

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br.125

**OPTIMIRANJE KORIŠTENJA SOLARNE
ENERGIJE FOTONAPONSKOM
PRETVORBOM**

Ivan Cvrk

Zagreb, ožujak 2011.

Ivan Cvrk
0036400493

Sažetak

U ovom diplomskom radu istraženi su energetske-ekonomski aspekti posebnih izvedbi fotonaponskih sustava. Jedan dio istraživanja odnosi se na investicijski trošak sustava, dok se drugi dio istraživanja odnosi na optimizaciju fotonaponskih sustava u svrhu bolje iskorištenosti Sunčeve energije. Istraživanje fotonaponskih sustava provedeno je za različite lokacije i različite izvedbe fotonaponskih sustava. Uspoređeni su fotonaponski sustavi sa panelima postavljenim pod fiksnim kutom, sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca i sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca. Program kojim je provedena analiza izvedivosti, usporedba raznih konfiguracija fotonaponskih sustava te pronađeno optimalno rješenje za svaku lokaciju je računalni simulacijski program HOMER. Iako postoji niz računalnih simulacijskih programa kojim se mogu modelirati fotonaponski sustavi, HOMER je zasada jedini besplatni program koji obuhvaća sve aspekte prilikom modeliranja sustava te pronalazi optimalno rješenje unutar zadanih mogućnosti. Prilikom modeliranja fotonaponskih sustava HOMER-om, nastojalo se prikupiti što točnije podatke o investicijskim troškovima i troškovima rada i održavanja pojedinih komponenti. Također, tehnički podaci komponenti koje su razmatrane prilikom modeliranja su preuzeti sa tvorničkih specifikacija. Za svaku lokaciju i izvedbu fotonaponskog sustava, računalnim programom HOMER pronađena rješenja su i komentirana. Nakon provedenih simulacija i usporedbe rezultata vidljivo je koliko konfiguracije fotonaponskih sustava značajno ovise o lokaciji, raspoloživosti Sunčevog zračenja te investicijskim troškovima pojedinih komponenti. Računalni simulacijski programi služe za analizu izvedivosti, dok stvarno ponašanje sustava nije moguće točno predvidjeti. Ipak, pristupom koji je primijenjen u ovom radu moguće je dobiti kvalitetne rezultate na osnovu kojih se može donijeti odluka o izvedivosti pojedinog fotonaponskog sustava na specificiranoj lokaciji.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Zemlja i sunce	3
2.1. Sunčevo zračenje, ozračenje i osunčavanje.....	3
2.2. Sunce kao izvor energije	4
2.3. Geometrijski odnos zemlje i sunca	5
2.4. Dijagram kretanja Sunca po nebu	13
2.5. Računanje vremena	17
3. Sunčevo zračenje	18
3.1. Ekstraterestričko zračenje	18
3.2. Mjerenje sunčevog zračenja.....	20
3.3. Utjecaj atmosfere na sunčevo zračenje.....	22
3.3.1. Izravno (direktno) Sunčevo zračenje	24
3.3.2. Raspršeno (difuzno) Sunčevo zračenje.....	26
3.3.3. Odbijeno (reflektirano) Sunčevo zračenje	28
3.4. Trajanje sijanja Sunca (osunčavanje).....	31
4. Proračun Sunčevog zračenja	33
4.1. Proračun prizemnog Sunčevog zračenja.....	33
4.1.1. Proračun koeficijenata a i b	34
4.1.2. Određivanje satnih ozračenosti iz dnevnih	36
4.1.3. Udio raspršenog zračenja u ukupnom.....	36
4.2. Sunčevo zračenje na nagnutu plovu	37
4.2.1. Proračun Sunčeva zračenja na nagnutu plovu (Liu, Jordan, Klein).	38
5. Izravno pretvaranje energije Sunčevog zračenja u električnu energiju fotonaponskim ili Sunčevim ćelijama	41
5.1. Povijest fotonaponskih (PV) ćelija	41

5.2.	Fotonaponski efekt	42
5.3.	Način izrade i tipovi fotonaponskih ćelija	44
5.3.1.	Sunčeve ćelije izrađene od monokristalnog (c-Si) silicija	44
5.3.2.	Sunčeve ćelije izrađene od polikristalnog silicija (p-Si)	46
5.3.3.	Sunčeve ćelije izrađene od amornog silicija (a-Si)	47
5.3.4.	Polikristalne tankoslojne sunčeve ćelije	48
5.3.5.	Monokristalne tankoslojne sunčeve ćelije i multijunction strukture ćelija	50
5.4.	Fotonaponski sustavi (ćelija, modul, mreža).....	52
6.	Sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca.....	56
6.1.	Vrste sustava za praćenje	57
6.1.1.	Polarni sustavi za praćenje.....	57
6.1.2.	Sustavi za praćenje sa horizontalnom osi rotacije.....	58
6.1.3.	Sustavi za praćenje sa vertikalnom osi rotacije	59
6.1.4.	Visinsko – azimutni sustavi za praćenje	60
6.2.	Vrste pogona	62
6.2.1.	Aktivni sustavi za praćenje	62
6.2.2.	Pasivni sustavi za praćenje	62
6.2.3.	Kronološki sustav za praćenje.....	63
7.	PROJEKTNI ZADATAK: Usporedba fotonaponskog sustava sa fiksnim kutom i fotonaponskih sustava sa sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca	64
7.1.	Usporedba fotonaponskih sustava računalnim simulacijskim programom HOMER.....	65
7.2.	Metodologija rada HOMER računalnim programom	66
7.3.	Procjena raspoloživog Sunčevog resursa	67
7.4.	PROJEKT 1: Fotonaponski sustav sa fiksnim kutom, lokacija grad Zagreb	71
7.4.1.	Podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja za grad Zagreb	71
7.4.2.	Definiranje parametara mreže	74
7.4.3.	Fotonaponski (PV) sustav	76

7.4.4.	Pretvarač.....	79
7.4.5.	Troškovi projekta.....	80
7.4.6.	Rezultati simulacije.....	81
7.5.	PROJEKT 2: Fotonaponski sustav sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Zagreb	84
7.5.1.	Rezultati simulacije.....	86
7.6.	PROJEKT 3: Fotonaponski sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Zagreb.....	89
7.6.1.	Rezultati simulacije.....	91
7.7.	PROJEKT 4: Fotonaponski sustav sa fiksnim kutom , lokacija grad Split	94
7.7.1.	Rezultati simulacije.....	96
7.8.	PROJEKT 5: Fotonaponski sustav sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Split	99
7.8.1.	Rezultati simulacije.....	100
7.9.	PROJEKT 6: Fotonaponski sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Split	104
7.9.1.	Rezultati simulacije.....	105
8.	Sumiranje rješenja projektnih zadataka dobivenih HOMEROM	108
9.	Zaključak	111
10.	Literatura	112

Popis kratica

- AM - optička masa zraka (eng. *air mass*)
DHMZ - Državni hidrometeorološki zavod
EIHP - Energetski institut Hrvoje Požar
ESRA - Europski atlas Sunčevog zračenja (eng. *European Solar Radiation Atlas*)
GMP - glavna meteorološka postaja
ICAO - Međunarodna organizacija za civilni transport (eng. *International Civil Aviation Organization*)
IEC - Međunarodna elektrotehničko povjerenstvo (eng. *International Electrotechnical Commission*)
ISO - Međunarodna organizacija za normizaciju (eng. *International Organization for Standardization*)
KŠP - kišomjerna meteorološka postaja
LAT - pravo Sunčevo vrijeme (eng. *local apparent time*)
LMT - lokalno zonsko vrijeme (eng. *local mean time*)
OMP - obična meteorološka postaja
WMO - Svjetska meteorološka organizacija (eng. *World Meteorological Organization*)

Popis općih oznaka

Osnovni principi označavanja ozračenja i ozračenosti:

- G ukupno,
- D raspršeno (difuzno) – raspršena komponenta Sunčevog zračenja,
- B izravno (direktno) – izravna komponenta Sunčevog zračenja,
- R odbijeno (reflektirano) – odbijena komponenta Sunčevog zračenja,
- I komponenta izravnog ozračenja okomita na upadnu plohu.

Vrijednosti ozračenosti odnose se na vremensko razdoblje:

- h satne vrijednosti,
- d dnevne vrijednosti,
- m mjesečne vrijednosti.

Vremenska razdoblja mogu se kombinirati sa zagradama. Na primjer $(G_d)_m$ označava srednju mjesečnu vrijednost ukupne dnevne ozračenosti vodoravne plohe.

Oznake kutova

j'	dnevni kut, dan u godini iskazan kao kut koji Zemlja zatvori pri kruženju oko Sunca od početka godine do dana j u 12 sati
α	azimut plohe
α_S	azimut Sunca
β	kut nagiba nagnute plohe
β_{opt}	optimalni kut nagiba nagnute plohe
γ_S	visina Sunca
δ	deklinacija Sunca
ζ_S	zenitni kut Sunca
$\theta(\beta, \alpha)$	upadni kut na nagnutu plohu azimuta α i nagiba β
λ	zemljopisna dužina
λ_r	referentni meridijan vremenske zone
ϕ	zemljopisna širina
ω	satni kut Sunca
ω_S	kut zalaska Sunca za vodoravnu plohu
ω_S	kut zalaska Sunca za nagnutu plohu

Oznake vezane uz zračenje

OZNAKA	OPIS	JEDINICA
B	izravno ozračenje	Wm^{-2}
B_d	dnevna izravna ozračenost	Whm^{-2}
$(B_d)_m$	srednja mjesečna vrijednost dnevne izravne ozračenosti	Whm^{-2}
B_h	satna izravna ozračenost	Whm^{-2}
$(B_h)_m$	srednja mjesečna vrijednost satne izravne ozračenosti	Whm^{-2}
D	raspršeno ozračenje	Wm^{-2}
D_d	dnevna raspršena ozračenost	Whm^{-2}
$(D_d)_m$	srednja mjesečna vrijednost dnevne raspršene ozračenosti	Whm^{-2}
D_h	satna raspršena ozračenost	Whm^{-2}
$(D_h)_m$	srednja mjesečna vrijednost satne raspršene ozračenosti	Whm^{-2}
G	ukupno ozračenje	Wm^{-2}
G_C	ukupno ozračenje za vedro nebo	Wm^{-2}
G_d	dnevna ukupna ozračenost	Whm^{-2}
$(G_d)_m$	srednja mjesečna vrijednost ukupne dnevne ozračenosti	Whm^{-2}
G_h	satna ukupna ozračenost	Whm^{-2}
$(G_h)_m$	srednja mjesečna vrijednost ukupne satne ozračenosti	Whm^{-2}
G_{0h}	dnevna ukupna ekstraterestrička ozračenost vodoravne plohe	Whm^{-2}
$(G_d)_m$	srednja mjesečna vrijednost dnevne ukupne ekstraterestričke ozračenosti vodoravne plohe	Whm^{-2}
I	izravno ozračenje	Wm^{-2}
I_d	dnevna izravna ozračenost	Whm^{-2}
$(I_d)_m$	srednja mjesečna vrijednost dnevne izravne ozračenosti	Whm^{-2}
I_h	satna izravna ozračenost	Whm^{-2}
$(I_h)_m$	srednja mjesečna vrijednost satne izravne ozračenosti	Whm^{-2}
I_0	Sunčeva konstanta (1367 Wm^{-2})	Wm^{-2}
R	odbijeno ozračenje	Wm^{-2}
R_d	dnevna odbijena ozračenost	Whm^{-2}
$(R_d)_m$	srednja mjesečna vrijednost dnevne odbijene ozračenosti	Whm^{-2}
R_h	satna odbijena ozračenost	Whm^{-2}
$(R_h)_m$	srednja mjesečna vrijednost satne odbijene ozračenosti	Whm^{-2}
N	količina naoblake	osmine (desetine)
λ	valna duljina zračenja	nm

Popis Slika

Slika 1. Utjecaj sfernosti Zemlje na ozračenje [2]	6
Slika 2. Utjecaj visine Sunca na ozračenje vodoravne plohe [2].....	6
Slika 3. Utjecaj nagiba plohe na ozračenje [2].....	6
Slika 4. Geometrijski odnos Zemlje i Sunca	7
Slika 5. Zemljopisna širina Φ , deklinacija Sunca δ i satni kut Sunca ω u odnosu na promatranu točku [2]	9
Slika 6. Prikaz kutova za računanje zračenja na nagnutu plohu [2].....	10
Slika 7. Polarni Sunčev dijagram [2].....	15
Slika 8. Cilindrični Sunčev dijagram s ucrtanim okolnim predmetima [2].....	15
Slika 9. Piranometar CM 11 Kipp & Zonen [2]	21
Slika 10. Poluvodički piranometar SP-lite Kipp & Zonen [2]	22
Slika 11. Optička masa zraka [2].....	23
Slika 12. Utjecaj atmosfere na upadno Sunčevo zračenje [2]	25
Slika 13. Pirheliometar Kipp & Zonen CH1 [17].....	25
Slika 14. Spektar zračenja AM 0 i Am 1,5 i spektar zračenja crnog tijela temperature 5800 K normaliziran na 1367 W/m^2 s utjecajem atmosferskih plinova [17]	27
Slika 15. Piranometar CM11 Kipp & Zonen sa sjenilom CM 121 za mjerenje raspršenog Sunčevog zračenja [17]	28
Slika 16. Albedometar CM7B Kipp & Zonen [17].....	30
Slika 17. Heliograf Negretti & Zambra (David Friend Productions, San Diego, California) [17].....	32
Slika 18. Prikaz fotonaponskog efekta [10]	43
Slika 19. Czochralski proces [10]	45
Slika 20. Struktura tipične monokristalne (c-Si) ćelije te stvarni izgled [10]	46
Slika 21. Struktura amorfne a-Si ćelije te praktična primjena u objektima [10]	48

Slika 22. Struktura polikristalne tankoslojne sunčeve ćelije te izgled krajnjeg proizvoda [10].....	49
Slika 23. Struktura Ga-As multijunction Sunčeve ćelije te proces apsorpiranja svjetlosti [10].....	51
Slika 24. Poprečni presjek PV modula sačinjenog od kristaličnog silicija [10]	52
Slika 25. Prikaz off-grid i on-grid PV sustava [10].....	53
Slika 26. Prikaz primjene PV modula sačinjenih od kristaličnog silicija (c-Si ili p-Si) [10]	54
Slika 27. Prikaz implementacije a-Si tehnologije u stambeni objekt (dvostruka primjena) [10]	54
Slika 28. Prikaz integracije polikristalne tehnologije tankog filma u poslovne zgrade	55
Slika 29. Prikaz koncentratorskog sustava sa Ga-As sunčevim ćelijama [10]	55
Slika 30. Dvorišna instalacija pasivnih, jednoosnih sustava za praćenje. Sustav je prikazan u zimskom položaju, nagnut prema jugu. Visoki nosači omogućavaju prolaženje i iskorištavanje prostora ispod fotonaponskih panela za sadnju biljaka, koje su onda zaštićene od jakog podnevnog Sunca [4].....	56
Slika 31. Jednoosni SunPower T20 sustav za praćenje, sa grubom polarnom orijentacijom, u Nellis zračnoj bazi, u Nevadi, USA. Nellis solarnu elektranu je projektirala i izgradila SunPower korporacija [4].....	58
Slika 32. Wattsun HZ-serije linearni sustavi za praćenje u Sjevernoj Koreji. Ovi sustavi za praćenje koriste horizontalnu os [4].	59
Slika 33. Gemini House u cijelosti rotira oko svoje osi i solarni paneli se rotiraju neovisno o kući, dopuštajući kontrolu prirodnog grijanja od Sunca [4].	59
Slika 34. Parabolični tanjur sa Sterling-ovim sistemom [4].	60
Slika 35. Energy Innovations, sunflower testne jedinice [4].....	61
Slika 36. Glava Zomework-ovog pasivnog sustava za praćenje [4].....	63
Slika 37. Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem [2].....	70

Slika 38. Prosječne srednje mjesečne vrijednosti ukupnog dnevnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu za grad Zagreb te ostali podaci potrebni za simulaciju.....	71
Slika 39. Godišnji prikaz globalnog (ukupnog) Sunčevog zračenja u gradu Zagrebu	73
Slika 40. Prikaz tarifa i njihov raspored	75
Slika 41. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]	78
Slika 42. Prikaz troškova projekta, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom].....	80
Slika 43. Prikaz troškova modeliranog sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom].....	81
Slika 44. Podaci o proizvodnji električne energije, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom] .	82
Slika 45. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]	83
Slika 46. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]	83
Slika 47. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	85
Slika 48. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	86
Slika 49. Podaci o proizvodnji električne energije, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	87
Slika 50. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	88
Slika 51. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	88

Slika 52. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	90
Slika 53. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	91
Slika 54. Podaci o proizvodnji električne energije, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	92
Slika 55. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	93
Slika 56. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca].....	93
Slika 57. . Prosječne srednje mjesečne vrijednosti ukupnog dnevnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu za grad Split te ostali podaci potrebni za simulaciju	94
Slika 58. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Split, PV sa fiksnim kutom]	95
Slika 59. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Split, PV sa fiksnim kutom]	96
Slika 60. Podaci o proizvodnji električne energije, [Split, PV sa fiksnim kutom] ...	97
Slika 61. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Split, PV sa fiksnim kutom].....	98
Slika 62. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Split, PV sa fiksnim kutom]	98
Slika 63. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	99
Slika 64. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	101

Slika 65. Podaci o proizvodnji električne energije, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	101
Slika 66. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	102
Figure 67. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	103
Slika 68. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	104
Slika 69. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	105
Slika 70. Podaci o proizvodnji električne energije, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	106
Slika 71. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	107
Slika 72. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]	107

Popis Tablica

Tablica 1. Sunčeve konstante po planetima [2]	18
Tablica 2. Prosječan albedo za karakteristične površine [2]	29
Tablica 3. Raspoloživost Sunčevog potencijala i ambijentalni podaci za grad Zagreb	68
Tablica 4. Raspoloživost Sunčevog potencijala i ambijentalni podaci za grad Split	69
Tablica 5. Tarifni modeli za kupce na NISKOM NAPONU:	74
Tablica 6. Investicijski troškovi fotonaponskog sustava nazivne snage 500 W [13]	78
Tablica 7. Troškovi investicije te rada i održavanja pretvarača [13]	79
Tablica 8. Investicijski troškovi fotonaponskog sustava sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca nazivne snage 500 W [13]	84
Tablica 9. Investicijski troškovi fotonaponskog sustava sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca nazivne snage 500 W [13]	89
Tablica 10. Prikaz rješenja projektnih zadataka dobivenih HOMER-om [lokacija, grad Zagreb]	108
Tablica 11. Prikaz rješenja projektnih zadataka dobivenih HOMER-om [lokacija, grad Split]	109

1. Uvod

Posljednjih godina postoji sve veći interes za obnovljive energetske izvore, osobito za Sunčevu (solarnu) energiju. Nakon energetske krize 1973. godine, postali su sagledivi problemi energije u budućnosti. Da bi se energetska kriza učinila podnošljivom, trebalo bi razviti nove izvore energije, djelotvornije iskorištavati energiju, a u skladu s tim mijenjati način života, štedjeti energiju.

Značajniji udio Sunčeve energije u pokrivanju energetske potrebe mogao bi se očekivati u bliskoj budućnosti. Da bi sunčana energija zamijenila stare izvore, potrebno je da bude jeftinija od njih. Zbog specifičnosti (promjenljivost, mala gustoća, nepouzdanost) taj je izvor skup, a često i nepraktičan, te jedino nedostatak drugih, konvencionalnih izvora - nafte ili ugljena - odnosno problemi pri njihovoj upotrebi mogu uzrokovati da ih sunčana energija djelomično zamijeni.

Razne su procjene o iskorištavanju Sunčeve energije u budućnosti. Neke su pesimistične, druge, naprotiv, suviše optimistične. Svi se, međutim, slažu da će povećati udio Sunčeve energije u budućoj energetskej potrošnji. Jedno je također sigurno: što se više novca i truda uloži u istraživanja, bit će brža i djelotvornija njezina primjena. Prije tridesetak godina samo su malobrojni pojedinci istraživali to područje. Danas većina zemalja ima program istraživanja primjene Sunčeve energije. Međutim, za ta istraživanja namijenjeno je mnogo manje sredstava nego za istraživanja drugih izvora energije.

Postoje dva osnovna načina upotrebe Sunčeve energije, prvi je pretvorba u toplinsku energiju, a drugi je pretvorba u električnu.

Sunčeva energija se može na više načina pretvoriti u električnu energiju. Najjednostavnija je izravna pretvorba pomoću Sunčevih ćelija. Princip rada Sunčevih ćelija temelji se na fotonaponskom efektu: kad se Sunčevo zračenje apsorbira u Sunčevoj ćeliji, na njezinim se krajevima pojavljuje elektromotorna sila tako da se ćelija obasjana Sunčevim zračenjem može upotrijebiti kao izvor električne energije.

Prednosti fotonaponske konverzije su mnogobrojne. Sunčeve ćelije izravno pretvaraju Sunčevu energiju u električnu bez pokretnih mehaničkih dijelova, trebaju minimalno održavanje uz radni vijek od dvadesetak godina, itd. Mane su

im intermitentna proizvodnja električne energije, tj. samo u periodu osunčanja i to proporcionalno jakosti upadnoga Sunčevog zračenja, gustoća snage koju daju je mala (najviše do 100 W/m^2).

Najveći problem u zemaljskoj primjeni sunčanih ćelija jest njihova visoka cijena. Iako se posljednjih godina znatno napredovalo u tehnologiji izrade sunčanih ćelija, one su, na žalost, danas još preskupe za dobivanje električne energije i uglavnom se primjenjuju tamo gdje se ne mogu upotrijebiti drugi izvori. Međutim, cijena im ipak stalno pada. Kad su se 1954. pojavile, cijena im je bila oko 10000 \$ po watu vršne snage, tj. snage pri ozračenju od 1000 W/m^2 , 1965. cijena im je pala na 1000 \$/W, 1973. na 300 \$/W 1975. na 80 \$/W, a 1977. na oko 15 \$/W. Današnja im je cijena oko 4 \$/W. Cijena ove tehnologije i dalje pada u prosjeku 20% godišnje.

Izravna pretvorba Sunčeve energije u električnu još je preskupa da bi bila ekonomična. Cijena sunčanih ćelija trebala bi biti oko deset puta manja da bi one bile ekonomski prihvatljive. Taj se cilj može postići ako se intenzivnim istraživanjem uspiju naći novi materijali i pojednostavi tehnologija proizvodnje. Sadašnju tehnologiju proizvodnje ćelija od monokristalnog silicija treba učiniti jeftinijom i povećati efikasnost tih ćelija. Istraživanje novih materijala, ćelija od polikristalnog i amornog silicija, CdS, GaAs i izrada drugih poluvodičkih materijala te upotreba koncentratora u sustavima Sunčevih ćelija, vjerojatno će smanjiti cijenu Sunčeve električne energije i omogućiti njezinu masovnu primjenu. Teško je, međutim, precizno preoreći kad će se to dogoditi. Rezultati dosadašnjih istraživanja, ipak, pobuđuju optimizam.

Iako je sada doprinos sunčanih ćelija energetske potrebama zanemariv, ipak su one važne u mnogim primjenama. Njihova je upotreba nužna u satelitima i svemirskim brodovima, gdje su se prvenstveno i počele primjenjivati. Njihove zemaljske primjene zasad su ograničene uglavnom na mjesta gdje nema drugih izvora električne energije. Signali na prijelazima preko željezničke pruge, udaljeni telekomunikacijski sustavi (npr. u planinama, na otocima i sl.), telefonske centrale, svjetionici, električne ograde na pašnjacima, sustavi za navodnjavanje, neki su od primjera gdje se uspješno primjenjuju Sunčeve ćelije.

Korištenjem Sunčeve energije smanjuje se potreba za fosilnim gorivima, kao i onečišćenje okoliša prouzročeno njihovim izgaranjem. Tehnologija korištenja Sunčeve energije ne proizvodi stakleničke plinove koji uzrokuju globalno zatopljenje i ne proizvodi radioaktivni otpad kao naslijeđe našim potomcima [1].

2. Zemlja i sunce

2.1. Sunčevo zračenje, ozračenje i osunčavanje

Ozračenje (iradijancija) je gustoća energetskega toka Sunčevog zračenja i jednako je omjeru energetskega toka Sunčevog zračenja i površine plohe okomite na smjer tog zračenja. Jedinica za ozračenje je vat po četvornom metru (W/m^2).

Ozračenost (iradijacija) je gustoća dozračene energije koja u promatranom vremenu upadne na jediničnu površinu plohe. Dobiva se integriranjem ozračenja po vremenu, a 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.

Na putu kroz atmosferu Sunčevo zračenje slabi jer se apsorbira¹ zbog interakcija s plinovima i vodenom parom i raspršuje na molekulama plinova i česticama prašine. Zbog toga Sunčevo zračenje do tla dopijeva kao izravno i kao raspršeno zračenje.

Izravno (direktno) Sunčevo zračenje dolazi izravno iz prividnog smjera Sunca.

Trajanje osunčavanja (skraćeno samo osunčavanje, trajanje sijanja Sunca, insolacija) je razdoblje u kojem je izravno Sunčevo ozračenje veće od 120 W/m^2 . Osunčavanje se mjeri u satima.

Raspršeno (difuzno) Sunčevo zračenje nastaje raspršenjem Sunčevog zračenja u atmosferi i do tla dopire iz svih smjerova neba.

Ukupno (globalno) Sunčevo zračenje na vodoravnoj plohi sastoji se od izravnog i raspršenog Sunčevog zračenja. Nagnuta ploha osim izravnog i raspršenog zračenja prima i od tla odbijeno Sunčevo zračenje.

Odbijeno (reflektirano) Sunčevo zračenje je dio Sunčevog zračenja koji se odbije od tla ili vodenih površina. Ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu sastoji se od izravnog, raspršenog i od tla odbijenog zračenja [2].

