

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Žiher

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Ante Žiher

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Nevenu Duiću, a posebno se zahvaljujem dr. sc. Goranu Krajačiću na nesebičnoj pomoći i stručnim savjetima tijekom izrade rada kao i na pomoći kod prikupljanja potrebnih podataka i literature. Također se zahvaljujem Goranu Gašparoviću, dipl. ing., na pomoći vezano uz Meteonorm i H2RES.

Zahvaljujem se Razvojnoj agenciji Dubrovačko - neretvanske županije (DUNEA) na ustupljenim podacima o potrošnji električne energije na području otoka Korčule (Vela Luka, Blato, Grad Korčula, Žrnovo, Smokvica, Čara, Račišće i Pupnat) prikupljenima u okviru projekta Meshartility (<http://www.meshartility.eu/en/about-meshartility>) i Alterenrgy (<http://www.alter-energy.eu/index.php/project>).

Ante Žiher



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Žiher**

Mat. br.: 0035185541

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

Analiza utjecaja izgradnje fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava i cijenu električne energije na otoku Korčuli

Naslov rada na engleskom jeziku:

Analysis of construction of photovoltaic systems and their impact on the power system load and electricity price on the island of Korčula

Opis zadatka:

Zbog energetske politike, sustava poticanja gradnje i znatnog pada cijena instalacije po jediničnoj snazi, fotonaponski sustavi predstavljaju progresivnu tehnologiju i sve se više nameću kao ekonomski prihvatljivo rješenje za proizvodnju električne energije u Europskoj uniji. Samo u 2012. godini, u EU je instalirano fotonaponskih sustava ukupne vršne snage 16750 MW, pri tome je ukupna instalirana snaga u periodu 2000.-2012. iznosila oko 70 GW.

U Hrvatskoj te njenim najsunčanijim predjelima može se također očekivati porast instaliranih fotonaponskih jedinica. U radu je potrebno, računalnim programima HOMER i H2RES, proračunati utjecaj izgradnje fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava (EES) otoka Korčule te treba provesti ekonomsku analizu kako bi se odredila cijena električne energije.

U okviru završnog rada potrebno je napraviti sljedeće:

1. Napraviti opsežan pregled literature na temu integracije fotonaponskih sustava u elektroenergetske sustave otoka, cijene fotonaponskih sustava i tehničkih ograničenja za njihovu instalaciju.
2. Opisati najvažnije značajke HOMER i H2RES modela.
3. Proračunati satno opterećenje EES sukladno raspoloživim mjerenim podacima i informacijama HEP-ODS-a.
4. Analizirati podatke o Sunčevom zračenju i dozračenju energiji na otoku Korčuli.
5. Analizirati proizvodnju električne energije te ekonomsku isplativost integracije fotonaponskih sustava na 5%, 25% i 50% stambenih objekata i drugih zgrada na otoku Korčuli.
6. Proračunati utjecaj odgode to jest upravljane potrošnje na mogućnost dodatne integracije električne energije iz fotonaponskih sustava.
7. Provesti analizu osjetljivosti proračuna s obzirom na učinkovitost fotonaponskih modula, ugrađen sustav praćenja sunca, cijenu sustava i kapitala, tarifne modele za otkup i kupovinu električne energije.

Potrebni podaci mogu se dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. studenog 2013.

Rok predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2014.


2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:


1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.

2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Neven Duić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
1.1. Sunce	1
1.2. Slični radovi na području fotonaponskih sustava i energetske neovisnih otoka	3
1.3. Fotonaponski sustavi	4
1.3.1. Osnove i podjela.....	4
1.3.2. Ugradnja	9
2. METODOLOGIJA.....	11
2.1. HOMER i H2RES	11
2.2. Analiza podataka o Sunčevom zračenju i dozračenoj energiji na otoku Korčuli	12
2.2.1. Općenito o Sunčevom zračenju.....	12
2.2.2. Sunčevo zračenje na Korčuli.....	13
2.3. Analiza podataka o potrošnji električne energije na otoku Korčuli i proračun satnog opterećenja elektroenergetskog sustava	17
3. PRIMJENA METODOLOGIJE.....	20
3.1. Analiza proizvodnje električne energije i ekonomska isplativost integracije fotonaponskih sustava na stambenim objektima otoka Korčule	20
3.1.1. Definiranje fotonaponskog sustava	21
3.1.2. Definiranje parametara mreže	22
3.1.3. Rezultati simulacije	25
3.2. Proračun utjecaja odgodive (upravljane) potrošnje na mogućnost dodatne integracije električne energije iz fotonaponskih sustava.....	33
3.2.1. Odgodiva potrošnja (zagrijavanje PTV)	34
3.3. Analiza osjetljivosti proračuna	37
3.4. H2RES model.....	42
4. ZAKLJUČAK	44
LITERATURA.....	46
PRILOZI.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1.	Godišnje Sunčevo zračenje na površini Zemlje u usporedbi sa zalihama fosilnih i nuklearnih goriva te godišnjom potrošnjom energije u svijetu [3]	2
Slika 2.	Sunčevo zračenje ovisno o načinu upada na proizvoljno postavljenu plohu na Zemlji	2
Slika 3.	Fotonaponski modul.....	4
Slika 4.	Solarni generator	4
Slika 5.	Osnovna podjela fotonaponskih sustava	6
Slika 6.	Autonomni fotonaponski sustav za trošila na istosmjernu struju [8].....	7
Slika 7.	Fotonaponski sustav priključen na javnu mrežu preko kućne instalacije [9]	8
Slika 8.	Fotonaponski sustav izravno priključen na javnu elektroenergetsku mrežu [10]....	8
Slika 9.	Ugrađeni krovni moduli [11]	9
Slika 10.	Fasadni solarni generator [12]	9
Slika 11.	Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske [16]	13
Slika 12.	Otok Korčula [17]	13
Slika 13.	Krivulja prosječnih satnih vrijednosti zračenja na ravnu plohu otoka Korčule za referentnu godinu	14
Slika 14.	Krivulja prosječnih satnih vrijednosti zračenja na plohu pod optimalnim kutem od 35° na otoku Korčuli za referentnu godinu	14
Slika 15.	Prosječne srednje mjesečne vrijednosti ukupnog dnevnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu za otok Korčulu.....	15
Slika 16.	Prosječno dnevno ozračenje za 7. mjesec	16
Slika 17.	Prosječno dnevno ozračenje za 12. mjesec	16
Slika 18.	Godišnji prikaz ukupnog Sunčevog zračenja za otok Korčulu	16
Slika 19.	Krivulja prosječnih satnih vrijednosti potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje u 2011. godini.....	17
Slika 20.	Prosječne srednje satne vrijednosti osnovnog opterećenja i prosječne srednje godišnje vrijednosti osnovnog i skaliranog opterećenja, odnosno potrošnje električne energije	18
Slika 21.	Krivulja prosječnih satnih vrijednosti potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje (osnovne vrijednosti) i otok Korčulu (skalirane vrijednosti) u 2011. godini	19
Slika 22.	Krivulja potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje i za otok Korčulu za jedan dan u 2011. godini	19
Slika 23.	Prikaz podataka potrebnih za modeliranje fotonaponskih sustava	21
Slika 24.	Prikaz tarifa i njihov raspored	23
Slika 25.	Energetski sustav otoka Korčule [21]	24
Slika 26.	Troškovi modeliranog sustava i cijena električne energije (50%).....	25
Slika 27.	Podaci o proizvodnji električne energije (50%).....	26
Slika 28.	Prikaz rada fotonaponskog sustava (50%)	26
Slika 29.	Troškovi modeliranog sustava i cijena električne energije (25%).....	27
Slika 30.	Podaci o proizvodnji električne energije (25%).....	28

Slika 31.	Prikaz rada fotonaponskog sustava (25%).....	28
Slika 32.	Troškovi modeliranog sustava i cijena električne energije (5%).....	29
Slika 33.	Podaci o proizvodnji električne energije (5%).....	30
Slika 34.	Prikaz rada fotonaponskog sustava (5%).....	30
Slika 35.	Troškovi sustava i cijena električne energije bez fotonapona.....	31
Slika 36.	Upravljana potrošnja.....	34
Slika 37.	Podaci o proizvodnji električne energije bez uključenog odgodivog opterećenja (50%).....	35
Slika 38.	Podaci o proizvodnji električne energije s uključenim odgodivim opterećenjem (50%).....	36
Slika 39.	Učinkovitost modula, sustav praćenja Sunca i cijena.....	37
Slika 40.	Prosječne okolišne mjesečne temperature na Korčuli.....	38
Slika 41.	Rezultati analize osjetljivosti.....	39
Slika 42.	Optimalni sustav.....	39
Slika 43.	Troškovi optimalnog sustava i cijena električne energije (25%).....	40
Slika 44.	Podaci o proizvodnji električne energije optimalnog sustava (25%).....	41
Slika 45.	Prikaz rada optimalnog fotonaponskog sustava (25%).....	41
Slika 46.	Mreža bez fotonaponskih sustava.....	42
Slika 47.	Energija isporučena iz fotonaponskih sustava u mrežu.....	42
Slika 48.	Ukupna električna energija (mreža + fotonaponski sustavi).....	43
Slika 49.	usporedba opterećenja i snage fotonaponskog sustava.....	43

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Površine i instalirane snage fotonaponskih sustava	20
Tablica 2.	Tarifni modeli (HEP)	23
Tablica 3.	Troškovi i cijena električne energije	32

SAŽETAK

U radu je analiziran utjecaj izgradnje fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava otoka Korčule te je provedena ekonomska analiza s ciljem određivanja cijene električne energije. Za provedbu navedenoga korišten je računalni simulacijski program HOMER.

Prvi dio rada daje kratki uvod u fotonaponske sustave, dok se u drugom dijelu opisuju najvažnije značajke programa, provodi analiza prikupljenih podataka o Sunčevom zračenju i dozračenju energiji te potrošnji električne energije na otoku Korčuli. Iza toga se provodi analiza satnog opterećenja elektroenergetskog sustava na temelju raspoloživih mjerenih podataka. U trećem se poglavlju analizira proizvodnja električne energije i ekonomska isplativost integracije fotonaponskih sustava na 5%, 25% i 50% stambenih objekata na otoku. Vršiti se proračun utjecaja odgodive potrošnje na mogućnost dodatne integracije električne energije iz fotonaponskih sustava. Nakon toga slijedi analiza osjetljivosti proračuna s obzirom na učinkovitost fotonaponskih modula, ugrađen sustav praćenja Sunca, cijenu sustava i tarifne modele za otkup i kupovinu električne energije. Na kraju rada prikazane su značajke proizvoljno modeliranog sustava u H2RES programu te je donesen zaključak.

Ključne riječi: fotonaponski sustavi, elektroenergetski sustav, električne energija

SUMMARY

This paper analyzes the impact of construction of photovoltaic systems on the power system load on the island of Korčula. Economic analysis was conducted with the aim of determining the price of electricity. For conducting the above, a computer simulation model named HOMER was used.

The first part of the paper gives a brief introduction to photovoltaic systems, while the second one describes the most important features of the model. Analysis of the collected data about solar radiation and radiated energy is conducted so as the analysis of the electricity consumption on the island of Korčula. After that, the analysis of the hourly power system load based on the available measured data is being carried out. Third chapter analyses the electricity production and economic profitability of integration a photovoltaic systems at 5%, 25% and 50 % residential buildings on the island. Calculation of the impact of deferrable expenditure on the possibility of further integration of electricity from photovoltaic systems is being performed. This is followed by a sensitivity analysis of the calculation considering the efficiency of photovoltaic modules, embedded system for Sun tracking, the system price and tariff models for sale and purchase of electricity. At the end of the paper, features of some arbitrary modelled system in H2RES model are shown and the conclusion was made.

Key words: photovoltaic systems, power system, electricity

1. UVOD

U uvodnom će se dijelu rada dati kratki pregled nekih općenitih podataka o Sunčevom zračenju, navest će se slični radovi te će se napraviti uvid u fotonaponske sustave (izravna pretvorba energije Sunčevog zračenja u električnu energiju). Na kraju prvog dijela će se napraviti kratki pregled rada prema poglavljima.

1.1. Sunce

Sunčeva energija je obnovljiv i prema ljudskom poimanju neograničen izvor energije od kojeg potječe najveći dio drugih izvora na Zemlji, izravno ili neizravno. Sunčeva energija u užem smislu podrazumijeva količinu energije prenesenu Sunčevim zračenjem. Njezina jedinica je J, ali se najčešće koristi kWh.

Zemlja se nalazi u planetarnom sustavu u čijem je središtu Sunce. Promjer Sunca se procjenjuje na 1,39 milijuna km, a masa na $1,98 \cdot 10^{30}$ kg, dok udaljenost Sunca od Zemlje iznosi 149,5 milijuna km. Sunce se uglavnom sastoji od vodika i helija, pri čemu se u njegovoj unutrašnjosti odvijaju termonuklearne reakcije fuzije kojima se vodik pretvara u helij, a energija koja se pri tome oslobađa sa Sunčeve površine odlazi u svemir najvećim dijelom u obliku elektromagnetskog zračenja i neutrina. Temperatura jezgre Sunca se procjenjuje na 15 milijuna K, dok je na površini ona oko 5780 K. Spektar Sunčevog zračenja približno odgovara spektru crnog tijela temperature 5760 K, pa se ta temperatura uzima kao efektivna temperatura površine Sunca. Snaga zračenja koje Sunce emitira u svemir iznosi $3,8 \cdot 10^{26}$ W, a Zemlja od toga dobiva oko $1,7 \cdot 10^{17}$ W. Na Zemljinu površinu stiže oko $4 \cdot 10^{24}$ J energije godišnje Sunčevim zračenjem, a to je 7500 puta više energije od ukupne godišnje potrošnje energije iz svih primarnih izvora. [1]

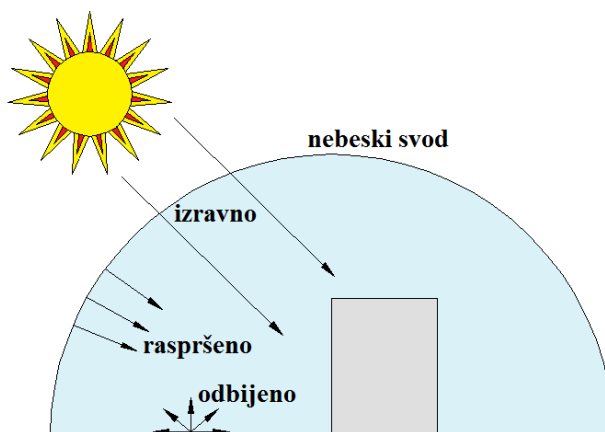
Kako je količina energije koju primimo od Sunca, tj. koju Sunce emitira do Zemlje enormna, stvara se sve veći naglasak na korištenje upravo tog, „besplatnog“ i za naše pojmove neiscrpnog izvora energije. Tome u korist govori i podatak iz [2] kako Sunce u samo jednoj sekundi oslobodi više energije nego što je naša civilizacija iskoristila tijekom svojeg razvoja. Time se nameće važnost istraživanja energije Sunca i pretvorbe energije Sunčevog zračenja u korisne oblike energije s velikom mogućnošću rješavanja problema, u svijetu sve prisutnije energetske krize. Na [Slika 1] prikazan je međusobni odnos godišnjeg Sunčevog zračenja na površini Zemlje prema ukupnim zalihama fosilnih (ugljen, nafta, plin) i nuklearnih goriva (uran), odnosno konvencionalnih izvora energije te prema godišnjoj potrošnji energije u svijetu.



Slika 1. Godišnje Sunčevo zračenje na površini Zemlje u usporedbi sa zalihama fosilnih i nuklearnih goriva te godišnjom potrošnjom energije u svijetu [3]

Sunčevo zračenje (kratkovalno) koje stiže na Zemlju ima jedinicu W/m^2 , a može biti:

- Izravno ili direktno – zračenje koje bez raspršivanja u atmosferi dolazi na plohu
- Raspršeno ili difuzno – zračenje koje nastaje raspršivanjem u atmosferi i na plohu dolazi iz svih smjerova od nebeskog svoda
- Odbijeno ili reflektirano – zračenje koje nakon odbijanja od nekih okolnih ploha dolazi na plohu



Slika 2. Sunčevo zračenje ovisno o načinu upada na proizvoljno postavljenu plohu na Zemlji

Sunčeva se energija obično pretvara u toplinsku (sustavi grijanja potrošne tople vode, proizvodnja procesne topline ili solarne termoelektre) ili električnu energiju (fotonaponski sustavi). Izravna pretvorba sunčeve energije u električnu je jedan od glavnih temelja izrade ovog rada o čemu će biti više riječi kasnije.

1.2. Slični radovi na području fotonaponskih sustava i energetske neovisnih otoka

Jedan od radova koji je korišten kao orijentacija za pisanje ovog rada je diplomski rad na temu „Optimiranje korištenja solarne energije fotonaponskom pretvorbom“ [4]. U radu su istraženi energetske-ekonomski aspekti različitih izvedbi fotonaponskih sustava instaliranih na različitim lokacijama. Uspoređeni su fotonaponski sustavi s panelima postavljenim pod fiksnim kutom te s jednoosnim i dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca. Program koji se koristi u navedenom radu za analizu osjetljivosti, usporedbu raznih konfiguracija fotonaponskih sustava te iznalaženje optimalnog rješenja za svaku od lokacija je računalni simulacijski program HOMER. U radu je vidljivo kako konfiguracije fotonaponskih sustava značajno ovise o lokaciji, raspoloživosti Sunčevog zračenja te investicijskim troškovima pojedinih komponenti.

Na kraju se došlo do rezultata koji pokazuje isplativost ugradnje dvoosnog sustava za praćenje prividnog kretanja Sunca, a on ujedno pridonosi i većoj proizvodnji električne energije u odnosu na fotonaponski sustav s fiksnim kutom kao i u odnosu na jednoosni fotonaponski sustav.

U drugom radu [5] provedeno je energetske planiranje otoka Lošinja primjenom RenewIslands metodologije i uz pomoć računalnog programa H2RES. Modelirana su 4 scenarija razvoja energetske sustava na otoku. U prvom scenariju nije bilo nikakvih zahvata na elektroenergetskom sustavu, što znači da se napajanje vršilo preko mreže povezane s kopnom dok su se u ostalim slučajevima primijenile radnje s ciljem iskorištavanja obnovljivih izvora energije. Tako se kombiniranjem vjetroturbina, fotonaponskih sustava, solarnih kolektora, gorivnih članaka, elektrolizera i vodikovih spremnika za spremanje viška električne energije dolazilo do različitih rješenja, a sve s ciljem postizanja 100% obnovljivog otoka (nema uvoza električne energije iz mreže s kopna). Na kraju se navodi kako bi, da bi se ostvario taj cilj, bilo potrebno uvesti i mjere štednje energije te povećati učinkovitost u njenoj proizvodnji.

Ovi su radovi zanimljivi i zbog toga što koriste računalne programe HOMER i H2RES koje je potrebno koristiti i u ovom radu. Opis najvažnijih značajki navedenih programa će se prikazati na početku 2. poglavlja.

1.3. Fotonaponski sustavi

Kako je ranije spomenuto, ovaj rad se bazira na izravnoj pretvorbi sunčeve energije u električnu, ili drugim riječima, na fotonaponskim sustavima. Točnije, glavni cilj ovog rada je proračunati, gore navedenim programima, utjecaj izgradnje fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava otoka Korčule i odrediti cijenu električne energije. Stoga će u ovom dijelu biti više riječi o samim sustavima i njihovoj ugradnji.

1.3.1. Osnove i podjela

Ključni i reprezentativni dio fotonaponskih sustava je fotonaponska ćelija (*photovoltaic*, PV). To je poluvodič (silicij u 98% slučajeva [2]) pomoću kojeg se svjetlost Sunčevog zračenja izravno pretvara u električnu energiju, odnosno dolazi do pojave kod koje na krajevima prikladno oblikovanog poluvodičkog elementa za vrijeme izloženosti svjetlosti nastaje elektromotorna sila (napon) čime fotonaponska ćelija postaje izvor (istosmjernu) električne struje [1]. Efekt izravne pretvorbe Sunčevog zračenja u električnu energiju poznat je kao fotonaponski efekt.



Slika 3. Fotonaponski modul



Slika 4. Solarni generator

Valjalo bi napomenuti da fotonaponske ćelije, osim od silicija, mogu biti i od bakrenog i indijevog selenida, kadmijevog telurida, polimerne itd. Detaljna podjela kao i načini izrade fotonaponskih ćelija izloženi su u [1] i [2].

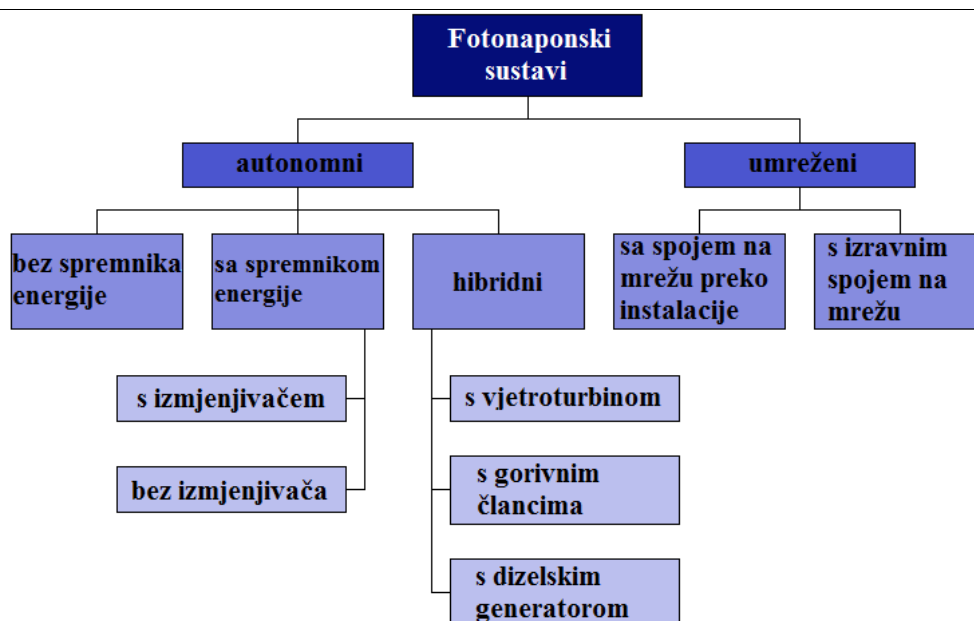
Fotonaponski modul je element koji nastaje međusobnim povezivanjem više fotonaponskih ćelija. Pri tome se ćelije mogu međusobno spajati serijski u niz ili paralelno u podmodul. Moduli proizvode istosmjernu struju i to obično s naponom od 12 ili 24 V. Na [Slika 3] prikazan je modul s ukupno 36 ćelija. Glavni razlog za povezivanje fotonaponskih

ćelija u module je postizanje puno veće izlazne snage u odnosu na snagu koju bi omogućila pojedina ćelija. Tu su i još neke prednosti. Npr, njihovim se električnim spajanjem i fizičkim povezivanjem u modul značajno poboljšavaju uporabna svojstva kao što su jednostavnost rukovanja, postavljanja i održavanja te otpornost na vanjske utjecaje pa se tako na modul prema [1] postavlja nekoliko osnovnih zahtjeva:

- Mehanička stabilnost,
- Postojanost prema utjecajima iz neposredne okoline kao što su vremenski utjecaji (padaline, vlažnost, udari vjetrova i sl), mehanička oštećenja itd.,
- Stabilnost u području temperatura od -50 do $+90$ °C,
- Otpornost na ultraljubičasto zračenje,
- Sigurnost od strujnog udara i drugih opasnosti vezanih uz primjenu električne energije.

Također je bitno napomenuti kako fotonaponski moduli nemaju pokretnih dijelova što je veliki plus u odnosu na recimo vjetro turbine. Uz to, modul bi trebao imati što veću iskorištenost površine, uz što manju masu i prikladan dizajn, a istodobno bi trebao biti jednostavan za ugradnju i pristupačan cijenom. Detaljna podjela fotonaponskih modula dana je u [1].

Solarni generator je naziv za jedan ili više međusobno povezanih fotonaponskih elemenata (ćelija ili modula), određene nazivne snage izražene u W_p , kW_p ili MW_p (vršna snaga). Na [Slika 4] prikazan je jedan solarni generator instaliran na krov kuće. Iako je često postavljanje solarnih generatora na krovove kuća, fasade ili pročelja zgrada ili nekih drugih građevnih objekata, ne nužno stambenih, solarni se generatori mogu postavljati gdje god je Sunčevo zračenje dostatno za proizvodnju električne energije. Snaga solarnog generatora te izlazni napon i jakost struje ovise o broju i načinu spajanja modula, isto kao i kod spajanja ćelija u module. Naravno, nabrojani izlazni parametri najviše ovise o Sunčevom zračenju kao i o temperaturi samog modula. Solarni generator je izvor električne energije pa se u njegovom radu mogu pojaviti problemi kao i kod bilo kojih drugih električnih uređaja, a najčešći su: kratki spojevi, izboji na masu, prekidi strujnog kruga i zasjenjivanje pojedine ćelije ili dijela modula. [1] Fotonaponski sustavi su cjelokupna postrojenja za proizvodnju električne energije iz energije Sunčevog zračenja. Solarni generator je zajednički element svih fotonaponskih sustava. Općenita podjela fotonaponskih sustava prikazana je na [Slika 5].



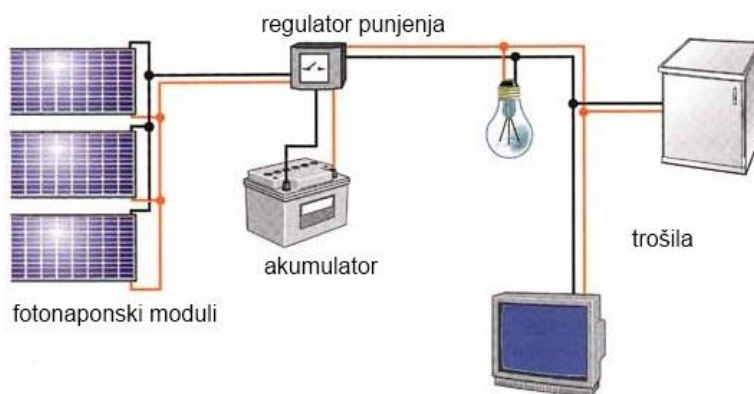
Slika 5. Osnovna podjela fotonaponskih sustava

Dvije osnovne skupine fotonaponskih sustava su:

- Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (*off grid*), a često se nazivaju i samostalnim, autonomnim ili otočnim sustavima (*stand-alone systems*),
- Fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu ili umreženi sustavi (*on-grid*).

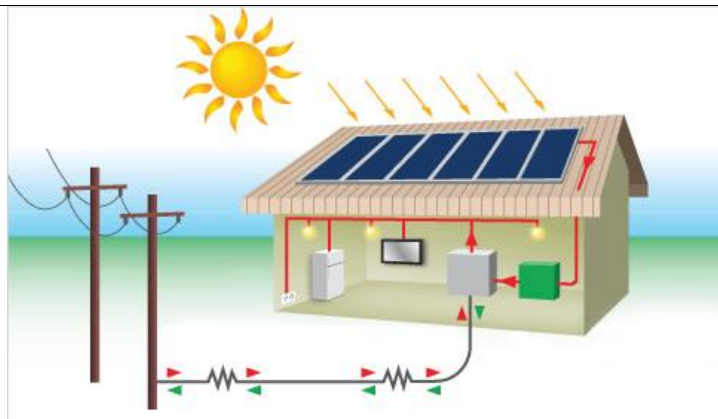
Autonomni sustavi su oni u kojima proizvedena električna energija služi za pokrivanje potreba potrošača koji nisu spojeni na javnu elektroenergetsku mrežu (vikendice, kampovi izolirani objekti na otocima ili planinama itd). U svakom elektroenergetskom sustavu proizvodnja električne energije uvijek mora odgovarati njezinoj potrošnji, a kako kod autonomnih fotonaponskih sustava to uglavnom nije slučaj, oni se opremaju spremnikom energije, odnosno akumulatorom. Kada Sunčevo zračenje nije dostatno za proizvodnju električne energije može se koristiti neki pomoćni ili dodatni izvor napajanja kao npr. dizelski generatori, vjetroturbine i sl., a takvi se sustavi onda nazivaju hibridni. Autonomni sustavi mogu proizvoditi istosmjernu [Slika 6] ili izmjeničnu struju (uz primjenu izmjenjivača). Njihovi uobičajeni sastavni dijelovi su: solarni generator, priključni ormarić, akumulatori, regulator punjenja, spoj na trošila te izmjenjivač (za trošila na izmjeničnu struju). Autonomni sustavi se najčešće izvode s fiksnim solarnim generatorom te jednoosnim ili dvoosnim sustavom praćenja prividnog kretanja Sunca. Ako su fotonaponski moduli fiksni, obično se postavljaju pod nekim kutem (optimalni kut je oko 30°). Dok su kod takvih sustava

investicijski troškovi manji u odnosu na sustave s praćenjem Sunca, proizvodnja električne energije je do 40% manja u odnosu na sustav s dvoosnim praćenjem prividnog kretanja Sunca. Podrazumijeva se da su investicijski troškovi takvih sustava dosta veći u odnosu na one bez praćenja Sunca pa preostaje pronaći kompromis ili optimalno rješenje za neku lokaciju.



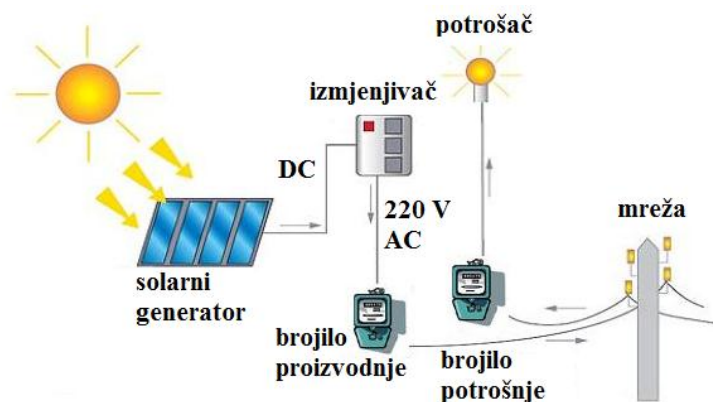
Slika 6. Autonomni fotonaponski sustav za trošila na istosmjernu struju [8]

Fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu ili umreženi fotonaponski sustavi su oni u kojima se proizvedena električna energija koristi za pokrivanje potreba objekta na kojem se sustav nalazi (obiteljske kuće, stambene zgrade i sl.) i javne elektroenergetske mreže ili samo javne elektroenergetske mreže (fotonaponske elektrane). Umreženi sustavi proizvode izmjeničnu struju pa moraju biti opremljeni izmjenjivačem, koji pretvara istosmjernu struju solarnog generatora u izmjeničnu, sinkroniziranu s naponom i frekvencijom mreže. U njihove se uobičajene sastavne dijelove ubrajaju: solarni generator, priključni ormarić, razvod istosmjerne struje, glavni prekidač istosmjerne struje, izmjenjivač, razvod izmjenične struje, razvodni ormarić sa zaštitnim i regulacijskim elementima te dvosmjernim električnim brojiлом i spoj na javnu elektroenergetsku mrežu. Primjenom umreženih sustava je otklonjen nedostatak autonomnih sustava, a to je nemogućnost usklađivanja proizvodnje i potrošnje električne energije (korištenje skupih akumulatora). Kod umreženih sustava ulogu spremnika električne energije ima javna elektroenergetska mreža pa kada je proizvodnja električne energije u solarnom generatoru veća od vlastitih potreba objekta, viškovi se isporučuju u mrežu, a kada je proizvodnja nedostatna za pokrivanje vlastitih potreba, energija se uzima iz mreže. Ipak, i kod primjene umreženih sustava postoje određeni problemi, posebno u vezi pretvorbe istosmjerne u izmjeničnu struju, npr. usklađivanje frekvencija, faza i napona na izlazu iz izmjenjivača s vrijednostima iz mreže što zahtjeva posebnu pozornost kod odabira izmjenjivača. [1]



Slika 7. Fotonaponski sustav priključen na javnu mrežu preko kućne instalacije [9]

Fotonaponski sustavi priključeni na javnu mrežu preko kućne instalacije [Slika 7] pripadaju distribuiranoj proizvodnji električne energije i u paralelnom su spoju s mrežom. Oni tako omogućuju povezivanje distribuiranih sustava na centralizirane sustave, odnosno sustave priključene uglavnom na niskonaponsku razinu elektroenergetskog sustava. Takvi se sustavi obično mogu podijeliti na one do 30 kW, od 30 kW do 100 kW i preko 100 kW, dok u Hrvatskoj vrijedi podjela prema instaliranoj snazi do 10 kW, od 10 kW do 30 kW i preko 30 kW. [2]



Slika 8. Fotonaponski sustav izravno priključen na javnu elektroenergetsku mrežu [10]

Posljedično razvoju tržišta fotonaponske tehnologije, fotonaponski se sustavi počinju ugrađivati ne samo na građevinama ili u njihovoj neposrednoj blizini, nego i na slobodnim površinama u blizini elektroenergetske mreže do priključka na nisku, srednju ili visoku razinu napona elektroenergetskog sustava. Ti su sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu i svu proizvedenu električnu energiju predaju izravno u elektroenergetski sustav [2], [Slika 8].

1.3.2. Ugradnja

Kako je ranije spomenuto fotonaponski se sustavi, točnije solarni generatori mogu postavljati gdje god postoji dovoljna količina Sunčevog zračenja za proizvodnju električne energije. Ipak postoje mjesta, odnosno položaji gdje se solarni generatori najčešće ugrađuju, bilo da na tim mjestima ne zauzimaju koristan prostor (krovovi, pročelja) ili se koriste kao višenamjenski uređaji, tj. elementi (dijelovi krovova, vanjskih zidova, nadstrešnice i sl.). Neki od primjera takve, višenamjenske ugradnje mogu se vidjeti na [Slika 9] i [Slika 10]. Ako se koriste kao elementi koji odjeljuju vanjski od unutarnjeg prostora, na njih se postavljaju dodatni zahtjevi kao npr, zvučna i toplinska izolacije te vodonepropusnost i zadovoljavajuća zrakotijesnost. Uz to, takvi fotonaponski moduli moraju zaštititi unutrašnjost od eventualnih požara ili mehaničkih oštećenja. Još je bitno napomenuti kako se prilikom izrade građevine, odnosno ugradnje samih fotonaponskih modula kao strukturnih dijelova zgrade, treba voditi računa o zamjeni ugrađenih dijelova nakon određenog vremenskog perioda. Naime, kako je životni vijek modula od 20 do 25 godina, a većine ostalih strukturnih elemenata zgrade do 3 puta duži, potrebno je unaprijed osigurati jednostavnu zamjenu modula bez nepotrebnih i neželjenih oštećenja ostatka konstrukcije.



Slika 9. Ugrađeni krovni moduli [11]



Slika 10. Fasadni solarni generator [12]

Jedan od najvećih problema koji se javlja u radu solarnih generatora je zasjenjivanje ćelije ili dijela modula okolnom vegetacijom ili raznim građevinama. Ono uglavnom nema značajnijeg utjecaja na rad modula tijekom jutarnjih i/ili večernjih sati, dok zasjenjenje modula oko podneva nije prihvatljivo i u takvim slučajevima treba odabrati drugu lokaciju ili mjesto ugradnje. Ćelija koja je zasjenjena ne može proizvoditi električnu struju i predstavlja smetnju u strujnom krugu. Druge, nezasjenjene ćelije, u isto vrijeme nastavljaju proizvoditi električnu struju i na zasjenjenu ćeliju djeluju tako da na njezinim kontaktima nastaje napon obrnutog polariteta. Ćelija postaje vodljiva kada taj napon dosegne vrijednost napona proboja (oko 15 V), ali istodobno djeluje kao otpor u strujnom krugu. Ona se zagrijava pri prolasku

struje kroz nju pa u određenim uvjetima može doći do njezinog pregaranja. Da bi se to onemogućilo, pri spajanju fotonaponskih ćelija u module koriste se premosne diode za zaštitu u serijskom nizu ili granske diode za zaštitu u podmodulu. [1]

U idućem poglavlju će se opisati najvažnije značajke HOMER i H2RES modela (u radu će se uglavnom koristiti HOMER). Također će se analizirati prikupljeni podaci o Sunčevom zračenju i dozračenju energiji na otoku Korčuli i podaci o potrošnji električne energije na otoku te će se proračunati satno opterećenje elektroenergetskog sustava na temelju raspoloživih mjerenih podataka HEP-ODS-a. U trećem će se poglavlju analizirati proizvodnja električne energije i ekonomska isplativost integracije fotonaponskih sustava na 5%, 25% i 50% stambenih objekata na otoku. Proračunat će se utjecaj odgodive, odnosno upravljane potrošnje na mogućnost dodatne integracije električne energije iz fotonaponskih sustava. Iza toga će biti provedena analiza osjetljivosti proračuna s obzirom na učinkovitost fotonaponskih modula, ugrađen sustav praćenja Sunca, cijenu sustava i tarifne modele za otkup i kupovinu električne energije dok će se na kraju trećeg poglavlja prikazati značajke proizvoljno modeliranog sustava u H2RES modelu. Na kraju rada uslijedit će zaključak.

2. METODOLOGIJA

2.1. HOMER i H2RES

HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) je optimizacijski računalni program za distribuiranu proizvodnju električne energije. On olakšava procjenu isplativosti samostalnih ili mrežnih modeliranih sustava koji mogu biti sastavljenih od neobnovljivih i/ili obnovljivih izvora energije. HOMER omogućuje definiranje modela ulaznim podacima koji se odnose na cijene komponenata, tehnološke izbore i raspoloživost resursa. Program koristi unesene podatke kako bi simulirao konfiguracije sustava, ili kombinacije komponenata. Rezultati simulacije se mogu vidjeti kao lista ostvarivih konfiguracija poredanih prema cijeni, odnosno trošku. HOMER simulira rad sustava izračunavajući energetske bilancu za svaki od 8760 sati u godini. Rezultati simulacija u raznim tablicama i grafovima olakšavaju usporedbu konfiguracija i pomažu u ocjenjivanju isplativosti nekog sustava prema ekonomskim i tehničkim vrijednostima. Ako želimo vidjeti kakav bi utjecaj imale promjene uzrokovane raspoloživošću resursa i ekonomskim utjecajima na ekonomičnost drugačijih konfiguracija sustava, provodimo analizu osjetljivosti. Pri izvođenju analize osjetljivosti u HOMER unosimo vrijednosti koje opisuju raspon promjene cijena komponenti i raspoloživih sredstava. Program tada simulira svaku konfiguraciju sustava preko raspona vrijednosti, a rezultate analize osjetljivosti možemo usporediti i identificirati čimbenike koji imaju najveći utjecaj na strukturu i konfiguraciju sustava. [4], [13]

H2RES model je baziran na analizi satnih vrijednosti potrošnje vode, električne energije, vodika te potrošne tople vode i izvora energije (vjetar, Sunčevo zračenje, biomasa, količina padalina, fosilna goriva). Namjena modela je energetske planiranje otoka i udaljenih (izoliranih) područja. Najvažnija je mogućnost sagledavanja različitih scenarija s ciljem bolje penetracije električne energije iz obnovljivih izvora u energetske sustave otoka ser se teži energetskim sustavima otoka koji su 100% obnovljivi, odnosno koji koriste samo obnovljive izvore energije. Cijela aplikacija je napravljena u Microsoft Excel programu pa joj je nadogradnja relativno jednostavna. Glavni *workbook* predstavlja sučelje gdje se unose podaci vezani uz projekt s odgovarajućim tehnologijama i kapacitetima. Meteorološki podaci i podaci o opterećenju nalaze se u posebnim *workbook* prozorima. Osim modula za električno i toplinsko opterećenje i modula za spremanje, postoji i modul za potrošnu toplu vodu (PTV), modul za biomasu, geotermalni modul, modul za fosilna goriva i vodik, hidro modul, modul za vjetar te solarni modul. [5]

2.2. Analiza podataka o Sunčevom zračenju i dozračenoj energiji na otoku Korčuli

2.2.1. Općenito o Sunčevom zračenju

Proizvedena električna energija u nekom fotonaponskom sustavu najviše ovisi o količini dozračene Sunčeve energije na fotonaponske module. Količina Sunčevog zračenja na određenoj lokaciji ovisi o zemljopisnoj širini, klimatološkim parametrima lokacije poput učestalosti pojave naoblake i sumaglice, tlaku zraka to o zasjenjenjima od okolnih objekata na lokaciji [14]. Sljedeći pojmovi prema [14] olakšavaju razumijevanje značenja pojedinih vrijednosti parametara Sunčevog zračenja:

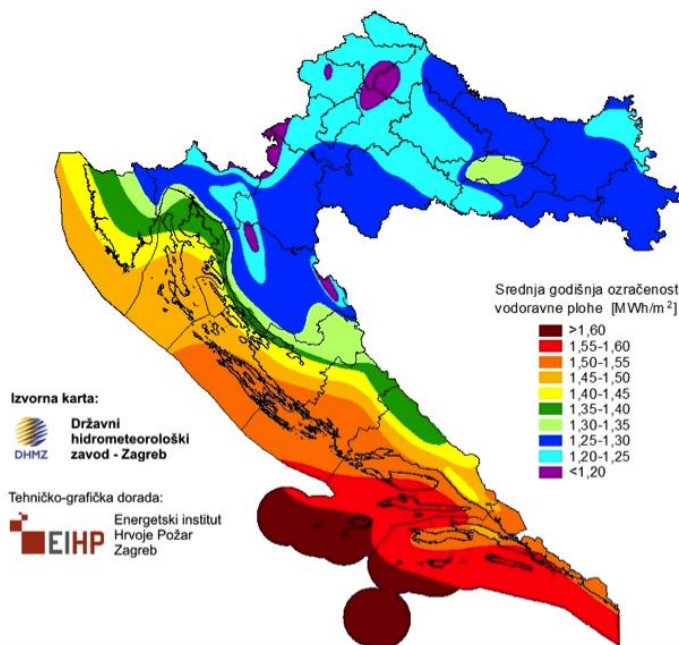
- Ozračenje u (W/m^2) – srednja gustoća dozračene snage Sunčevog zračenja, jednaka je omjeru snage Sunčevog zračenja i površine plohe okomite na smjer tog zračenja,
- Ozračenost u (Wh/m^2) – količina energije Sunčevog zračenja dozračena na jediničnu površinu plohe u određenom vremenskom razdoblju; dobiva se integriranjem ozračenja po vremenu, a ovisno o promatranom vremenskom intervalu ozračenost se često naziva satna, dnevna, mjesečna ili godišnja suma zračenja.