¹ apsorpcija – međusobno djelovanje elektromagnetskog zračenja i tvari pri čemu tvar upija zračenje

2.2. Sunce kao izvor energije

Sunce je velika užarena plinovita kugla promjera 1,39 milijuna kilometara i uzrok svih energetskih promjena u atmosferi. Zemlja se vrti oko Sunca (revolucija² Zemlje) u eliptičnoj putanji s vrlo malim ekscentricitetom ($E=0,017$) tako da se udaljenost Zemlje i Sunca mijenja vrlo malo tijekom godine. Srednja udaljenost Zemlje i Sunca je 149,68 milijuna km. U perihelu³, početkom siječnja, Zemlja je 1,67 posto bliža, a u afelu⁴, početkom srpnja, Zemlja je 1,67 posto udaljenija od Sunca. Kako se Sunčevo zračenje mijenja s kvadratom udaljenosti, Zemlja u siječnju prima 6,9 posto više Sunčeve energije nego u srpnju. Prema tome, srednje siječnjaške temperature bi trebale biti više od srednjih srpanjskih, zima bi na sjevernoj polutki trebala biti toplija nego na južnoj, a ljeto na južnoj polutki toplije od ljeta na sjevernoj. U stvarnosti je sve obratno jer odnosi u atmosferi značajno ovise i o drugim čimbenicima, trajanju osunčavanja, kutu upada Sunčevih zraka na površinu zemlje, raspodjeli kopna i mora i općoj cirkulaciji atmosfere.

Sunce se sastoji uglavnom od vodika i helija. U unutrašnjosti Sunca vodik se nuklearnim reakcijama fuzije pretvara u helij što rezultira oslobađanjem velikih količina energije. Uslijed tih reakcija temperatura u unutrašnjosti Sunca premašuje 20 milijuna K, no to nije temperatura koja određuje elektromagnetska svojstva Sunčevog zračenja.

Zračenje iz unutrašnjosti u velikom dijelu apsorbira sloj negativnih vodikovih iona blizu površine pa je temperatura površine Sunca oko 6000 K, a spektar Sunčevog zračenja približno odgovara spektru crnog tijela temperature 5760 K. Stoga se temperatura od 5760 K može uzeti kao efektivna temperatura Sunčeve površine, a iz nje je primjenom Planckova zakona moguće proračunati energetski spektar Sunčevog zračenja. Snaga zračenja koje Sunce zrači sa svoje površine iznosi oko $9,5 \cdot 10^{25}$ W i to se zračenje sastoji od različitih valnih duljina. Većina (99 posto) Sunčevog zračenja otpada na spektar 0,275-4,6 μm . Maksimum Sunčevog zračenja je na valnoj duljini od 0,48 μm . Sunčevo zračenje se sastoji od ultraljubičastog (0,12-0,4 μm), vidljivog (0,4-0,75 μm) i infracrvenog dijela (>0,75 μm). Ultraljubičasti dio nosi oko 9 posto, vidljivi oko 41,5 posto i infracrveni oko 49,5 posto ukupne energije Sunčevog zračenja [2].

² revolucija – kruženje nebeskog tijela oko drugog nebeskog tijela

³ perihel – točka u kojoj planet na svojoj eliptičnoj stazi dolazi najbliže Suncu

⁴ afel – najudaljenija točka od sunca na eliptičnoj stazi planeta

2.3. Geometrijski odnos zemlje i sunca

Sunčevo zračenje pada okomito na vodoravnu plohu na površini Zemlje samo između obratnica, i to samo dva određena dana u godini (na obratnicama samo jedan dan). Sferičan oblik Zemljine površine smanjuje ozračenje na višim zemljopisnim širinama jer Sunčevo zračenje upada pod većim kutom, pa se energija raspodjeljuje na veću površinu. Na slici 1. se vidi klimatska važnost zemljopisne širine jer jednaka količina zračenja ($A=B$) pada na mnogo veću površinu u slučaju B' (na višim zemljopisnim širinama), nego u slučaju A' (na ekvatoru).

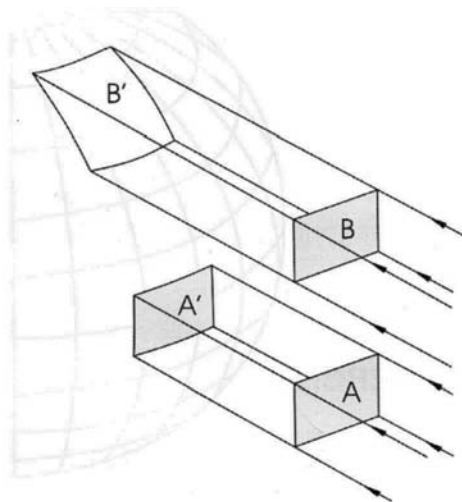
Gustoća energetskega toka po jedinici površine ovisi i o dnevnom hodu Sunca. Na slici 2. prikazane su dvije karakteristične visine Sunca, ujutro i u podne. Ozračenje ovisi o upadnom kutu Sunčevih zraka jer se u podne zračenje podijeli na manjoj površini (površina $a \times c$), nego kad zračenje upada koso (površina $b \times c$). Kretanje Sunca po nebu je jedan od uzroka porasta i pada temperature zraka. Zemljina površina nije posve ravna pa će različiti dijelovi reljefa primati različite količine Sunčevog zračenja. Na slici 3. je prikazano kako se ista količina zračenja raspodjeljuje na različito velike plohe. Na godišnjoj razini, ozračenost prisojne⁵ padine B je najveća, a osojne⁶ padine C najmanja. Takva raspodjela ozračenja ima vrlo veliku ulogu u brdovitim i planinskim predjelima, a naročito u područjima na višim zemljopisnim širinama, gdje su moguće velike razlike klime na malom prostoru. Zbog skraćenog vegetacijskog razdoblja i naglog pada srednjih temperatura zraka s porastom visine, prisojne padine mogu biti ekonomski daleko važnije od osojnih.

Okretanje Zemlje oko svoje osi uzrokuje smjenu dana i noći, no duljinu trajanja dana određuje i kruženje Zemlje oko Sunca (revolucija Zemlje) jer se ravnina ekliptike (kružnice na nebeskoj sferi po kojoj se Zemlja kreće oko Sunca) ne poklapa sa Zemljinom ekvatorijalnom ravninom⁷.

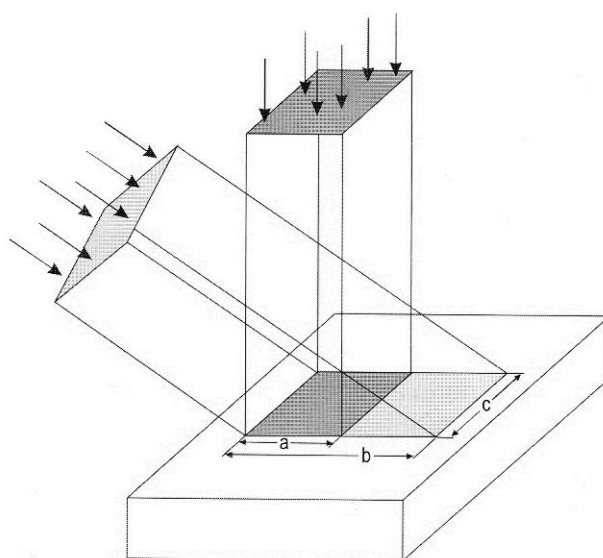
⁵ prisoj – strana izložena suncu

⁶ osoj – sjenovita strana nekog mjesta, mjesto koje nije izloženo suncu

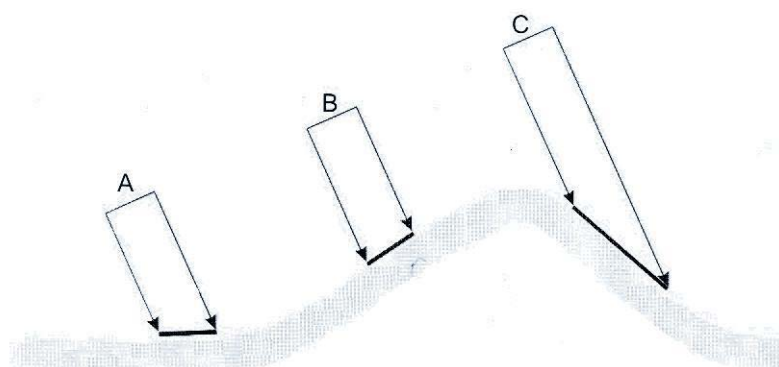
⁷ Zemljina ekvatorijalna ravnina je ravnina u kojoj leži ekvator



Slika 1. Utjecaj sfernosti Zemlje na ozračenje [2]

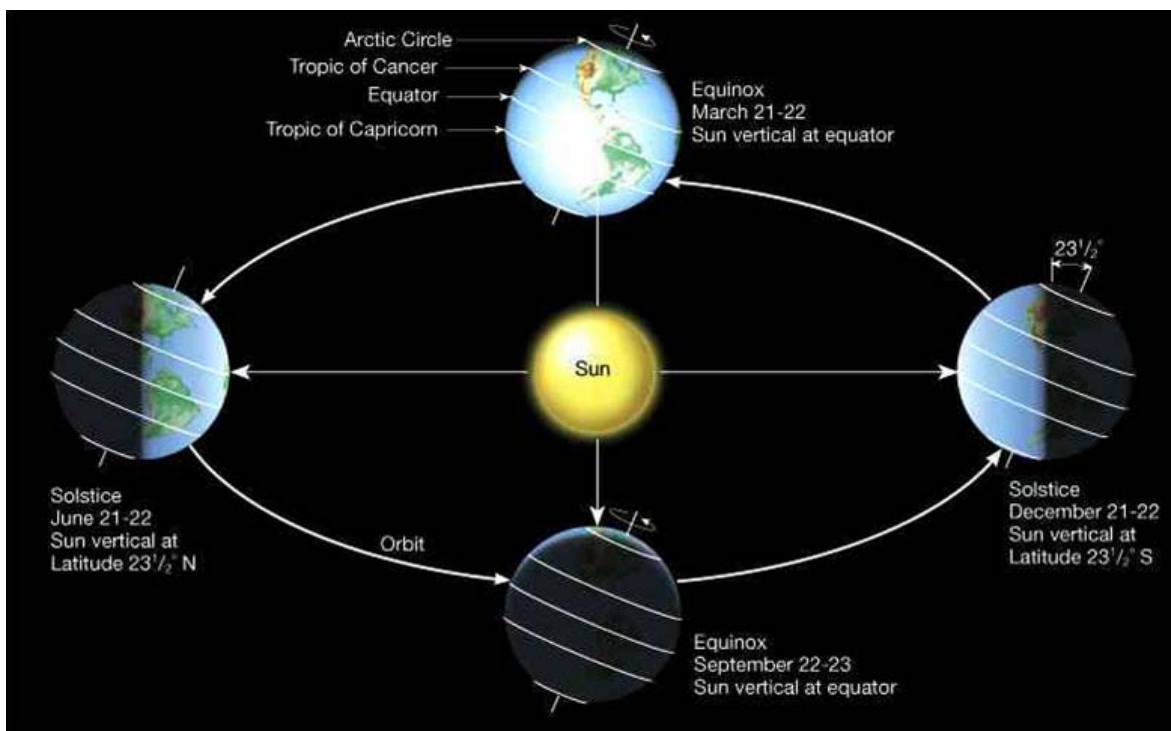


Slika 2. Utjecaj visine Sunca na ozračenje vodoravne plohe [2]



Slika 3. Utjecaj nagiba plohe na ozračenje [2]

Zemljina ekvatorijalna ravnina je uvijek nagnuta u odnosu na ravninu ekliptike za $23^{\circ}27'$, odnosno Zemljina os rotacije zatvara s ravinom ekliptike kut od $66,33^{\circ}$ (Slika 4). Zbog tog nagiba sjeverna polutka je ljeti nagnuta prema Suncu, a zimi od Sunca, što je uzrok pojave godišnjih doba i različitog trajanja dana na različitim zemljopisnim širinama. Dan se u širem smislu definira kao vrijeme za koje se Zemlja okrene oko svoje osi. **Sunčani dan** je vrijeme između dvaju uzastopnih prolaza Sunca kroz isti meridijan, a zvjezdani dan je vrijeme između dvaju uzastopnih prolaza neke zvijezde kroz isti meridijan. Sunčani dan je nešto kraći od zvjezdanog dana zbog kombinacije dvaju kretanja, okretanja Zemlje oko svoje osi i kruženja Zemlje oko Sunca. Kako se Zemlja oko svoje osi kreće u istom smjeru kao i oko Sunca (obrnuto od kazaljke na satu), promatrač će na Zemlji u godini dana⁸ izbrojati 365,24 Sunčeva dana, iako se Zemlja u istom razdoblju okrenula 366,24 puta (zvjezdani dan), odnosno jedan put više.



Slika 4. Geometrijski odnos Zemlje i Sunca

Međutim, u energetske primjenama Sunčevog zračenja dan podrazumijeva razdoblje između izlaska i zalaska Sunca, odnosno razdoblje u kojem je Sunčev

⁸ tropskoj godini – vrijeme između dva prolaska sunca kroz proljetnu točku, jednu od dvije točke u kojoj se ekliptika siječe s meridijanom.

disk iznad obzora⁹, za razliku od noći kada je Sunce ispod obzora. U prosjeku dan traje više od noći. Zbog veličine Sunčevog diska od 32 lučne minute, gornji vrh Sunca prijeđe obzor oko dvije minute prije samog središta Sunca na izlasku i dvije minute nakon središta Sunca na zalasku. Nadalje, zbog loma¹⁰ svjetlosti Sunčeve zrake dopiru do površine Zemlje prije nego vrh ili dno Sunčevog diska zaista prijeđe obzor. Stoga prvo svjetlo obasjava Zemlju oko 3,3 minute (50 lučnih minuta) prije nego središte Sunca prijeđe obzor.

Obratnice su paralele koje su od ekvatora udaljene prema sjeveru (sjeverna ili Rakova) ili prema jugu (južna ili Jarčeva obratnica) za $23^{\circ}27'$. Za ljetnog suncostaja¹¹ (ljetni solsticij, 21. ili 22. srpnja) Sunce na svom putu dosegne sjevernu, a za zimskog suncostaja (zimski solsticij, 21. ili 22. prosinca) južnu obratnicu. Na sjevernoj obratnici Sunce je u zenitu¹² 21. ili 22. lipnja u podne, a na južnoj 21. ili 22. prosinca u podne.

Polarnice su paralele koje su od ekvatora udaljene prema sjeveru (Arktički polarni krug) ili jugu (Antartički polarni krug) za $66,33^{\circ}$. Na području između polarnica dan i noć se izmjenjuju u 24 sata i njihova duljina se pravilno mijenja tijekom godine. Na polarnim kalotama dan i noć se izmjenjuju jedanput u godini dana tako da pola godine traje noć a pola godine dan. Međutim, Zemlja u srpnju prolazi kroz afel eliptične putanje pa se zbog toga sporije kreće oko Sunca, dok u siječnju prolazi kroz perihel pa joj je kretanje brže. Stoga, na sjevernoj polutki topliji dio godine traje 7,5 dana više nego hladniji, dok polarni dan traje 186 dana a polarna noć 179. Na ekvatoru dan i noć traju jednako tijekom cijele godine dok je na ostalim zemljopisnim širinama dan jednak noći samo dva dana u godini, za vrijeme proljetne ravnodnevnic (proljetni ekvinocij, 21. ili 22. ožujka) i jesenske ravnodnevnic (jesenski ekvinocij, 23. ili 24. rujna). Iz opisanog geometrijskog odnosa Zemlje i Sunca proizlazi činjenica da je smjena godišnjih doba posljedica

⁹ obzor (horizont) – kružna prividna crta koja kao granica dijeli nebo i površinu Zemlje (pravi obzor). Prividni obzor je krivulja duž koje nam se čini da se nebeski svod spaja s površinom Zemlje.

¹⁰ lom (refrakcija) – promjena smjera kretanja valova pri prolazu kroz granicu dvaju sredstva

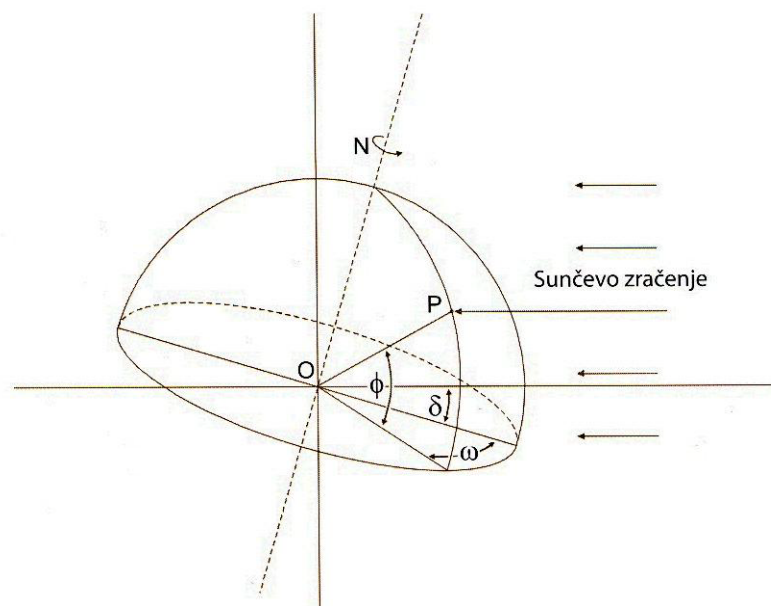
¹¹ suncostaj (solsticij) – točka u kojoj se Sunce prividno najviše udaljava sjeverno i južno od ekvatora

¹² zenit – točka na prividnoj nebeskoj sferi iznad glave motritelja

prividnog kretanja Sunca između obratnica. Kad bi ravnina ekliptike bila okomita na os rotacije Zemlje, Sunce bi se uvijek kretalo iznad ekvatora, dan i noć bi svugdje isto trajali i ne bi bilo smjene godišnjih doba.

Položaj Sunca u odnosu na promatrača na Zemljinoj površini može se opisati s tri osnovna kuta prikazana na slici 5:

- **Φ , zemljopisna širina** - kutna udaljenost promatrača od ekvatora prema sjeveru ili jugu,
- **δ , deklinacija Sunca** - kutna udaljenost spojnice središta Zemlje i središta Sunca i ekvatorijalne ravnine, odnosno kutna udaljenost točke u kojoj je Sunce trenutno u zenitu i ekvatora,
- **ω , satni kut Sunca** - vrijeme izraženo kutom, odnosno kut projekcije na ekvatorijalnu ravninu linije koja spaja centar Zemlje i centar Sunca i linije koja spaja centar Zemlje i promatranu točku.



Slika 5. Zemljopisna širina Φ , deklinacija Sunca δ i satni kut Sunca ω u odnosu na promatranu točku [2]

Zemlja se u 24 sata okrene za 360° odnosno 2π radijana, za jedan sat se okrene za 15° odnosno $\pi/12$ radijana pa vrijedi:

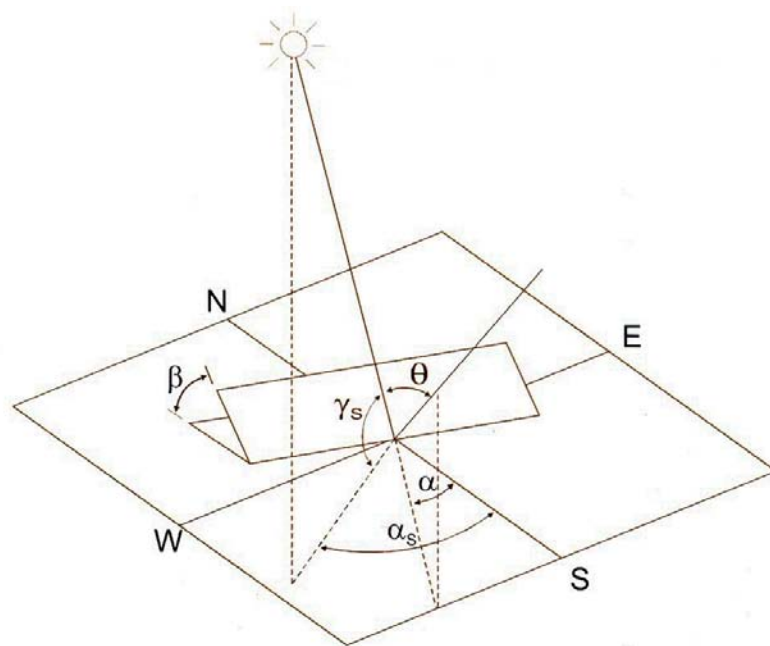
$$\omega = \frac{(t-12)\pi}{12} \quad (1)$$

gdje je t pravo Sunčevo vrijeme.

Pravo Sunčevo vrijeme (eng. *local apparent time*, LAT) je vrijeme određeno položajem Sunca na nebu. **Pravi Sunčev dan** je vrijeme između dva uzastopna prolaska Sunca kroz isti meridijan. Pravo Sunčevo podne je trenutak prolaska Sunca kroz lokalni meridijan. Zbog različite brzine kretanja Zemlje oko Sunca i nagiba Zemljine osi, duljina Sunčevog dana je različita tijekom godine. Iz pravog Sunčevog vremena se računskim putem može izračunati lokalno vrijeme.

Satni kut Sunca je negativan za vrijeme prije Sunčevog podneva, a pozitivan nakon Sunčevog podneva. Tako na primjer $t = 09:00$ LAT predstavlja satni kut $\omega = -\pi/4$ rad (-45°), a $t = 15:00$ LAT predstavlja satni kut $\omega = \pi/4$ rad (45°).

Iz tri osnovna kuta mogu se odrediti i sve ostale veličine vezane uz kretanje Sunca na nebu. **Visina Sunca** γ_s je kut između središta Sunčevog diska i vodoravne ravnine (slika 6):



Slika 6. Prikaz kutova za računanje zračenja na nagnutu plohu [2]

$$\sin \gamma_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

Komplementarni kut visine Sunca je ζ_s , zenitni kut sunca:

$$\zeta_s = \pi / 2 - \gamma_s \quad (3)$$

Azimut¹³ **Sunca** α_s je kut između projekcije Sunčeve zrake na vodoravnu plohu i smjera sjeverjug u vodoravnoj ravnini (slika 7). Azimut se za sjevernu polutku računa od smjera juga, uz pozitivnu vrijednost kad je Sunce na zapadu (poslijepodne). Za južnu polutku, azimut se računa od sjevera. Preporučeni je sljedeći algoritam:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= -\cos^{-1}(\cos \alpha_s^*) \text{ za } \alpha_s < 0 \\ \alpha_s &= \cos^{-1}(\cos \alpha_s^*) \text{ za } \alpha_s > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

uz

$$\begin{aligned} \sin \alpha_s &= \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \gamma_s} \\ \cos \alpha^* &= \frac{\sin \phi \sin \gamma_s - \sin \delta}{\sin \gamma_s \cos \phi} \end{aligned} \quad (5)$$

Satni kutovi astronomskog izlaska i zalaska Sunca, $+\omega_s$ odnosno $-\omega_s$ određeni su satnim kutom Sunca za koji je visina Sunca jednaka nuli:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta), \text{ za } -1 < -\tan \phi \tan \delta < 1 \quad (6)$$

Zadani uvjet za određena područja na krajnjem jugu ili sjeveru ne mora biti ispunjen, pa ako je $-\tan \phi \tan \delta \geq 1$, $\omega_s = 0$, a za $-\tan \phi \tan \delta \leq -1$, tada vrijedi $\omega_s = \pi$. U prvom slučaju Sunce je cijeli dan ispod obzora (polarna noć), a u drugom iznad obzora (polarni dan).

Ako se želi uzeti u obzir veličina Sunčevog diska i loma u atmosferi, kutovi izlaska i zalaska Sunca su rješenja sljedeće jednadžbe:

$$\sin(-0,014544) = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (7)$$

Sunčev disk će se pojaviti (nestati) na obzoru na izlasku (zalasku) uz izračunatu astronomsku visinu od $-0,014544$ rad ($-50'$).

Ukoliko na obzoru postoje prepreke (brda, zgrade, stabla), kutovi izlaska i zalaska Sunca odgovaraju visinama Sunca koje su veće od nule (ili $-50'$). Visina

¹³ azimut – vodoravna kutna udaljenost od utvrđenog smjera do položaja objekta na nebu

izlaska i zalaska Sunca za takve slučajeve je visina preprekay s' , a kutovi izlaska i zalaska su rješenja sljedeće jednadžbe:

$$\sin(\gamma_s') = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (8)$$

Vrijeme izlaska i zalaska Sunca t_r i t_s izračunava se prebacivanjem satnog kuta u pravo Sunčevo vrijeme:

$$\begin{aligned} t_r &= 12 - \frac{12}{\pi} \omega_s [h(dec)] \\ t_s &= 12 + \frac{12}{\pi} \omega_s [h(dec)] \end{aligned} \quad (9)$$

Trajanje Sunčevog dana S_{od} , odnosno vrijeme tijekom kojeg je Sunčev disk iznad obzora računa se kao razlika vremena izlaska i zalaska Sunca:

$$S_{od} = t_r - t_s [h(dec)] \quad (10)$$

ili izravno kao

$$S_{od} = \omega_s \frac{24}{\pi} [h(dec)] \quad (11)$$

Upadni kut θ na nagnutu plohu je kut između Sunčevih zraka i okomice na plohu (slika 7):

Za površinu s azimutom α i kutom nagiba plohe β vrijedi:

$$\begin{aligned} \theta(\alpha, \beta) &= \arccos(\cos \theta^*(\alpha, \beta)); \text{ za } \cos \theta^*(\alpha, \beta) > 0 \\ \theta(\alpha, \beta) &= 0; \text{ za } \cos \theta^*(\alpha, \beta) \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

gdje je

$$\begin{aligned} \cos \theta^*(\alpha, \beta) &= \cos \omega \cos \delta \cos \phi \cos \beta \\ &+ \cos \omega \cos \alpha \sin \phi \sin \beta \\ &+ \sin \omega \cos \delta \sin \alpha \sin \beta \\ &+ \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ &- \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

Za plohe orijentirane prema jugu (na južnoj polutki orijentirane prema sjeveru), odnosno uz $\alpha=0$ dobiju se jednostavniji izrazi:

$$\cos \theta^*(\beta) = \sin(\phi - \beta) \sin \delta + \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega; \text{ ako je } \beta \neq \Phi \quad (14)$$

$$\cos \theta^*(\beta) = \cos \delta \cos \omega; \text{ ako je } \beta = \Phi \quad (15)$$

Ozračenost plohe moguće je značajno povećati uz praćenje kretanja Sunca po nebu, na primjer kod koncentrirajućih kolektora. Za jednoosno praćenje kretanja Sunca vrijedi:

-vertikalna os, uz praćenje azimuta Sunca i poznat nagib osi β :

$$\theta = \arccos(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) - \beta \quad (16)$$

u slučaju da je $\beta = \Phi$ vrijedi:

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos(\cos \omega \cos \phi) \\ \theta &= \delta \end{aligned} \quad (17)$$

dok za os sjever-jug postavljenu na proizvoljan kut α_{osi} vrijedi:

$$\beta = \arccos(\cos \omega \cos \alpha_{osi}) \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{\sin \omega}{|\sin \omega|} \arccos \frac{\cos \omega \sin \alpha_{osi}}{\sin \arccos(\cos \omega \cos \alpha_{osi})} \quad (19)$$

Sada možemo izračunati upadni kut θ .