Bitno je spomenuti da se ukupno Sunčevo zračenje na vodoravnoj plohi sastoji od izravnog i raspršenog Sunčevog zračenja dok se ukupno Sunčevo zračenje na nagnutoj plohi sastoji od izravnog, raspršenog i odbijenog zračenja (poglavlje 1.1.). Kako je izravna komponenta zračenja dominantna u ukupnom zračenju maksimalno se ozračenje postiže postavljanjem plohe okomito na smjer zračenja. Maksimalno je ozračenje plohe moguće ako se kontinuirano prati prividno kretanje Sunca na nebu. Ozračenje u tom slučaju ovisi samo o optičkoj masi zraka koja se povećava kako se Sunce približava obzoru. Za fiksno postavljene sustav određuje se vrijednost optimalnog kuta nagnute plohe. [14] To je kut pod kojim je potrebno postaviti modul u odnosu na vodoravnu površinu da bi se dobila najveća moguća godišnja ozračenost i iznosi, kako je i ranije navedeno, oko 30° .

Podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja potrebni su kako bi se proračunala proizvodnja električne energije fotonaponskog sustava. Vrijednosti Sunčevog zračenja za neku lokaciju mogu se dobiti od nadležne meteorološke postaje ili se mogu naći u bazama podataka. Neke od najšire korištenih baza podataka su *Meteonorm database* i *PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System*.

2.2.2. Sunčevo zračenje na Korčuli

Korčula s ukupno 2671 sunčanim satom u godini prema [15] spada u najosunčanija područja u Republici Hrvatskoj i ima velik potencijal u iskorištavanju Sunčeve energije za proizvodnju električne energije.

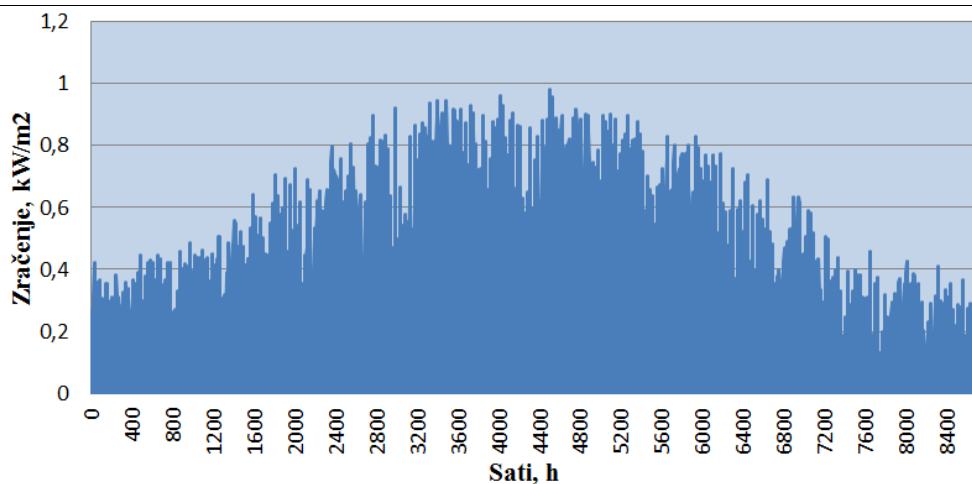


Slika 11. Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske [16]

Prema dobivenim satnim vrijednostima zračenja, odnosno ozračenja iz Meteonorma (baze podataka dostupne za 2005. godinu) za Grad Korčulu i Vela Luku, pretpostavljena je srednja vrijednost između te dvije. Ta je vrijednost (niz satnih vrijednosti) uzeta kao reprezentativna vrijednost zračenja za cijeli otok [Slika 12] i u nastavku će se spominjati kao zračenje u referentnoj godini, a na dijagramima na kojima neće biti naznačena godina podrazumijevat će se referentna. Pretpostavljeno je da se vrijednosti zračenja nisu bitno promijenile u narednim godinama.

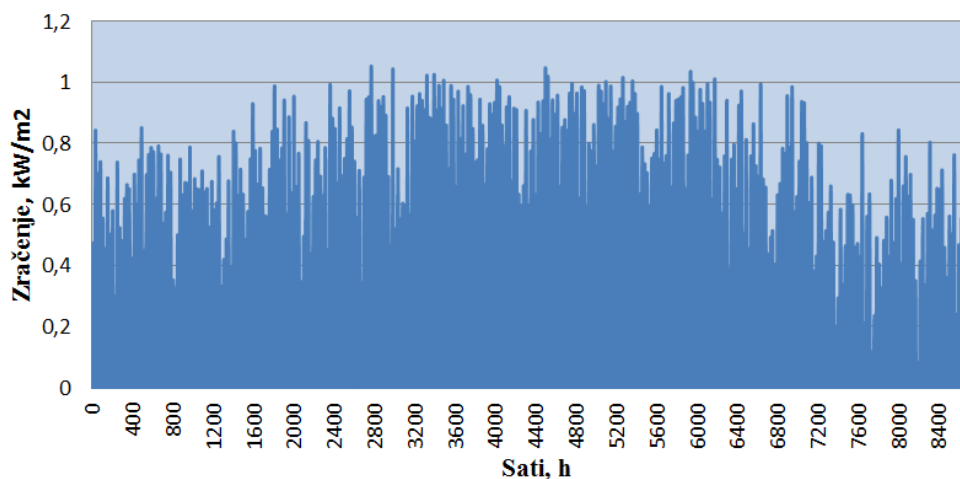


Slika 12. Otok Korčula [17]



Slika 13. Krivulja prosječnih satnih vrijednosti zračenja na ravnu plohu otoka Korčule za referentnu godinu

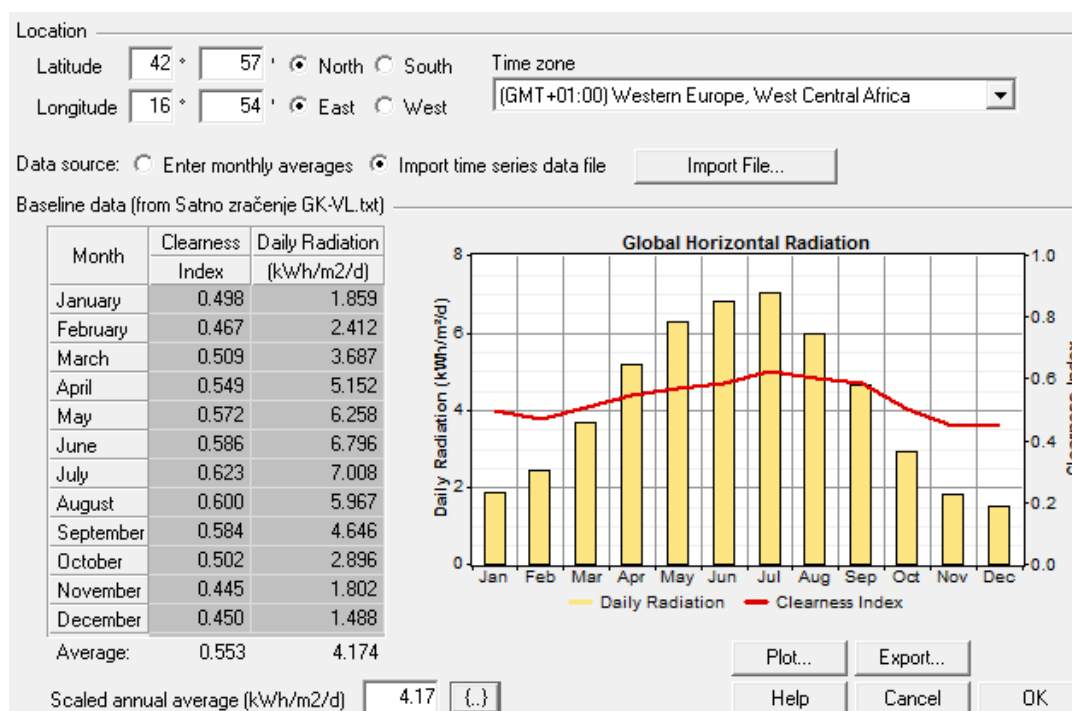
Kako je prema DHMZ-u optimalni kut za Grad Korčulu 34° , a za Vela Luku 36° , može se pretpostaviti prosječni optimalni kut od 35° za cijeli otok. Iz [Slika 13] i [Slika 14] se vidi kako se postavljanjem plohe (modula) pod optimalni kut u odnosu na horizontalu iskorištava veća količina Sunčevog zračenja. To je posebno izraženo u zimskom periodu jer se u tom razdoblju značajno povećava kut upada Sunčevih zraka na plohu u slučaju kad je ploha pod optimalnim kutem.



Slika 14. Krivulja prosječnih satnih vrijednosti zračenja na plohu pod optimalnim kutem od 35° na otoku Korčuli za referentnu godinu

Ako se prosječne satne vrijednosti Sunčevog zračenja na ravnu plohu za cijeli otok učitaju u ranije opisani program HOMER dobiju se vrijednosti indeksa bistrine (*clearness index*) i srednje mjesečne vrijednosti Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu u $\text{kW/m}^2/\text{d}$ ili

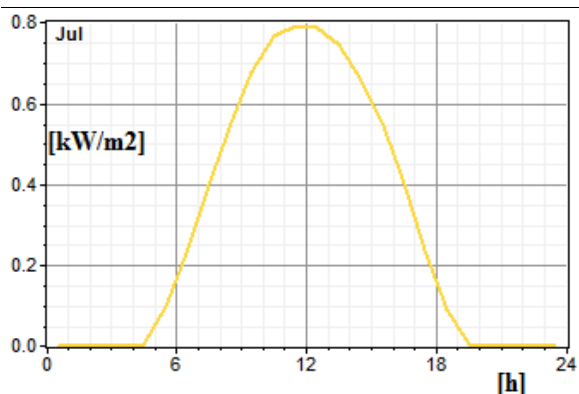
ozračenost [Slika 15]. Na slici se mogu vidjeti i ostali podaci potrebni za izračunavanje proizvodnje električne energije iz fotonaponskog sustava: zemljopisna širina i dužina i vremenska zona lokacije.



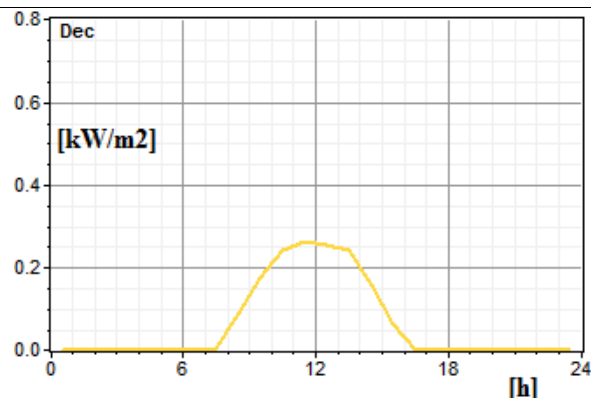
Slika 15. Prosječne srednje mjesečne vrijednosti ukupnog dnevnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu za otok Korčulu

Indeks bistrine je mjera bistrine atmosfere i definira se kao omjer ukupnog sunčevog zračenja i ekstraterestičkog zračenja (na rubu atmosfere). Kreće se između 0 i 1 ovisno o vremenu, a najčešće je u rasponu od 0,25 do 0,75. U HOMER je dovoljno učitati ili ukupno zračenje na ravnu plohu ili indeks bistrine za neku lokaciju jer program sam izračunava varijablu koja nije unesena pomoću zemljopisne širine. Može se vidjeti da je prosječna mjesečna vrijednost ukupnog dnevnog Sunčevog zračenja na ravnu plohu 4,174 kWh/m²/d što je jednako ozračenosti od 1,52 MWh/m² godišnje za otok Korčulu.

Na [Slika 16] i [Slika 17] (HOMER) prikazane su prosječne dnevne vrijednosti ozračenja za otok Korčulu. S razlogom su prikazani reprezentativni mjeseci za ljetno kada je Sunčevo zračenje najjače i najduže i zimu kada je Sunčevo zračenje najslabije i najkraće kako bi se što jasnije uočila razlika između količine energije koja dolazi na ravnu plohu u ta dva krajnja slučaja.

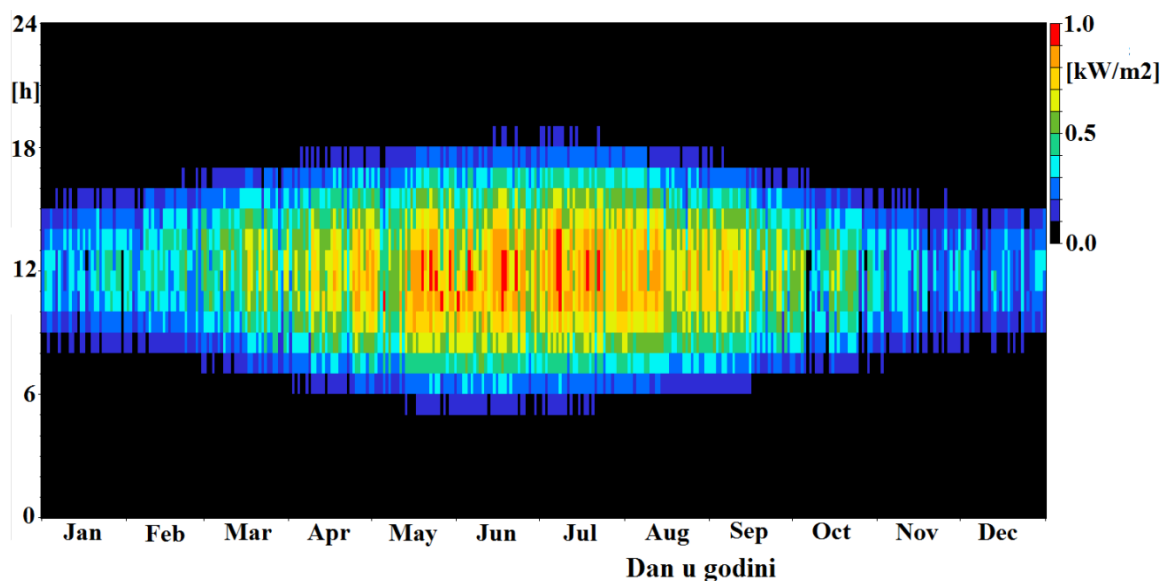


Slika 16. Prosječno dnevno ozračenje za 7. mjesec



Slika 17. Prosječno dnevno ozračenje za 12. mjesec

Na [Slika 18] dan je slikoviti grafički prikaz, u programu HOMER, ukupnog Sunčevog zračenja na ravnu plohu na otoku Korčuli za svaki sat u godini. Vidi se kako je najveća količina zračenja upravo sredinom ljeta i sredinom dana što je, naravno, bilo i za očekivati.



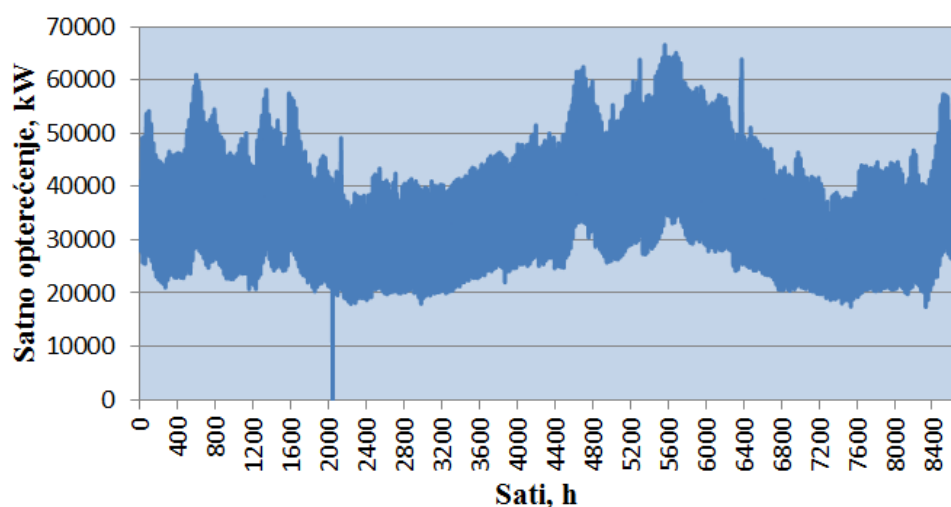
Slika 18. Godišnji prikaz ukupnog Sunčevog zračenja za otok Korčulu

Još je bitno napomenuti kako podaci o Sunčevom zračenju ne moraju biti, i uglavnom nisu isti kada se usporede prikupljene vrijednosti iz različitih izvora. Oni će se uvijek nešto razlikovati. Takve razlike su zanemarive kod ovakvih grubih proračuna pa je svejedno za koji se izvor podataka odlučimo.

2.3. Analiza podataka o potrošnji električne energije na otoku Korčuli i proračun satnog opterećenja elektroenergetskog sustava

Analizi potrošnje električne energije na Korčuli se pristupilo na sljedeći način. Elektrojug Dubrovnik je ustupio podatke o potrošnji električne energije za veća mjesta na otoku Korčuli (Vela Luka, Blato, Grad Korčula, Žrnovo, Smokvica, Čara, Račišće i Pupnat) za period od 01.01.2010. do 31.12.2012. na temelju čega se izračunala prosječna godišnja potrošnja električne energije po stanovniku (3728 kWh/god.) za 2011. godinu i potrošnja za Lumbardu za čiju potrošnju nije bilo podataka. Izračunata ukupna potrošnja električne energija na otoku Korčuli za 2011. godinu je prema tim podacima iznosila 57790851 kWh/god.

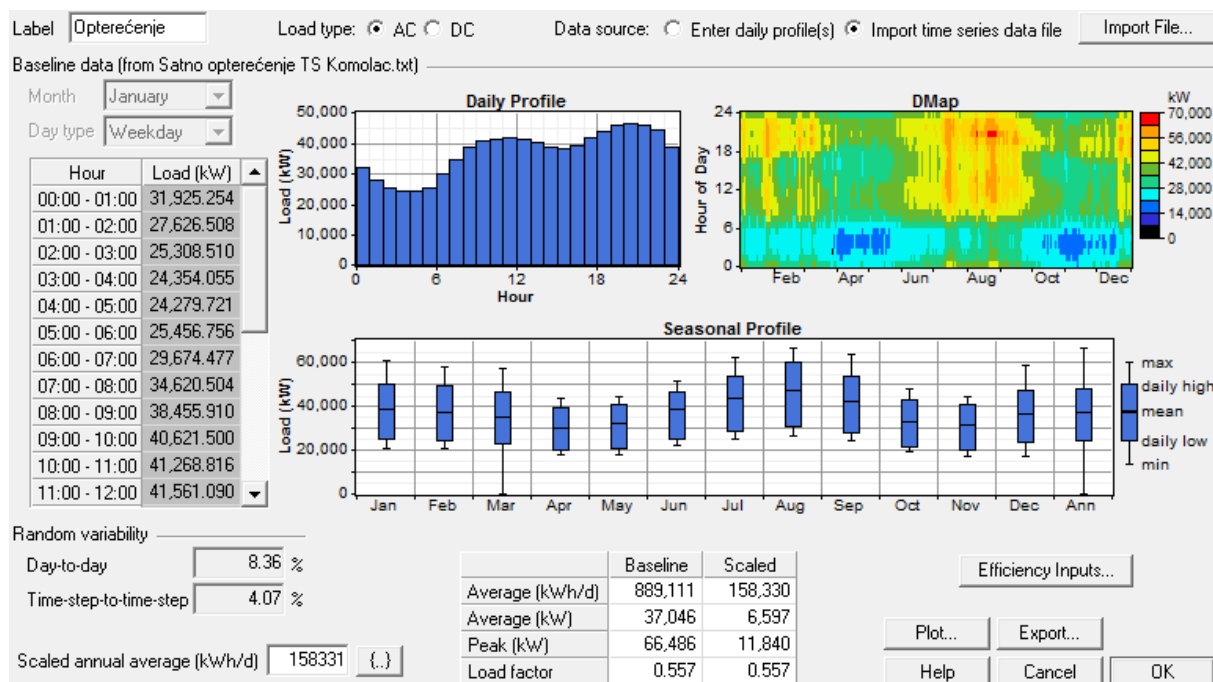
Elektrojug Dubrovnik je također ustupio podatke o potrošnji električne energije za šire dubrovačko područje iz kojih se dobila krivulja na [Slika 19]. Te su vrijednosti mjerene na trafostanici Komolac 110/35 kV za 2011. godinu. Vidi se porast potrošnje električne energije u zimskom periodu zbog grijanja i u ljetnom periodu zbog turističke sezone. Maksimalno opterećenje u jednom satu u 2011. godini je iznosilo 66486 kW.



Slika 19. Krivulja prosječnih satnih vrijednosti potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje u 2011. godini

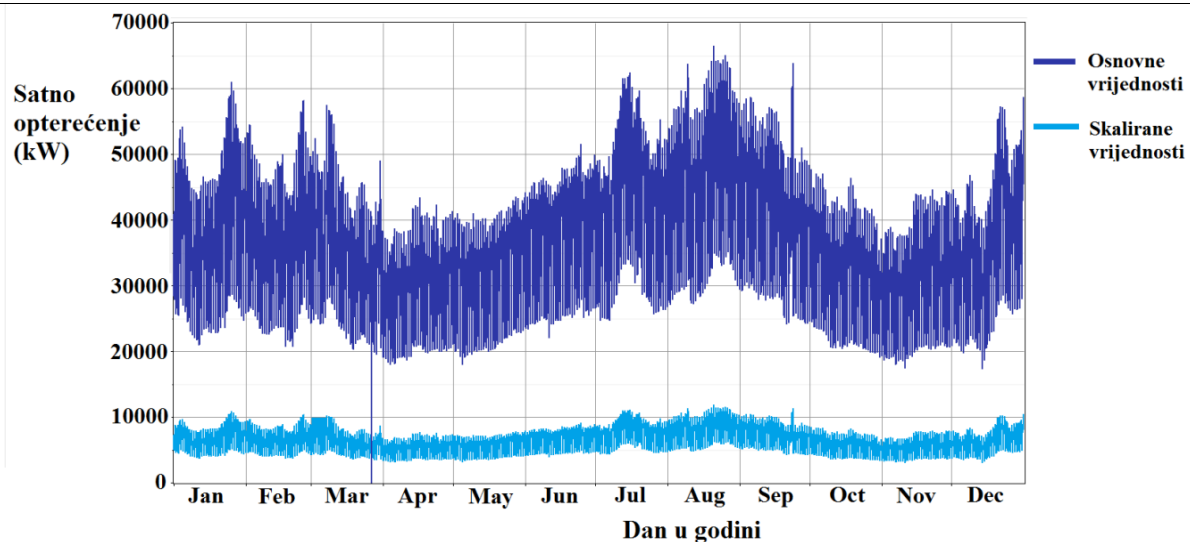
Kako je ulazni podatak potreban za simulaciju u programu HOMER satna potrošnja električne energija na otoku Korčuli, nije bilo moguće unijeti ranije izračunatu godišnju potrošnju. U program je učitana krivulja (podaci) prosječnih satnih vrijednosti potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje, a kako u programu postoji mogućnost skaliranja vrijednosti (u ovom slučaju potrošnje električne energije), satna potrošnja za šire dubrovačko područje je skalirana na potrošnju električne energije otoka Korčule (može se

pretpostaviti da krivulja potrošnje za Korčulu izgleda isto kao i krivulja za dubrovačko područje). Skaliranje je izvršeno unosom izračunate potrošnje električne energije na Korčuli za 2011. godinu od 158331 kWh/d. HOMER pri izračunavanju skaliranih vrijednosti množi svaku od 8760 osnovnih vrijednosti (učitanih vrijednosti potrošnje za dubrovačko područje) zajedničkim faktorom što rezultira godišnjom prosječnom vrijednošću potrošnje električne energije jednakoj vrijednosti koja je unesena kao *Scaled annual average* (158330 kWh/d) [Slika 20]. Kako bi došao to tog faktora, HOMER dijeli vrijednost skalirane prosječne godišnje potrošnje osnovnom prosječnom godišnjom potrošnjom. Još valja napomenuti kako je faktor opterećenja (*load factor*) jednak za osnovno i skalirano opterećenje, a njegova se vrijednost dobije ako se vrijednost prosječnog opterećenja podijeli vrijednošću vršnog opterećenja. Tako krivulja skaliranih vrijednosti ima isti oblik kao i krivulja osnovnih (unesenih) vrijednosti samo smanjenog iznosa što se može i vidjeti na [Slika 21].

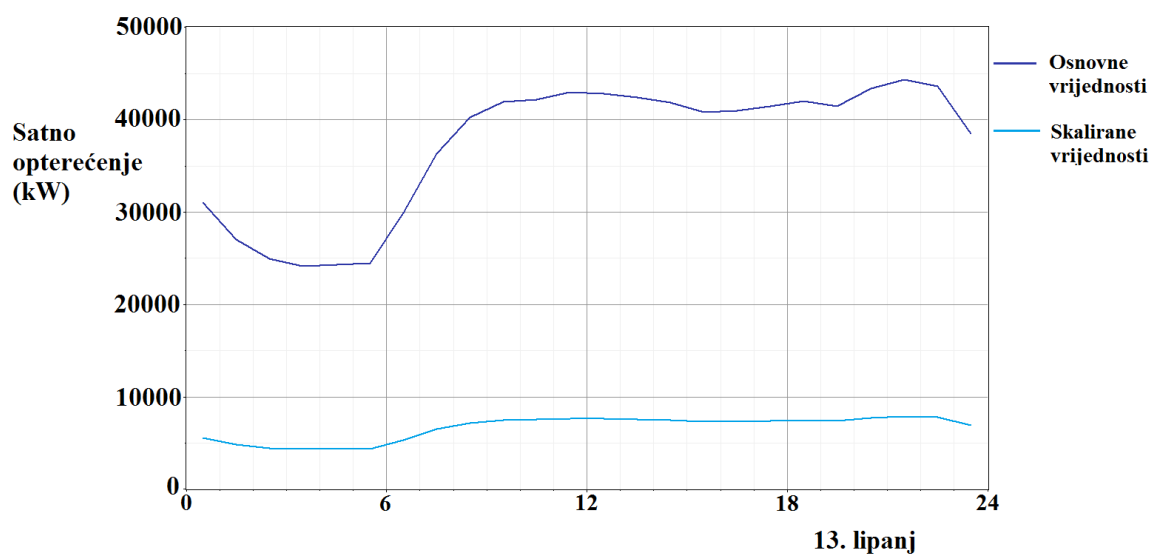


Slika 20. Prosječne srednje satne vrijednosti osnovnog opterećenja i prosječne srednje godišnje vrijednosti osnovnog i skaliranog opterećenja, odnosno potrošnje električne energije

Iz [Slika 21] se može vidjeti kako je krivulja osnovnog opterećenja, odnosno prosječne satne potrošnje električne energije na širem dubrovačkom području u 2011. godini jednaka krivulji na [Slika 19] samo je dobivena u programu HOMER. Iz slike se još može približno očitati maksimalno (vršno) opterećenje (potrošnja) električne energije na otoku Korčuli koje iznosi oko 12 MW. Na [Slika 22] prikazan je jedan dan u 2011. godini i usporedba potrošnje električne energije za dubrovačko područje i otok Korčulu.



Slika 21. Krivulja prosječnih satnih vrijednosti potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje (osnovne vrijednosti) i otok Korčulu (skalirane vrijednosti) u 2011. godini



Slika 22. Krivulja potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje i za otok Korčulu za jedan dan u 2011. godini

3. PRIMJENA METODOLOGIJE

U prošlom je poglavlju provedena analiza prikupljenih podataka, odnosno nekih ulaznih parametara potrebnih za simulacije (Sunčevo zračenje i potrošnja električne energije na otoku Korčuli). Preostali parametri (fotonaponski sustavi, elektroenergetska mreža i sl.) će biti definirani u ovom dijelu.

3.1. Analiza proizvodnje električne energije i ekonomska isplativost integracije fotonaponskih sustava na stambenim objektima otoka Korčule

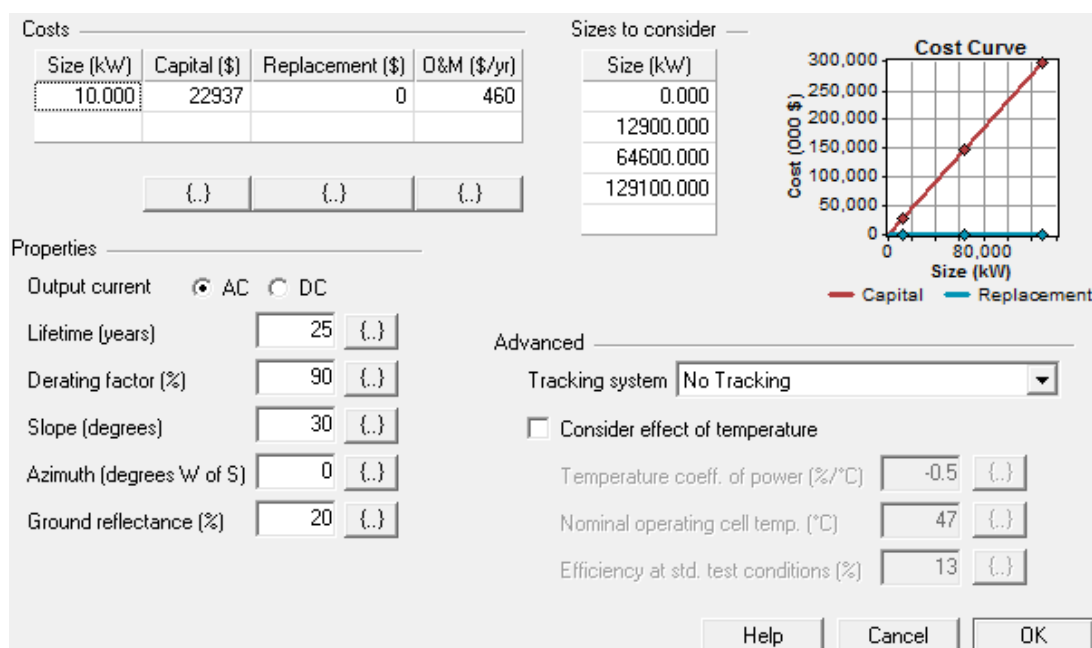
Prema podacima Državnog zavoda za statistiku iz 2011. godine na otoku Korčuli se nalazilo ukupno nešto manje od 5 milijuna m² stambenih površina u što se ubrajaju stanovi za stalno stanovanje, stanovi koji se koriste povremeno i stanovi u kojima se samo obavljala djelatnost. Ako se uzmu u obzir samo stanovi za stalno stanovanje i ako se od njihove ukupne površine oduzme površina napuštenih stanova dolazi se do nešto više od 4 milijuna m² (4054283 m²) stambene površine. Uz aproksimaciju da je većina površine u visokim prizemnicama (dvije etaže) iskoristiva površina je upola manja i iznosi nešto više od 2 milijuna m² (2027141,5 m²). Kako je ukupna površina jedne etaže nešto manja od ukupne površine krovova (najmanje za debljinu zidova) ta bi površina prema nekoj pretpostavci mogla odgovarati ugradbenoj krovnoj površini. Međutim, kako dio krovne površine otpada zbog oblika krova, eventualnih krovnih prozora i dimnjaka taj se broj množi s pretpostavljenim koeficijentom iskoristivosti površine 0,9 i dobiva se konačna ukupna ugradbena površina od 1824427,4 m². Taj se broj kvadrata u [Tablica 1] koristi u izračunu ugradbene površine krova. Instalirana snaga od 235 W_p prema [18] zauzima 1,66 m² površine pa je prema tome izračunat posljednji stupac u [Tablica 1].

Tablica 1. Površine i instalirane snage fotonaponskih sustava

% ukupne površine	Ugradbena površina (m ²)	Instalirana snaga (MW _p)
50	912213,675	129,1
25	456106,838	64,6
5	91221,368	12,9

3.1.1. Definiranje fotonaponskog sustava

Vrijednosti instalirane snage iz [Tablica 1] se unose u HOMER pod *Sizes to consider* [Slika 23]. Kao posebna opcija uzima se slučaj u kojem nema instaliranih fotonaponskih sustava (0 kW), a poslužit će samo radi usporedbe. Investicijski troškovi su definirani prema [18] gdje cijena fotonaponskog sustava (solarne elektrane) instalirane snage od 10 kW_p po modelu „ključ u ruke“ iznosi oko 128000 kn (u cijenu je uključen priključak na elektroenergetsku mrežu). Trošak pogona i održavanja je procijenjen na 2% investicijskog troška godišnje. Ostali eventualni troškovi zamjene (popravka) su uračunati u trošak pogona i održavanja.



Slika 23. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje fotonaponskih sustava

Pretpostavljeni životni vijek fotonaponskog sustava je 25 godina. Ostali parametri koje je potrebno definirati kod modeliranja fotonaponskog sustava su: faktor gubitaka (*derating factor*), kut nagiba fotonaponskog modula (*slope*) i azimut budući da se radi o fiksnim modulima i koeficijent refleksije tla ili albedo (*ground reflectance*). Zanemaren je utjecaj temperature fotonaponskih modula. Pretpostavljeno je linearno kretanje cijena s povećanjem instalirane snage. Izlazna struja je odabrana kao izmjenična (*alternating current*, AC) pošto se sustav modelira bez posebnih izmjenjivača, tj. izmjenjivači i njihova cijena su uračunati u cijenu investicije.

- Faktor gubitaka iznosi 90% jer će prema [18] nakon otprilike pola životnog vijeka proizvodnja električne energije modula biti za 10% manja od nazivne vrijednosti,
- Kut nagiba fotonaponskih modula u odnosu na horizontalu pretpostavljen je na 30°,

- Azimut (otklon modula na vodoravnu plohu od smjera juga) je uzet u iznosu od 0° ,
- Koeficijent refleksije tla ili albedo je definiran kao svojstvo podloge da odbije Sučevo zračenje. Kreće se od 1 za bijelo tijelo koje bi u potpunosti odbijalo Sunčevo zračenje (snijeg) do 0 za potpuno crno. Za simulaciju je uzeta vrijednost albeda od 0,2 koja obuhvaća najviše različitih površina.

3.1.2. Definiranje parametara mreže

Kod definiranja mreže u HOMER je potrebno unijeti tri vrste podataka:

- Tarife – definiranje strukture troškova mrežne snage,
- Emisije – unos emisijskih faktora za mrežnu snagu,
- Napredno – postavljanje određenih naprednih varijabli.

Moguće je definirati do 16 različitih tarifa koje se u dijagramu (rasporedu) mogu označiti prema vremenima u kojima su važeće. Svaka od tarifa definirana je sljedećim vrijednostima:

- Cijena el. energije – cijena po kojoj se el. energija kupuje iz mreže (\$/kWh). U [Tablica 2] prikazane su cijene za neke od tarifnih modela.
- Prodajna tarifa – cijena koju komunalna služba plaća za energiju koja je isporučena u mrežu. Pri mrežnom mjerenju, prodajna tarifa odnosi se samo na višak proizvedene energije. Cijena za isporučenu električnu energiju iz fotonaponske elektrane instalirane snage do uključivo 10 kW je 1,91 kn/kWh.
- Tarifa zahtjeva – mjesečna pristojba koja se plaća komunalnoj službi na osnovu vršnog mjesečnog zahtjeva za električnom energijom.

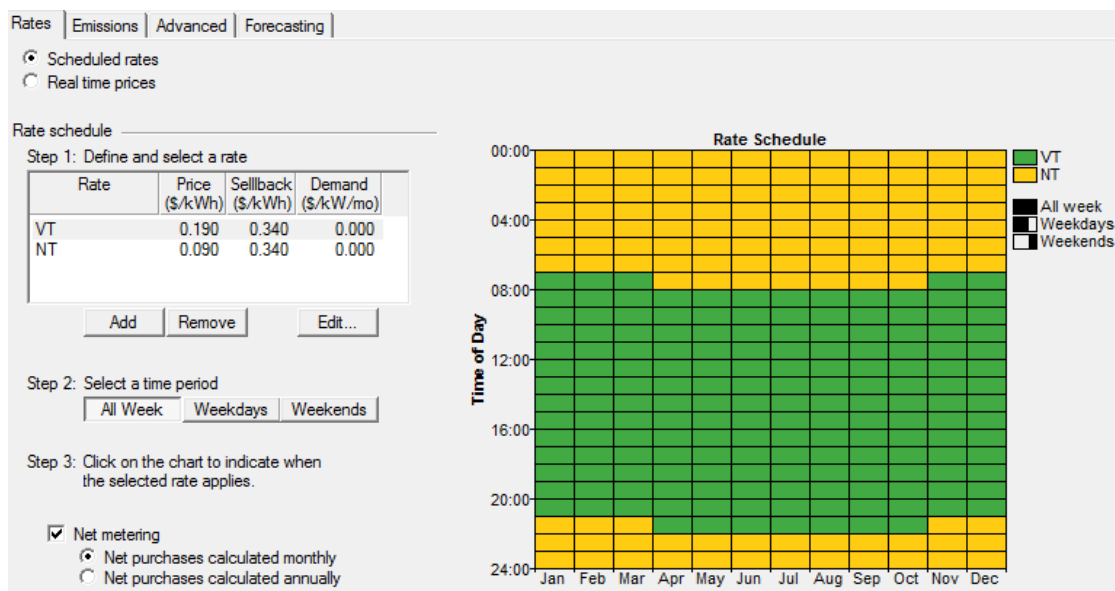
Kod definiranja novih tarifa potrebno je navesti i oznaku tarife pored gore navedenih vrijednosti. U ovom su slučaju definirane dvije tarife: visoka (VT) i niska tarifa (NT) prema [Tablica 2], a čiji se vremenski periodi korištenja mogu vidjeti na grafu [Slika 24].

Mrežno mjerenje je obračunska shema prema kojoj komunalna služba dopušta prodaju električne energije u mrežu po maloprodajnoj cijeni. Efektivno i najčešće doslovno, pri prodaji električne energije u mrežu, mjerač (sat) ide u natrag. Na kraju obračunskog razdoblja (mjesec ili godina) naplaćuje se količina kupljene energije iz mreže (kupljena minus prodana energija). Ako na kraju obračunskog razdoblja „kupljena energija“ ima negativnu vrijednost, znači da je količina prodane energije veća nego količina kupljene energije u obračunskom

razdoblju pa komunalna služba plaća otkupljenu energiju prema prodajnoj tarifi koja je uglavnom jednaka veleprodajnoj cijeni ili „cijeni izbjegnutog troška“ ili na plaća.

Tablica 2. Tarifni modeli (HEP)

Kategorija kupaca		Tarifni model	Tarifni element			
			Radna energija (kn/kWh)			Naknada za mjernu uslugu i opskrbu (kn/mj)
			JT	VT	NT	
Tarifne stavke						
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,78	-	-	17,40
			(0,98)			(21,45)
		Bijeli	-	0,85	0,42	17,40
				(1,06)	(0,53)	(21,75)
Narančasti	1,09	-	-	-		
	(1,36)					
Crni	0,38	-	-	6,20		
	(0,48)			(7,75)		
iznosi u zgradama su cijene s PDV-om						
Napomene		Zimsko računanje vremena			VT (07-21 h)	
					NT (21-07 h)	
		Ljetno računanje vremena			VT (08-22 h)	
					NT (22-08 h)	



Slika 24. Prikaz tarifa i njihov raspored

Kod definiranja emisija potrebno je unijeti podatke o emisijama ugljičnog dioksida, ugljičnog monoksida, nesagorjelih ugljikovodika, čestica, sumpornog dioksida i dušikovih oksida u g/kWh proizvedene električne energije. Ove vrijednosti ovise o načinu proizvodnje energije na području instalacije fotonaponskih sustava. Npr., ako je većina električne energije u tom području proizvedena iz ugljena, vrijednosti emisija će biti velike dok će kod proizvodnje energije iz prirodnog plina emisije biti nešto manje. Kod nuklearnih i hidroelektrana emisije će biti gotovo jednake nuli. Za ovu će se simulaciju uzeti da su emisije jednake nuli pošto se u Dubrovačko – neretvanskoj županiji nalaze četiri hidroelektrane.

Još je potrebno definirati napredne parametre:

- Trošak međupovezanosti (u \$) je pristojba koja se plaća kod spajanja sustava na mrežu i ovdje je 0 jer je priključak na mrežu uračunat u investicijski trošak. Ovaj se trošak ne odnosi na sustave koji su priključeni samo na mrežu.
- Trošak pripravnosti (u \$) je godišnja pristojba koja se plaća zbog osigurane opskrbe priključenog sustava rezervnom energijom iz mreže. Prema [Tablica 2] uzima se 21,75 kn/mj. Ovaj se trošak ne odnosi na sustave koji su priključeni samo na mrežu.
- Kapacitet prodaje i potražnje se odnosi na maksimalnu snagu koja može biti predana iz mreže, odnosno prodana u mrežu. Na Korčuli [Slika 25] je jedan 110 kV dalekovod, a prema [19] snaga 110 kV dalekovoda iznosi 100 MW. U predavanju [20] izvršeni su proračuni dozvoljene strujne opteretivosti visokonaponskih kabela te dopuštene prijenosne snage. Npr., za 110 kV kabel aluminijskog vodiča presjeka 1000 mm² dopuštena prijenosna snaga iznosi 150 MW. Kako na izračun prijenosne snage kabela, odnosno dalekovoda utječe cijeli niz parametara, od vrste i debljine izolacije do dubine i svojstava tla (kod polaganja kabela) točan proračun je relativno složen. Za proračun se tako uzima vrijednost dozvoljenog opterećenja mreže od 100 MW. Ova je vrijednost uzeta kao pretpostavka s određenom nesigurnošću.