-vodoravna os u smjeru istok-zapad i prati se visina Sunca. Nagib β tada iznosi:

$$\beta = \arctan \frac{\cos \delta \sin \phi \cos \omega - \sin \delta \cos \phi}{\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega} \quad (20)$$

Upadni kut se računa izrazu (13) uz $\alpha = 0$

Za dvoosno praćenje:

$$\cos \theta = 1 \quad (\theta = 0) \quad (21)$$

Tada je:

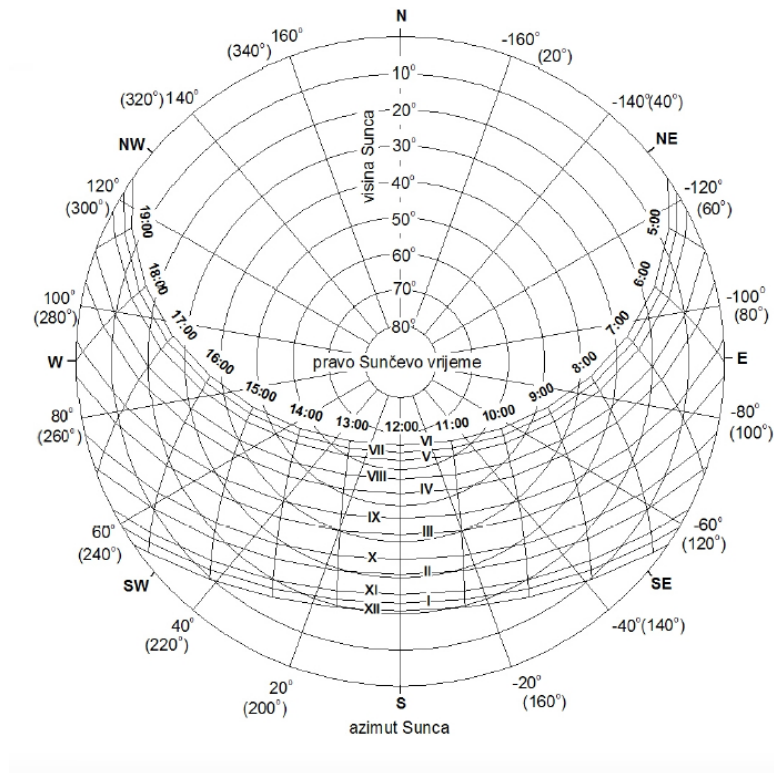
$$\beta = \arccos(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (22)$$

Prilikom proračuna treba koristiti astronomske vrijednosti veličine kutova izlaska i zalaska Sunca bez utjecaja loma svjetlosti [2].

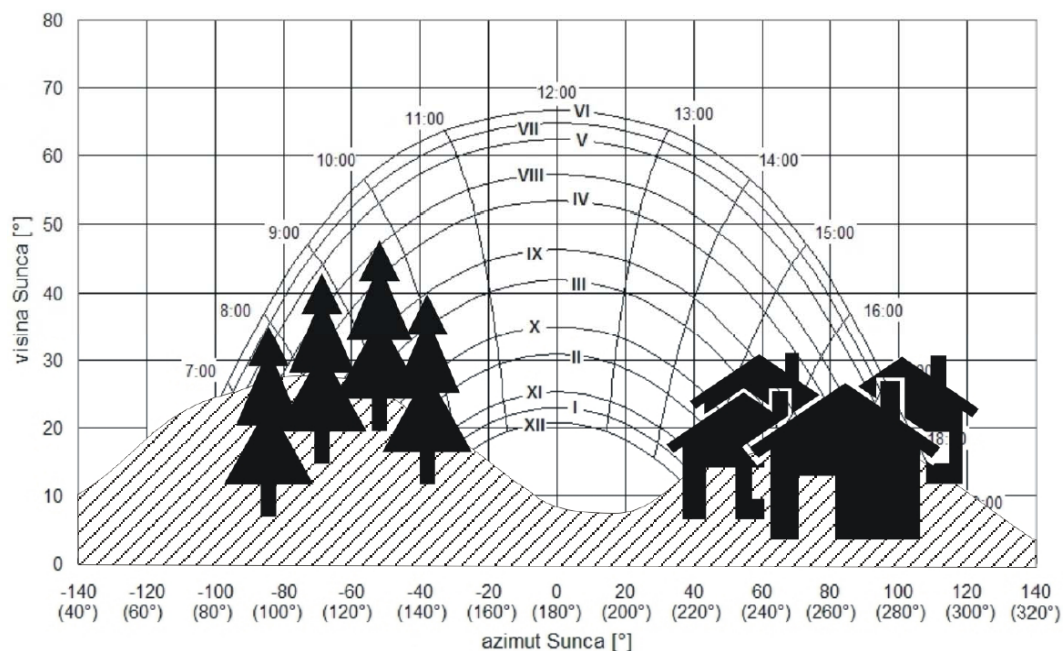
2.4. Dijagram kretanja Sunca po nebu

Jedan od važnijih čimbenika koji treba uzeti u obzir pri projektiranju pasivnih i aktivnih sunčanih sustava je kretanje Sunca po nebu tijekom dana i tijekom godine. Položaj Sunca na nebu u svakom se trenutku može opisati s dva podatka, visinom i azimutom Sunca. Vrlo jednostavan način prikazivanja prividnog kretanja Sunca po nebu je Sunčev dijagram, prikazan u cilindričnom ili polarnom koordinatnom sustavu. Polarni Sunčev dijagram je projekcija Sunčevog kretanja na vodoravnu plohu s promatračem u centru plohe. Primjer polarnog Sunčevog dijagrama prikazan je na slici 7. U polarnom dijagramu azimuti u odnosu na opažača su predstavljeni azimutnim linijama - ravnim linijama koje se zrakasto šire iz centra polarnog dijagrama u koracima od po 20° . Azimut se prikazuje od juga (S), pozitivno u smjeru zapada (W) i negativno u smjeru istoka (E). Vrijednosti azimuta se kreću od -180° do $+180^\circ$. Neki autori azimut prikazuju od sjevera, u smjeru kazaljke na satu od 0° do 360° (takve vrijednosti prikazane su u zgradama). Visina objekta na nebu je predstavljena linijama visine, koncentričnim kružnicama ucrtanim u koracima od po 10° , od 0° do 90° . Dnevne linije kretanja Sunca po nebu ucrtane su za takozvane karakteristične dane u mjesecu. **Karakterističan dan** za pojedini mjesec je onaj dan čije se vrijednosti najviše približavaju srednjim vrijednostima tog mjeseca. To su 17. siječanj, 15. veljače, 16. ožujak, 15. travanj, 15. svibanj, 11. lipanj, 17. srpanj, 16. kolovoz, 16. rujan, 16. listopad, 15. studeni i 11. prosinac. Dnevne linije počinju na istočnoj strani i završavaju na zapadnoj. Satne linije sijeku se s dnevnim linijama i predstavljaju položaj Sunca u određeno doba dana po pravom Sunčevom vremenu. Satne linije se mogu ucrtati i za lokalno vrijeme, no tada poprimaju oblik analeme - krivulje slične broju osam.

Cilindrični Sunčev dijagram prikazuje kretanje Sunca kako to izgleda promatraču koji je okrenut točno prema jugu u pravokutnom koordinatnom sustavu. Na cilindrični Sunčev dijagram lakše se mogu ucrtati konture okolnih prepreka kako bi se predvidjelo kako će ti objekti zasjeniti Sunce tijekom godine (slika 8).



Slika 7. Polarni Sunčev dijagram [2]



Slika 8. Cilindrični Sunčev dijagram s ucrtanim okolnim predmetima [2]

Dobra lokacija za korištenje Sunčeve energije je lako prepoznatljiva, okrenuta prema jugu, izložena Suncu na izlasku, tijekom cijelog dana i na zalasku bez prepreka kao što su brda, planine, stabla ili zgrade. Ugradnja sunčanih sustava sada

je jednostavna, kolektore ili ćelije treba okrenuti pod optimalnim nagibom direktno prema jugu. Ukoliko se smjer juga određuje magnetnim kompasom treba uzeti u obzir i magnetnu deklinaciju, trenutno $2^{\circ} 31'$ E uz promjenu $0^{\circ} 6'$ E godišnje. Međutim, malo je lokacija koje su u potpunosti izložene jugu, pa svaku prepreku koja zasjenjuje Sunce treba uzeti u obzir. Lokacije udaljene nekoliko metara jedna od druge mogu imati različitu ozračenost, a kako se visina Sunca mijenja ne samo tijekom dana nego i tijekom godine, objekti koji ne zasjenjuju sunčani kolektor ili ćeliju ljeti, mogu to činiti zimi. Za preciznije proračune potrebno je izmjeriti kutnu visinu svake prepreke i odrediti odgovarajuće smanjenje Sunčevog zračenja. Izvrstan alat za procjenu lokacije je uređaj *Solar pathfinder*. Uređaj se sastoji od polirane prozirne konveksne polukugle u kojoj se zrcali panoramska slika cijelog okoliša. Kroz rupe u uređaju na dijagram se mogu ucrtati obrisi okoliša. Uređaj je opremljen razuljom¹⁴ i kompasom.

Sunčev dijagram, iskazan u pravom Sunčevom vremenu, ovisi samo o zemljopisnoj širini lokacije. Promatrajući Sunčev dijagram možemo doći do jednostavnih ali važnih zaključaka:

- Sunce izlazi točno na istoku i zalazi točno na zapadu samo dva dana u godini (prvi dan proljeća i prvi dan jeseni),
- Sunce izlazi na sjeveroistoku i zalazi na sjeverozapadu tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci,
- Sunce izlazi na jugoistoku i zalazi na jugozapadu tijekom jesenskih i zimskih mjeseci,
- Sunce se nalazi u svojoj najvišoj točki južno od promatrača. To je pravo Sunčevo podne,
- Zenitni položaj Sunca je bliži obzoru tijekom zimskih mjeseci, a viši na nebu tijekom ljetnih mjeseci,
- Sunce izlazi ranije i zalazi kasnije tijekom ljetnih mjeseci (obrnuto za zimske mjesece) [2].

¹⁴ razulja (libela) – naprava kojom se određuje je li neka ploha ili ravnina vodoravna odnosno okomita

2.5. Računanje vremena

Duljina Sunčevog dana se mijenja tijekom godine zbog nagiba rotacijske osi Zemlje u odnosu na ravninu ekliptike i eliptičnog kruženja Zemlje oko Sunca. Kako bi se ujednačila duljina dana uvodi se srednji Sunčev dan, jednake duljine tijekom cijele godine i srednje Sunčevo vrijeme. Pravo Sunce prolazi kroz meridijan prije ili poslije srednjeg Sunca a vremenska razlika se naziva **jednadžba vremena**:

$$\text{jednadžba vremena} = -0,128 \sin(j' - 0,04887) - 0,165 \sin(2j' + 0,34383) \text{ [h (dec)]} \quad (23)$$

Razlika pravog i srednjeg Sunčevog vremena je uvijek manja od 17 minuta a četiri puta u godini je jednaka nuli.

Površina Zemlje je podijeljena na 24 vremenske zone¹⁵. Sva mjesta u takvoj zoni imaju u istom trenutku jednako vrijeme. **Lokalno vrijeme** svake zone (eng. *local mean time* - *LMT*) računa se od referentnog meridijana zone smještenog u središtu zone. Referentni meridijan za Hrvatsku je $\lambda_r = +15^\circ$. Razlika između zonskih meridijana je 15° tako da je vremenska razlika susjednih zona jedan sat. Zbog potreba javnog života granice zona nisu uvijek ograničene meridijanima, nego se prilagođuju granicama država. Hrvatska se nalazi u srednjeeuropskoj vremenskoj zoni.

Pravo Sunčevo vrijeme možemo izračunati iz lokalnog vremena:

$$\text{LAT} = \text{LMT} + \text{jednadžba vremena} + \frac{\lambda - \lambda_r}{15^\circ} - c \text{ [h (dec)]} \quad (24)$$

gdje je λ zemljopisna dužina promatrane točke a λ_r referentni meridijan vremenske zone, oba izražena u stupnjevima. Član c uzima u obzir **ljetno računanje vremena** za dane od posljednje nedjelje u ožujku do posljednje nedjelje u listopadu, kada vrijedi $c = 1$ sat, dok za ostale dane vrijedi $c = 0$ [2].

¹⁵ postoje značajne razlike u računanju vremena u različitim državama. danas je u upotrebi 39 vremenskih zona

3. Sunčevo zračenje

3.1. Ekstraterestričko zračenje

Prolaskom kroz zrakoprazan prostor, spektralna karakteristika Sunčevog zračenja se ne mijenja, ali se gustoća zračene snage smanjuje s kvadratom udaljenosti od izvora zračenja prema izrazu:

$$E_0 = \frac{R_s^2}{D^2} \cdot E_s \quad (25)$$

gdje je E_s gustoća snage na površini Sunca određena Stefan-Boltzmannovim zakonom za zračenje crnog tijela ($6,3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$), R_s polumjer Sunca ($6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$), a D udaljenost mjesta na kojem računamo gustoću zračenja od Sunca. Za različite planete u Sunčevom sustavu sada možemo izračunati gustoću snage Sunčevog zračenja (tablica 1).

Tablica 1. Sunčeve konstante po planetima [2]

PLANET	UDALJENOST ($\times 10^9 \text{ m}$)	SUNČEVA KONSTANTA (W/m^2)
Merkur	57	8908,0
Venera	108	2481,3
Zemlja	150	1286,3
Mars	227	561,7
Jupiter	778	47,8
Saturn	1426	14,2
Uran	2868	3,5
Neptun	4497	1,4
Pluton	5806	0,9

Ekstraterestričko zračenje je Sunčevo zračenje na gornjoj granici Zemljine atmosfere. Kako se udaljenost Zemlje od Sunca mijenja tijekom godine i ekstraterestričko ozračenje se mijenja od najmanje vrijednosti 1321 W/m^2 do najveće 1412 W/m^2 .

Ekstraterestričko ozračenje okomito na Sunčeve zrake za srednju udaljenost Zemlje od Sunca naziva se **Sunčeva (solarna) konstanta**. Utvrđivanje Sunčeve konstante i njene moguće promjenjivosti počelo je na prijelazu u dvadeseto stoljeće. Sunčeva aktivnost ima u prosjeku jedanaestogodišnji ciklus (Schwabeov ciklus), a na zračenje utječu i drugi fenomeni, kao što su: 27-dnevna diferencijalna rotacija Sunca oko svoje osi, Sunčeve pjege¹⁶, prominencije¹⁷ i baklje. Svjetska meteorološka organizacija je 1981. godine normirala Sunčevu konstantu u iznosu:

$$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (26)$$

Najnovija mjerenja utvrđuju vrijednost Sunčeve konstante od $1366,1 \text{ W/m}^2 \pm 1,1 \text{ W/m}^2$. Kako je mjerna nesigurnost mjerenja zračenja 0,1 posto ili $1,4 \text{ W/m}^2$, Sunčeva konstanta utvrđena prije više od 20 godina se još uvijek može smatrati vrlo točnom. Ekstraterestričko ozračenje površine okomite na smjer Sunčevog zračenja za određeni dan u godini može se odrediti iz izraza:

$$I_{0j}(j) = \varepsilon(j) \cdot I_0 = \left(1 + 0,03344 \cos \left(\frac{2\pi j}{3 \cos 65,25} - 0,048869 \right) \right) I_0 \quad (27)$$

gdje je I_0 Sunčeva konstanta, $\varepsilon(j)$ ekscentricitet Zemljine orbite, a j redni broj dana u godini ($j=1,2, \dots, 365$).

Ekstraterestričko ozračenje vodoravne plohe može se izračunati iz ekstraterestričkog ozračenja površine okomite na smjer Sunčevog zračenja:

$$I_{oh} = I_0 \varepsilon \cos \zeta_s \left[\text{W / m}^2 \right] \quad (28)$$

Ekstraterestričku ozračenost $[\text{J/m}^2]$ vodoravne plohe računamo integriranjem ekstraterestričkog ozračenja tijekom vremena. Možemo ga izraziti s tri osnovna kuta (Φ, ω, δ) :

-opći slučaj za bilo koji vremenski interval od ω_1 do ω_2 :

$$G_{0(12)} = I_0 \varepsilon \frac{T}{2\pi} \left[\sin \phi \sin \delta (\omega_2 - \omega_1) + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \right] \left[\text{J / m}^2 \right] \quad (29)$$

-za satne vrijednosti, $|\omega_2 - \omega_1| = \pi/2$ uz $\zeta_s > 0$ tijekom sata

¹⁶ Sunčeve pjege – tamna područja smanjene temperature u Sunčevoj fotosferi

¹⁷ prominencija – hladna i gusta tvorevina u Sunčevoj koroni, sastoji se od ioniziranih plinova

$$G_{0h} = I_o \varepsilon \frac{T}{2\pi} \left[\sin \phi \sin \delta \frac{\pi}{2} + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \right] [J / m^2] \quad (30)$$

za dnevne vrijednosti, $\omega_1 = \omega_S$, $\omega_2 = \omega_S$:

$$G_{0h} = I_o \varepsilon \frac{T}{2\pi} \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_S - \omega_S \sin \omega_S) [J / m^2] \quad (31)$$

Parametar T predstavlja trajanje vrtnje Zemlje oko vlastite osi, $T=86400$ s (24 h).

3.2. Mjerenje sunčevog zračenja

Mjerenje Sunčevog zračenja obuhvaća kratkovalno zračenje koje prolazi kroz atmosferu kao izravno ili raspršeno zračenje te dugovalno zračenje Zemlje i atmosfere. Za praktično korištenje energije Sunčevog zračenja važna su mjerenja ukupnog, raspršenog i izravnog ozračenja vodoravne plohe. Najčešće se mjeri trajanje sijanja Sunca iz kojeg se u nedostatku mjerenja Sunčevog zračenja može procijeniti ozračenost.

Ukupno (globalno) Sunčevo zračenje na vodoravnu plohu iz prostornog kuta 2π steradijana sastoji se od zračenja koje ploha izravno primi s površine Sunčevog diska i raspršenog zračenja neba. Instrument koji mjeri zračenje iz prostornog kuta 2 steradijana na plohu u valnom području između $0,3$ do $3,0 \mu m$ je piranometar. Na idealno odabranoj lokaciji instrument ne bi trebao registrirati zračenje odbijeno od tla i okolnih predmeta, niti imati prepreke više od 5° u području gdje Sunce izlazi i zalazi. Ukupne prepreke ne bi smjele smanjiti vidno polje instrumenta više od $0,5$ steradijana. Piranometri mogu imati termoelektrične, fotoelektrične, piroelektrične ili bimetalne elemente kao osjetnike¹⁸. Kako su trajno izloženi atmosferskim utjecajima moraju biti čvrste izvedbe i otporni na korozivne utjecaje vode i vlažnog zraka. Prijemnik zračenja mora biti hermetički zatvoren ili imati sustav za odvodnju kondenzirane vlage u kućištu. Vlaga se obično uklanja pomoću silika gela kojeg je potrebno redovito mijenjati. Silika gel je vrlo higroskopian¹⁹ materijal kojem se obično dodaje vrlo mala količina kobaltnog klorida ($0,5$ - 1%) koji promijeni boju iz plave u

¹⁸ osjetnik (senzor) – dio mjernog uređaja koji je osjetljiv na promjene fizikalnih veličina

¹⁹ higroskopsnost – sposobnost tvari da upija vlagu iz okoline

ružičasto kada upije vlagu. Boja silika gela se može vidjeti kroz prozirni plastični spremnik na instrumentu i kada prijeđe u ružičasto silika gel treba zamijeniti. Ružičasti silika gel moguće je reaktivirati sušenjem u pećnici na 130°C kroz nekoliko sati. Međutim, u posljednje vrijeme sumnja se da je kobalt kancerogen, pa se preporučuje zamjena plavog silika gela s kobaltom alternativnim, npr. žutim ili narančastim. U upotrebi su najčešće termoelektrični piranometri koji koriste toplinske osjetnike (slika 9) koji proizvode napon na principu termoelektričnog efekta²⁰ u funkciji upadnog Sunčevog zračenja.



Slika 9. Piranometar CM 11 Kipp & Zonen [2]

Toplinski detektor smješten je ispod dvostruke staklene kupole koja ga štiti od prodora vlage i smanjuje dugovalno zračenje iz samog instrumenta, toplinski izolira detektor i sprječava njegovo hlađenje. Svjetska meteorološka organizacija i Međunarodna organizacija za standarde (ISO 9060:1990) i definira tri klase piranometra. Najbolja klasa (sekundarni standard) se koristi za precizna meteorološka mjerenja, instrumenti prve klase za redovna meteorološka mjerenja, a druge klase za pogonska mjerenja i praćenje fotonaponskih i toplinskih sunčanih sustava.

Poluvodički silicijski piranometri (slika 10), ne zadovoljavaju zahtjeve WMO-a u pogledu spektralne osjetljivosti no dimenzijama su znatno manji, imaju odziv reda ms i za red veličine su jeftiniji.

²⁰ termoelektrični efekt – pojava da se pri uzajamnom djelovanju svjetlost i tvari mijenjaju električna svojstva tvari



Slika 10. Poluvodički piranometar SP-lite Kipp & Zonen [2]

Silicij je osjetljiv samo u ograničenom dijelu spektra između 0,4 i 1 μm . Kako je spektar Sunčevog zračenja na površini zemlje funkcija visine Sunca i atmosferskih uvjeta, poluvodički i piranometri s termočlankom ne moraju dati jednak rezultat za jednake vrijednosti zračenja. Silicijski piranometri su baždareni za mjerenje nezaklonjenog Sunčevog zračenja pa se ne mogu koristiti pod raslinjem, za mjerenje umjetne rasvjete, u staklenicima ili za mjerenje odbijenog zračenja [2].

3.3. Utjecaj atmosfere na sunčevo zračenje

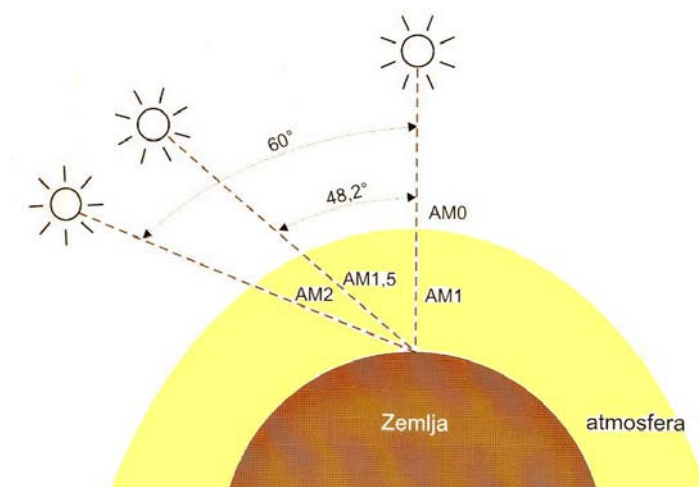
Sunčevo zračenje na putu kroz Zemljinu atmosferu slabi jer se raspršuje na molekulama plinova, česticama prašine i dimu, a apsorbira prilikom međudjelovanja s molekulama plinova. Možemo govoriti o ekstinkciji²¹ Sunčevog zračenja u atmosferi i definirati koeficijent ekstinkcije a , čija se vrijednost za Zagreb prema mjerenjima kreće od 0,2 do 0,8. Visoke vrijednosti odgovaraju jakoj su maglici i magli, a niske potpuno suhom zraku pri vedrom vremenu i zenitnom položaju Sunca. Slabljenje Sunčevog zračenja na putu kroz atmosferu može se opisati Bouguer-Lambertovim zakonom:

$$B = I_0 e^{-am} \quad (32)$$

gdje je B ozračenje na tlu, I_0 ozračenje na gornjoj granici atmosfere, m optička masa zraka i a koeficijent ekstinkcije. **Optička masa zraka** m je omjer stvarne duljine puta

²¹ ekstinkcija – slabljenje jakosti zračenja pri prolasku kroz atmosferu uslijed apsorpcije

Sunčevih zraka na putu kroz atmosferu i najkraćeg mogućeg puta; funkcija je upadnog kuta Sunca i najvažniji parametar koji određuje snagu upadnog Sunčevog zračenja (slika 11).



Slika 11. Optička masa zraka [2]

Kad je Sunce točno iznad promatrane točke, optička masa zraka je najmanja:

$$m = \frac{\overline{BA}}{\overline{CA}} = \frac{1}{\cos \vartheta_z} \quad (33)$$

Optička svojstva atmosfere mijenjaju se s promjenom atmosferskog tlaka, pa se može definirati relativna optička masa zraka, tj. optička masa izračunata za tlak 1000 mbar:

$$m_r = m \frac{p}{1000} \quad (34)$$

gdje je p tlak zraka u [mbar].

Za Sunčeve zrake koje na površinu dolaze okomito optička masa zraka je $m=1$, a za zrake koje s obzorom zatvaraju kut od 30° optička masa zraka je $m=2$. Ekstraterestričko zračenje označavamo s AMO (AM-eng. *air mass*). Spektar AMO se koristi za ispitivanje rada sunčanih ćelija predviđenih za rad u svemiru. Djelotvornost uređaja za pretvorbu Sunčevog zračenja ovisi o promjenama snage i spektra upadnog zračenja. Kako bi se omogućila precizna usporedba karakteristika sunčanih ćelija ispitanih u različito vrijeme i na različitim mjestima definiran je normirani spektar i gustoća snage (ozračenje) za zračenje izvan Zemljine atmosfere i na površini Zemlje (ISO 9845-1:1992, IEC EN 60904-3:1989-02). Prizemno Sunčevo zračenje sa

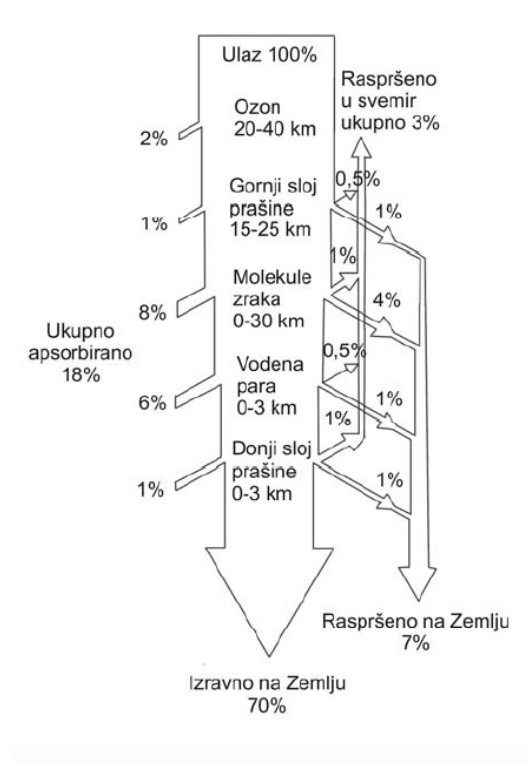
Suncem u zenitu ima optičku masu zraka jedan, no kao normirano prizemno Sunčevo zračenje pri mjerenjima na uređajima za pretvorbu Sunčevog zračenja usvojena je raspodjela zračenja AM 1,5. To je zračenje koje dolazi do površine mora ako je visina Sunca $\gamma_s=41,81^\circ$ (odnosno upadni kut $\zeta_s=48,19^\circ$). Taj standardni spektar na površini Zemlje još se označava i AM1,5 G (gdje G označava ukupno, globalno zračenje). Ako promatramo samo izravno zračenje tada se koristi oznaka AM1,5 D (D - eng. *direct*) i približno mu odgovara spektar AM0 umanjen za 28 posto (18 posto zbog apsorpcije i 10 posto zbog raspršenja). Ukupni spektar AM1,5 G je 10 posto veći od spektra izravnog zračenja AM1,5 D uz ozračenje od približno 970 W/m². Međutim, normirani AM1,5 G spektar je normaliziran na vrijednost od 1000 W/m² [2].

3.3.1. Izravno (direktno) Sunčevo zračenje

Zbog velike udaljenosti Zemlje i Sunca možemo smatrati da se Sunčevo zračenje prije ulaska u atmosferu sastoji od snopa paralelnih elektromagnetskih valova. Međudjelovanjem s plinovima i česticama u atmosferi Sunčevo zračenje se može upiti (apsorpcija), odbiti (refleksija) ili može manje ili više nesmetano proći kroz atmosferu (transmisija). Na slici 12. prikazana je bilanca Sunčevog zračenja na putu kroz atmosferu [2].

Mjerenje izravnog (direktnog) Sunčevog zračenje je svakako jedno od najsloženijih mjerenja u određivanju potencijala energije Sunca. Izravno Sunčevo zračenje mjeri se pirheliometrom, instrumentom koji se sastoji od termočlanaka na dnu uskog cilindra tako je vidni kut instrumenta samo oko 5°, odnosno 0,005 steradiana. Takvom geometrijom

se omogućava registracija samo zračenja koje dolazi iz uskog pojasa oko Sunčevog diska. Prijemna površina instrumenta u svakom trenutku mora biti okomita na Sunčeve zrake tako da pirheliometri moraju pratiti Sunce po nebu uz kutnu grešku manju od 0,75° (Kipp & Sonnen) ili 1,5° (Epply), što zahtijeva složen i precizan mehanički sustav za praćenje kretanja Sunca. Takvi sustavi za dvoosno praćenje Sunca su za red veličine skuplji od samog mjernog instrumenta. Izmjerene podatke je potrebno normalizirati na srednju udaljenost Zemlje od Sunca, a instrument kalibrirati prema instrumentu više klase, prema standardu ISO 9060:1990 E [17].



Slika 12. Utjecaj atmosfere na upadno Sunčevo zračenje [2]



Slika 13. Pirheliometar Kipp & Zonen CH1 [17]

3.3.2. Raspršeno (difuzno) Sunčevo zračenje

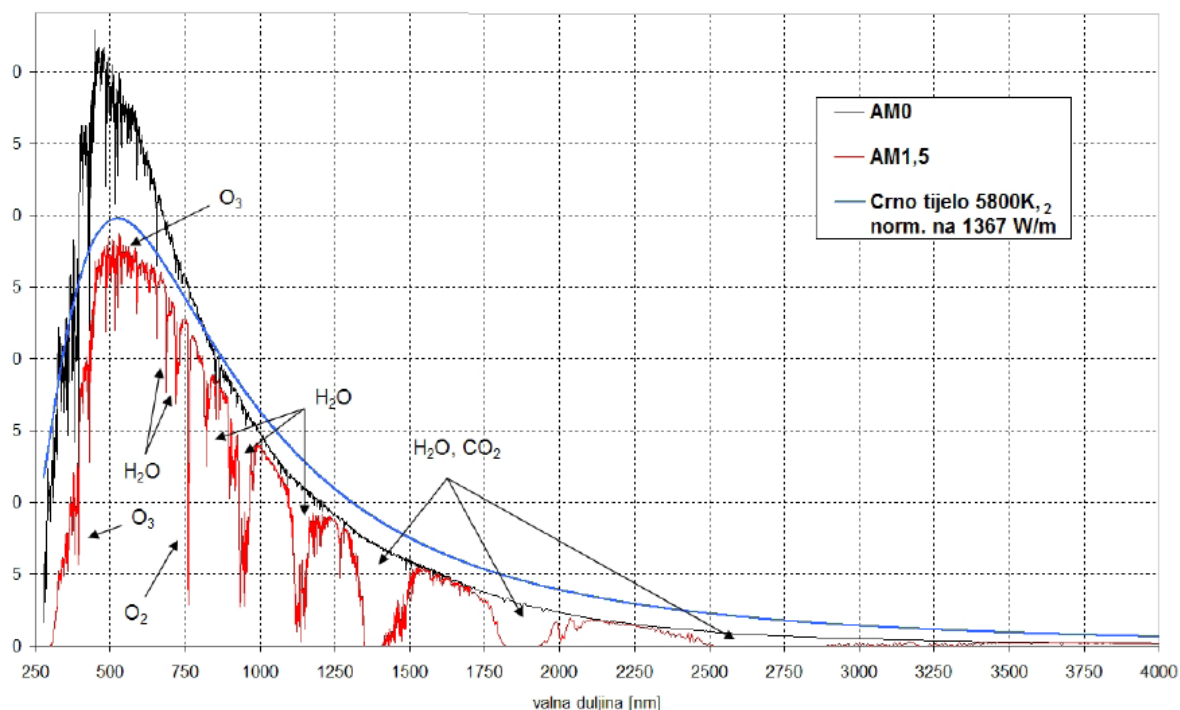
Raspršivanje zračenja izazivaju molekule plinova i čestice suspendirane u atmosferi. Sunčevo zračenje nailazi na molekule plina ili čestice i pobuđuje ih na titranje. Primljenu elektromagnetsku energiju čestica ili molekula odmah zrači u svim smjerovima u prostor. Energija se više ne širi samo u jednom smjeru kao prije ulaska u atmosferu već na sve strane. Utjecaj raspršenja je dvojak, s jedne strane smanjuje jačinu izravnog Sunčevog zračenja, a s druge uzrokuje raspršeno zračenje neba. Jedan dio Sunčevog zračenja se vraća u međuplanetarni prostor i on je izgubljen za procese u atmosferi. Pobuđena molekula ili čestica ne emitira elektromagnetsku energiju s istom spektralnom raspodjelom energije kakvu je primila već mijenja relativni udio pojedinih valnih duljina. Rayleigh je utvrdio zakonitost odnosa valne duljine i intenziteta raspršivanja:

$$D=k\lambda^{-4} \quad (35)$$

gdje je k faktor proporcionalnosti.

Kako je raspršivanje proporcionalno s četvrtom potencijom valne duljine, ultraljubičaste zrake će se raspršiti znatno više nego zrake bliže crvenom dijelu spektra. Sredinom dana, kad je Sunce u zenitu, put Sunčevog zračenja do tla je kraći, raspršenje je manje izraženo pa, raspršeno zračenje sadrži više kratkovalnog zračenja dajući nebu plavu boju. Spuštanjem Sunca prema obzoru, raspršenje se povećava i time se udio kratkovalnog zračenja u ukupnom zračenju smanjuje. Pri niskim kutovima Sunca, pri izlasku i zalasku, plavi dio spektra se gotovo potpuno apsorbira pa preostaje samo žuto i crveno zračenje. Apsorpcija slabi intenzitet samo pojedinih valnih duljina Sunčevog zračenja. Od plinova koji čine atmosferu pojedine valne duljine značajnije upijaju kisik, ugljični dioksid, ozon i dušik, dok zračenje zanemarivo apsorbiraju dušični oksidi, ugljični monoksid i metan. Dušik upija samo zračenje s valnom duljinom manjom od $0,2 \mu\text{m}$ i to u dijelu spektra gdje je intenzitet Sunčevog zračenja zanemariv. Kisik (O_2) značajnije apsorbira zračenje u dva područja ili vrpce, jedno između $0,76$ i $9,80 \mu\text{m}$ gdje apsorbira $8,9$ posto zračenja tog intervala i drugo područje s maksimumom apsorpcije kod valne duljine $0,69 \mu\text{m}$. Ugljični dioksid (CO_2) apsorbira pojedine valne duljine u infracrvenom dijelu spektra od $1,4$ do $15 \mu\text{m}$ i zanemarivo neke duljine u vidljivom dijelu spektra. Ozon (O_3) apsorbira pojedine valne duljine u ultraljubičastom ($0,20$ do $0,36 \mu\text{m}$), vidljivom ($0,43$ do $0,75 \mu\text{m}$) i infracrvenom (3 do $5 \mu\text{m}$) dijelu spektra. Apsorpcija ovisi i o ukupnom

ozonu koji se mijenja tijekom godine. Atmosferski plinovi apsorbiraju zračenje samo u strogo ograničenom području spektra, fotone određene valne duljine, pa se takva apsorpcija naziva selektivna apsorpcija (slika 14) [2].



Slika 14. Spektar zračenja AM 0 i Am 1,5 i spektar zračenja crnog tijela temperature 5800 K normaliziran na 1367 W/m² s utjecajem atmosferskih plinova [17]

Raspršeno Sunčevo zračenje se može mjeriti piranometrom ako se Sunčev disk zasjeni tako da do instrumenta ne može doći izravno Sunčevo zračenje. To se može postići na više načina. Najčešće se za zasjenjivanje koristi polukružna ili kružna metalna traka (slika 15), promjera od 0,5 do 1,5 m orijentirana u smjeru istok zapad tako da zasjenjuje Sunčev disk od izlaska do zalaska Sunca s vidnim kutnom zasjenjenja dovoljnim da potpuno blokira Sunčev disk (npr. 10,6° za Kip&Zonen CM 121B). Traka je prekrivena slojem crne boje vrlo male reflektivnosti kako bi se spriječilo odbijanje zračenja od trake. Omjer širine trake i promjera se kreće između 0,09 i 0,35. Izvedbom trake u obliku U-profila, može se ostvariti konstantnost vidnog kuta u granicama od $\pm 2\%$. Kako se Sunčeva deklinacija mijenja tijekom godine traku je potrebno pomicati svakih nekoliko (najčešće dva) dana, pa je nužna stalna prisutnost kvalificiranog osoblja.

Traka zasjenjuje piranometar mnogo više nego je potrebno za blokiranje izravnog Sunčevog zračenja. Zbog anizotropnosti²² raspršenog zračenja s maksimumom blizu Sunčevog diska gubitak zračenja zbog zasjenjenja dijela neba može biti znatan. Zbog toga je potrebno izračunati korekcijski faktor koji uzima u obzir površinu neba koja je zasjenjena i iznos raspršenog zračenja koji potječe upravo od tog dijela neba [17].



Slika 15. Piranometar CM11 Kipp & Zonen sa sjenilom CM 121 za mjerenje raspršenog Sunčevog zračenja [17]

3.3.3. Odbijeno (reflektirano) Sunčevo zračenje

Nakon prolaska kroz atmosferu, Sunčevo zračenje nailazi na tlo ili vodenu površinu (more, jezera, rijeke). Veći ili manji dio zračenja će se odbiti (reflektirati) ovisno o svojstvima podloge na koju naiđe. Moguća su tri procesa refleksije. Zrcalna (spekularna) refleksija moguća je na ravnim površinama (u prirodi na mirnim vodama) kada je hrapavost površine manja od valne duljine Sunčevog zračenja (od 0,4 do 2 μm). Ako je hrapavost površine usporediva s valnom duljinom zračenja, moguća je raspršujuća refleksija koja se sastoji od više zrcalnih refleksija u svim elementarnim ravninama od koje se površina sastoji. Volumna refleksija se događa kada zračenje prodre kroz površinu i odbije se od različitih slojeva ispod površine. Ukupna refleksija je zbroj zrcalne, difuzne i volumne refleksije. Svojstvo podloge da

²² anizotropnost – osobina iskazivanja različitih fizikalnih svojstava u različitim smjerovima

odbije zračenje možemo izraziti koeficijentom refleksije ili albedom²³ (ρ_g). Potpuno bijelo tijelo imalo bi albedo jedan jer bi potpuno odbijalo zračenje, a potpuno crno tijelo imalo bi albedo nula. Ako tijelo ima albedo 0,5 znači da odbija polovicu zračenja koje pada na njega. Tijela u prirodi imaju vrlo različita albeda. Vegetacija u pravilu ima relativno nizak albedo jer dobar dio zračenja apsorbiraju biljni pigmenti (klorofil²⁴, karoten²⁵, ksantofil²⁶). Vlažne površine imaju manji albedo od suhih, zbog manjeg indeksa refrakcije vode od zraka i same apsorpcije vode u crvenom dijelu spektra. Zbog toga je vlažno tlo tamnije od suhog. Zbog svoje strukture koja se sastoji od rijetko raspoređenih malih kristala leda koja uzrokuje mnogobrojne refleksije na kontaktu leda i zraka, svježiji snijeg je jedna od prirodnih površina s najmanjim albedom. U tablici 2. su prikazane prosječne vrijednosti albeda za neke karakteristične površine [2].

Tablica 2. Prosječan albedo za karakteristične površine [2]

POVRŠINA	ALBEDO
snijeg, svjež	0,75
vodene površine	0,07
zemlja	0,14
zemljani put	0,04
crnogorična šuma zimi	0,07
šuma u proljeće, obrađena polja	0,26
istrošen asfalt	0,10
istrošen beton	0,22
suho lišće	0,30
suha trava	0,20
zelena trava	0,26
bitumenozni krov	0,13
lomljeni kamen	0,20
zgrade, tamne (crvena cigla, tamna fasadna boja)	0,27
zgrade, svijetle (svijetla cigla, svijetla fasadna boja)	0,60

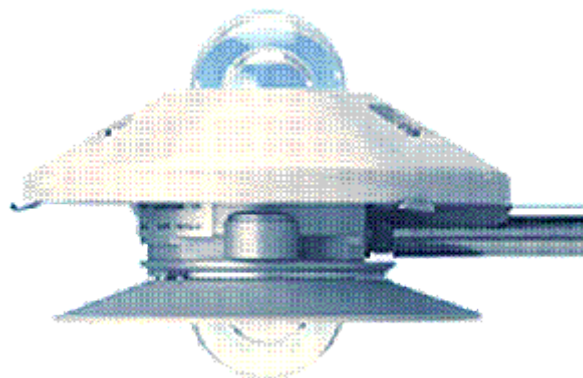
²³ albedo – sposobnost odbijanja (refleksije) Sunčevog zračenja za neke tvari, omjer između odbijenog i upadnog zračenja

²⁴ klorofil – biljno zelenilo, složeni pigment neophodan u procesu fotosinteze, plavozelen do žutozelen

²⁵ karoten – narančastožuti biljni pigment

²⁶ ksantofil – žuti biljni pigment koji dolazi uz klorofil i prevladava u požutjelom lišću

Odbijeno (reflektirano) Sunčevo zračenje prema preporukama WMO-a mjeri se na visini 1-2 m, po mogućnosti iznad pokošene travnate površine. Za područja gdje se zimi zadržava snijeg, potrebno je instrument ugraditi na mehanizam koji regulira jednaku udaljenost od površine bez obzira na visinu snijega. Sam nosač instrumenta ne smije utjecati na mjerenje i treba ga postaviti sa sjeverne strane instrumenta. Piranometar za mjerenje odbijenog zračenja treba imati posebno konstruiranu zaštitnu masku koja sprečava da kupolu piranometra obasjava Sunce na izlasku i zalasku. Također je potrebno ugraditi zaštitnu masku iznad cijelog instrumenta da se spriječi pretjerano zagrijavanje i zaštititi instrument od oborina. Točna mjerenja odbijenog zračenja vrlo su važna za procjenu ozračenosti nagnute plohe.



Slika 16. Albedometar CM7B Kipp & Zonen [17]

Često se umjesto mjerenja odbijenog zračenja, mjeri albedo, odnos ukupnog zračenja koje padna na plohu i zračenja koje ta ploha odbije. Instrument koji mjeri albedo, albedometar, sastoji se od dva piranometra (slika 16). Gornji piranometar mjeri ukupno Sunčevo zračenje a donji mjeri Sunčevo zračenje odbijeno od tla. Iako je u literaturi naglašena važnost upotrebe izmjerenog albeda za svaku lokaciju, ipak se albedo vrlo rijetko mjeri. Vrijednost albeda 0,2 je u najširoj upotrebi kada se ne raspolaže s izmjerenim albedom, a temelji se na radovima Liu i Jordana [17].

3.4. Trajanje sijanja Sunca (osunčavanje)

Pojam "sijanje Sunca" definira situaciju kada Sunčev disk rasvjetljuje predmete snažnije od raspršenog zračenja neba, odnosno pojavu sjene iza rasvjetljenih objekata. Pojam je više vezan uz vidljivo svjetlo nego uz ostale frekvencije Sunčevog zračenja. WMO definira sijanje Sunca kao razdoblje u kojem je intenzitet Sunčevog zračenja veći od 120 W/m^2 . Trajanje sijanja Sunca ili osunčavanje se mjeri u satima.

U praksi je pojam prvotno definiran uz registraciju na Campbell-Stokesovom heliografu, instrumentu koji sijanje Sunca registrira izgaranjem posebne trake smještene iza posebne staklene leće koja zrake koncentrira na traku koja se mora mijenjati svaki dan. Campbell-Stokesov heliograf je možda najstariji instrument koji se još uvijek zadržao u redovnim meteorološkim mjerenjima (uveden u redovnu meteorološku službu 1880. godine), a prema nekima jedan je od najljepših mjernih instrumenata. Instrument je 1853. godine razvio J. Campbell. Njegov instrument se sastojao od staklene kugle napunjene vodom koja je postavljena u sredini izdubljene drvene posude. Staklena kugla fokusira Sunčevo zračenje na unutrašnju površinu posude i ostavlja nagoreni trag na drvu. G. Stokes je 1879. godine unaprijedio Campbellov instrument do izvedbe koja se koristi i danas. Stokesov instrument koristi staklenu kuglu od visokokvalitetnog stakla smještenu u sredini metalnog ležišta koje se može prilagođavati prema geografskoj širini. Papirna traka se stavlja iza kugle u smjeru istok zapad tako da se Sunčevo zračenje koncentrira kroz kuglu i progorijeva traku toplinskim djelovanjem. Na traci su označeni sati pa je moguće ustanoviti kad i koliko je Sunce sijalo. Traka se treba mijenjati svaki dan i obično je različita za ljeto, zimu i proljeće (jesen). Da bi traka počela registrirati potreban je određen intenzitet Sunčevog zračenja, ovisno o instrumentu između 80 i 280 W/m^2 . Ako je traka vlažna (česta situacija u zimskim jutrima) mora se prije nego započne registracija osušiti za što je potrebna određena količina topline, što znači da vlažna traka počinje kasnije registrirati od suhe. Krajevi metalne školjke zaklanjaju suprotnu stranu trake određeno vrijeme kod izlaza i zalaza Sunca. Često se trake ne postavle dobro pa registracija nije točna. Najvažnija prednost Campbell-Stokesova heliografa, mogućnost rada bez potrebe za električnom energijom, nije više presudna zbog dostupnosti električnog napajanja na sve većem broju meteoroloških postaja. Za točno očitavanje mjerenja je potrebna vizualna procjena iskusnog osoblja. Sama konstrukcija instrumenta ne omogućava automatizirano prikupljanje podataka pa WMO preporučuje napuštanje mjerenja trajanja sijanja Sunca Campbell-Stokesovim heliografom.



Slika 17. Heliograf Negretti & Zambra (David Friend Productions, San Diego, California) [17]

Heliografi se trebaju postavljati na mjesta sa slobodnim obzorom bez ikakvih prepreka u smjeru izlaska i zalaska Sunca. Za naše zemljopisne širine to znači otvorenost obzora za izlaz od NE do SE (50° - 140°) i zalaz od SW do NW (220° - 310°). Ukoliko prepreke ipak postoje, one će skraćivati registraciju heliografa ako su veće od visine Sunca pri kojima heliograf počinje ili prestaje registraciju. Ako su prepreke manje njihov utjecaj će biti obuhvaćen instrumentalnom greškom heliografa pa se mogu zanemariti. Svjetska meteorološka organizacija preporučuje najvišu visinu prepreka do 3° pri čemu izgubljeni dio registracije neće biti značajan. Takav horizont smatramo kvaziidealnim. Međutim, velik broj mjernih postaja nema niti kvaziidealni horizont. Čak i ako se instrument jednom pravilno postavi mogu se tijekom vremena pojaviti prepreke, novoizgrađene zgrade, stupovi ili narasla stabla. Stabla predstavljaju velik problem jer se prepreka na vjetru pomiče, postepeno se povećava, tijekom godine se mijenja jer u proljeće prolista a u jesen izgubi lišće [17].

4. Proračun Sunčevog zračenja

4.1. Proračun prizemnog Sunčevog zračenja

Pri proračunu sunčanih uređaja najčešće su potrebni podaci o mjesečnom prosjeku ukupne dnevne ozračenosti. Da bi mogli proračunati te podatke, potrebno je poznavati vrijednost dnevne ekstraterestičke ozračenosti horizontalne plohe. Iz definicije ozračenosti slijedi da je dnevna ekstraterestička ozračenost (od izlaska do zalaska Sunca) horizontalne plohe:

$$H_{0h} = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon(n) \overline{E}_0 \cos \vartheta_z dt \quad (36)$$

Uvrštavajući izraz za ekscentricitet Zemljine orbite i uz:

$$\cos \vartheta_z = \cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (37)$$

slijedi:

$$H_{0h} = \int_{-\omega_s}^{\omega_s} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{n}{365} \cdot 360^\circ \right) \right) \overline{E}_0 (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) d\omega, \quad (38)$$

odnosno izraz:

$$H_{0h} = \frac{86400}{\pi} \overline{E}_0 \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{n}{365} \cdot 360^\circ \right) \right) \left(\frac{\pi}{180^\circ} \omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s \right) \quad (39)$$

Mjesečni prosjek dnevne ekstraterestičke ozračenosti horizontalne plohe $\overline{H}_{0h}$ se dobije kao aritmetička sredina vrijednosti dobivenih za sve dane u mjesecu.

Za mnoga područja ne postoje izmjereni podaci o Sunčevu zračenju, a na mnogim mjestima su mjerenja tek nedavno započeta. Ukoliko ne postoje podaci dobiveni mjerenjem, Sunčevo zračenje se može izračunati koristeći razvijene empirijske formule i modele. Oni omogućuju proračun mjesečnog prosjeka ukupne dnevne ozračenosti horizontalne plohe ($\overline{H}$) koristeći izmjerene klimatološke podatke koji su općenito dostupniji (npr. podaci o insolaciji ili o temperaturi).

Jedna od prikladnih relacija je Ångström-Pageova relacija koja omogućuje proračun mjesečnog prosjeka ukupne dnevne ozračenosti $\overline{H}$ uz poznavanje podataka o srednjoj dnevnoj vrijednosti relativnog trajanja sijanja Sunca $\overline{S}$ i srednje

dnevne vrijednosti ekstraterestičke ozračenosti horizontalne plohe za promatrani mjesec:

$$\overline{H} = \overline{H}_0(a + b\overline{S}) \quad (40)$$

Dakle, potrebno je izmjeriti samo insolaciju i poznavati zemljopisnu širinu mjesta, a ostali se podaci mogu izračunati.

Srednja dnevna vrijednost relativnog trajanja Sunčeva zračenja se izračuna kao omjer stvarne insolacije dobivene mjerenjem s i najveće moguće insolacije Z (trajanja sunčanog dana) za određeni dan:

$$\overline{S} = \frac{\overline{s}}{\overline{Z}} \quad (41)$$

Koeficijenti a i b ovise o promatranom mjestu i moraju se izračunati [11].