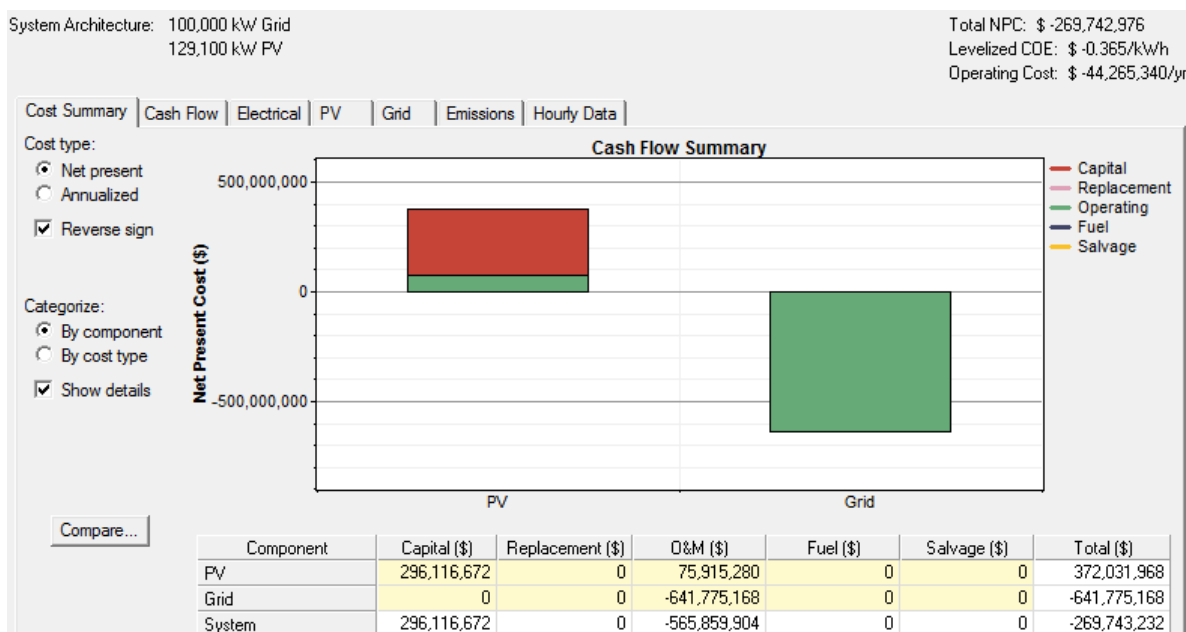


Slika 25. Energetski sustav otoka Korčule [21]

3.1.3. Rezultati simulacije

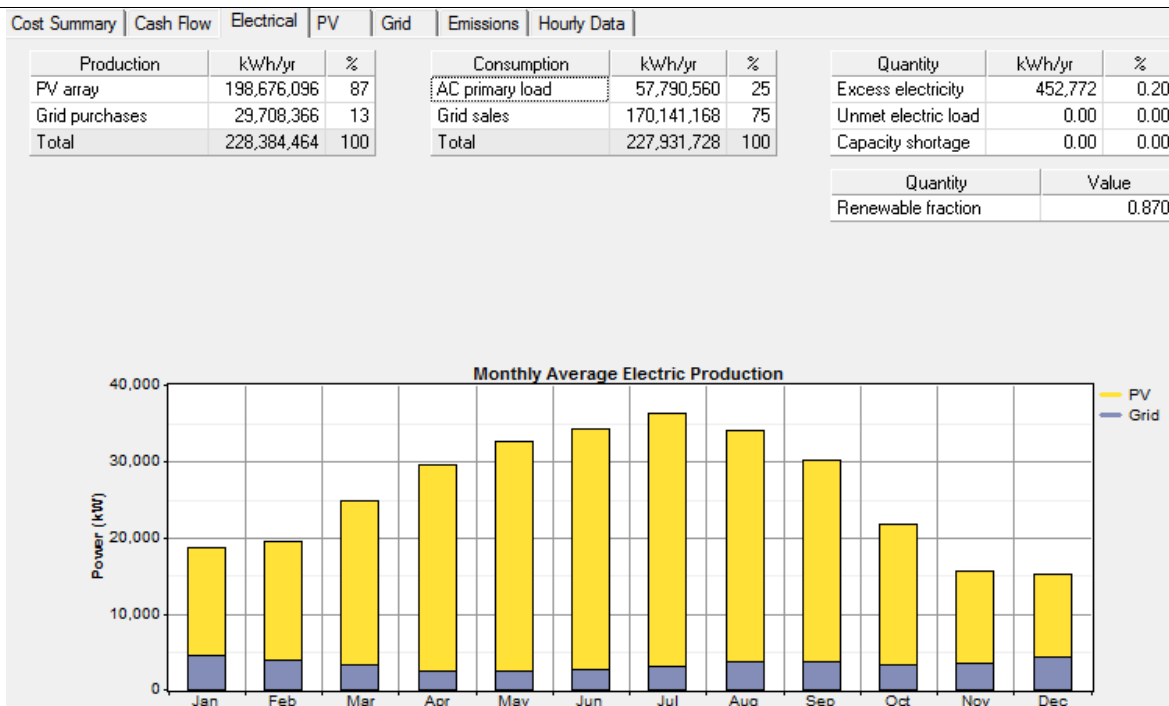
Nakon unosa svih potrebnih podataka HOMER provodi simulacije modeliranih sustava. U nastavku će biti prikazani rezultati simulacije za slučajeve integracije fotonaponskih sustava na 50%, 25% i 5% stambenih objekata na otoku Korčuli.

Na [Slika 26] prikazani su osnovni podaci o sustavu i njegovim troškovima. Modelirani se sustav sastoji od 129,1 MW fotonaponskih sustava (50% površine) i 100 MW mreže. Investicijski troškovi sustava iznose preko 296 mil. \$ (296116672 \$). Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta od 25 godina i uz kamatnu stopu od 6% iznose 372 mil. \$ (372031968 \$). Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 642 mil. \$ (641775168 \$). Ako se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazi se do ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 270 mil. \$ (269743232 \$). Prosječna cijena za kWh proizvedene električne energije iznosi 0,365 \$/kWh (2,04 kn/kWh).



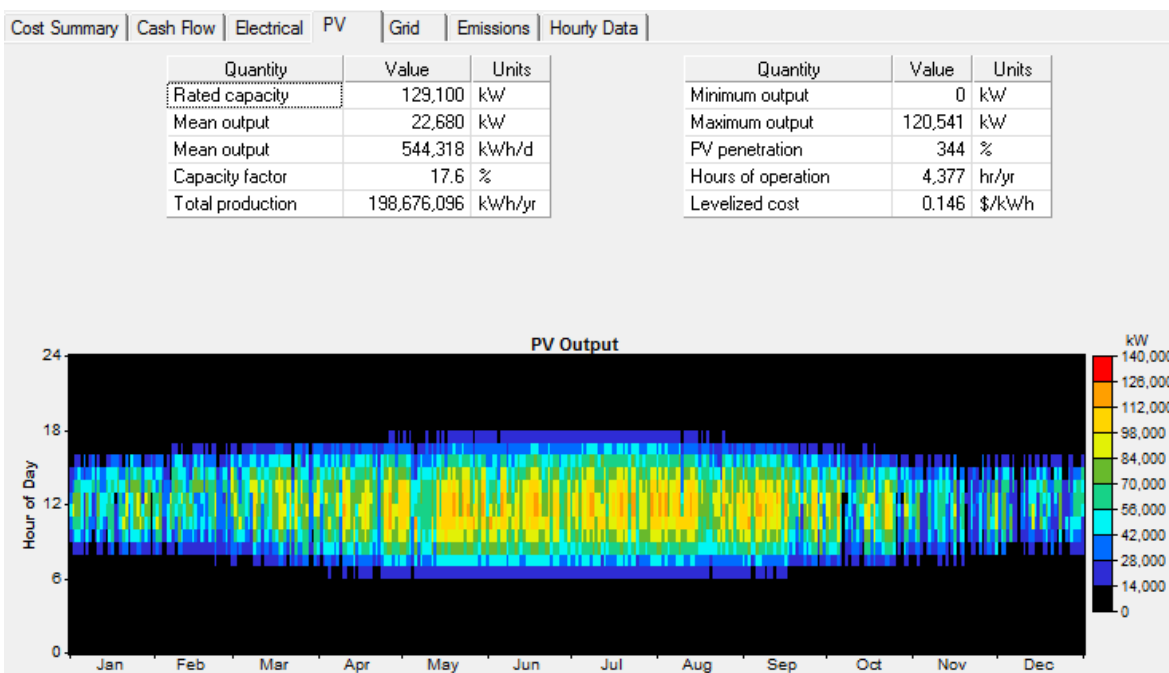
Slika 26. Troškovi modeliranog sustava i cijena električne energije (50%)

Na [Slika 27] mogu se vidjeti podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava (odnose se na srednje godišnje vrijednosti). Od ukupno proizvedene električne energije (228,384 GWh/god.) većina (87%) je iz fotonaponskih sustava dok je ostatak (13%) iz mreže. Od te ukupne količine proizvedene energije jedan dio (0,2%) je višak i on nije zanemariv jer iznosi 453 MWh/god., dok se od preostale energije 25% koristi za podmirivanje potrošnje na cijelom otoku, a 75% je na raspolaganju u mreži.



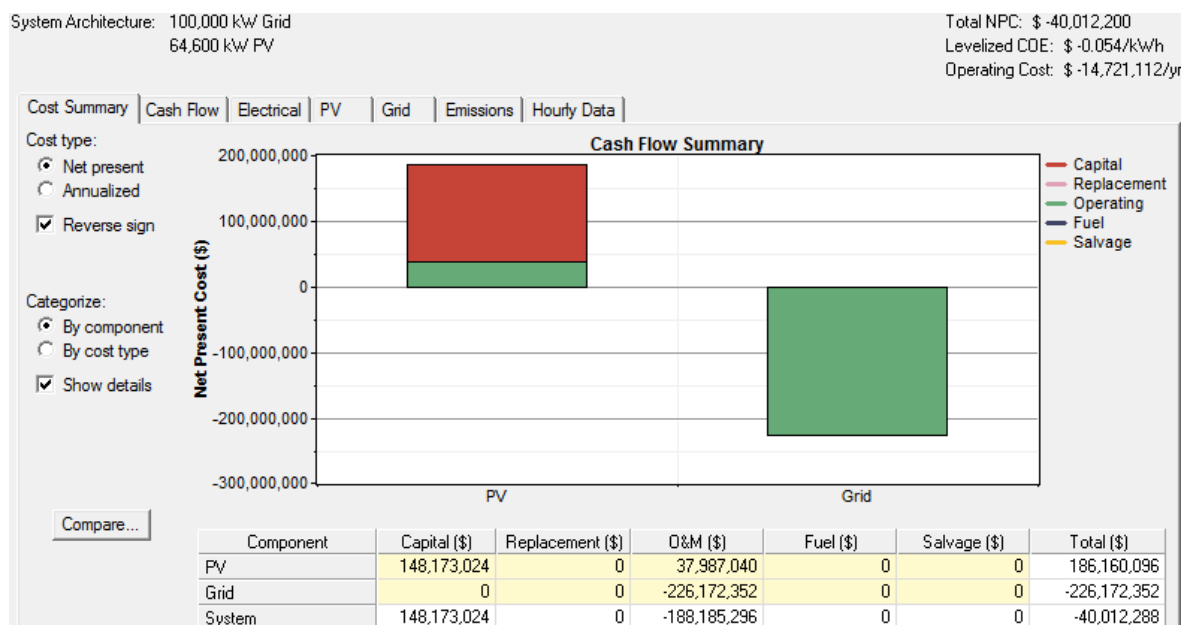
Slika 27. Podaci o proizvodnji električne energije (50%)

Na [Slika 28] prikazani su podaci o radu fotonaponskih sustava ukupne instalirane snage 129,1 MW. Prosječna dnevna proizvodnja električne energije fotonaponskih sustava iznosi 544,3 MWh/d.



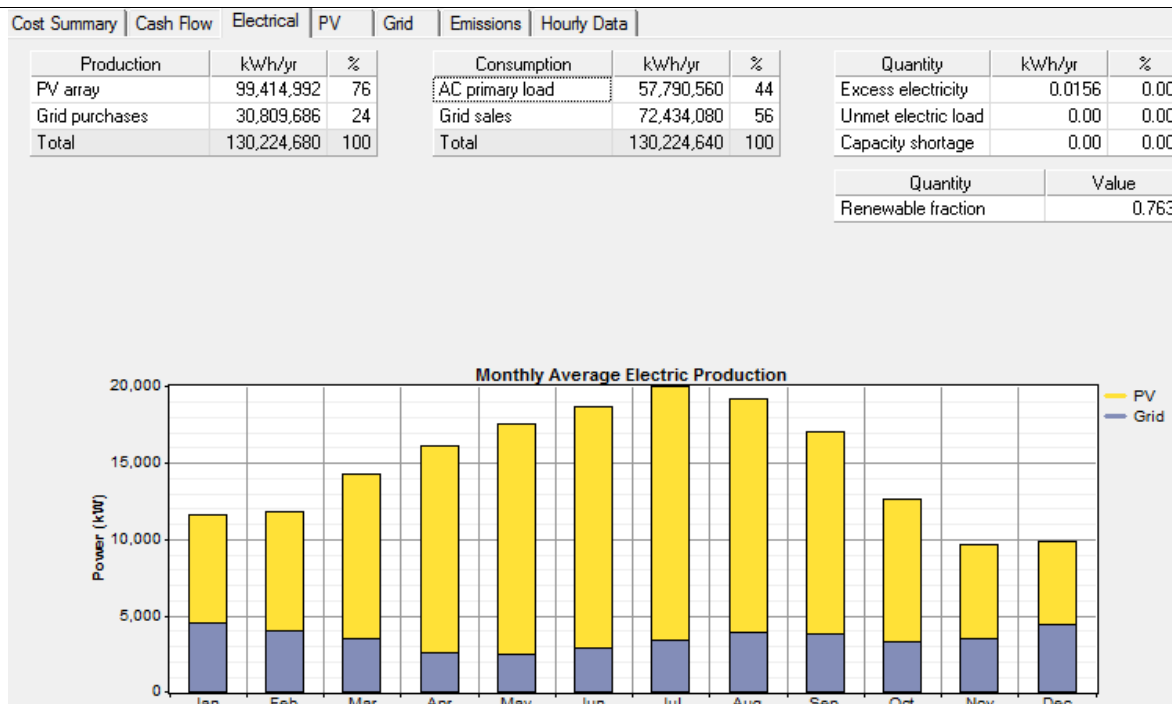
Slika 28. Prikaz rada fotonaponskog sustava (50%)

U drugom slučaju se modelirani sustav sastoji od 64,6 MW fotonaponskih sustava (25% površine) i 100 MW mreže. Na [Slika 29] prikazani su osnovni podaci o sustavu i njegovim troškovima. Investicijski troškovi sustava iznose preko 148 mil. \$ (148173024 \$). Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta od 25 godina i uz kamatnu stopu od 6% iznose 186 mil. \$ (186160096 \$). Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 226 mil. \$ (226172352 \$). Ako se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazi se do ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 40 mil. \$ (40012288 \$). Prosječna cijena za kWh proizvedene električne energije iznosi 0,054 \$/kWh (0,30 kn/kWh).

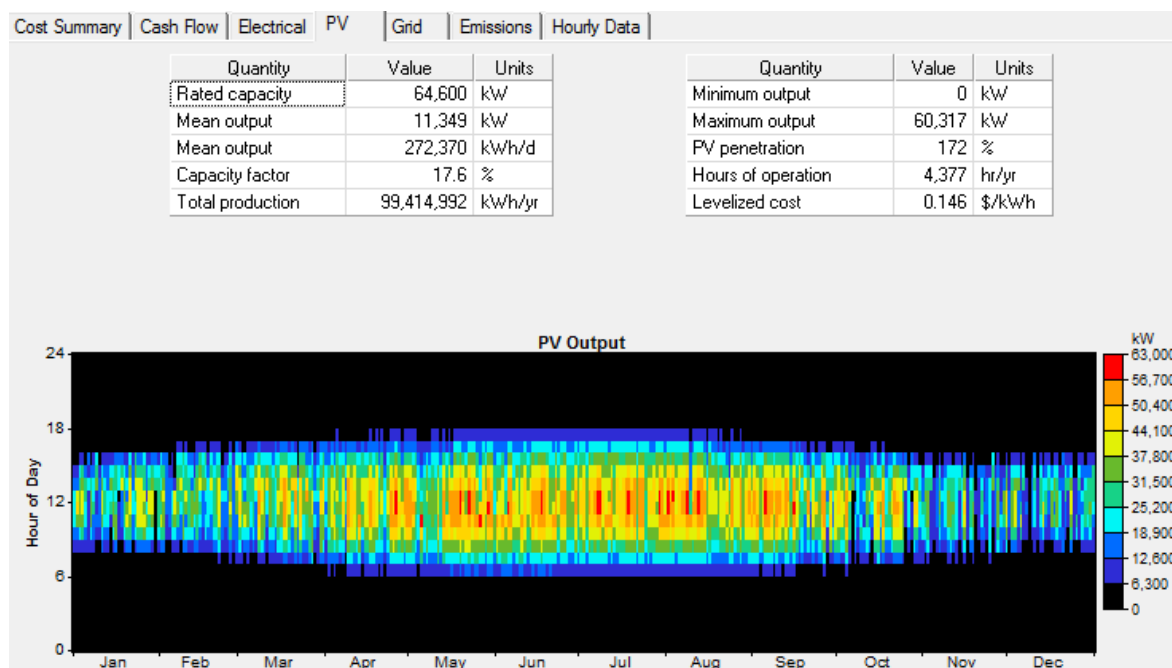


Slika 29. Troškovi modeliranog sustava i cijena električne energije (25%)

Na [Slika 30] se mogu vidjeti podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava (odnose se na srednje godišnje vrijednosti). Od ukupno proizvedene električne energije (130,225 GWh/god.) većina (76%) je iz fotonaponskih sustava dok je ostatak (24%) iz mreže. Od te ukupne količine proizvedene energije 44% se koristi za podmirivanje potrošnje na cijelom otoku dok je 56% na raspolaganju u mreži. Višak električne energije je zanemariv (15,6 Wh/god.). Prosječna dnevna proizvodnja električne energije fotonaponskih sustava iznosi 272,4 MWh/d [Slika 31].

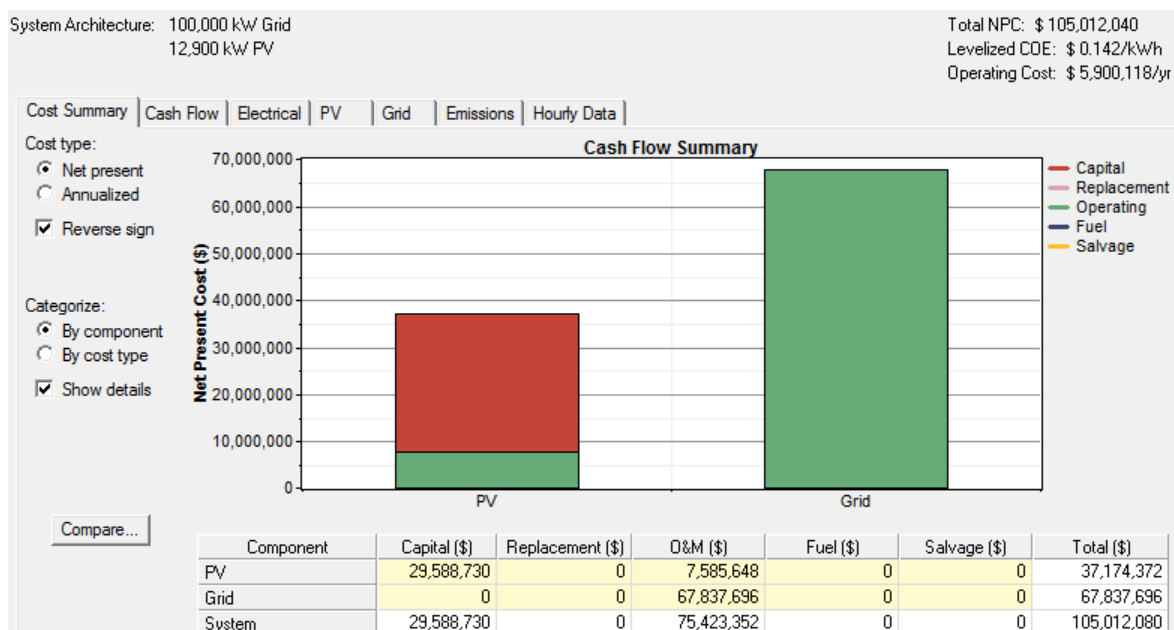


Slika 30. Podaci o proizvodnji električne energije (25%)



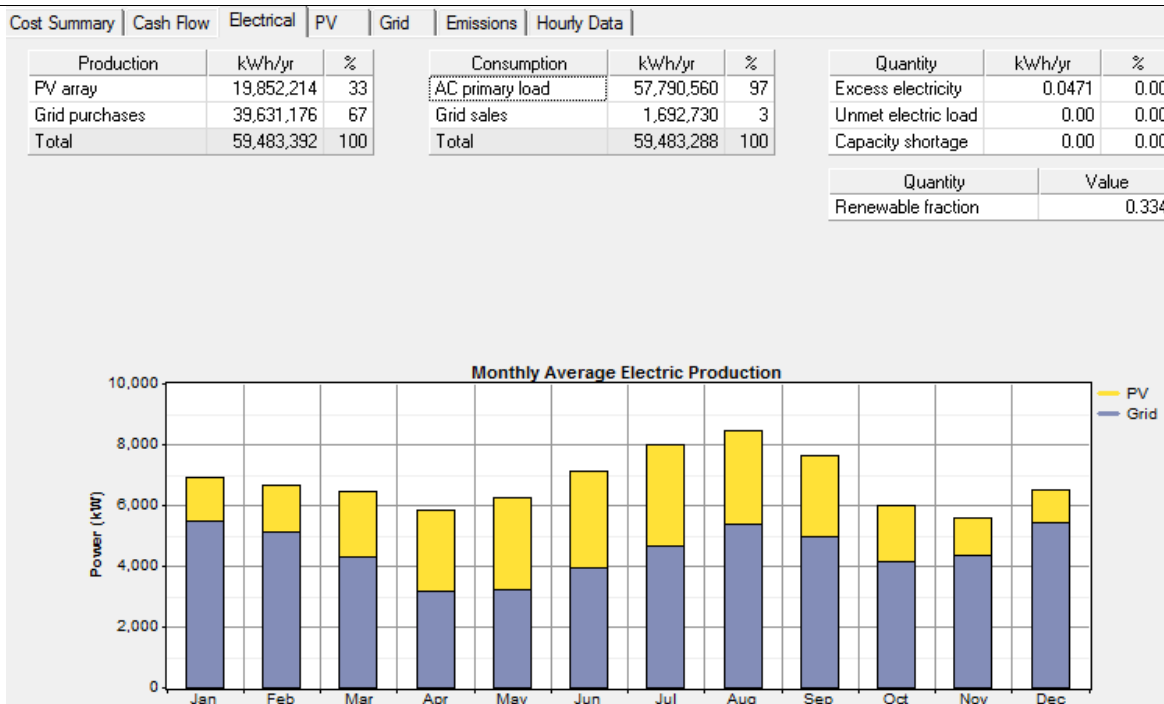
Slika 31. Prikaz rada fotonaponskog sustava (25%)

U trećem slučaju se modelirani sustav sastoji od 12,9 MW fotonaponskih sustava (5% površine) i 100 MW mreže. Na [Slika 32] prikazani su osnovni podaci o sustavu i njegovim troškovima. Investicijski troškovi sustava iznose preko 29 mil. \$ (29588730 \$). Ovdje se vidi kako je zbog malo instaliranih fotonaponskih sustava (u odnosu na potrošnju) potrebno kupovati električnu energiju iz mreže u iznosu od 68 mil. \$ (67837696). Ovdje nema uštede kao u prva dva slučaja, a ukupni trošak iznosi 105 mil. \$ (105012040 \$). Prosječna cijena za kWh proizvedene električne energije iznosi 0,142 \$/kWh (0,79 kn/kWh).