4.1.1. Proračun koeficijenata a i b

Spomenuta Ångström-Pageova relacija (40) je najčešće korištena empirijska relacija za proračun Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu jer je primjenjiva na veliki broj područja. Uobičajeno je izračunavanje vrijednosti a i b za mjesta na kojima postoje izmjereni podaci o ukupnom Sunčevu zračenju i insolaciji. Tako izračunati koeficijenti se mogu koristiti u proračunu ukupnog zračenja na mjestima sličnih zemljopisnih i klimatskih uvjeta. Međutim, problem je što čak i za bliska i klimatski vrlo slična područja vrijednosti koeficijenata a i b ponekad pokazuju znatne razlike što predstavlja zapreku pri odabiru njihovih vrijednosti za mjesta na kojima nisu dostupni izmjereni podaci. Stoga se te vrijednosti pokušavaju proračunati iz različitih podataka.

Rietveld je ispitivao neke objavljene vrijednosti za a i b i zapazio da je a vezan linearno, a b hiperbolički sa srednjom vrijednosti relativnog trajanja Sunčeva zračenja $\overline{S}$:

$$a = 0,1 + 0,24 \frac{\overline{s}}{\overline{Z}} \quad (42)$$

$$b = 0,38 + 0,8 \frac{\overline{Z}}{\overline{s}} \quad (43)$$

Uvrštavajući tako dobivene vrijednosti za a i b u relaciju (40) dobija se sljedeći izraz:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} = 0,18 + 0,62 \frac{\overline{s}}{\overline{Z}} \quad (44)$$

gdje je $\overline{s}$ mjesečni prosjek dnevne insolacije, a $\overline{Z}$ mjesečni prosjek maksimalne moguće dnevne insolacije.

Neuwirth je razmatrao utjecaj nadmorske visine promatranog mjesta na koeficijente a i b i razvio kvadratnu vezu za područja u Austriji.

Glover i McCulloch su uključili utjecaj zemljopisne širine φ te predložili formulu oblika:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} = 0,29 \cos \varphi + 0,52 \frac{\overline{s}}{\overline{Z}} \quad (45)$$

Uz postojeće ovisnosti parametara a i b o visini, trajanju sijanja Sunca i zemljopisnoj širini promatranog mjesta, pokušalo se razviti novu relaciju koja bi uključivala sve navedene ovisnosti. U provedenoj analizi korištene su poznate vrijednosti a i b i podaci o srednjoj mjesečnoj insolaciji za 40 različitih lokacija u svijetu. Ovisnost koeficijenata a i b o zemljopisnoj širini, visini i relativnom trajanju Sunčeva zračenja je prikazana relacijama sljedećeg oblika:

$$a = A_0 + A_1 \cos \varphi + A_2 h + A_3 \frac{\overline{s}}{\overline{Z}} \quad (46)$$

$$b = B_0 + B_1 \cos \varphi + B_2 h + B_3 \frac{\overline{s}}{\overline{Z}} \quad (47)$$

gdje je φ zemljopisna širina u stupnjevima, h nadmorska visina u kilometrima, $\frac{\overline{s}}{\overline{Z}} = \overline{S}$

omjer stvarnog i maksimalnog mjesečnog prosjeka dnevne insolacije, $A_0...A_3$ i $B_0...B_3$ su konstante. Za proračun konstanti A i B korišteni su dostupni podaci o a , b , φ , h i $\overline{S}$ sa 40 različitih mjesta na svijetu te su razvijeni i napisani odgovarajući kompjuterski programi. Nakon toga su jednadžbe (46) i (47) korištene za proračun koeficijenata a i b za 14 novih lokacija u svijetu koje nisu korištene u prethodnoj analizi te je pomoću njih uz poznate izmjerene podatke o insolaciji izračunata vrijednost ukupnog zračenja. Ispitivanja su pokazala odlično slaganje tako izračunatih i izmjerenih vrijednosti ukupnog zračenja. Bitno je naglasiti da su svih 14 odabranih lokacija

potpuno različitih klimatskih i zemljopisnih uvjeta pa se stoga ova metoda može smatrati primjenjivom za bilo koje mjesto na svijetu [11].

Konačno, uključujući izračunate vrijednosti konstanti A i B :

$$a = -0,309 + 0,539 \cos \varphi - 0,0693h + 0,290\bar{S} \quad (48)$$

$$b = 1,527 - 1,027 \cos \varphi + 0,0926h - 0,359\bar{S} \quad (49)$$

4.1.2. Određivanje satnih ozračenosti iz dnevnih

Ponekad je pri proračunu rada sunčanih uređaja potrebno poznavati srednje satne ozračenosti za svaki mjesec u godini. Kako su dostupniji podaci o srednjoj dnevnoj ozračenosti, najčešće se prosječne satne ozračenosti izračunavaju. Jedan od načina proračuna je korištenjem Collares-Pereirove i Rablove formule koja daje približnu vrijednost prosječne satne ozračenosti $\bar{H}_s$ iz poznate prosječne dnevne ozračenosti $\bar{H}$:

$$\bar{H}_s = \bar{H} \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{2\pi\omega_s}{360^\circ} \cos \omega_s} \quad (50)$$

gdje su koeficijenti a i b :

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (51)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (52)$$

ω satni kut Sunca sredinom onog sata za koji čitamo satnu ozračenost, a ω_s je prosječna mjesečna vrijednost kuta izlaska, odnosno zalaska Sunca. Pretpostavlja se da primjenjivost formule nije ograničena klimatskim uvjetima područja [11].

4.1.3. Udio raspršenog zračenja u ukupnom

Procjena udjela raspršenog zračenja u ukupnom je važna jer pri oblačnom vremenu ono predstavlja većinu zračenja koje dolazi do plohe kolektora fotonaponskog sustava. Raspršeno zračenje se može izmjeriti (piranometrom kojemu se onemogućiti dolazak zračenja izravno iz smjera Sunca) ili izračunati. Srednja dnevna ozračenost raspršenim zračenjem se uglavnom ne mjeri pa je prosječnu

dnevnu raspršenu ozračenost horizontalne plohe $\overline{H}_d$ potrebno izračunati iz srednje dnevne ukupne ozračenosti horizontalne plohe $\overline{H}$. Udio raspršene ozračenosti u ukupnoj je jednak:

$$\overline{K}_d = \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} \quad (53)$$

i on je funkcija tzv. *indeksa prozračnosti* $\overline{K}_T$ koji je definiran kao:

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} \quad (54)$$

gdje je $\overline{H}$ srednja dnevna prizemna vrijednost ukupne ozračenosti na horizontalnu plohu, a $\overline{H}_0$ srednja dnevna ekstraterestička ozračenost za horizontalnu plohu na istoj zemljopisnoj širini i za određeni mjesec. Postoji nekoliko empirijskih relacija za proračun udjela raspršene ozračenosti u ukupnoj pomoću indeksa prozračnosti atmosfere (eng. clearness index) koje su dali B.Y.H.Liu, R.C.Jordan, S.A.Klein, J.K.Page i dr. [11].

Relacije prilagođene našem području su:

$$\overline{K}_d = 1,05 - 1,125\overline{K}_T \quad (55)$$

odnosno nešto točnija:

$$\overline{K}_d = 1,60 - 4,17\overline{K}_T + 5,29\overline{K}_T^2 \quad (56)$$

4.2. Sunčevo zračenje na nagnutu plohu

U većini praktičnih primjena iskorištenja sunčane energije fotonaponskom pretvorbom Sunčevo zračenje upada na nagnutu plohu. Snaga koju takav fotonaponski sustav daje određen je osim karakteristikama upadnog zračenja i kutom pod kojim ono upada na promatranu plohu. Sunčevo zračenje na nagnutu plohu se mjeri vrlo rijetko (aktinometrija mjeri samo zračenje na horizontalnu plohu) pa je najčešća potreba do tih podataka koji su vrlo važni za proračun djelotvornosti

fotonaponskog uređaja doći proračunom iz aktinometrijskih podataka za promatrano područje.

Metoda koju su razvili Liu, Jordan i Klein omogućuje proračun srednje dnevne ozračenosti (mjesečni prosjek) plohe nagnute prema jugu iz podataka o Sunčevu zračenju na horizontalnu plohu koje daje meteorološka služba [11].

4.2.1. Proračun Sunčeva zračenja na nagnutu plohu (Liu, Jordan, Klein)

Ukupno ozračenje Sunčevim zračenjem (E_β) koje upada na plohu nagnutu pod kutom β sastoji se od tri komponente:

1. od izravnog Sunčeva zračenja koje upada na plohu ($E_{b\beta}$);
2. od raspršenog zračenja dijela neba koji se nalazi iznad plohe ($E_{d\beta}$) i
3. od zračenja odbijenog od tla i okolnih predmeta ($E_{r\beta}$)

Prema tome, može se pisati:

$$E_\beta = E_{b\beta} + E_{d\beta} + E_{r\beta} \quad (57)$$

Izravno sunčano ozračenje nagnute plohe $E_{b\beta}$ je:

$$E_{b\beta} = E_b \frac{\cos \vartheta_\beta}{\cos \vartheta_z} = E_b \frac{\cos \vartheta_\beta}{\sin \alpha} = E_b R'_b \quad (58)$$

gdje je ϑ_β kut između upadnih zraka i normale na plohu, tj. kut upada Sunčevih zraka na nagnutu plohu, ϑ_z kut upada Sunčevih zraka na horizontalnu plohu, a E_b izravno ozračenje horizontalne plohe.

Omjer izravnog ozračenja južno orijentirane plohe nagnute pod kutom β prema horizontali ($E_{b\beta}$) i izravnog ozračenja horizontalne plohe (E_b) naziva se faktorom R'_b i on ovisi o položaju Sunca i kutu nagiba plohe:

$$R'_b = \frac{\cos \vartheta_\beta}{\sin \alpha} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (59)$$

gdje je φ zemljopisna širina, δ deklinacija Sunca, ω satni kut Sunca i β nagib plohe prema horizontali.

Srednja vrijednost dnevne izravne ozračenosti nagnute plohe se dobije integriranjem i izračunavanjem prosjeka:

$$\overline{H}_{b\beta} = \overline{R}_b \overline{H}_b \quad (60)$$

gdje je $\overline{R}_b$ omjer srednje dnevne izravne ozračenosti nagnute i horizontalne plohe za pojedini mjesec, a $\overline{H}_b$ srednja dnevna izravna ozračenost horizontalne plohe. Dnevna vrijednost faktora $\overline{R}_b$ za plohe okrenute prema jugu može se izračunati pomoću izraza:

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (61)$$

gdje je ω_s vremenski kut izlaska (zalaska) Sunca za horizontalnu plohu, ω'_s vremenski kut izlaska (zalaska) Sunca za nagnutu plohu dan sa:

$$\omega'_s = \min\{\omega_s, \arccos[-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta]\} \quad (62)$$

δ deklinacija Sunca i β nagib plohe. Srednja vrijednost se dobiva kao aritmetička sredina faktora R_b izračunatog za svaki dan u mjesecu ili uvrštavanjem u (61) i (62) vrijednosti prosječne mjesečne deklinacije. Faktori R'_b se obično računaju za vrijeme od izlaska do zalaska Sunca s periodom od 1 h i nazivaju se satni faktori. Dnevni faktori R_b se dobivaju integriranjem po cijelom Sunčevu danu.

Ozračenost nagnute plohe raspršenim zračenjem $H_{d\beta}$ se razlikuje od raspršene ozračenosti horizontalne plohe H_d , jer nagnuta ploha ne dobija zračenje iz hemisfere iznad tla nego samo od jednog njenog dijela. Uz pretpostavku da je raspršeno zračenje neba izotropno (jednako u svim smjerovima), tada je dio hemisfere iz kojeg dolazi raspršeno zračenje na nagnutu plohu proporcionalan prostornom kutu pod kojim se vidi nebo s nagnute plohe:

$$\overline{H}_{d\beta} = \overline{H}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (63)$$

gdje je β kut koji ploha zatvara s horizontalom.

Na nagnutu plohu dolazi i zračenje odbijeno s tla i okolnih objekata. Srednja dnevna ozračenost nagnute plohe odbijenim (reflektiranim) zračenjem je:

$$\overline{H}_{r\beta} = \rho \overline{H} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (64)$$

gdje je $\overline{H}$ ukupna srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe.

Ukupna ozračenost nagnute plohe je dakle:

$$\overline{H}_\beta = \overline{H}_{b\beta} + \overline{H}_{d\beta} + \overline{H}_{r\beta} = \overline{H}_b \overline{R}_b + \overline{H}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \overline{H} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (65)$$

Kako je: $\overline{H}_b = (\overline{H} - \overline{H}_d)$ (66)

slijedi:

$$\overline{H}_\beta = (\overline{H} - \overline{H}_d) \overline{R}_b + \overline{H}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \overline{H} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (67)$$

$$\overline{H}_\beta = \left[\left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} \right) \overline{R}_b + \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \overline{H} \quad (68)$$

$$\overline{H}_\beta = \left[(1 - \overline{K}_d) \overline{R}_b + \overline{K}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \overline{H} = \overline{R} \overline{H} \quad (69)$$

gdje je $\overline{R}$ omjer srednje dnevne ozračenosti nagnute plohe i srednje dnevne ozračenosti horizontalne plohe za pojedini mjesec [11]:

$$\overline{R} = (1 - \overline{K}_d) \overline{R}_b + \overline{K}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (70)$$

5. Izravno pretvaranje energije Sunčevog zračenja u električnu energiju fotonaponskim ili Sunčevim ćelijama

Energija sunčevog zračenja izravno se može koristiti za proizvodnju električne energije fotonaponskim (*photovoltaic*, PV) odnosno sunčevim ćelijama. Termin *photovoltaic* prvi puta je upotrebljen krajem 19. stoljeća, nastao je spojem riječi *photo* (grč. svjetlo) i *volt* (po Alessandru Volti). U doslovnom prijevodu termin *photovoltaic* znači "struja iz svjetla" i upravo takav prijevod najbolje opisuje princip rada fotonaponskih (PV) ćelija – pretvaranje energiju sunčevog zračenja u električnu energiju putem fotonaponskog efekta [10].

5.1. Povijest fotonaponskih (PV) ćelija

Razvoj fotonaponskih ćelija počinje 1839. godine istraživanjima francuskog fizičara Edmonda Becquerela. On je primijetio fotonaponski efekt dok je eksperimentirao sa elektrodama u otopini elektrolita prilikom čega se stvorio napon kada su elektrode bile izložene svjetlu. Nedugo nakon Becquerel-ovog otkrića, točnije 1870. godine Hertz je proučavajući selen (Se) uspio ostvariti pretvorbu svijetla u elektricitet efikasnosti oko 1%. Nakon navedenih otkrića počinje razvoj solarnih ćelija, te su preglednosti radi važniji događaji prikazani u vremenskom slijedu:

- 1883. godine američki izumitelj Charles Fritts opisao je prvu sunčevu (PV) ćeliju načinjenu od selena kao vodiča sa vrlo tankim slojem zlata.
- 1905. godine proslavljeni fizičar Albert Einstein objavio je znanstveni dokaz fotonaponskog efekta, ali i teoriju relativnosti. Upravo za znanstveni dokaz fotonaponskog efekta 1921. godine osvojio je Nobelovu nagradu (jedinu).
- 1916. godine Robert Millikian pružio je eksperimentalni dokaz fotonaponskog efekta.
- 1918. godine poljski znanstvenik Jan Czochralski otkrio je način proizvodnje čistog silicija (Si), a koji je uspio proizvesti tek nakon 1950. Čistoća proizvedenog silicija bila je oko 99.99%, te je od tada pa do današnjeg dana na osnovi silicijske tehnologije proizvedeno daleko najviše elektroničkih komponenti.

-
- 1954. godina smatra se početkom fotonaponske tehnologije. Naime, te godine su tri američka znanstvenika (Pearson, Fuller i Chapin) razvili prvu PV ćeliju koja je mogla generirati upotrebljivu količinu energije (efikasnosti oko 4%).
 - 1958. počinje upotreba PV tehnologije u svemirskom programu SAD-a.

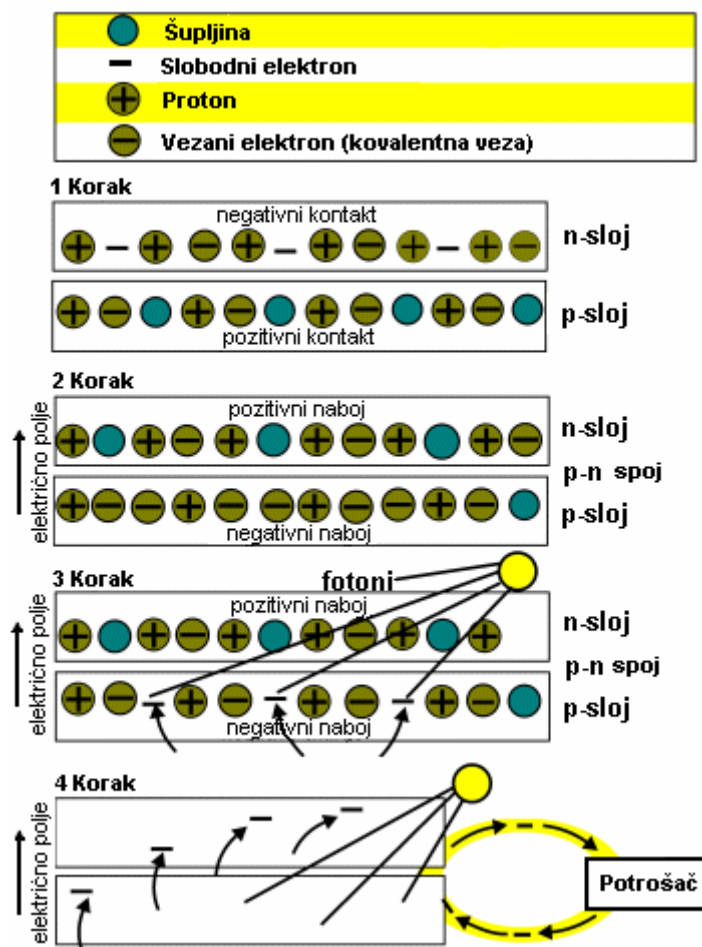
Dakle, početkom 60-ih godina prošloga stoljeća počinje razvoj fotonaponske tehnologije prvenstveno za potrebe svemirskog programa, odnosno napajanja satelita, što je u konačnici dovelo do komercijalne primjene PV ćelija kakvu danas poznajemo [10].

5.2. Fotonaponski efekt

Prije no što se pojasni fotonaponski efekt, potrebno je reći nešto o poluvodičima, odnosno materijalima na kojima se fotonaponski efekt bazira. Materijali se po svojstvu električne provodljivosti dijele na vodiče (uglavnom metali), poluvodiče (Si, Ge, GaAs, GaP) i izolatore. Poluvodiči su izolatori na temperaturi apsolutne nule, sa porastom temperature eksponencijalno se povećava broj nosilaca naboja koji mogu provoditi električnu struju. Poluvodiči se s obzirom na vrstu električne provodljivosti dijele u dva tipa: n-tip s elektronima i p-tip s tzv "šupljinama" (engl. *hole*) kao osnovnim nosiocima naboja. Najvažniji i najznačajniji poluvodički materijal je silicij (Si) i iz njega je proizvedeno daleko najviše (>95%) elektroničkih komponenti, dioda, tranzistora i integriranih krugova.

Na primjeru silicija (Si) pojasniti će se kako se dobiva p-tip, odnosno n-tip poluvodiča. U kristalu silicija atomi su učvršćeni kovalentnom, odnosno stabilnom vezom. Ukoliko se u kristal Si ugradi (dopira) mala količina (10^{16} do 10^{29} atoma/cm³) nekog od elemenata iz V skupine elemenata (npr. P ili As) kristalna struktura (cca 10^{23} atoma/cm³) ostaje sačuvana. Atomi iz V skupine se ugrađuju na mjesta Si atoma, ali pritom moraju "otpustiti" svoj peti elektron kako bi ostao okružen s 8 atoma (kovalentna veza). Taj otpušteni elektron postaje slobodni nosilac naboja i budući da je negativan, takav poluvodič se naziva n-tip. Isto tako ako se u kristal Si ugradi (dopira) mala količina nekog od elemenata iz II skupine (npr. B), taj se atom ugrađuje na mjesto na mjestu Si atoma. Pri tom mu za konfiguraciju 8 elektrona u okruženju nedostaje jedan elektron, on ga "traži" i ponaša se kao pozitivna čestica. Takva

"pozitivna čestica" naziva se "šupljina", a poluvodič gdje su pozitivne šupljine nosioci naboja naziva se p-tip.



Slika 18. Prikaz fotonaponskog efekta [10]

Posebno iskonstruiran i dizajniran oblik p–n spoja, koji omogućuje prostorno padanje svjetla na što veću njegovu površinu, pri čemu svjetlost (fotoni) ulaskom u materijal p–n spoja prijenosom svoje energije "oslobađaju" slobodne nosioce naboja elektrone i šupljine, naziva se **fotonaponska ćelija**.

Pojava koja ima za posljedicu "oslobađanje" slobodnih nosioca naboja pod djelovanjem svjetlosti te stvaranje električnog toka naziva se **fotonaponski efekt**, koji je prikazan na slici 18. Prvi korak prikazuje stanje fotonaponske ćelije prije nego što se p-tip i n-tip poluvodiča spoje. Iako su oba poluvodička materijala električki neutralna, spajanjem p-tipa i n-tipa poluvodiča nastaje takozvani p-n spoj koji za posljedicu ima stvaranje električnog polja. U trenutku kada se n-tip Si poluvodiča i p-tip Si poluvodiča spoje, višak elektrona od strane n-tipa kreće se ka p-tip strani. Rezultat navedenih događaja je nagomilavanje pozitivnog naboja na n-tip strani

ćelije, odnosno nagomilavanje negativnog naboja na p-tip strani ćelije (korak 2). Kada fotoni pogode fotonaponsku ćeliju oni se mogu reflektirati, proći direktno kroz nju ili biti apsorbirani. Samo apsorbirani fotoni daju energiju za proizvodnju struje. Kada poluvodič apsorbira dovoljno svjetla elektroni se istiskuju iz atoma materijala, sele se ka prednjem (negativnom) kontaktu ćelije dok se u isto vrijeme šupljine kreću u suprotnom smjeru ka donjem (pozitivnom) kontaktu ćelije gdje očekuju elektrone (korak 3). Napon na vanjskim kontaktima p-n spoja može se povezati sa potrošačima pri čemu će se stvarati naboj i teći DC struja sve dok postoji upadni tok svjetlosti (korak 4) [10].

5.3. Način izrade i tipovi fotonaponskih ćelija

Fotonaponske ćelije mogu biti izrađene od različitih tipova poluvodičkih materijala, koji mogu biti složeni u različite strukture s ciljem postizanja što bolje efikasnosti pretvorbe. Za izradu fotonaponskih ćelija koriste se sljedeći poluvodički materijali i tehnologije:

- **Silicij (Si)** – uključujući monokristalni silicij (c-Si), polikristalni silicij (p-Si) te amorfni silicij (a-Si).
- **Polikristalni tankoslojni materijali** (polikristalni tanki film) – uključujući CIS spoj poluvodičkih materijala (Bakar-Indij-Diselenid), CdTe (Kadmij-Telurid) te tankoslojni silicij (većinom amorfni silicij).
- **Monokristalni tankoslojni materijali** (monokristalni tanki film) – većinom izvedeni od Galij-Arsenida (Ga-As).
- **Multijunction strukture materijala** – kombinacije raznih poluvodičkih materijala.

5.3.1. Sunčeve ćelije izrađene od monokristalnog (c-Si) silicija

Sunčeve ćelije izrađene od monokristalnog silicija imaju tzv. *homojunction* strukturu, što znači da se sastoje od istog materijala koji je modificiran tako da je na jednoj strani ćelije p-sloj, a na drugoj n-sloj Si poluvodiča. Unutar ćelije, p-n spoj lociran je tako da se maksimum sunčevog zračenja apsorbira blizu spoja. Površina takvih ćelija ovisi o presjeku monokristala od kojeg se proizvode, iznosi od 5 do 10 cm, debljina im je od 200 do 300 μm . Napon takve ćelije je od 0.55 do 0.70 V.

Teorijska efikasnost im je oko 22%, dok je stvarna efikasnost oko 15%. Jedina mana ćelija izrađenih od monokristalnog silicija je visoka proizvodna cijena, zbog zamršenog procesa proizvodnje. Najpouzdanije metode proizvodnje monokristalnog silicija su *Czochralski* (Cz) te *Float-zone* (FZ) procesi, dok se u zadnje vrijeme sve više koristi tzv. *Ribbon growth* tehnologija.

Czochralski metodom, silicij visoke čistoće se zagrijava na velikoj temperaturi dok se ne rastali (slika 19). Potom se na površinski dio rastaljenog silicija koji se nalazi u cilindričnom kalupu dodaje zrnice monokristalnog silicija. Dok se zrno polagano uzdiže iz kalupa, atomi rastaljenog silicija zgušnjavaju se u strukturu dodanog zrnca, odnosno monokristalnu strukturu.



Slika 19. *Czochralski* proces [10]

Float-zone poces proizvodi čistiju kristalnu strukturu no *Czochralski* proces budući da ne sadrži posudu za taljenje. U *float-zone* procesu poluga sačinjena od silicija visoke čistoće postavlja se iznad monokristalnog zrna te se propušta kroz elektromagnetsku zavojnicu. Magnetsko polje zavojnice inducira električno polje unutar poluge, posljedica čega je zagrijavanje i topljenje površinskog spoja između poluge i zrna. Pošto se zavojnica polagano uzdiže, unutar spoja poluge i zrna formira se monokristalni silicij koji "raste prema gore". *Czochralski* i *Float-zone* procesi proizvode monokristalni silicij u obliku kalupa ili podloge, koje je potrebno razrezati u tanke pločice pri čemu se 20% skupog materijala gubi (piljevina). Kao alternativa navedenim tehnologijama pojavila se *Ribbon growth* tehnologija.

Ribbon growth proces započinje sa dva monokristalna Si zrnca koji rastu te zauzimaju površinu tankog okvira dok se polagano izvlače iz posude sa tekućim silicijem. Kada je okvir izvučen iz posude, iz njega se vadi gotova tanka pločica. Ovakva tehnologija nema velikih gubitaka materijala, ali zato kvaliteta monokristalnog

The diagram on the left illustrates the layered structure of a thin-film solar cell. From top to bottom, the layers are: Gornji kontakt (Top contact), Antirefleksijski sloj (Antireflective layer), Transparentni sloj (Transparent layer), and Staklo (Glass). Below these is the active layer, which consists of an n-tip poluvodiča (n-type semiconductor) and a p-tip poluvodiča (p-type semiconductor). The bottom layer is the Podloga (Substrate), which also serves as the Donji kontakt (Bottom contact). Sunčeva svjetlost (Solar light) is shown as orange arrows entering from the top. A circuit diagram shows DC struja (DC current) flowing from the top contact, through a light bulb, and back to the bottom contact.

The photograph on the right shows a person wearing white gloves holding a flexible, rectangular solar panel. The panel has a grid of small, square cells. The person is holding the panel by its edges, demonstrating its flexibility.

5.3.2. Sunčeve ćelije izrađene od polikristalnog silicija (p-Si)

Polikristalinski silicij moguće je proizvesti na više načina, najraširenije metoda sastoji se od izlijevanja tekućeg silicija u kalup, koji se ostavlja da se zgusne u četvrtasti oblik poput cigle. Krajnja količina kristala i nečistoća unutar četvrtastog oblika ovisi o brzini hlađenja. Rasijecanjem četvrtastog oblika (cigle) dobiju se tanke pločice. Postupak dobivanja polikristalne Si sunčeve ćelije identičan je postupku kod c-Si ćelija. Isto tako, presjek p-Si sunčeve ćelije identičan je presjeku c-Si ćelije (slika 20). Jedina razlika je u obliku p-Si ćelija, koje su četvrtaste (zbog kalupa) stoga se mogu bolje složiti u PV module.

46

5.3.3. Sunčeve ćelije izrađene od amorfnog silicija (a-Si)

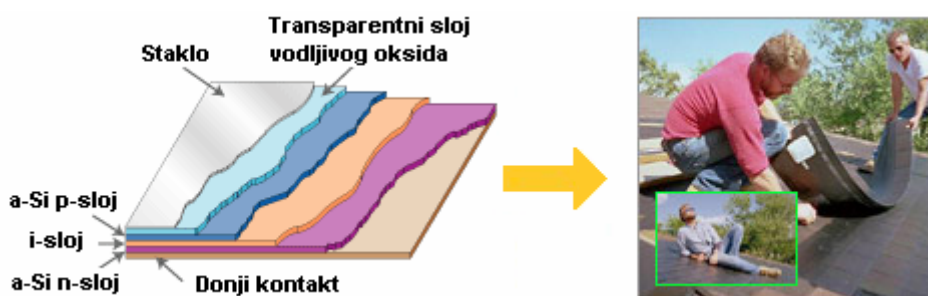
Atomi unutar amorfnih materijala nisu složeni u nikakvu posebnu strukturu, odnosno ne formiraju kristalnu strukturu. Također, amorfni materijali sadrže velik broj strukturnih defekata te lošu povezanost atoma, što znači da atomi nemaju susjeda sa kojim bi se mogli povezati. Zbog navedenog razloga elektroni će rekombinirati sa šupljinama umjesto da "uđu" u strujni krug. Budući da defekti limitiraju tok električne struje, ovakve vrste materijala su inače neprihvatljive u elektroničkim napravama. Defekti se mogu djelomično ukloniti ako se u amorfnu silicij ugradi mala količina vodika. Posljedica takvog tretiranja amorfnog silicija je kombiniranje atoma vodika sa atomima amorfnog silicija koji nemaju susjeda (nisu vezani) tako da elektroni mogu nesmetano putovati kroz materijal.

Još 1974. godine istraživači su otkrili da je amorfni (a-Si) silicij upotrebljiv u PV tehnologiji ukoliko se kontroliraju uvjeti polaganja materijala i pažljivo modificira njegov sastav. Danas se amorfni silicij koristi u napravama koje koriste sunčevu energiju kao izvor napajanja te imaju male energetske zahtjeve (kalkulatori, ručni satovi i sl.).

Amorfni silicij upija sunčevo zračenje 40 puta efikasnije naspram monokristalnog silicija, tako da sloj debljine 1 μm može upiti oko 90% energije sunčevog zračenja, naravno kada je obasjan. Upravo to svojstvo amorfnog silicija bi moglo sniziti cijenu PV tehnologije. Ostale prednosti amorfnog silicija također su ekonomskog karaktera, primjerice amorfni silicij je moguće proizvesti na niskim temperaturama te može biti položen na jeftine podloge (plastika, staklo, metal i sl.) što ga čini idealnim za integriranje PV tehnologije kao sastavni dio objekata. Na slici 21. prikazan ju načini integriranja a-Si fotonaponske tehnologije u objekte, odnosno kao krov objekta koji proizvodi električnu energiju.

Zbog jedinstvenog svojstva amorfnog silicija, sunčeve a-Si ćelije izrađene su tako da imaju ultra tanak (0.008 μm) gornji p-sloj, deblji (0.5 do 1 μm) i-sloj (nedopirani) i-sloj te izrazito tanak (0.02 μm) donji n-sloj. Takav struktura sunčeve ćelije naziva se p-i-n struktura. Budući da je gornji p-sloj ultra tanak te relativno transparentan većina svjetlosti proći će direktno kroz njega na i-sloj gdje će generirati slobode elektrone. p sloj i n sloj proizvedeni dopiranjem amorfnog silicija (a-Si) stvoriti će električno polje kroz cijelu intrističnu površinu te će inducirati kretanje elektrona kroz i-sloj. Struktura ćelije sačinjene od amorfnog silicija (a-Si) ćelije te

primjena istoga prikazani su slikom 21. Najveći nedostatak PV ćelijama izrađenima od amornog silicija je nestabilnost. Zbog djelovanja Staebler-Wronski efekta izlazna snaga a-Si ćelija se nakon prvog izlaganja sunčevoj svjetlosti smanjuje kroz određeni vremenski period. Djelovanje efekta rezultira gubicima izlazne snage od 20% dok se u konačnici a-Si ćelija ne stabilizira. Valja napomenuti da a-Si ćelije po podjeli spadaju u tzv. tankoslojne materijale. Teorijska efikasnost a-Si ćelija je oko 11.5%, stvarna efikasnost je oko 7% (i manje) [10].



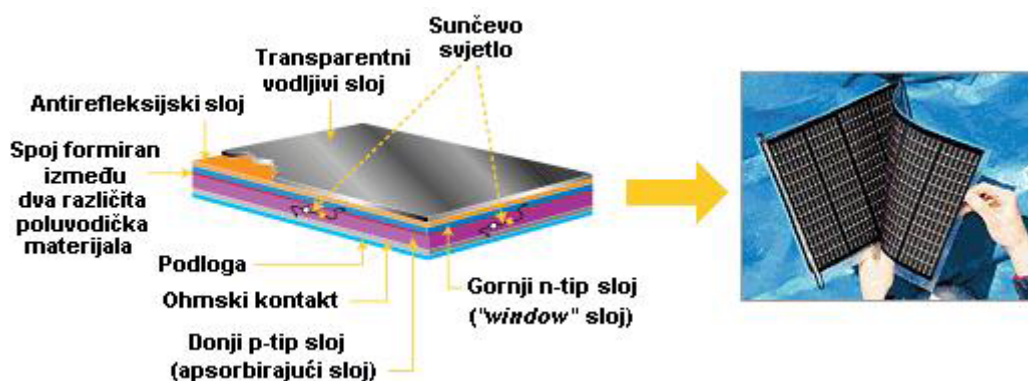
Slika 21. Struktura amorfne a-Si ćelije te praktična primjena u objektima [10]

5.3.4. Polikristalne tankoslojne sunčeve ćelije

Termin "tankoslojni", točnije "tanki film" odnosi se na tehnologiju polaganja filma, a ne na debljinu filma (sloja), pošto se tankoslojne sunčeve ćelije polažu u izrazito tankim, uzastopnim slojevima atoma, molekula ili iona. Sunčeve ćelije izrađene tehnologijom tankog filma imaju puno prednosti naspram ćelija izrađenih klasičnim metodama, primjerice:

- pri izradi tankoslojnih ćelija koristi se puno manje materijala pošto debljina takvih ćelija varira od 1 do 10 μm , dok su klasične Si ćelije debljine od 100 do 300 μm ,
- tankoslojne ćelije proizvode se automatiziranim, besprekidnim procesima te se mogu polagati na jeftine podloge (staklo, nehrđajući čelik, plastika i sl.),
- zbog fleksibilnosti proizvodne tehnologije polaganja slojeva tankog filma, ćelija standardnih dimenzija (125mm x 125mm) te modul sačinjen kao jedna velika ćelija (75cm x 150cm) mogu se proizvesti istom aparaturom,
- ćelijama izrađenim tehnologijom tankog filma nije potrebna metalna mreža za gornji kontakt (kao kod c-Si ćelija), već koriste tanki sloj transparentnog vodljivog oksida,
- slojevi tankog filma polažu se na odabranu podlogu uključujući antirefleksijski sloj te transparentni vodljivi sloj oksida, čime se skraćuje proces proizvodnje.

Polikristalne tankoslojne ćelije proizvode se od malih kristalnih zrna poluvodičkih materijala. Materijali koji se koriste za izradu polikristalnih tankoslojnih ćelija imaju drugačija svojstva nego silicijski poluvodički materijali. Stoga se za stvaranje električnog polja unutar ćelije koriste dva različita poluvodička materijala, a takva struktura ćelija naziva se *heterojunction* struktura. Tipična polikristalna ćelija izrađena tehnologijom tankog filma ima jako tanak (manji od $0.1\ \mu\text{m}$) gornji sloj n-tipa koji se naziva "window" sloj (u doslovnom prijevodu sloj koji djeluje kao prozor). Uloga gornjeg (window) sloja je fokusiranje sunčevog zračenja i to samo visokoenergetskog dijela spektra. Stoga mora biti jako tanak te imati dovoljno širok energetske procjep ($2.8\ \text{eV}$ ili više) kako bi kroz propustio što veću količinu energije sunčevog zračenja donjem (apsorbirajućem) sloju. Donji (apsorbirajući) sloj većinom je dopirani p-tip poluvodiča, a obično se nalazi ispod "window" sloja. Poluvodički materijal p-sloja mora biti visoko apsorbirajućeg karaktera te



Slika 22. Struktura polikristalne tankoslojne sunčeve ćelije te izgled krajnjeg proizvoda [10]

pritom imati prikladan energetske procjep (*band gap*) kako bi se dobile veće vrijednosti napona ćelije. Ipak, donji p-sloj je jako tanak, debljine od 1 do $2\ \mu\text{m}$. Struktura opisane polikristalne tankoslojne sunčeve ćelije te izgled krajnjeg proizvoda (*low-cost*) prikazani su na slici 22.

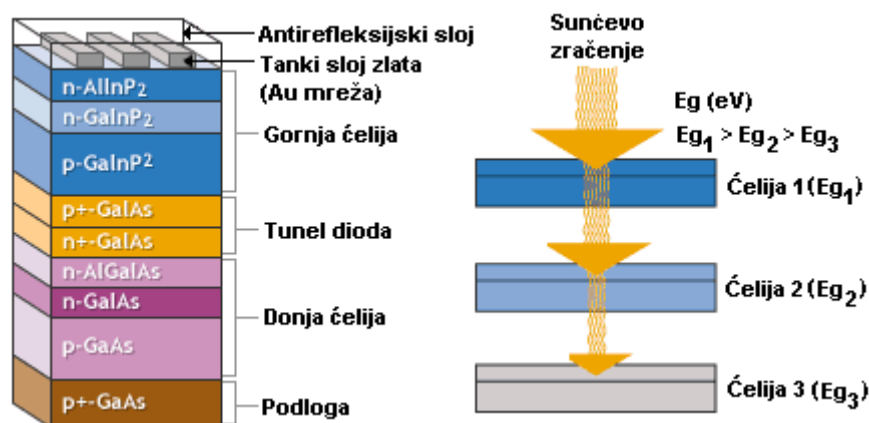
Bakar-Indij-Diselenid (CuInSe_2 ili CIS), polikristalni tankoslojni materijal ima ekstremno veliko svojstvo apsorpiranja, što znači da će 99% sunčeve svjetlosti obasjane na sunčevu ćeliju sačinjenu od CIS tankog filma biti upijeno. CIS ćelije obično imaju *heterojunction* strukturu, gornji ili "window" sloj najčešće je sačinjen od Kadmij-Sulfida dok se donjem (apsorbirajućem) sloju često dodaju male količine Galija kako bi se poboljšala efikasnost naprave (CIGS struktura). Teorijska efikasnost ovakvih ćelija je oko 15%, stvarna efikasnost je puno manja.

Kadmij-Telurid (CdTe), polikristalni tankoslojni materijal ima gotovo idealan energetski procjep od 1.44 eV te veliko svojstvo apsorbaranja. Iako se najčešće koristi u PV napravama bez dodavanja drugih materijala, relativno je lagano postići leguru sa Zinkom ili Živom kako bi poboljšali svojstva naprave. Isto kao i kod CIS tanki filmovi, CdTe filmovi mogu se polagati na jeftine podloge (plastika, staklo i sl.). CdTe ćelije imaju *homojunction* strukturu, sa Kadmijevim-Sulfidom kao gornjim "window" n-slojem. Za antirefleksijski sloj ali i transparentni vodljivi sloj koristi se tanki sloj oksida. Zbog unutarnjeg otpora p-tipa CdTe materijala, CdTe materijal se postavlja kao intristični sloj dok se kao p-tip materijala koristi Zink-Telurid (ZnTe). Teorijska efikasnost ovakvih ćelija je oko 15%, stvarna efikasnost je puno manja [10].

5.3.5. Monokristalne tankoslojne sunčeve ćelije i *multijunction* strukture ćelija

Monokristalne tankoslojne sunčeve ćelije većinom su izrađene od Galij-Arsenida. Galij-Arsenid (Ga-As) je poluvodič sastavljen od dva elementa: galija i arsena. Galij (Ga) je produkt taljenja određenih materijala, posebice aluminija (Al) i zinka (Zn) te je kao takav rjeđi od zlata. Arsen nije rijedak kemijski element, ali je otrovan. Osim što se koristi u PV tehnologiji, Ga-As se koristi kod LED dioda, lasera te ostalih elektroničkih naprava koji koriste svjetlost. Ćelije sačinjene od Galij-Arsenida uglavnom imaju tzv. *multijunction* strukturu koja se često naziva i kaskadnom strukturom.

***Multijunction* strukturom** sunčeve ćelije postiže se visoka efikasnost pretvorbe budući da se obuhvaća veći dio solarnog spektra. U tipičnoj *multijunction* strukturi, ćelije sa različitim energetskim procjepima su poslagane jedna iznad druge na takav način da sunčeva svjetlost prvo pada materijal sa najvećim energetskim procjepom. Fotoni koji nisu apsorbirani u prvoj ćeliji se prenose na drugu ćeliju koja upija visoko-energetski dio preostalog sunčevog zračenja za vrijeme čega ostaje transparentna za nisko-energetske fotone. Ovakav selektivni proces apsorbaranja se nastavlja do zadnje ćelije koja ima najmanji energetski procjep. Pri "slaganju" *multijunction* strukture ćelije se mogu spajati mehaničkim putem ili se prilikom proizvodnje polažu u slojevima te na koncu spajaju u kaskadnu strukturu. Struktura *multijunction* ćelije te selektivni proces apsorbaranja svjetlosti prikazani su na slici 23.



Slika 23. Struktura Ga-As multijunction Sunčeve ćelije te proces apsorpiranja svjetlosti [10]

Većina istraživanja kaskadnih struktura fokusira se na ćelije od Galij-Arsenida kao jednom (ili svim) od komponenti takve strukture. Teorijska efikasnost takvih ćelija bila bi iznad 35%, ali pod djelovanjem fokusiranog sunčevog zračenja. Dakle, poluvodički materijal Galij-Arsenid prikladan je kod visoko efikasnih sunčevih ćelija te ćelija koje imaju *multijunction* strukturu i to zbog sljedećih razloga:

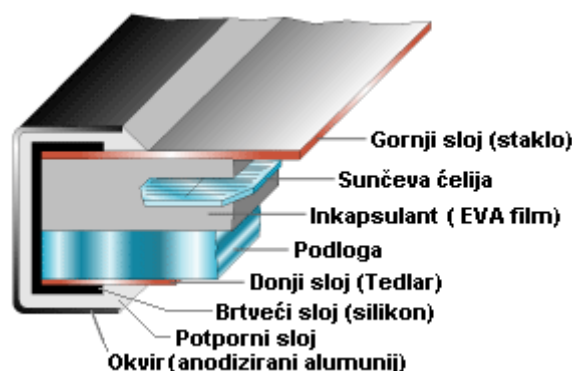
- energetski procjep od 1.43 eV je gotovo idealan za visoko-efikasne sunčeve ćelije,
- zbog izrazito visokog svojstva apsorpiranja, sunčeve ćelije izrađene od Ga-As debljine su nekoliko mikrometara, naspram Si ćelija koje su debljine 100 μm i više,
- za razliku od Si ćelija, Ga-As sunčeve ćelije su relativno neosjetljive na temperaturu. Stoga temperature Ga-As ćelija mogu biti izrazito visoke (koncentratorski sustavi),
- legure Ga-As sa aluminijom, fosforom, antimonom ili indijem zadržavaju svojstva Ga-As što omogućava fleksibilnost pri dizajnu takvih ćelija,
- Ga-As je izrazito otporan na oštećenja izazvana sunčevim zračenjem, pa je zbog toga ali i izrazito visoke efikasnosti idealan za svemirske aplikacije.

Najveća mana Galij-Arsenida je visoka cijena monokristalnih Ga-As slojeva. Zbog toga se Ga-As ćelije pretežito koriste u koncentratorskim sustavima, gdje je površina ćelije svega 0.25 cm^2 . U koncentratorskim sustavima, zbog visoko-efikasne pretvorbe cijena Ga-As sunčevih ćelija je konkurentna klasičnim sunčevim ćelijama. Teorijska efikasnost takvih ćelija je 28%, dok je stvarna efikasnost 17% [10].

5.4. Fotonaponski sustavi (ćelija, modul, mreža)

Fotonaponska (PV) ćelija temeljni je gradivi blok fotonaponskog sustava. Individualne PV ćelije su obično malih dimenzija (od 1 do 15 cm), te u prosjeku proizvode od 1 do 2 W. Budući da je izlazna snaga ćelije premala, električno se povezuju u fotonaponski (PV) modul kako bi ostvarili adekvatnu izlaznu snagu. Moduli se mogu dalje povezati kako bi oblikovali niz ili mrežu. Niz ili mreža može biti cjelokupno proizvodno postrojenje, sastavljeno od jednog do nekoliko tisuća modula (ovisno o potrebnoj izlaznoj snazi).

Tipični fotonaponski modul sačinjen od kristaličnog silicija (c-Si ili p-Si) sastoji se od transparentnog gornjeg sloja, inkapsulanta, donjeg sloja te okvira, prikazano na slici 24.



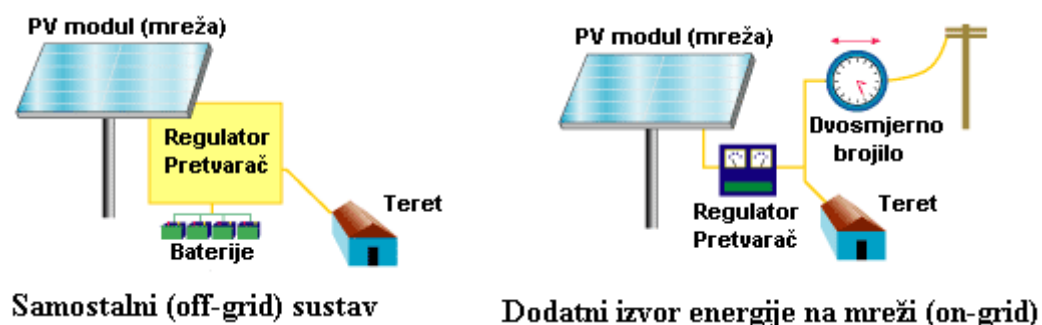
Slika 24. Poprečni presjek PV modula sačinjenog od kristaličnog silicija [10]

Gornji sloj PV modula mora imati visoki stupanj transparentnosti, biti otporan na vodu, tuču te biti stabilan kada je duže vremena izložen ultraljubičastom zračenju. Materijal koji se najčešće koristi za izradu gornjeg sloja PV modula je kaljeno staklo. Inkapsulant služi kao zaštita sunčeve ćelije od vanjskih utjecaja, ali i kao poveznica gornjeg sloja, ćelije i donjeg sloja. Inkapsulant mora biti visoko transparentan te stabilan pri visokim temperaturama i visokim razinama ultraljubičastog zračenja. Materijal koji se najčešće koristi za izradu inkapsulanta je *ethylene vinyl acetate*, odnosno EVA film, koji se prilikom zagrijavanja polimezira te učvršćuje konstrukciju PV modula. Donji sloj PV modula je tanki polimerni film koji ima dobru otpornost protiv vode i korozije, najčešće tedlar. Tako izrađeni PV modul uramljuje se u aluminijski okvir čime se postiže robusnost te mogućnost praktičkog i jednostavnog postavljanja na nekakvu površinu.

Fotonaponski moduli mogu biti postavljeni pod fiksnim kutom ili mogu pratiti kretanje Sunca. Sustavi za praćenje Sunca isplativi su jedino ako je riječ o većoj PV

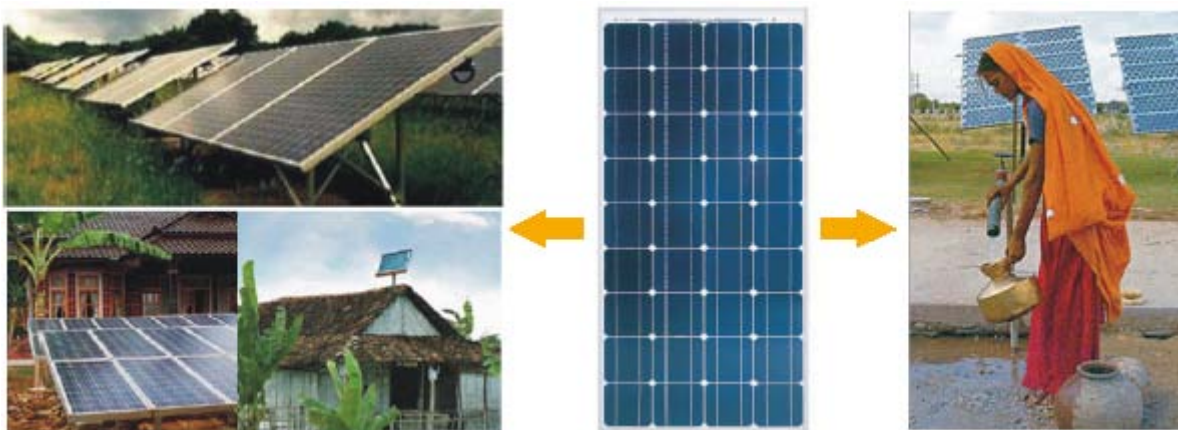
mreži. Stoga su PV moduli najčešće postavljeni pod fiksnim kutom (većinom na krovu objekta). Pošto su fiksno postavljeni, moduli će apsorbirati manje sunčevog zračenja nego u sustavu koji prati kretanje Sunca, što predstavlja jedinu manu fiksno postavljenih sustava. Nebitno o način praćenja sunčevih kretnji, PV moduli apsorbiraju direktno i reflektirano sunčevo zračenje. Za lijepa vremena reflektirana komponenta iznosi 10 do 20% ukupnog sunčevog zračenja, za polu oblačnog dana reflektirana komponenta sunčevog zračenja iznosi 50% ukupnog sunčevog zračenja dok će za oblačnog dana cjelokupno sunčevo zračenje biti reflektirano.

Promatraju li se zasebno, moduli ili niz modula ne čine cijeli fotonaponski sustav. Da bi se električna energija proizvedena fotonaponskim modulima isporučila krajnjem potrošaču, potrebne su komponente koje reguliraju, pohranjuju te isporučuju električne energiju. Te komponente su: regulatori napona, pretvarači istosmjerne (DC) struje u izmjeničnu (AC) struju te baterije (u slučaju otočnog rada sustava). Dakle, fotonaponski moduli zajedno sa navedenim komponentama tvore fotonaponski sustav. Fotonaponski sustav može se koristiti kao samostalni (*off-grid*) izvor energije ili kao dodatni izvor energije na mreži (*on-grid*). Kod samostalnih sustava višak energije se pohranjuje u baterije, dok se kod on-grid sustava višak energije predaje u električnu mrežu. Navedeni sustavi prikazani su na slici 25.



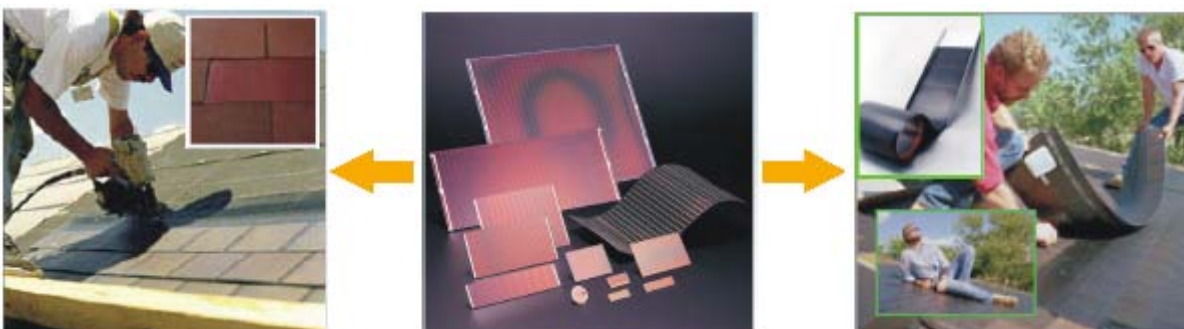
Slika 25. Prikaz off-grid i on-grid PV sustava [10]

Fotonaponska tehnologija ima širok spektar uporabe, od napajanja ručnih satova i kalkulatora do napajanja satelita. Za Zemaljsku primjenu najčešće se koriste PV moduli izrađeni od kristaličnog silicija (c-Si ili p-Si) koje je jednostavno složiti u niz, pri čemu je moguće prespajati module u seriju ili paralelu, ovisno o željenom naponu. Mjesto postavljanja kristaličnih Si modula ne ovisi o primjeni PV sustava (*off-grid* ili *on-grid*). Na slici 26 prikazana je primjena kristaličnih Si modula, gdje oni služe za napajanje objekata (*on-grid*), kao dio samostalnog PV sustava (*off-grid*) te kao izvor električne energije pumpe za vodu.