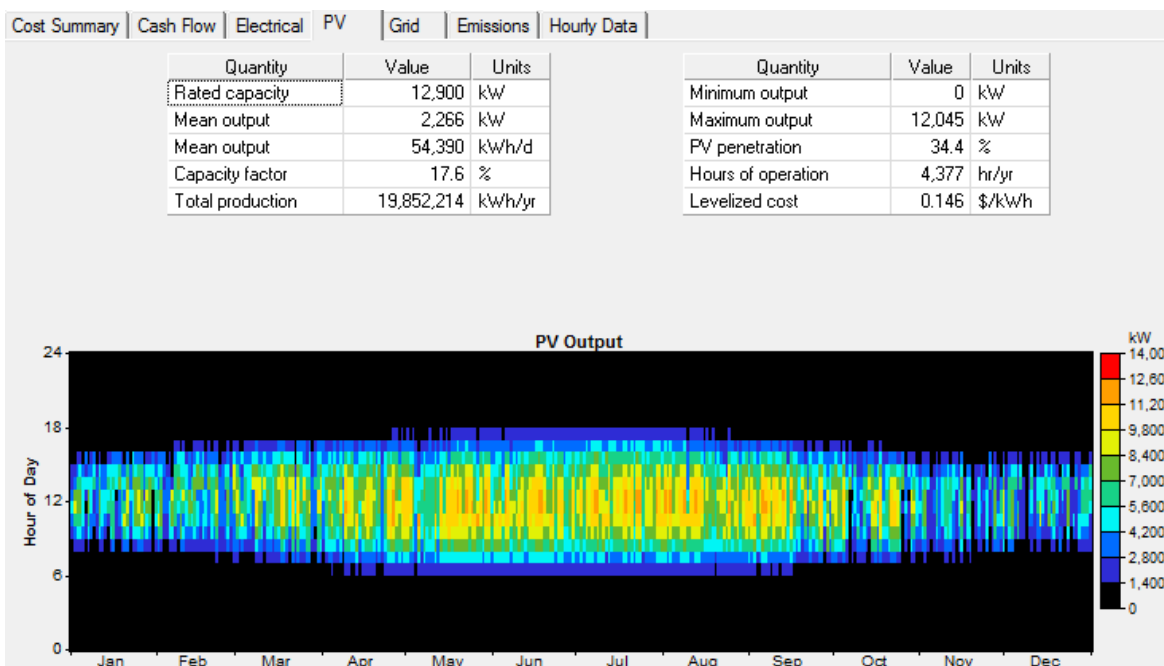


Slika 32. Troškovi modeliranog sustava i cijena električne energije (5%)

Na [Slika 33] se mogu vidjeti podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava (odnose se na srednje godišnje vrijednosti). Od ukupno proizvedene električne energije (59,483 GWh/god.) većina (67%) je iz mreže dok je ostatak (33%) iz fotonaponskih sustava. Od te ukupne količine proizvedene energije 97% se koristi za podmirivanje potrošnje na cijelom otoku dok je 3% na raspolaganju u mreži. Višak električne energije je zanemariv (47,1 Wh/god.). Prosječna dnevna proizvodnja električne energije fotonaponskih sustava iznosi 54,4 MWh/d [Slika 34].

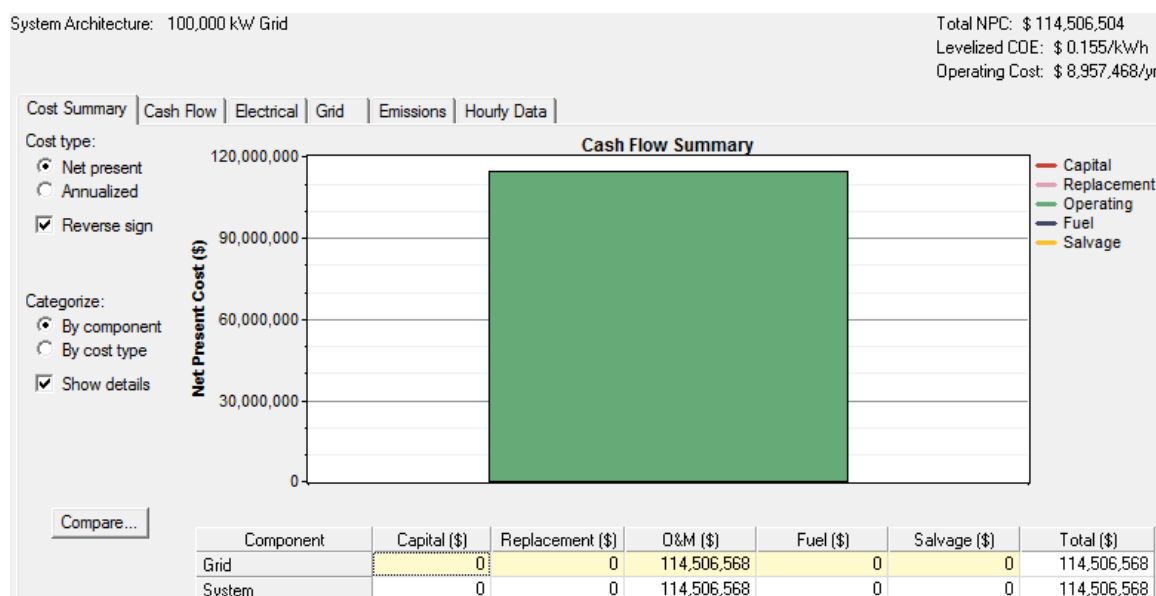


Slika 33. Podaci o proizvodnji električne energije (5%)



Slika 34. Prikaz rada fotonaponskog sustava (5%)

Na [Slika 35] prikazani su troškovi i cijena električne energije u slučaju kada na otoku nema instaliranih fotonaponskih sustava. Ukupni troškovi iznose 114,5 mil. \$ (114506568 \$) što je više nego u prethodno analiziranom (trećem) slučaju gdje su fotonaponski sustavi instalirani na 5% stambenih objekata otoka Korčule. U tom su slučaju ukupni troškovi 105 mil. \$ (105012040 \$) što je za 9,5 mil. \$ manje. Iza tih 9,5 mil. \$ uštede stoji pokrivanje dijela potrošnje električne energije iz fotonaponskih sustava.



Slika 35. Troškovi sustava i cijena električne energije bez fotonapona

HOMER analizirane slučajeve rangira prema ukupnoj neto sadašnjoj cijeni sustava (*Total Net Present Cost*). To je sadašnja vrijednost svih troškova koji nastanu tijekom životnog vijeka sustava umanjena za sadašnju vrijednost svih prihoda, također tijekom životnog vijeka sustava. Ako su prihodi veći od troškova, ta će vrijednost biti negativna i obrnuto. Nivelirana cijena energije (*Levelized Cost of Energy*) definirana je kao prosječna cijena po kWh korisne električne energije proizvedene u sustavu. Ona također može biti negativna (u slučaju zarade) ili pozitivna (u slučaju troška). Za izračun te cijene HOMER dijeli cijenu proizvodnje električne energije na godišnjoj razini s ukupnom korisnom proizvedenom električnom energijom.

Iz izloženoga se može zaključiti kako su u trećem slučaju, iako nema zarade (pozitivna neto sadašnja cijena koja ukazuje na to da su ukupni troškovi veći od ukupnih prihoda, svedeno na sadašnju vrijednost), troškovi u odnosu na one kad nema instaliranih fotonaponskih sustava manji. U prvom slučaju gdje je provedena integracija fotonaponskih sustava na 50% stambenih objekata na otoku dolazi se do najveće zarade od ukupno 270 mil.

\$ (269743232 \$) pa je taj slučaj HOMER odabrao kao najbolji. Nedostatak je velika količina proizvedene električne energije u odnosu na potrošnju, tj. javlja se višak i to 453 MWh/god. Još je bitno napomenuti kako maksimalna izlazna snaga fotonaponskih sustava u prvom slučaju prelazi 120 MW što za više od 20% premašuje dozvoljenu opteretivost mreže. Ovo opterećenje 110 kV dalekovod ne bi mogao podnijeti prema dosad izloženome. Treba reći da je dozvoljena opteretivost dalekovoda u ovom slučaju ovisna o sigurnosnoj rezervi i točnosti pretpostavke. Kako bi se sa sigurnošću moglo utvrditi hoće li ili neće dalekovod podnijeti navedeno opterećenje potrebno je provesti detaljnu analizu elektroenergetskog sustava. Na drugom mjestu je slučaj s integracijom fotonaponskih sustava na 25% stambenih objekata s ukupnom zaradom od 40 mil. \$ (40012288 \$). U [Tablica 3] prikazani su rezultati troškova i cijene električne energije za sva tri slučaja.

Ovdje je samo promatrana bilanca proizvodnje i potrošnje električne energije u elektroenergetskom sustavu otoka Korčule i nije vršena provjera stabilnosti sustava. Veliki udjeli energije iz nekontroliranih varijabilnih obnovljivih izvora energije na decentraliziranim lokacijama mogu izazvati probleme na svim naponskim razinama. Pri proračunu stabilnosti sustava treba paziti da na raspolaganju stoji dovoljno reaktivne snage za kontrolu napona, a koja se najčešće namiruje iz velikih centraliziranih elektrana.

Tablica 3. Troškovi i cijena električne energije

Instalirana snaga (MW)	Ukupni troškovi sustava (25 god. uz kamatu 6%)	Ukupni troškovi svedeni na godišnju vrijednost	Prosječna cijena proizvedene električne energije
129,1 (50%)	372 031 968 \$ ili 2 079 286 669 kn	29 102 838 \$/god. ili 162 655 762 kn/god.	0,365 \$/kWh ili 2,04 kn/kWh
64,6 (25%)	186 160 096 \$ ili 1 040 448 777 kn	14 562 693 \$/god. ili 81 390 891 kn/god.	0,054 \$/kWh ili 0,30 kn/kWh
12,9 (5%)	105 012 080 \$ ili 586 912 515 kn	8 214 750 \$/god. ili 45 912 238 kn/god.	0,142 \$/kWh ili 0,79 kn/kWh

3.2. Proračun utjecaja odgodive (upravljane) potrošnje na mogućnost dodatne integracije električne energije iz fotonaponskih sustava

Odgodiva potrošnja je električno opterećenje koje se mora opskrbiti u nekom vremenskom periodu, ali točno vrijeme nije važno. Tereti (potrošnja) se deklariraju kao odgodivi jer imaju spremnike s kojima su povezani. Pumpanje vode je jedan od primjera. Kada pumpa treba raditi, postoji fleksibilnost koja omogućava da se vodeni spremnik ne isuši. Dodatni primjeri su pravljenje leda, punjenje baterija ili zagrijavanje potrošne tople vode (PTV). Odgodivo se opterećenje definira na isti način kao i osnovno. Osnovne podatke predstavlja 12 vrijednosti koje govore o prosječnoj dnevnoj odgodivoj potrošnji za svaki mjesec u godini, a to je vrijednost pri kojoj energija odlazi iz odgodivog spremnika, odnosno količina energije potrebne da se nivo u spremniku drži konstantnim.

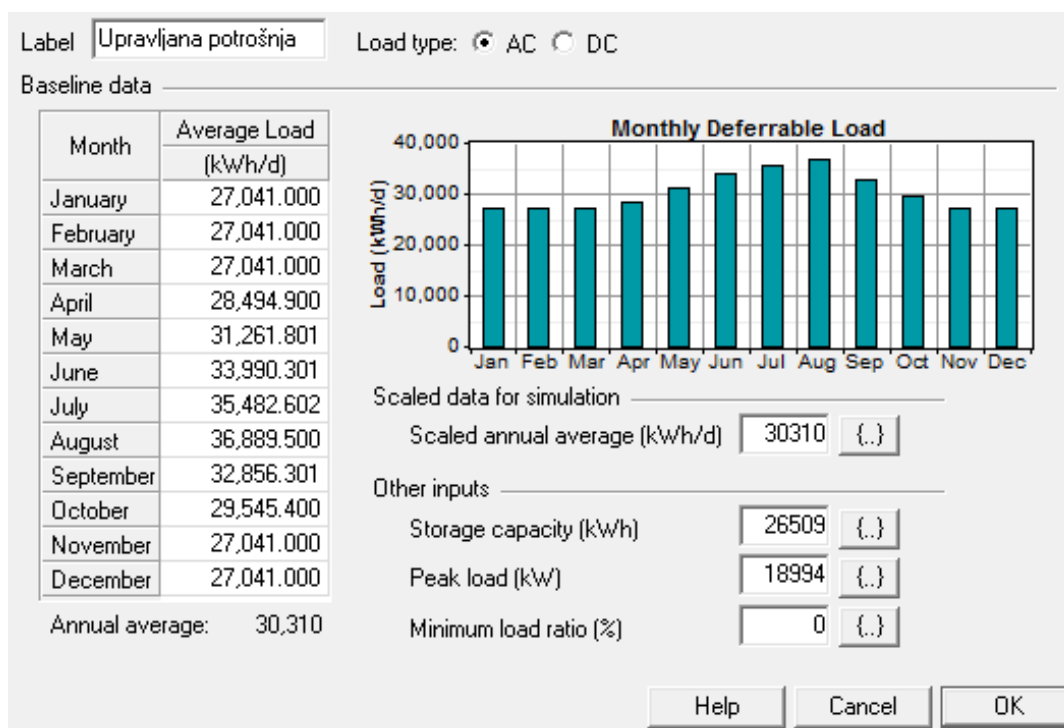
Prilikom definiranja odgodive potrošnje u HOMER je potrebno unijeti sljedeće podatke:

- Kapacitet spremnika – veličina spremnika u kWh energije potrebne za njegovo ispunjavanje,
- Vršno opterećenje – maksimalna snaga u kW koja može opskrbiti odgodivi teret (potrošnju). Kod pumpanja vode, vršno je opterećenje jednako nazivnoj električnoj potrošnji pumpe,
- Minimalni omjer tereta – minimalna snaga koja opskrbljuje odgodivi teret u % vršnog opterećenja. U primjeru pumpe za vodu, ako je pumpa nazivne snage 0,75 kW i zahtjeva najmanje 0,5 kW kako bi radila, omjer je 67%.

Odgodivo opterećenje je drugo po važnosti iza osnovnog opterećenja, ali ispred punjenja baterija. HOMER opskrbljuje odgodivo opterećenje električnom energijom samo u slučaju postojanja viška proizvedene energije, tj. ako je osnovno opterećenje nedostavno za potrošnju proizvedene energije ili ako se isprazni spremnik odgodive potrošnje. Sposobnost odgode posluživanja opterećenja često je korisno kod sustava koji sadrže obnovljive izvore energije jer smanjuje potrebu za preciznom kontrolom vremena u kojem će se proizvoditi energija. Ako proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora premaši potrošnju u nekom trenutku, višak može poslužiti za odgodivo opterećenje, umjesto da završi kao otpadna energija.

3.2.1. Odgodiva potrošnja (zagrijavanje PTV)

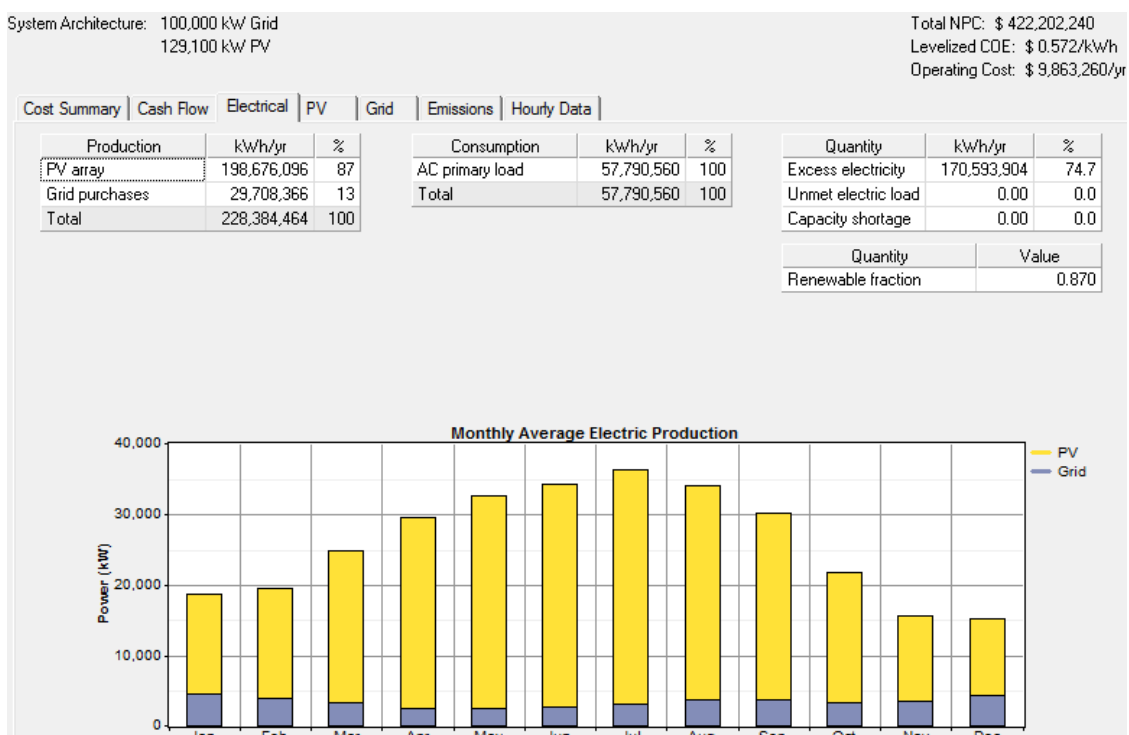
Prema [23] u 2012. godini na Korčuli je ostvareno ukupno 689000 noćenja. Pretpostavka je da se većina tih noćenja ostvarila tijekom turističke sezone, dok je broj noćenja stalno naseljenog stanovništva ostao nepromijenjen tijekom godine (oko 15500 stanovnika). Kako jedna osoba u Hrvatskoj u prosjeku potroši oko 150 l vode dnevno, od čega je trećina za održavanje higijene, dolazi se do količine topline potrebne da bi se 50 l vode zagrijalo za pretpostavljenih 30 °C (1,745 kWh). Ako se ta količina topline pomnoži brojem noćenja u pojedinom mjesecu i podijeli brojem dana dobivaju se vrijednosti na [Slika 36] u kWh/d. Vidljivo je povećanje potrošnje energije u ljetnim mjesecima upravo zbog većeg broja turista. Iz broja noćenja dolazi se do maksimalnog broja osoba koje bi mogle biti na otoku u nekom trenutku (37989 osoba). Ako se pretpostavi da četiri osobe koriste jedan električni bojler za zagrijavanje tople vode, onda je ukupan broj električnih bojlera 9497, svaki snage grijača 2 kW i obujma 80 l. Ukupan kapacitet spremnika energije bi u tom slučaju bila toplina potrebna da se u svakom od bojlera zagrije 80 l vode za 30 °C i iznosio bi 26509 kWh. Vršno bi opterećenje bila snaga svih uključenih bojlera u nekom trenutku (18994 kW). Minimalni omjer tereta je približno nula jer od maksimalnog broja električnih bojlera može biti uključen samo jedan.