Slika 26. Prikaz primjene PV modula sačinjenih od kristaličnog silicija (c-Si ili p-Si) [10]

Pojavom tehnologije tankog filma, omogućena je proizvodnja fotonaponskih ćelija na jeftinim podlogama čime se olakšala implementacija PV tehnologije u objekte. Na slici 27. prikazana je paleta proizvoda od amornog silicija (a-Si), odnosno implementacija a-Si u objekte. Lijeva slika prikazuje krov koji proizvodi el. energiju, odnosno šindru izvedenu sa amornim silicijem. Desna slika također prikazuje krov koji proizvodi el. energiju, gdje je pokrov izveden od tankoslojnog amornog silicija.



Slika 27. Prikaz implementacije a-Si tehnologije u stambeni objekt (dvostruka primjena) [10]

Zbog mogućnosti polaganje tankih filmova na jeftine podloge (staklo, plastika i sl.) integracija PV tehnologije u komercijalne zgrade je u zadnje vrijeme sve raširenija. Na slici 28. prikazani su primjeri integracije PV sustava u komercijalne zgrade. Lijeva slika prikazuje "4 Times Square" zgradu, koja od 35 do 48 kata na zapadno i južno orijentiranim pročeljima ima tzv. fotonaponsku zavjesu, odnosno sustav koji umjesto staklenih prozora sadrži tankoslojne PV panele koji proizvode dio el. energije potrebne za napajanje objekta. Desna slika prikazuje "Doxford int. PLC office", prvu komercijalnu zgradu sa integriranim PV sustavom, koji također proizvodi dio električne energije potrebne za napajanje objekta.

U zadnje vrijeme se provode istraživanja tzv. koncentratorskih sustava koji fokusiraju energiju sunčevog zračenja na visokoefikasne ćelije sačinjene od Galij-

Aresnida. Fokusiranje sunčeve energije postiže se pomoću plastičnih leća (Fresnel leće), čime se postiže veća izlazna snaga PV sustava uz manji broj sunčevih ćelija.



Slika 28. Prikaz integracije polikristalne tehnologije tankog filma u poslovne zgrade

Zbog visoke cijene ćelija sačinjenih od Galij-Arsenida, primjena Ga-As sunčevih ćelija ekonomski je opravdana samo u koncentratorskim sustavima. Na slici 29 prikazan je najveći koncentratorski sustav čije se ponašanje istražuje. Sustav se nalazi u Arizoni, točnije u STAR centru. Izlazna snaga tog sustava je 20 kW, što navodi na činjenicu da su koncentratorski sustavi isplativi jedino u većim PV sustavima. Iako su Ga-As sunčeve ćelije izrazito otporne na temperaturu, ipak je potreban sustav za hlađenje. Također, koncentratorski sustavi moraju imati opremu za praćenje sunca, što povećava trošak ionako skupog sustava te apsorbiraju samo direktno sunčevo zračenje. Dakle, koncentratorski sustavi imaju podjednako prednosti i mana naspram običnih PV tehnologija. Predviđa se da će koncentratorski sustavi u bližoj budućnosti biti dostatni za napajanje manjih zajednica (ruralna elektrifikacija) [10].



Slika 29. Prikaz koncentratorskog sustava sa Ga-As sunčevim ćelijama [10]

6. Sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca

Sustav za praćenje prividnog kretanja sunca je uređaj za usmjeravanje ravnih kolektorskih sustava, koncentrirajućih solarnih reflektora ili leća prema suncu. Koncentratori, osobito kod koncentrirajućih sustava zahtijevaju visok stupanj točnosti da bi osigurali da je koncentrirano sunčevo zračenje usmjereno točno na solarnu ćeliju, koja je na (ili blizu) žarišne točke reflektora ili leće. Ne-koncentrirajući sustavi ne zahtijevaju visok stupanj točnosti, i sustav za praćenje nije potreban, ali može značajno doprinijeti količini proizvedene energije, poboljšavajući jutarnja i popodnevna radna svojstva. Bolja popodnevna radna svojstva osobito su poželjna kod fotonaponskih sustava povezanih na mrežu, kako se proizvodnja u to vrijeme poklapa sa vrhom potražnje električne energije. Fiksni sustavi orijentirani da optimiziraju to ograničeno vrijeme će imati relativno malu godišnju proizvodnju.



Slika 30. Dvorišna instalacija pasivnih, jednoosnih sustava za praćenje. Sustav je prikazan u zimskom položaju, nagnut prema jugu. Visoki nosači omogućavaju prolazanje i iskorištavanje prostora ispod fotonaponskih panela za sadnju biljaka, koje su onda zaštićene od jakog podnevnog Sunca [4].

Za niskotemperaturne solarne kolektore, sustavi za praćenje uglavnom se ne upotrebljavaju, zbog relativno visokih troškova sustava za praćenje u usporedbi s dodavanjem veće površine kolektora i zbog ograničenih kutova sunca za rad po zimi, što utječe na prosječni cjelogodišnji kapacitet sustava. U usporedbi s fotonaponskim ćelijama, sustavi za praćenje su relativno jeftini. To ih čini posebno učinkovitim za fotonaponske sustave sa visokim stupnjem iskoristivosti. Većina sustava za praćenje prividnog kretanja sunca najučinkovitije radi ako se sezonski prilagođava položaj i većina treba pregled i podmazivanje na godišnjoj bazi [4].

6.1. Vrste sustava za praćenje

Sustavi za praćenje prividnog kretanja sunca mogu biti aktivni ili pasivni, jednoosni ili dvoosni. Jednoosni sustavi za praćenje u pravilu koriste polarno praćenje za maksimalnu solarnu učinkovitost. Jednoosni sustavi za praćenje obično imaju ručno prilagođavanje nagiba na drugoj osi i on se prilagođava u redovitim razmacima tijekom godine. U usporedbi s fiksno postavljenim, jednoosni sustav za praćenje povećava godišnju proizvodnju za otprilike 30%, a dvoosni sustav za praćenje dodatno 6%. Postoje dvije vrste dvoosnih sustava za praćenje, polarni i visinsko-azimutni [4].

6.1.1. Polarni sustavi za praćenje

Polarni sustav za praćenje ima os rotacije u liniji koja je gotovo paralelna s osi rotacije zemlje, otuda naziv polarni. Međutim strogo govoreći, jedini pravi polarni sustavi za praćenje koriste se pri postavljanju izuzetno preciznih astronomskih teleskopa, koji rotiraju oko osi, paralelno s osi zemlje. Kod polarnih sustava za praćenje prividnog kretanja sunca, os rotacije je okomita na ravninu ekliptike. Kod jednostavnih polarnih sustava za praćenje s jednom osi, praćenje se može inicijalno postaviti na predviđenu ravninu ekliptike lokalne zemljopisne širine. Djelomično ili kontinuirano praćenje druge osi (kut uzdizanja) moguće je prilagoditi ručno ili automatski, po potrebi, kako bi se nadoknadila odstupanja od ravnine ekliptike. Kada se druga os prilagođava ručno, podešavanja su potrebna najmanje dva puta godišnje. Kako su odstupanja od ravnine ekliptike najveća za vrijeme ekvinocija, točnost godišnjeg praćenja najbolje se postiže kada se podešavanje osi radi u to vrijeme. Jedno podešavanje se radi za jesenskog ekvinocija kako bi se postavila pozicija za jesen i zimu, a drugo podešavanje za proljetnog ekvinocija, za proljeće i ljeto. Takvi se sustavi za praćenje mogu ubrojiti u jednoosne sustave za praćenje, jer je potreban jedan pogonski mehanizam za dnevni rad. To smanjuje troškove sustava i dopušta primjenu jednostavnijih metoda praćenja, uključujući pasivno i kronološko praćenje [4].



Slika 31. Jednoosni SunPower T20 sustav za praćenje, sa grubom polarnom orijentacijom, u Nellis zračnoj bazi, u Nevadi, USA. Nellis solarnu elektranu je projektirala i izgradila SunPower korporacija [4].

6.1.2. Sustavi za praćenje sa horizontalnom osi rotacije

Postoji nekoliko proizvođača koji proizvode jednoosne horizontalne sustave za praćenje koji mogu biti orijentirani pomoću pasivnog ili aktivnog mehanizma, ovisno o proizvođaču. Ovaj tip sustava za praćenje karakterizira duga horizontalna cijev koju podupiru stupovi ili okviri na postoljima, a orijentacija cijevi je u liniji sjever- jug. Paneli se postavljaju na cijev, a cijev rotira oko svoje osi kako bi pratila prividno kretanje sunca preko dana. Kako nisu uz ekvator, nisu posebno uspješni po zimi (osim ako se ne nalaze uz ekvator), ali su u značajnoj mjeri produktivni za proljetnih i ljetnih razdoblja kada je put sunca visoko na nebu. Ovi su uređaji manje efikasni na visokim zemljopisnim širinama. Osnovna prednost ovih sustava za praćenje je čvrstoća potporne strukture i jednostavni mehanizam. Kako su paneli postavljeni horizontalno, mogu se postavljati na osnu cijev bez opasnosti od samozasjenjivanja i dostupni su za čišćenje. Za aktivne mehanizme, jedan kontroler i motor dovoljni su za upravljanje s više redova panela. Proizvođači su :Array Technologies, Inc. Wattsun Solar Trackers....



Slika 32. Wattsun HZ-serije linearni sustavi za praćenje u Sjevernoj Koreji. Ovi sustavi za praćenje koriste horizontalnu os [4].

6.1.3. Sustavi za praćenje sa vertikalnom osi rotacije

Jednoosni sustav za praćenje može biti konstruiran da se vrti samo po vertikalnoj osi, sa panelima postavljenim vertikalno ili pod kutom. Ovi sustavi za praćenja pogodni su na visokim zemljopisnim širinama, gdje put prividnog kretanja sunca nije posebno visok, ali prednjače za dugih ljetnih dana, kada sunce putuje po dugom luku. Ova metoda upotrebljena je pri konstruiranju cilindrične kuće u Austriji (iznad 45° sjeverne zemljopisne širine) koja u cjelini rotira kako bi pratila sunce, sa vertikalnim panelima postavljenima s jedne strane zgrade (slika 33) [4].



Slika 33. Gemini House u cijelosti rotira oko svoje osi i solarni paneli se rotiraju neovisno o kući, dopuštajući kontrolu prirodnog grijanja od Sunca [4].

6.1.4. Visinsko – azimutni sustavi za praćenje

6.1.4.1. Sustavi za praćenje sa dvoosnim postavljanjem

Ograničen na aktivne sustave za praćenje, ovakv način postavljanja također postaje popularan kod postavljanja velikih teleskopa, zahvaljujući jednostavnosti strukture i kompaktnim dimenzijama. Jedna os je vertikalni rotirajući stup ili horizontalno prstenasto postolje, koje dopušta uređaju da bude zaokrenut do orijentacijske točke. Druga os je horizontalna, nagibna osovina postavljena iznad azimut platforme. Kombiniranjem dviju osi svaka lokacija iznad hemisfere može biti istaknuta. Ovakav sustav može se kontrolirati kroz kompjutorski sustav ovisno o očekivanoj solarnoj orijentaciji, ili može koristiti senzore za traganje koji kontroliraju motorni pogon za orijentaciju panela prema suncu. Ovakav način postavljanja koristi se i za orijentiranje paraboličkih reflektora sa Sterling-ovim motorom (slika 34) [4].



Slika 34. Parabolični tanjur sa Sterling-ovim sistemom [4].

6.1.4.2. Višezrcalni reflektirajući uređaj

Najnovije razvijen, ovaj uređaj koristi više zrcala u horizontalnoj ravnini koji reflektiraju sunčevu svjetlost prema visoko temperaturnom fotonaponskom ili nekom drugom sustavu kojem je potrebna koncentrirana snaga sunca. Strukturni problemi i troškovi znatno su smanjeni otkad zrcala nisu znatno izložena naletima vjetra. Uključivanjem patentiranih mehanizama, samo dva pogonska sustava su potrebna za svaki uređaj. Zbog konfiguracije uređaja posebno je prikladan za upotrebu na ravnim krovovima i na manjim zemljopisnim širinama [4].



Slika 35. Energy Innovations, sunflower testne jedinice [4].

6.2. Vrste pogona

6.2.1. Aktivni sustavi za praćenje

Upravljački sklop odzivajući se na smjer sunca usmjerava sustav za praćenje koristeći njihove motore i zupčaste vodilice. Aktivni dvoosni sustavi za praćenje također se koriste za orijentiranje heliostata - pomičnih zrcala koja reflektiraju sunčevu svjetlost prema apsorberu solarnog tornja. Kako je svako zrcalo u velikom polju individualno usmjereno, zrcala se kontroliraju programski, centralnim kompjutorskim sustavom, a koji omogućava i gašenje sustava prema potrebi [4].

6.2.2. Pasivni sustavi za praćenje

Pasivni sustavi za praćenje koriste nisku točku vrelišta komprimiranog plina koji se premješta s jedne strane na drugu (sunčeva toplina stvara tlak) i tako se sustav za praćenje pomiče kao odgovor na neravnotežu. Kako je ovo neprecizno usmjeravanje, takav sustav nije pogodan za određene tipove koncentrirajućih fotonaponskih kolektora, ali zadovoljava uobičajene tipove fotonaponskih kolektora. Ovi sustavi imaju amortizere koji sprečavaju pretjerana gibanja uzrokovana žestokim udarima vjetra. Sjenilo/reflektori se koriste za refleksiju ranojutarnjih sunčevih zraka kako bi 'pokrenuli' panel i usmjerili ga prema suncu, što može potrajati gotovo sat vremena. Vrijeme potrebno za to može se znatno smanjiti samootpuštanjem iz pozicije u koju je pričvršćen navečer, što pozicionira panel neznatno iznad zenita (tako da tekućina ne mora nadvladati gravitaciju) - lagano otpuštajuća opruga sprječava otpuštanje u vjetrovitim noćnim uvjetima [4].



Slika 36. Glava Zomework-ovog pasivnog sustava za praćenje [4].

6.2.3. Kronološki sustav za praćenje

Kronološki sustav za praćenje djeluje suprotno zemljinoj rotaciji okretanjem u istom odnosu kao i zemlja, ali u suprotnom smjeru. Zapravo odnosi nisu potpuno jednaki, jer kako zemlja ide oko sunca, položaj sunca se mijenja u odnosu na zemlju za 360° svake godine ili 365,24 dana. Kronološki sustav za praćenje vrlo je jednostavan i potencijalno vrlo precizan sustav za praćenje prividnog kretanja sunca posebno za upotrebu za polarno praćenje. Metoda upravljanja može biti jednostavna kako se pogonski uređaj okreće malim prosječnim zaokretom od 15 stupnjeva na sat (jednog okreta zemlje oko sunca dnevno). U teoriji sustavi za praćenje mogu u potpunosti rotirati, pod pretpostavkom da postoji dovoljno prostora za potpunu rotaciju, da križanje ožičenja ne predstavlja problem kao kod solarnih koncentratora ili se sistem može vraćati u početno stanje svaki dan kako bi se izbjegao problem. Alternativno se može koristiti elektronički upravljački sklop sa stvarnim vremenskim satom koji se uključuje na 'solarno vrijeme' (satni kut). Prilagodbe u praćenju mogu biti povremene ili kontinuirane [4].

7. PROJEKTNI ZADATAK: Usporedba fotonaponskog sustava sa fiksnim kutom i fotonaponskih sustava sa sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca

Zadatak:

Za zadane lokacije usporediti fotonaponski sustav sa fiksnim kutom, fotonaponski sustav sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca i fotonaponski sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca koji su spojeni na mrežu. Usporediti troškove instalacije tih sustava, količinu proizvedene električne energije te usporediti isplativost tih sustava, spojenih na mrežu, s iznosom poticaja prema tarifnom pravilniku za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije.

Prilikom analize uzeti u obzir lokaciju na kojoj bi se fotonaponski sustav izveo. Zadane lokacije su:

- Grad Zagreb
- Grad Split

7.1. Usporedba fotonaponskih sustava računalnim simulacijskim programom HOMER

HOMER je optimizacijski računalni model za distribuiranu proizvodnju električne energije, koji pojednostavljuje zadatak procjene isplativosti samostalnih ili mrežnih modeliranih hibridnih sustava, sastavljenih od neobnovljivih i obnovljivih distribuiranih izvora.

HOMER je razvijen od strane NREL-a (*National Renewable Energy Laboratory*) 1993. godine u SAD-u. Program je razvio Paul Gilman, dok su Tom Ferguson, Hope Corsair, Tony Jimenez i drugi sudjelovali u njegovom razvitku. Verzija, koja je korištena u ovom radu je v2.67 Beta. Prema službenim podacima HOMER koristi 23060 osoba iz 190 zemalja, od kojih su 123 osobe iz Hrvatske. Većina ga koristi u svrhu istraživanja, a tako velik broj korisnika je rezultat besplatne licence, koja traje šest mjeseci, ali i kvalitete te jednostavnosti programa. Nakon toga je moguće ponovno zatražiti licencu i neometano ga koristiti narednih šest mjeseci, jer je obnavljanje licence neograničeno.

Pri dizajniranju mreže (energetskog sustava), potrebno je napraviti mnogo odluka o konfiguraciji sustava. Koje komponente ima smisla uključiti u dizajn sustava? Koliko komponenti treba upotrijebiti i koje su njihove veličine?

Velik broj tehnoloških opcija i varijacija u tehnologiji, cijenama i raspoloživosti energetskih potencijala, otežavaju odabir. Optimizacija i algoritmi analize osjetljivosti u HOMERU olakšavaju procjene brojnih mogućih konfiguracija sustava. HOMER omogućava definiranje modela s ulaznim podacima, koji opisuju tehnološke izbore, cijene komponenata i raspoloživost resursa. HOMER upotrebljava unesene podatke za simulaciju konfiguracija sustava, ili kombinaciju komponenata, i generira rezultate koji se mogu vidjeti kao lista ostvarivih konfiguracija sortiranih prema cijeni. Rezultati simulacija u različitim tablicama i grafovima pomažu pri usporedbi konfiguracija i ocjenjivanju prema njihovim ekonomskim i tehničkim vrijednostima.

Kada želimo istraživati kakav bi efekt imale promjene uzrokovane čimbenicima kao na primjer raspoloživost resursa i ekonomski uvjeti na ekonomičnosti drugačijih konfiguracija sustava, možemo provesti analizu osjetljivosti. Pri izvođenju analize

osjetljivosti, opskrbljujemo HOMER s vrijednostima koje opisuju raspon promjene raspoloživosti sredstva i cijena komponenti. HOMER simulira svaku konfiguraciju sustava preko raspona vrijednosti. Rezultate analize osjetljivosti možemo upotrijebiti i identificirati čimbenike koji imaju najveći učinak na dizajn i rad sustava.

Također možemo upotrijebiti rezultate proračuna analize osjetljivosti i odgovoriti na opća pitanja o izboru tehnologije i te donijeti odluke o planiranju i strategiji. HOMER simulira rad sustava izračunavajući energetske bilancu za svaki od 8,760 sati u godini. Za svaki sat, HOMER uspoređuje električne i toplinske zahtjeve tereta prema energiji koju taj sustav može opskrbiti i računa tokove energije prema i od svake komponente sustava. Za sustave koji uključuju baterije ili gorivom pokretane generatore, HOMER također odlučuje za svaki sat o upravljanju generatorima i režimu rada baterija (punjenje i pražnjenje). HOMER proračunava energetske bilance za svaku konfiguraciju sustava koju želimo razmotriti. određuje da li je konfiguracija ostvariva, tj., može li udovoljiti zahtjevima korisnika, procjenjuje cijenu instaliranja, rada i održavanja sustava u životnom vijeku projekta. Sustavne troškovničke računice obuhvaćaju cijene kao na primjer investicije, zamjene, upravljanje i održavanje te cijena goriva. Nakon što simulira sve moguće konfiguracije sustava, HOMER daje listu konfiguracija, sortiranih prema cijeni, koje možemo iskoristiti za usporedbu izbora dizajniranih sustava.

7.2. Metodologija rada HOMER računalnim programom

Usporedba fotonaponskih sustava se izvodi za dvije lokacije, i sa različitim izvedbama fotonaponskih sustava. Pošto se radi o različitim lokacijama, ulazni podaci potrebni za modeliranje sustava, kao što su podaci o Sunčevom zračenju, su različiti. Neki podaci o komponentama isti su za sve projekte, tako da nema potrebe navoditi sve podatke zasebno. Prvenstvena razlika između projekata je lokacija i korištenje odnosno nekorisćenje sustava za praćenje prividnog kretanja sunca.

Pretpostavljeni životni vijek projekta je 25 godina.

7.3. Procjena raspoloživog Sunčevog resursa

Postupak procjene raspoloživog Sunčevog potencijala za određenu lokaciju olakšan je postojanjem baza podataka koje sadrže informacije o intenzitetu Sunčevog zračenja, temperaturama okoline, prosječnim dnevnim temperaturama itd. Trenutno postoji više kvalitetnih bazi podataka. U skupinu najšire korištenih baza podataka spadaju:

- NASA – *surface meteorology and solar energy database*,
- *Meteonom database*,
- PVGIS – *Photovoltaic Geographical Information System*.

Bitno je istaknuti da podaci o intenzitetu sunčeva zračenja na okomitu plovu u prethodno navedenim bazama podataka nisu izmjereni, već su izračunati na osnovi satelitskih mjerenja ekstraterestičke radijacije na rubu Zemljine atmosfere. Pribavljanje podataka potrebnih za procjenu raspoloživog sunčevog energetskog resursa te računalna simulacija energetskog sustava koji iskorištava energiju Sunca olakšana je činjenicom da većina računalnih simulacijskih programa ima opciju direktnog preuzimanja podataka putem interneta, ali samo od jednog poslužitelja. Prilikom preuzimanja podataka valja obratiti pažnju što se točno traži, globalno zračenje, izravno zračenje ili insolacija. Tablicom 3. i tablicom 4. dani su podaci o raspoloživom Sunčevom potencijalu, ambijentalni podaci te optimalni kut nagiba PV modula za grad Zagreb i grad Split.

Tablica 3. Raspoloživost Sunčevog potencijala i ambijentalni podaci za grad Zagreb

ZAGREB Zemljopisna širina [N]: 45°19' Zemljopisna dužina [E]: 16°2'			
Mjesec	Globalno sunčevo zračenje na okomitu plovu (kWh/m ² dnevno)	Srednje mjesečne temperature zraka (°C)	Mjesečni optimalni kut (°)
Siječanj	1.390	-0.8	58.35
Veljača	2.330	1.9	51.94
Ožujak	3.400	5.9	40.23
Travanj	4.230	10.6	23.19
Svibanj	5.430	15.3	8.53
Lipanj	5.810	18.5	1.61
Srpanj	6.080	20.1	5.04
Kolovoz	5.260	19.3	17.59
Rujan	3.800	15.8	36.36
Listopad	2.330	10.5	49.89
Studen	1.350	5.3	56.57
Prosinac	1.100	0.9	57.67
Prosječno	3.550	10.3	Godišnji optimalni kut: 24.95°

Budući da zemljopisni položaj, vremenski uvjeti te kontinentalna klima ne pružaju optimalne uvjete za korištenje Sunčeve energije na području središnje Hrvatske, grad Zagreb ne spada u vrh raspoloživog Sunčevog potencijala u Hrvatskoj.

Podaci za grad Zagreb su sljedeći:

- prosječna godišnja insolacija iznosi oko 1.25 MWh/m² godišnje,
- prosječan broj Sunčanih sati iznosi 1805.

Na osnovi stvarnih i proračunatih podataka može se zaključiti da je lokacija grada Zagreba pogodna za postavljanje fotonaponskog sustava, ali ne i idealna.