Slika 36. Upravljana potrošnja

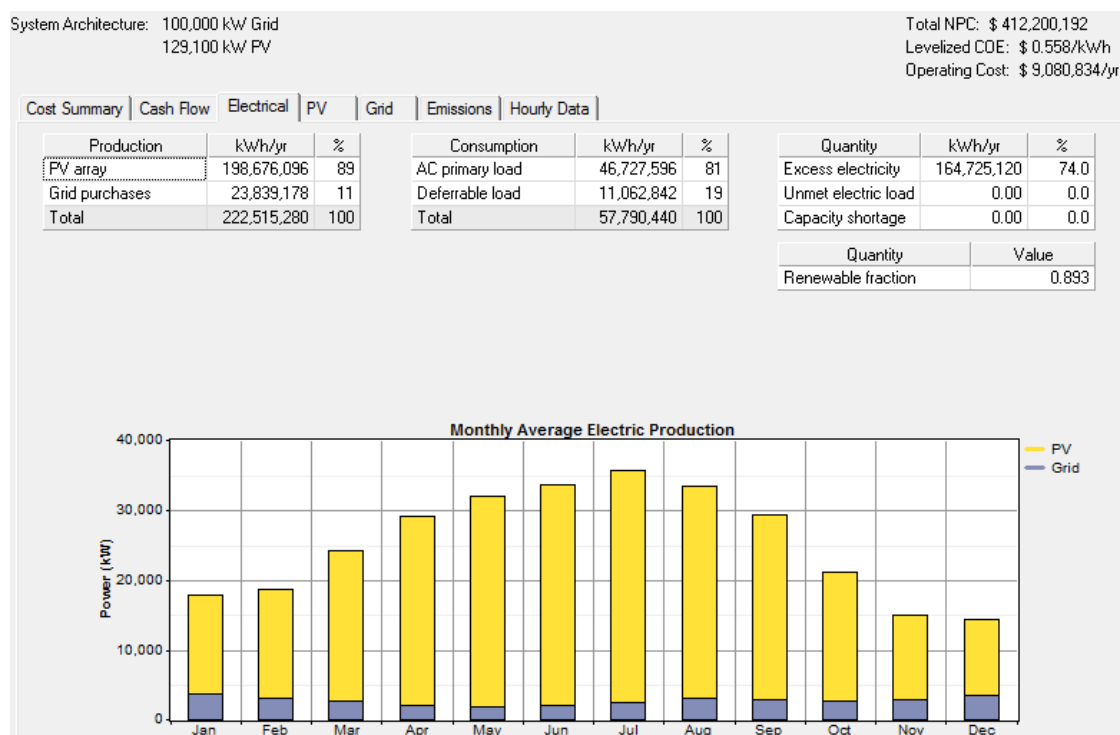
Kako se kod računanja (simulacija) bez utjecaja odgodive potrošnje (tereta), cjelokupna potrošnja električne energije na otoku Korčuli u vrijednosti od 57790560 kWh/god. definirala kao stalno opterećenje, potrebno je umanjiti taj iznos za količinu odgodive potrošnje (za zagrijavanje PTV) koja iznosi 11062842 kWh/god. Dobiveni iznos od 46,7 GWh je stalno opterećenje koje zajedno s odgovivom potrošnjom daje ukupnu potrošnju električne energije na Korčuli. Da bi se pokazao utjecaj odgodive potrošnje, potrebno je u HOMER-u isključiti prodaju električne energije iz fotonaponskih sustava u mrežu, što znači uzeti prodajni kapacitet jednak 0 te cijenu električne energije prodane u mrežu također 0. To znači da se sva električna energija proizvedena u fotonaponskim sustavima koristi samo za pokrivanje potreba otoka pa se u skladu s time očekuju i velike vrijednosti viškova proizvedene energije. U HOMER-u je još isključena i opcija mrežnog mjerenja.

U nastavku će se usporediti dva slučaja. Jedan bez uključene odgodive potrošnje (57,7 GWh/god.) i jedan slučaj s uključenom odgovivom potrošnjom (46,7 GWh/god. + 11 GWh/god). Kao primjer će se uzeti prvi slučaj gdje su fotonaponski sustavi integrirani na 50% stambenih površina jer je u tom slučaju najveći višak proizvedene energije. Neće se analizirati troškovi i cijena električne energije već samo proizvodnja, odnosno višak.



Slika 37. Podaci o proizvodnji električne energije bez uključenog odgodivog opterećenja (50%)

Na [Slika 37] se vidi da je višak proizvedene električne energije 170,6 GWh/god. kada je potrošnja električne energije 57,7 GWh/god. (stalno opterećenje). Ako se u obzir uzme i odgodiva potrošnja od 11 GWh/god., višak se proizvedene električne energije smanjuje za 5,9 GWh/god. i iznosi 164,7 GWh/god. [Slika 38]. Vidljivo je kako se i udio proizvedene električne energije iz fotonapona povećao s 87% na 89,3% zahvaljujući odgodivoj potrošnji, a i ukupna energija kupljena iz mreže se također smanjila.

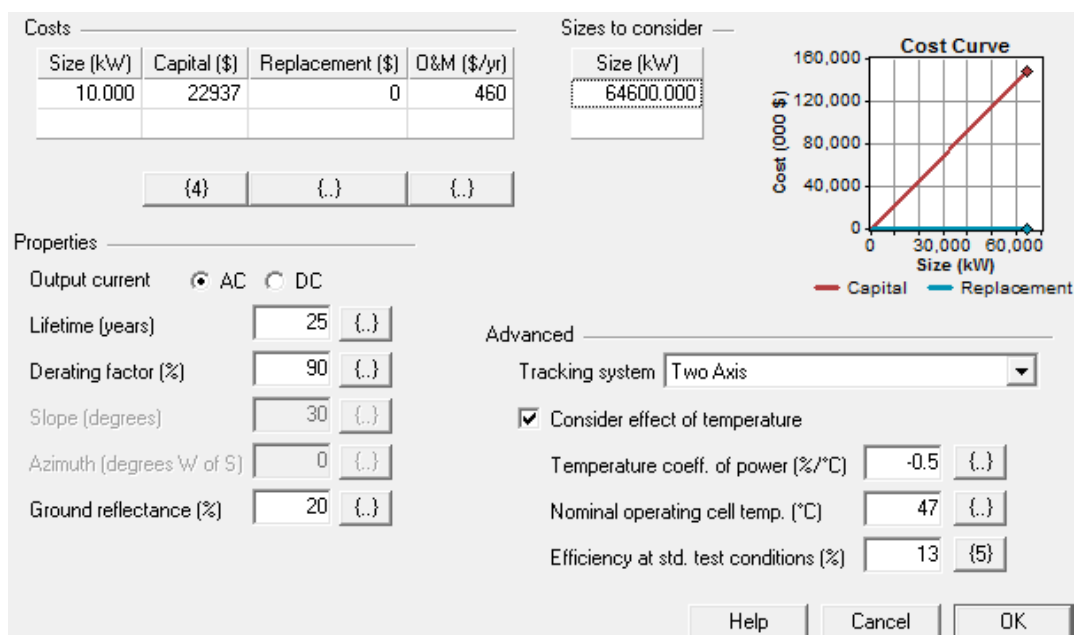


Slika 38. Podaci o proizvodnji električne energije s uključenim odgodivim opterećenjem (50%)

Iz izloženoga se može zaključiti kako upravljana potrošnja električne energije pozitivno utječe na mogućnost dodatne integracije električne energije iz fotonaponskih sustava. Drugim riječima, smanjuje se višak proizvedene energije.

3.3. Analiza osjetljivosti proračuna

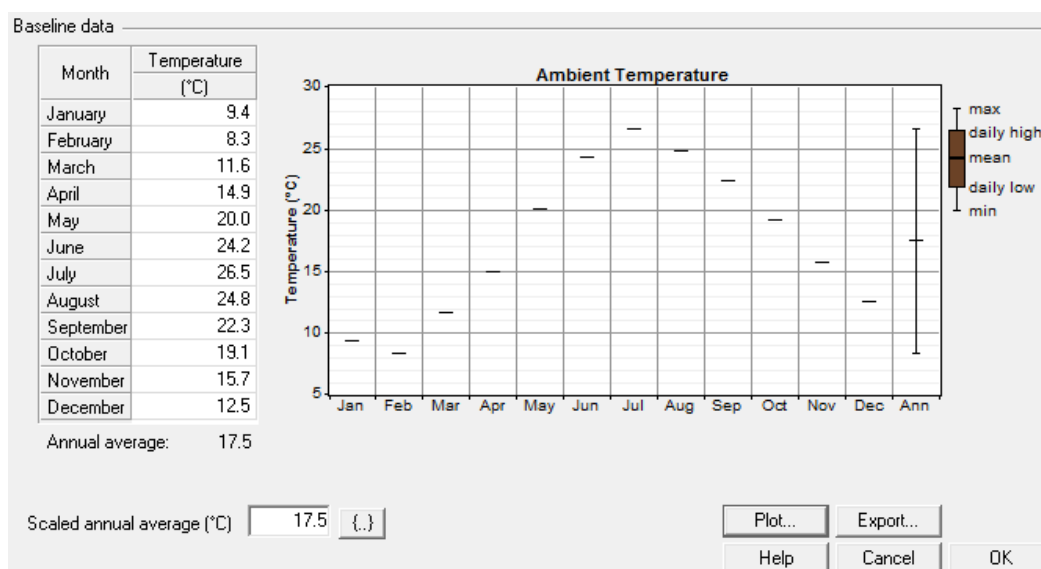
U ovom će dijelu biti provedena analiza osjetljivosti proračuna s obzirom na učinkovitost fotonaponskih modula, ugrađen sustav praćenja Sunca, cijenu sustava i tarifne modele za otkup i kupovinu električne energije. Analizirat će se slučaj bez uključene odgodive potrošnje i instaliranim fotonaponskim sustavima na 25% površine stambenih objekata na otoku Korčuli.



Slika 39. Učinkovitost modula, sustav praćenja Sunca i cijena

Za učinkovitost fotonaponskih modula se osim s do sada računatom vrijednošću od 13% u obzir uzimaju dodatne 4 vrijednosti (8, 10, 15, 17) koje obuhvaćaju raspon učinkovitosti skoro svih tipova fotonaponskih modula. Pored prvotno odabrane učinkovitosti, u vitičastoj zagradi stoji broj 5, a to znači da će HOMER prilikom simulacije uzimati u obzir svih 5 vrijednosti ranije navedenih učinkovitosti. Bitno je napomenuti kako su to učinkovitosti u ispitnim (laboratorijskim) uvjetima i kako su u stvarnim uvjetima te vrijednosti nešto niže. Kako se ovdje također uzima u obzir i sustav praćenja Sunca (dvoosni), tako kut postavljanja modula u odnosu na horizontalu i azimut postaju nebitni i HOMER ih zaključava. Na [Slika 39] se još može vidjeti kako utjecaj temperature u ovom slučaju više nije zanemariv pa se prema tome trebaju unijeti dodatne dvije vrijednosti, i to, temperaturni koeficijent snage i radna temperatura fotonaponskih ćelija. Temperaturni koeficijent snage je broj koji govori koliko izlazna snaga fotonaponskog sustava ovisi o temperaturi fotonaponskih ćelija. Za tu je vrijednost odabrano $-0,5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$, što znači da se za svaki stupanj Celzijusov povećanja temperature okoline, izlazna snaga fotonaponskog modula smanjuje za

0,5%. Prema [24] se radna temperatura kreće između 33 °C (najbolji slučaj) i 58 °C (najgori slučaj) dok je uobičajena temperatura oko 48 °C. U ovom je slučaju odabrana radna temperatura ćelije 47 °C. Ta je temperatura inače definirana pri Sunčevom zračenju od 0,8 kW/m², temperaturi okoline 20 °C i brzini vjetra od 1 m/s. Kako ovdje utjecaj temperature nije zanemariv, u HOMER je potrebno unijeti dodatne podatke o temperaturi okoliša u kojem se fotonaponski sustavi nalaze. Program tu temperaturu koristi prilikom računanja snage proizvedene električne energije. Prema [25] prosječne su mjesečne temperature zraka u 2005. godini na otoku Korčuli jednake temperaturama na [Slika 40]. Ovdje će se još u obzir uzeti i određeni raspon cijene sustava pa će se tako početna cijena sustava množiti određenim koeficijentima. Odabrane vrijednosti koeficijenata su 0,8, 1,1 i 1,2 i koeficijent 1, što znači da cijena ostaje ista, tj. jednaka početnoj cijeni sustava. To su ukupno 4 vrijednosti koje će HOMER prilikom simulacije uzeti u obzir.



Slika 40. Prosječne okolišne mjesečne temperature na Korčuli

U obzir će se još uzeti nekoliko različitih tarifnih modela za otkup i kupovinu električne energije. Kako je ranije definirano, cijena kWh električne energije kupljene iz mreže prema visokoj tarifi iznosi 1,06 kn (0,19 \$), a cijena kWh kupljene energije prema niskoj tarifi 0,53 kn (0,09 \$), dok cijena predane električne energije u mrežu iznosi 1,91 kn/kWh (0,34 \$/kWh). Posljednji iznos se odnosi na cijenu za isporučenu električnu energiju iz fotonaponske elektrane instalirane snage do uključivo 10 kW. Za provedbu analize osjetljivosti uzimaju se još dodatne dvije vrijednosti cijene isporučene električne energije u mrežu, i to, cijena jednaka cijeni kWh električne energije kupljene iz mreže u visokoj tarifi, 1,06 kn (0,19 \$) i niskoj tarifi, 0,53 kn (0,09 \$). Kod cijene za kupljenu električnu energiju, u

visokoj tarifi i niskoj tarifi su dodatno odabrane vrijednosti od 1,9 kn/kWh (0.34 \$/kWh) i 1,4 kn/kWh (0.25 \$/kWh).

Nakon unošenja navedenih parametara, HOMER provodi analizu osjetljivosti s ciljem iznalaženja najbolje opcije, tj. kombinacije unesenih parametara. Poslije završenog proračuna, pojavljuju se lista kombinacija poredanih prema isplativosti, od najisplativije prema manje isplativima [Slika 41].

PV Cap. Mult.	PV Eff. at STC (%)	VT Price (\$/kWh)	VT Sellback (\$/kWh)	NT Price (\$/kWh)	NT Sellback (\$/kWh)	PV (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.
1.00	13.0	0.190	0.340	0.090	0.340	646...	100000	\$ 148,173,024	-20,790,704	\$ -117,601,960	-0.159	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.090	0.190	646...	100000	\$ 148,173,024	-20,489,494	\$ -113,751,488	-0.154	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.090	0.090	646...	100000	\$ 148,173,024	-20,288,688	\$ -111,184,512	-0.151	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.340	0.340	646...	100000	\$ 148,173,024	-18,294,996	\$ -85,698,432	-0.116	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.340	0.190	646...	100000	\$ 148,173,024	-17,993,788	\$ -81,847,984	-0.111	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.340	0.090	646...	100000	\$ 148,173,024	-17,792,982	\$ -79,281,008	-0.107	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.250	0.340	646...	100000	\$ 148,173,024	-19,193,452	\$ -97,183,720	-0.132	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.250	0.190	646...	100000	\$ 148,173,024	-18,892,242	\$ -93,333,240	-0.126	0.80
1.00	13.0	0.190	0.340	0.250	0.090	646...	100000	\$ 148,173,024	-18,691,436	\$ -90,766,264	-0.123	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.090	0.340	646...	100000	\$ 148,173,024	-10,212,146	\$ 17,627,520	0.024	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.090	0.190	646...	100000	\$ 148,173,024	-9,910,937	\$ 21,477,982	0.029	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.090	0.090	646...	100000	\$ 148,173,024	-9,710,131	\$ 24,044,956	0.033	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.340	0.340	646...	100000	\$ 148,173,024	-7,716,439	\$ 49,531,032	0.067	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.340	0.190	646...	100000	\$ 148,173,024	-7,415,229	\$ 53,381,508	0.072	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.340	0.090	646...	100000	\$ 148,173,024	-7,214,423	\$ 55,948,484	0.076	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.250	0.340	646...	100000	\$ 148,173,024	-8,614,893	\$ 38,045,776	0.051	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.250	0.190	646...	100000	\$ 148,173,024	-8,313,684	\$ 41,896,236	0.057	0.80
1.00	13.0	0.190	0.190	0.250	0.090	646...	100000	\$ 148,173,024	-8,112,878	\$ 44,463,212	0.060	0.80
1.00	13.0	0.190	0.090	0.090	0.340	646...	100000	\$ 148,173,024	-3,159,775	\$ 107,780,496	0.146	0.80
1.00	13.0	0.190	0.090	0.090	0.190	646...	100000	\$ 148,173,024	-2,858,565	\$ 111,630,968	0.151	0.80

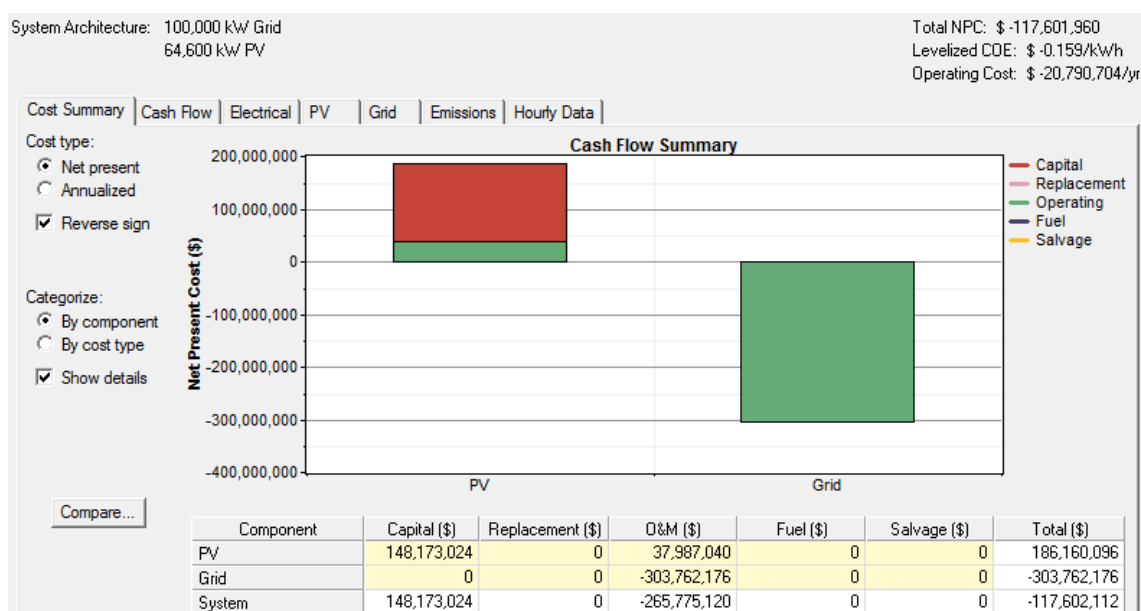
Slika 41. Rezultati analize osjetljivosti

Na [Slika 42] prikazan je optimalni sustav. Tu je kombinaciju parametara, između 1620 mogućih, HOMER izabrao kao najisplativiju. Idealna kombinacija unesenih parametara ima istu cijenu sustava (22937 \$) po instaliranom kW kao i istu učinkovitost fotonaponskih ćelija od 13% kao i kod računanja bez analize osjetljivosti. Za cijenu kupljene električne energije je naravno odabrana najniža cijena, i to, 1,06 kn/kWh (0,19 \$/kWh) u visokoj tarifi i 0,53 kn (0,09 \$) u niskoj tarifi, dok je za cijenu isporučene električne energije u mrežu HOMER odabrao najvišu cijenu, 1,91 kn/kWh (0,34 \$/kWh).

PV (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.
64600	100000	\$ 148,173,024	-20,790,704	\$ -117,601,960	-0.159	0.80

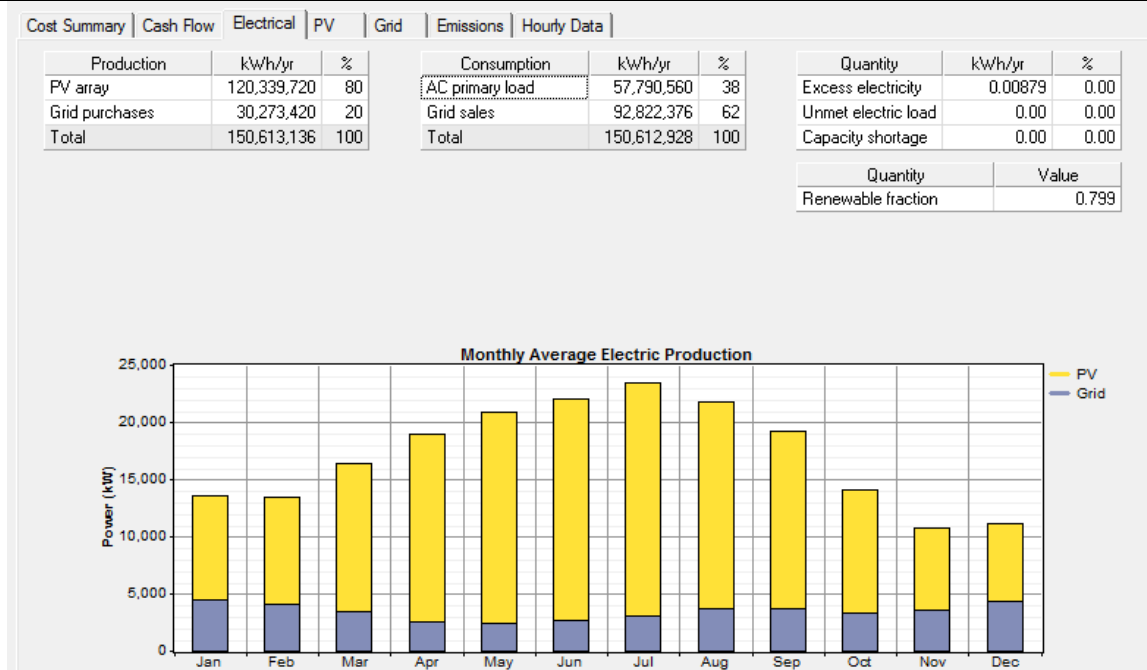
Slika 42. Optimalni sustav

Na [Slika 43], [Slika 44], [Slika 45] prikazani su troškovi optimalnog sustava i cijena električna energije, podaci o proizvodnji električne energije, te rad optimalnog fotonaponskog sustava. Kako je ranije navedeno, modelirani se sustav sastoji od 64,6 MW fotonaponskih sustava (25% površine) i 100 MW mreže. Investicijski troškovi sustava iznose preko 148 mil. \$ (148173024 \$). Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta od 25 godina i uz kamatnu stopu od 6% iznose 186 mil. \$ (186160096 \$). Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 303,8 mil. \$ (303762176 \$). Ako se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazi se do ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 117,6 mil. \$ (117602112 \$). Prosječna cijena za kWh proizvedene električne energije iznosi 0,159 \$/kWh (0,89 kn/kWh).

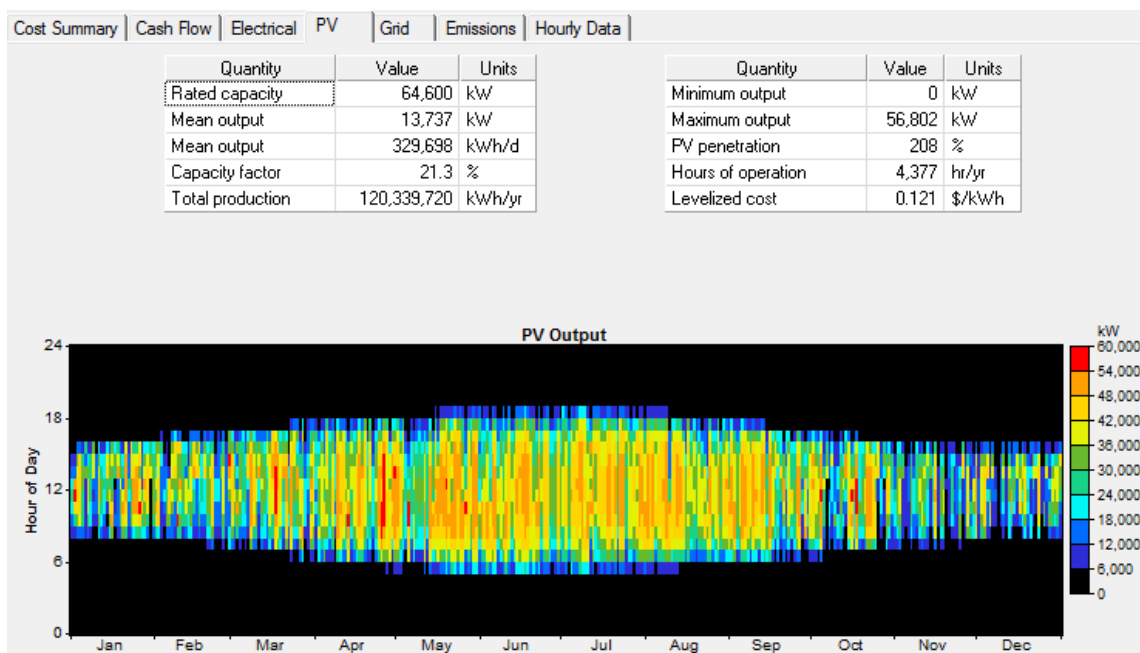


Slika 43. Troškovi optimalnog sustava i cijena električne energije (25%)

Od ukupno proizvedene električne energije (150,6 GWh/god.) većina (80%) je iz fotonaponskih sustava dok je ostatak (20%) iz mreže. Od te ukupne količine proizvedene energije 38% se koristi za podmirivanje potrošnje na cijelom otoku dok je 62% na raspolaganju u mreži. Prosječna dnevna proizvodnja električne energije fotonaponskih sustava iznosi 329,7 MWh/d.



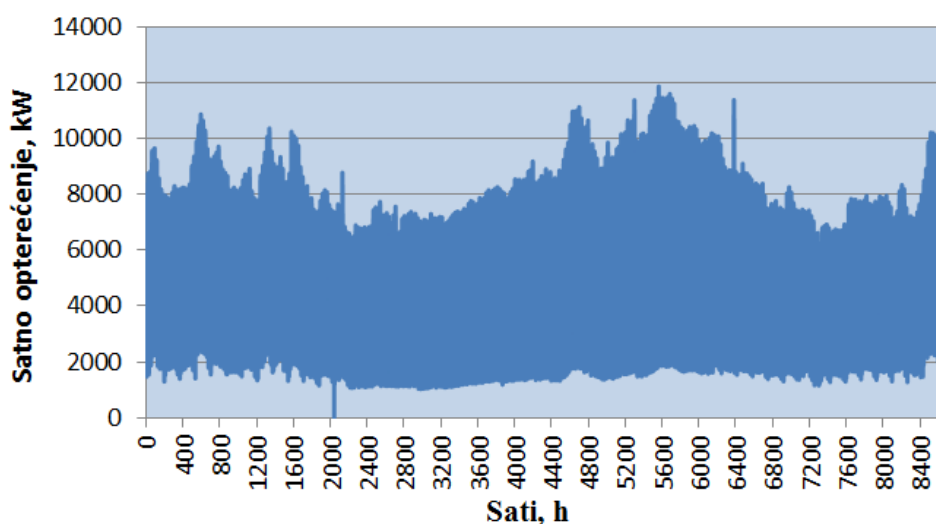
Slika 44. Podaci o proizvodnji električne energije optimalnog sustava (25%)



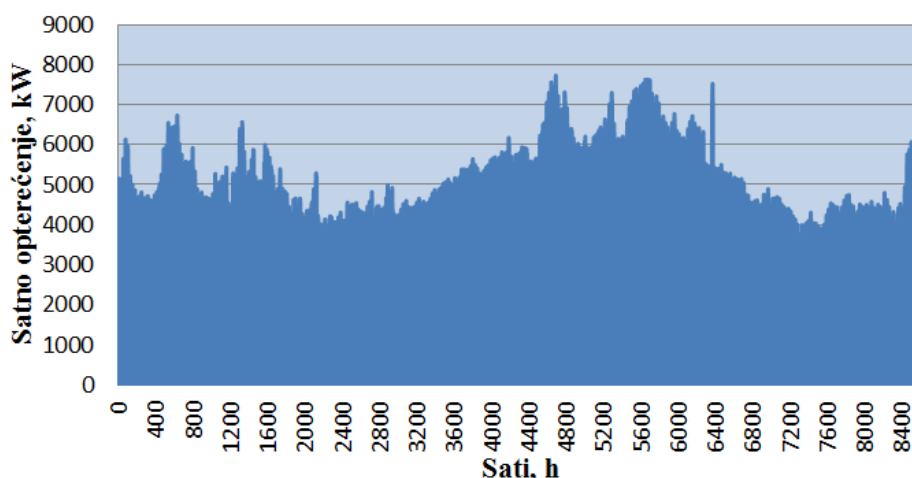
Slika 45. Prikaz rada optimalnog fotonaponskog sustava (25%)

3.4. H2RES model

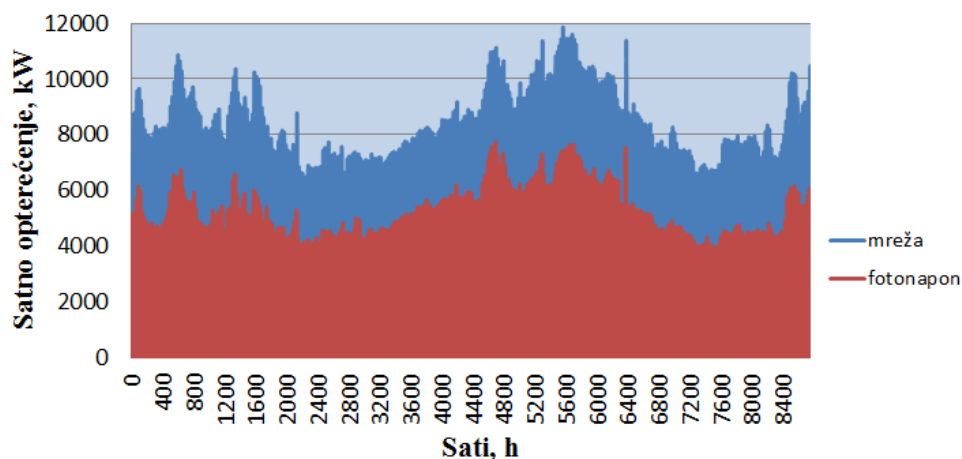
U ovom će se dijelu prikazati značajke modeliranog sustava u H2RES simulacijskom programu. Modelirani sustav se sastoji od 10 MW instaliranih fotonaponskih sustava i 12 MW mreže s time da je postavljeno ograničenje na maksimalno 70% električne energije iz fotonapona zbog sigurnosti mreže. Ukupna proizvodnja električne energije zadovoljava ukupnu potrošnju na Korčuli u iznosu od 57,7 GWh/god. Jedan dio te energije namiruje se iz mreže (36,2 GWh/god.) [Slika 46] dok se ostatak u iznosu od 21,5 GWh/god. uzima iz fotonaponskih sustava [Slika 47]. Ukupna električna energija proizvedena u fotonaponskim sustavima iznosi 2283 GWh/god. pa je višak proizvedene energije ogroman (2261,5 GWh/god.).



Slika 46. Mreža bez fotonaponskih sustava



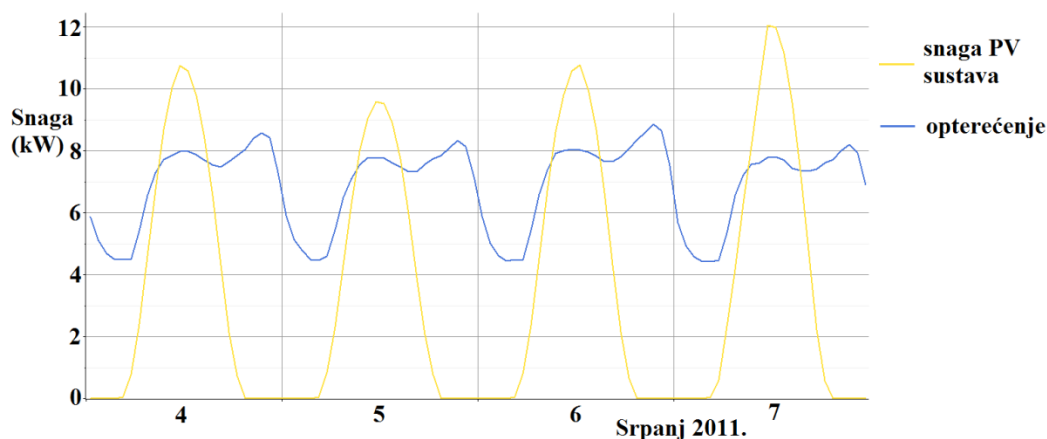
Slika 47. Energija isporučena iz fotonaponskih sustava u mrežu



Slika 48. Ukupna električna energija (mreža + fotonaponski sustavi)

Na [Slika 48] prikazana je ukupna električna energija iz mreže i iz fotonaponskih sustava potrebna da bi se zadovoljila ukupna potrošnja. Vršno opterećenje iznosi 11,8 MW dok je prosječno 6,6 MW.

Na [Slika 49] dana je usporedba u HOMER-u za slučaj instaliranih fotonaponskih sustava na 5% stambenih objekata na otoku bez uključene odgodive potrošnje. Vidi se kako je najveća snaga, a samim time i proizvodnja električne energije, sredinom dana pa će u tom razdoblju biti zadovoljena potrošnja dok je u večernjim satima, kada se postiže vrhunac potrošnje, električnu energiju potrebno kupovati iz mreže.



Slika 49. usporedba opterećenja i snage fotonaponskog sustava

4. ZAKLJUČAK

U radu se analizirao utjecaj izgradnje fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava otoka Korčule. Također je provedena analiza s ciljem utvrđivanja cijene proizvedene električne energije. Prilikom proračunavanja navedenoga korišten je računalni simulacijski program HOMER.

Nakon prikupljanja i analiziranja podataka potrebnih za simulaciju, iste su provedene. Prilikom analize proizvodnje električne energije i ekonomske isplativosti integracije fotonaponskih sustava na 5%, 25% i 50% stambenih objekata na otoku došlo se do sljedećih zaključaka. Najisplativiji sustav bi, prema HOMER-u, bio onaj koji pokriva 50% stambenih objekata. Iza njega je sustav s 25% pokrivenih stambenih objekata dok je na trećem mjestu sustav koji pokriva 5% stambenih objekata. U prvom je slučaju zarada najveća upravo zbog velike količine proizvedene električne energije predane u mrežu po cijeni prema tarifnom pravilniku. Međutim, značajan je dio proizvedene energije u fotonaponskim sustavima koja ne može biti potrošena na otoku pa je taj dio deklariran kao višak. Još jedna mana proizvodnje velike količine energije je ovdje došla do izražaja, a to je izlazna snaga sustava koja za više od 20% prelazi dozvoljeno opterećenje dalekovoda na otoku. Ovdje treba napomenuti kako su u radu provedeni grubi proračuni uz dosta pretpostavki i kako je po pitanju opterećenja mreže potrebno provesti dodatnu analizu.

Ako se u obzir uzme odgodiva, odnosno upravljana potrošnja, dio viška proizvedene energije je moguće iskoristiti. Upravo je to i pokazano u dijelu rada 3.2. U obzir je uzeta količina električne energije potrebna za zagrijavanje potrošne tople vode na otoku. Iz toga se može zaključiti kako bilo koja vrsta odgodive potrošnje može pozitivno utjecati na višak proizvedene električne energije, odnosno, može ju barem djelomično iskoristiti.

Na kraju rada je provedena analiza osjetljivosti s obzirom na učinkovitost fotonaponskih modula, ugrađen sustav praćenja Sunca, cijenu sustava i tarifne modele za otkup i kupovinu električne energije. Kao dodatni podaci za simulaciju, u HOMER su unesene vrijednosti veće ili manje od onih s kojima su se proračuni vršili u prethodnim iteracijama. Analizirao se slučaj bez odgodive potrošnje i instaliranim fotonaponskim sustavima na 25% površine stambenih objekata. Nakon provedene simulacije svih mogućih kombinacija unesenih parametara HOMER odabire najbolje rješenje. Odabrani sustav ima cijenu i učinkovitost fotonaponskih modula jednaku onima u simulacijama bez analize osjetljivosti, tj. sa samo jednom postavljenom veličinom kao ulaznim parametrom. Cijene

električne energije su, kao što je i bilo za očekivati, kod kupovine najniže unesene, dok su kod prodaje najviše unesene veličine, što je u skladu s ostvarivanjem najvećeg prihoda, prema čemu HOMER i odabire najbolje rješenje, odnosno kombinaciju parametara. Može se reći kako je HOMER jako koristan program kod ovakvog tipa modeliranja sustava jer na temelju nekoliko poznatih podataka može polučiti vrlo korisne rezultate koji mogu biti dobra orijentacija u daljnjem analiziranju nekog projekta.

LITERATURA

- [1] Labudović, B.: Osnove primjene fotonaponskih sustava, Energetika marketing, Zagreb, 2011.
- [2] Majdandžić Lj.: Fotonaponski sustavi [Priručnik], Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, Srednja škola Oroslavje,
http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf. [11. veljače 2014.]
- [3] Udruga Moj otok, http://mojotok.info/dt_portfolio/energetska-ucinkovitost/.
[12. veljače 2014.]
- [4] Cvrk, I., Diplomski rad: „Optimiranje korištenja solarne energije fotonaponskom pretvorbom“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011.,
http://www.ieee.hr/_download/repository/DR08ICvrk.pdf. [13. veljače 2014.]
- [5] Hemetek, B., Diplomski rad: „Planiranje energetskeg sustava otoka Lošinja primjenom RenewIslands metodologije“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.,
http://powerlab.fsb.hr/neven/pdf/supervision_of_msc_eq_thesis/19_03_2008_Diplomski_Boris_Hemetek.pdf. [13. veljače 2014.]
- [6] The Sietch Blog: „How Solar Panels Are Made – A Tutorial,
<http://blog.thesietch.org/2007/06/29/how-solar-panels-are-made-a-tutorial/>.
[15. veljače 2014.]
- [7] All about interest...: „Buying a Homer Solar System Can Be a Good Investment“,
<http://www.allaboutinterest.com/2013/08/buying-solar-system-can-be-good.html>.
[15. veljače 2014.]
- [8] Flamtron d.o.o.: „Autonomni ili samostalni fotonaponski sustavi“,
<http://flamtron.hr/solar/index.php/hr/fotonaponski-sustavi/autonomni-ili-samostalni-fotonaponski-sustavi>. [15. veljače 2014.]
- [9] Solar projekt Hrvatska: „Mrežni (Grid Connected) FN sustavi“,
http://www.solarprojekt.hr/index-mrezni_fotonaponski_sustavi.html.
[16. veljače 2014.]

- [10] Alternative Energy Systems: „PV grid connected“, <http://www.aes-tunisie.com/en/photovoltaics-grid-connection.php>. [16 veljače 2014.]
- [11] Photovoltaic Solar Power: „Modular BIPV systems“, <http://www.planetenergy.co.uk/photovoltaics.htm>. [16 veljače 2014.]
- [12] Photovoltaics: „Benefits of Building – Integrated Photovoltaics“, <http://www.yoursunyourenergy.com/Benefits-of-Building-Integrated-Photovoltaics.htm>. [16 veljače 2014.]
- [13] Homer, <http://www.homerenergy.com/>. [16 veljače 2014.]
- [14] Karadža, N., Bačan, A., Horváth, L., Knežević, S.: „Mali vjetroagregati i fotonaponski moduli za autonomne aplikacije na otocima Primorsko - goranske županije“, Zagreb, rujan 2009., <http://www.zavod.pgz.hr/docs/zzpuHR/documents/182/Original.pdf>. [17. veljače 2014.]
- [15] Kalogjera, D.: „Prirodno geografske značajke“, Korčula (UNESCO Tentative List), <http://www.korcula.hr/o-korculi/prirodno-geografske-znacajke/>. [13. veljače 2014.]
- [16] Solvis, <http://www.solvis.hr/hr/advice/suncevo-zracenje-na-podrucju-hrvatske/?action=lngChng>. [12. veljače 2014.]
- [17] PVGIS, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>. [17. veljače 2014.]
- [18] RITEH za projektiranje, konzalting i inženjering d.o.o., <http://www.riteh.eu/Index.aspx>. [19. veljače 2014.]
- [19] Marinček, T., Rozman, I.: „Nadzemni 110 kV dalekovod ili 110 kV podzemni kabel: Kriteriji izbora“, <http://www.ho-cired.hr/referati/SO5-06.pdf>. [12. veljače 2014.]
- [20] Komen, V.: Prijenos i distribucija električne energije, Kabelski elektroenergetski vodovi – 3. predavanje, Tehnički fakultet u Rijeci, 2008/09.
- [21] Dubrovačko – neretvanska županija: „Prostorni plan županije“, http://www.edubrovnik.org/kartografski_prikaz_23.php. [20 veljače 2014.]

- [22] Homer, upute,
http://www.etfos.unios.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti_dodiplomski/692HOMER_upute.pdf. [22. veljače 2014.]
- [23] Institut za turizam: „Hrvatski turizam u brojkama“,
<http://www.iztg.hr/UserFiles/Pdf/Projekti/Informacije/Hrvatski-turizam-u-brojkama-4-2012.pdf>. [23. Veljače 2014.]
- [24] PVCDROM, <http://pveducation.org/pvcdrom>. [25. veljače 2014.]
- [25] Grbin, I., Korčula.NET meteorološka stanica,
http://www.korcula.net/weather/wx_analiza.htm. [25. veljače 2014.]

PRILOZI

- I. CD-R disc