Tablica 4. Raspoloživost Sunčevog potencijala i ambijentalni podaci za grad Split

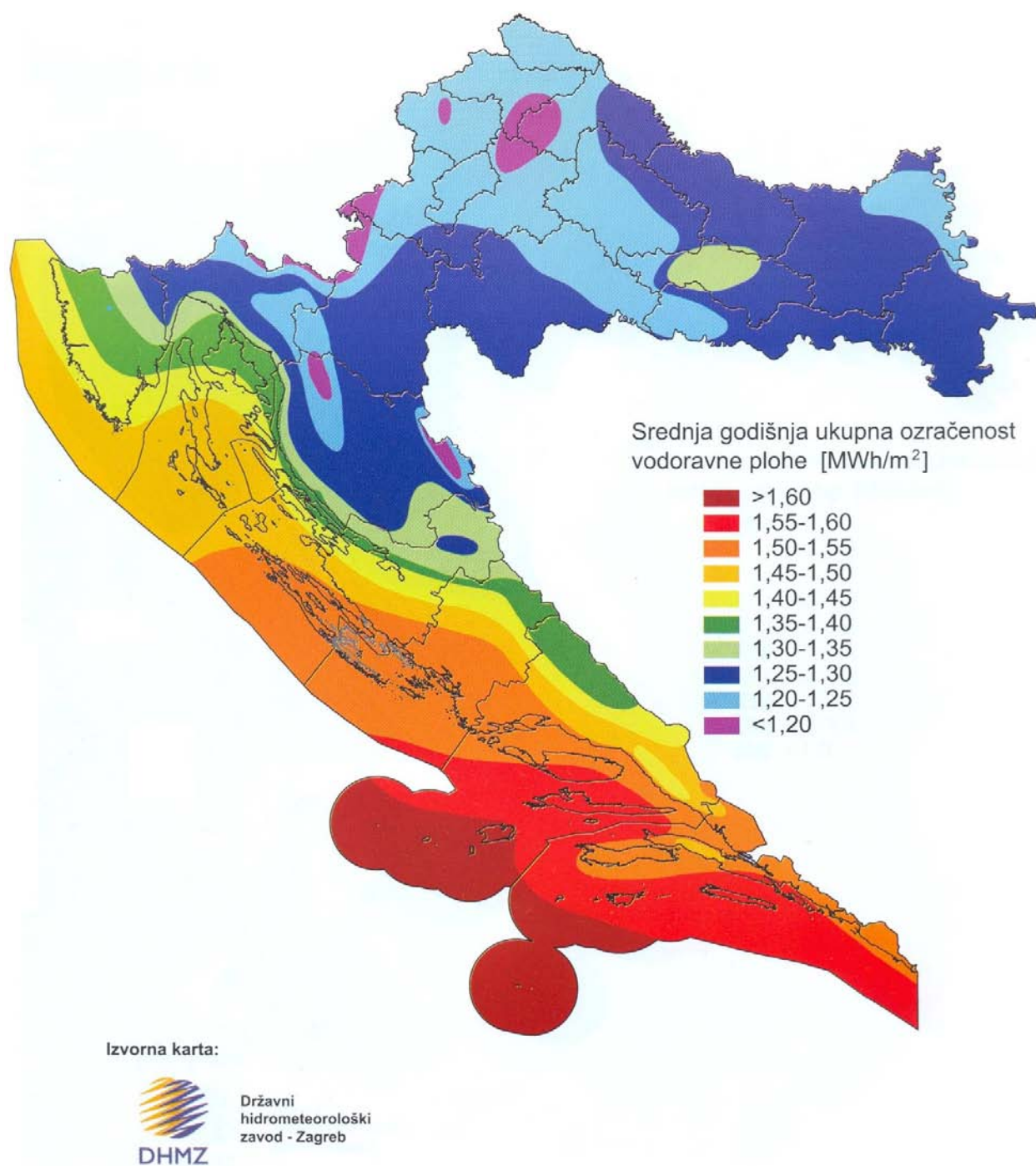
SPLIT Zemljopisna širina [N]: 43°31' Zemljopisna dužina [E]: 16°26'			
Mjesec	Globalno sunčevo zračenje na okomitu plovu (kWh/m ² dnevno)	Srednje mjesečne temperature zraka (°C)	Mjesečni optimalni kut (°)
Siječanj	1.740	7.6	64.58
Veljača	2.610	8.2	56.55
Ožujak	3.860	10.5	40.73
Travanj	4.770	13.9	22.52
Svibanj	6.010	18.7	7.70
Lipanj	6.850	22.5	0.65
Srpanj	7.080	25.4	4.07
Kolovoz	6.050	24.9	17.21
Rujan	4.530	21.4	35.75
Listopad	2.840	16.9	52.16
Studen	1.740	12.3	61.98
Prosinac	1.420	8.9	66.51
Prosječno	4.134	15.9	Godišnji optimalni kut: 30.60°

Zemljopisni položaj, vremenski uvjeti te blaga mediteranska klima pružaju optimalne uvjete za korištenje Sunčeve energije na području južne dalmacije, a grad Split spada u sam vrh raspoloživog Sunčevog potencijala u Hrvatskoj.

Podaci za grad Split su sljedeći:

- prosječna godišnja insolacija iznosi oko 1.55 MWh/m² godišnje,
- prosječan broj Sunčanih sati iznosi 2553.

Na osnovi stvarnih i proračunatih podataka može se zaključiti da je lokacija grada Splita izrazito pogodna za postavljanje fotonaponskog sustava.

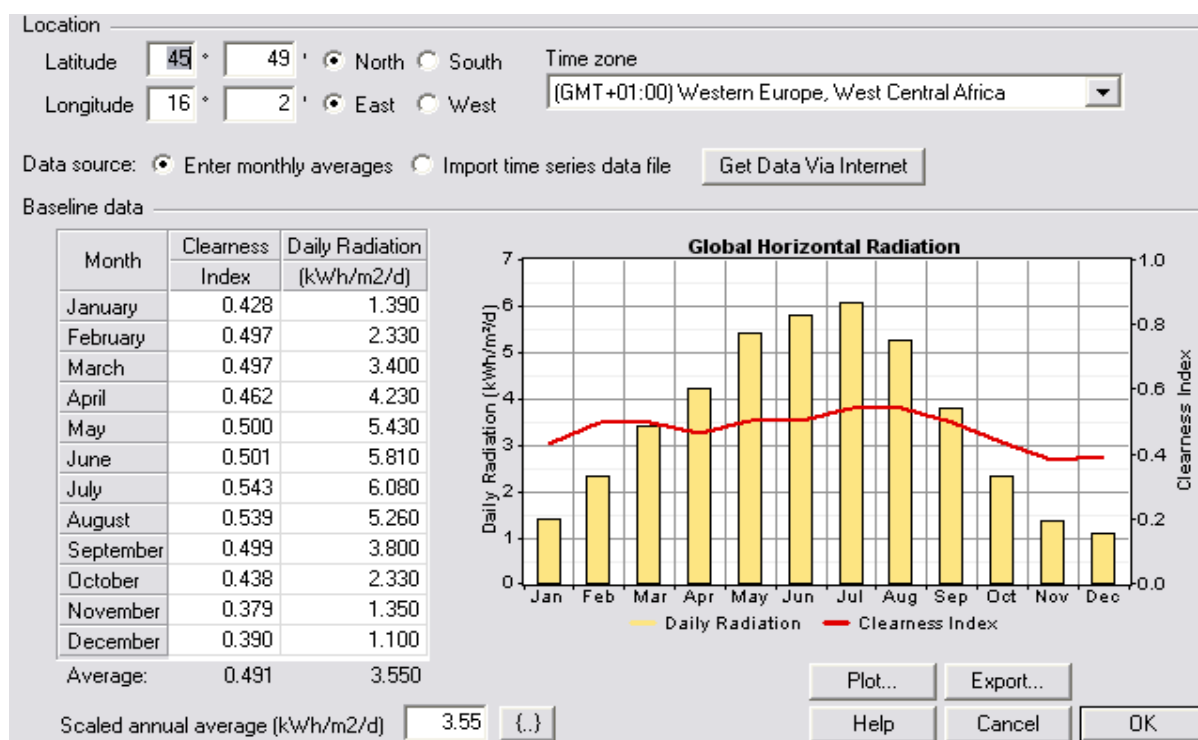


Slika 37. Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem [2]

7.4. PROJEKT 1: Fotonaponski sustav sa fiksnim kutom, lokacija grad Zagreb

7.4.1. Podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja za grad Zagreb

Podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja potrebni su za proračun proizvodnje električne energije fotonaponskog (PV) sustava. Podaci se mogu automatski učitati iz NASA – *surface meteorology and solar energy* baze podataka ili ih HOMER može sintetizirati na osnovi srednjih mjesečnih vrijednosti. Na slici 38. prikazani su osnovni podaci koji su potrebni da bi HOMER proračunao proizvodnju el. energije PV sustava, ti podaci su: zemljopisna širina i dužina, vremenska zona lokacije, globalno (ukupno) Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu ili indeks bistrine (*clearness index*).



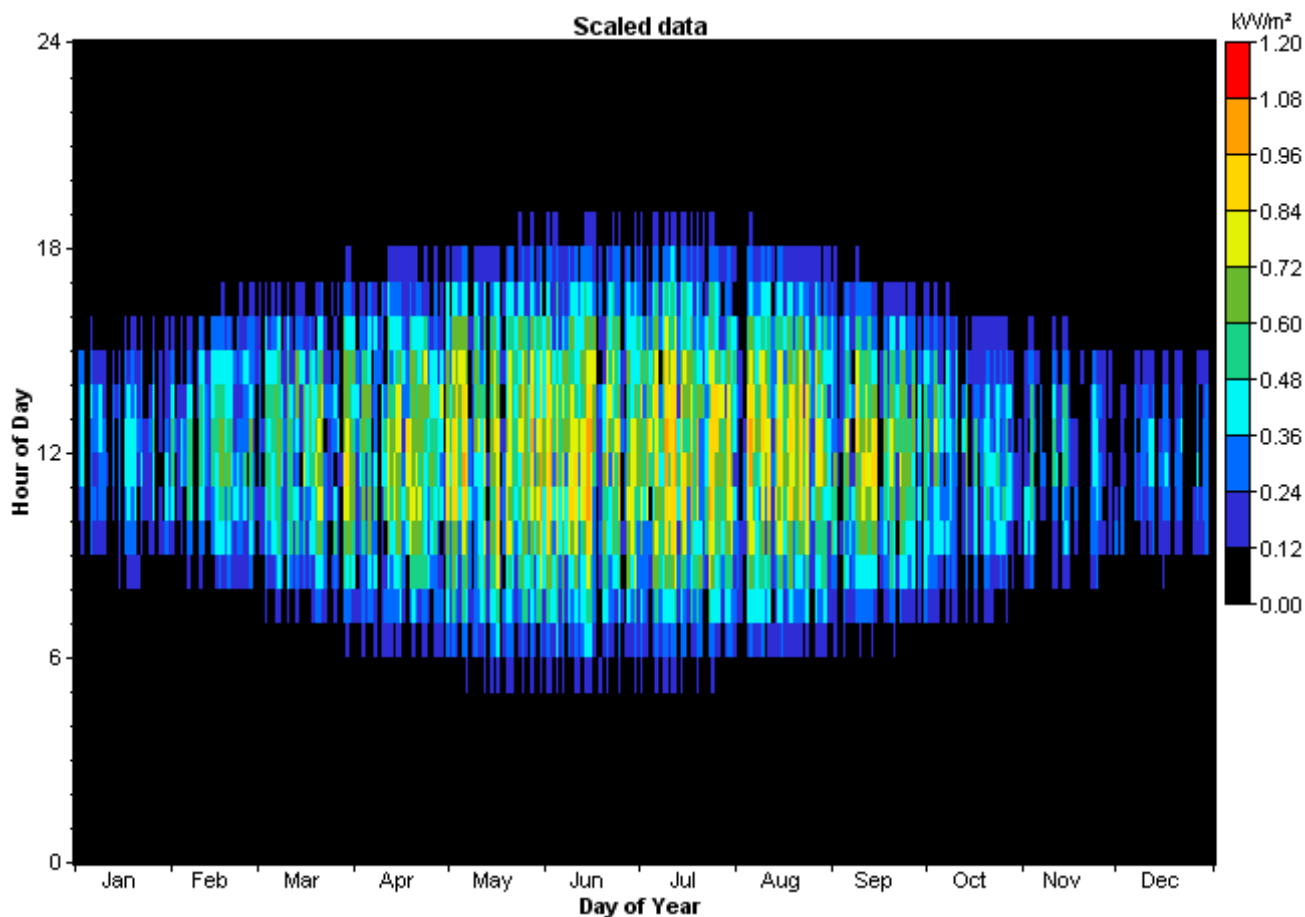
Slika 38. Prosječne srednje mjesečne vrijednosti ukupnog dnevnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu za grad Zagreb te ostali podaci potrebni za simulaciju

Zemljopisna širina i dužina specificiraju lokaciju objekta. Posebice **zemljopisna širina** predstavlja važnu varijablu pri solarnim kalkulacijama. Prvenstveno se koristi pri kalkulaciji globalnog zračenja ako je poznat indeks bistrine (vrijedi i obratno). Također predstavlja važnu varijablu pri izračunu Sunčevog ozračenja površine postavljene pod određenim kutom (PV modul).

Vremenska zona predstavlja bitnu varijablu prilikom "prebacivanja" sa standardnog računanja vremena na solarno računanje vremena. Solarno računanje vremena temelji se na računanju vremena prema poziciji Sunca. Prema solarnom računanju vremena, Sunce će uvijek postići svoju najveću visinu naspram Zemlje u solarno podne, odnosno položaj Sunca naspram Zemlje biti će uvijek okomit u solarno podne.

Globalno (ukupno) Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu predstavlja najvažniju varijablu pri solarnim kalkulacijama. Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu je mjera intenziteta Sunčevog zračenja na površini Zemlje. Po definiciji, ukupno Sunčevo zračenje je zbroj doprinosa direktnog (ekstraterestičkog) zračenja, raspršenog (atmosferskog) zračenja te odbijenog zračenja sa površine Zemlje. Najveći doprinos globalnom (ukupnom) zračenju na horizontalnu plohu daje direktno zračenje Sunca, ono ne utječe na temperaturu Zemljine površine, kratkovalnog je karaktera odnosno spada u skupinu tzv. vidljive svjetlosti. Direktno je zračenje Sunca najizraženije za vrijeme "bistrog neba", odnosno lijepog vremena. Indikator izrazito dobrog direktnog Sunčevog zračenja je pojava sjene.

Mjera globalnog (ukupnog) Sunčevog zračenja ukoliko se radi o trenutnom intenzitetu zračenja je W/m^2 . Mjera koja se najčešće koristi je srednja dnevna vrijednost, izražena je u kWh/m^2 dnevno, što znači da je vrijednost globalnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu mjerena (izračunata) kroz određeni vremenski period (jedan sat) na određenoj površini plohe ($1m^2$) te je predstavljena kao aritmetička sredina srednjih dnevnih vrijednosti za pojedini mjesec (slika 39).



Slika 39. Godišnji prikaz globalnog (ukupnog) Sunčevog zračenja u gradu Zagrebu

Indeks bistrine (clearness index) K_f predstavlja mjeru bistrine atmosfere. Definiran je kao omjer globalnog sunčevog zračenja i ekstraterestičkog zračenja, proračunava se za dnevne ili mjesečne vrijednosti. Indeks bistrine je bezdimenzionalan broj, po vrijednosti može biti između 0 i 1. Pri lijepom, sunčanom vremenu indeks bistrine ima visoku vrijednost, dok pri oblačnom vremenu ima nisku vrijednost. Tipične su vrijednosti indeksa bistrine između 0.25 i 0.75. Za potrebe simulacije dovoljno je unijeti (importirati) globalno zračenje na okomitu plohu ili indeks bistrine za promatranu lokaciju. HOMER proračunava varijablu koja nije unesena pomoću zemljopisne širine.

7.4.2. Definiranje parametara mreže

Za definiranje mreže potrebno je unijeti tri vrste podataka:

- Tarife, gdje definiramo strukturu troškova mrežne snage,
- Emisije, gdje unosimo faktore emisije za mrežnu snagu,
- Napredne postavke, gdje unosimo određene ekonomske (napredne) varijable.

Moguće je definirati do 16 tarifa i koristiti raspored (dijagram) za označavanje vremenskih perioda u kojima se koriste pojedine tarife. Svaka tarifa ima različite vrijednosti slijedećih varijabli:

- Cijena energije -energija kupljena iz mreže u \$/kWh. Cijene električne energije za Republiku Hrvatsku izražene su u tablici 5.
- Prodajna tarifa - cijena koju komunalna služba plaća za kupljenu energiju. Pri mrežnom mjerenju, ova tarifa se odnosi samo na prekomjernu proizvodnju energije u sustavu. Poticajna cijena za isporučenu električnu energiju iz sunčane elektrane instalirane snage do uključivo 10kW je 3,40 kn/kWh.
- Tarifa zahtjeva - mjesečna pristojba koja se plaća komunalnoj službi na osnovi vršnog mjesečnog zahtjeva za električnom energijom.

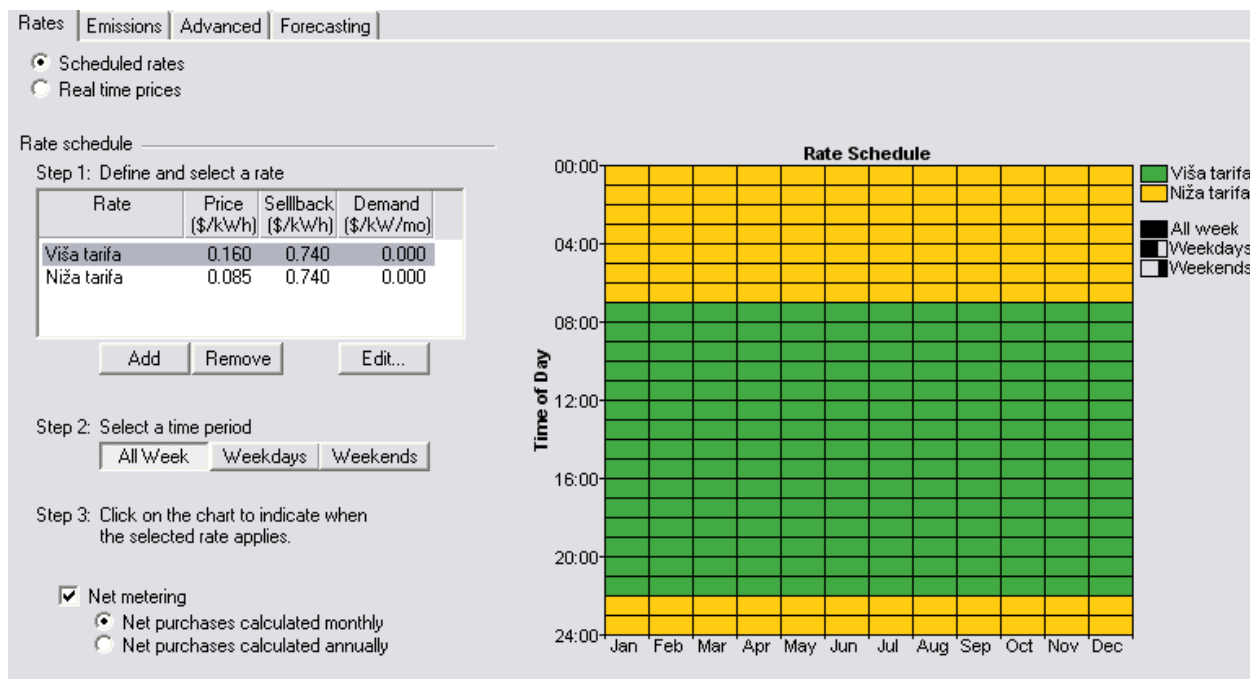
Tablica 5. Tarifni modeli za kupce na NISKOM NAPONU:

Obračunski element	Tarifne stavke		Kućanstva/tarifni model			
	Jedinica mjere	Dnevni	Plavi	Bijeli	Narančasti	Crni
Radna energija	kn/kWh	VT	0,58 (0,71)	0,61 (0,74)	0,85 (1,04)	0,26 (0,32)
		NT	-	0,32 (0,39)	-	0,26 (0,32)
Mjesečna naknada	kn/mj		15,75 (19,22)	15,75 (19,22)	-	5,25 (6,41)
Napomene: Iznosi u zgradama izraženi su sa PDV-om, zaokruženi na dvije decimale.						

RASPORED DNEVNIH TARIFA:

- zimsko računanje vremena: VT od 07-21 sat, NT od 21-07 sati
- ljetno računanje vremena: VT od 08-22 sata, NT od 22-08 sati

Pri kreiranju novih tarifa potrebno je uz gore navedene vrijednosti navesti još i oznaku za identifikaciju tarife. Ako se ove tarife nikad ne mijenjaju, dovoljno je definiranje samo jedne tarife (čest slučaj su stambeni potrošači).



Slika 40. Prikaz tarifa i njihov raspored

Mrežno mjerenje je obračunska shema prema kojoj komunalna služba dopušta prodaju energije u mrežu po maloprodajnoj tarifi. Efektivno i najčešće doslovno, pri prodaji električne energije u mrežu, mjerač ide unatrag. Na kraju obračunskog razdoblja (mjesečno ili godišnje razdoblje) naplaćuje se količina kupljene energije iz mreže (kupljena energija minus prodana). Ako na kraju obračunskog razdoblja «kupljenja energija» ima negativnu vrijednost, znači da je količina prodane energije veća nego količina kupljene energije u obračunskom razdoblju. Prema tome komunalna služba plaća otkupljenu energiju, prema prodajnoj tarifi koja je tipično jednaka veleprodajnoj cijeni, ili cijeni izbjegnuto troška ili ne plaća. Vrijednosti tih koeficijenata ovise o tome koji od generatora radi u određenoj okolini. U okolini gdje se većina električne energije proizvodi iz ugljena, te će vrijednost biti relativno visoke, jer sagorijevanje ugljena rezultira visokim emisijama štetnih plinova. Prirodni plin rezultira manjim emisijama, dok nuklearne elektrane i hidroelektrane imaju emisije štetnih plinova virtualno jednake nuli.

Napredne postavke sadrže dvije dodatne ekonomske ulazne varijable i dvije ulazne varijable koje se odnose na maksimalnu vrijednost snage koja može teći od i prema mreži.

Trošak međupovezanosti (izražen u \$) je pristojba koja se plaća pri spajanju sustava na mrežu, a omogućava sustavu da bude priključen na mrežu. Ovaj se trošak ne odnosi na sustave koji su priključeni samo na mrežu.

Trošak pripravnosti (izražen u \$) je godišnja pristojba koja se plaća zbog omogućavanja opskrbe priključenog sustava rezervnom energijom iz mreže. Ovaj se trošak ne odnosi na sustave koji su priključeni samo na mrežu.

Kapaciteti prodaje i kupnje, maksimalni zahtjev mreže je maksimalna količina snage koja može biti predana iz mreže. To je varijabla odluke zbog utjecaja troškova zahtjeva. Ako je zahtijevana tarifa jednaka nuli, potrebno je precizirati jednu vrijednost za maksimalan zahtjev mreže. Ako zahtjev mreže nije nula, potrebno je precizirati vrijednost jednaku ili veću od vršnog opterećenja, plus najmanje jednu vrijednost koja je manja od vršnog opterećenja. Homer će pronaći optimalnu vrijednost. Maksimalna vrijednost prodaje predstavlja maksimalnu količinu snage koju je moguće prodati u mrežu.

7.4.3. Fotonaponski (PV) sustav

Prilikom odabira fotonaponskog sustava nije bitno koju vrstu tehnologije fotonaponskog (PV) modula odaberemo, budući da HOMER nema specificirane pojedine tipove PV modula ili tehnologija. To predstavlja očiti nedostatak, što autori HOMER-a i navode.

Razlog takvomu općenitom pristupu izračunu proizvodnje električne energije PV sustava je kompliciran račun modeliranja ponašanja PV modula. HOMER je prvenstveno optimizacijsko oruđe koji traži najisplativiju kombinaciju komponenti sustava na osnovi podataka koji su uneseni, tako da je za očekivati propuste u pojedinim dijelovima izračuna bilance energije.

Životni vijek PV sustava (modula) podatak koji je naveden u tehničkim specifikacijama PV modula koji se koristi pri modeliranju. Pretpostavljeni životni vijek PV modula je između 20 i 25 godina, u proračunu je 25 godina. Važno je naglasiti da se u HOMER-u može definirati životni vijek svih komponenti (npr. pretvarača).

Faktor gubitaka f_{pv} (*derating factor*) je mjera gubitaka PV sustava prilikom proizvodnje el. energije. Gubici su često uzrokovani visokim temperaturama ambijenta, nepravilnim ožičenjem, nanosima prašine i slično. U projektu faktor gubitaka iznosi 94%, što znači da proizvodnja el. energije PV modula odstupa barem 6% od nazivne vrijednosti.

Sustav praćenja kretanja Sunca (*tracking system*) je ponuđen kao opcija. U slučaju odabira takovog sustava potrebno je između ponuđenih opcija naznačiti kakvu vrstu tehnologije praćenja Sunčevog kretanja želimo koristiti.

Kut nagiba PV modula β (*slope*) je zakrenutost modula naspram horizontale. Najčešće odabrana opcija je fiksni kut tijekom cijele godine, većinom se uzima isti kut kao i zemljopisna širina. U projektu je uzet kut od 24.95° , koji je preporučen u priručniku za energetske korištenje Sunčevog zračenja za lokaciju grada Zagreba [2].

Azimut γ služi kao pokazatelj zakrenutosti PV sustava. Da bi se dobio maksimum iz PV sustava koji je postavljen pod fiksnim kutom on mora biti orijentiran prema jugu. Za sjevernu zemljinu polutku azimut je najčešće 0° .

Koeficijent refleksije tla (*ground reflectance*) ili **albedo** je svojstvo podloge da odbija zračenje. Potpuno bijelo tijelo imalo bi albedo 1.0 jer bi potpuno odbijalo Sunčevo zračenje (snijeg), a potpuno crno tijelo imalo bi albedo nula. Najčešća se koristi koeficijent refleksije travnate površine koji iznosi 0.2. Albedo se koristi pri izračunu solarnog zračenja na površini PV modula, iako je doprinos odbijenog zračenja globalnom zračenju jako malen.

Za potrebe simulacije odabrani su solarni moduli Solaris, nazivne snage 125 W te nazivnog napona 12 V. Iako to uopće nije bitno pri energetskom izračunu, predstavljaju bitnu varijablu pri izračunu investicijskih troškova i određuje potrebnu površinu. Pri izračunu investicijskih troškova bitno je uključiti sve komponente PV mreže, posebice MPPT (Maximum Power Point Tracking) regulator napona, budući da HOMER pretpostavlja da se upravo takva vrsta regulatora koristi. Regulator MPPT osigurava proizvodnju energije solarnih modula uvijek u optimalnim radnim uvjetima. Neovisno o tipu modula, starosti, meteo uvjetima, najveća moguća energija koju solarni moduli mogu proizvesti, uvijek je na raspolaganju. Uvođenjem ovog regulatora, smanjuje se potrebna količina skupih solarnih modula, tako da je ukupna cijena sustava (posebno većih), bitno manja od sustava s uobičajenim regulatorima. Podaci o investicijskim troškovima dani su u tablici 6.

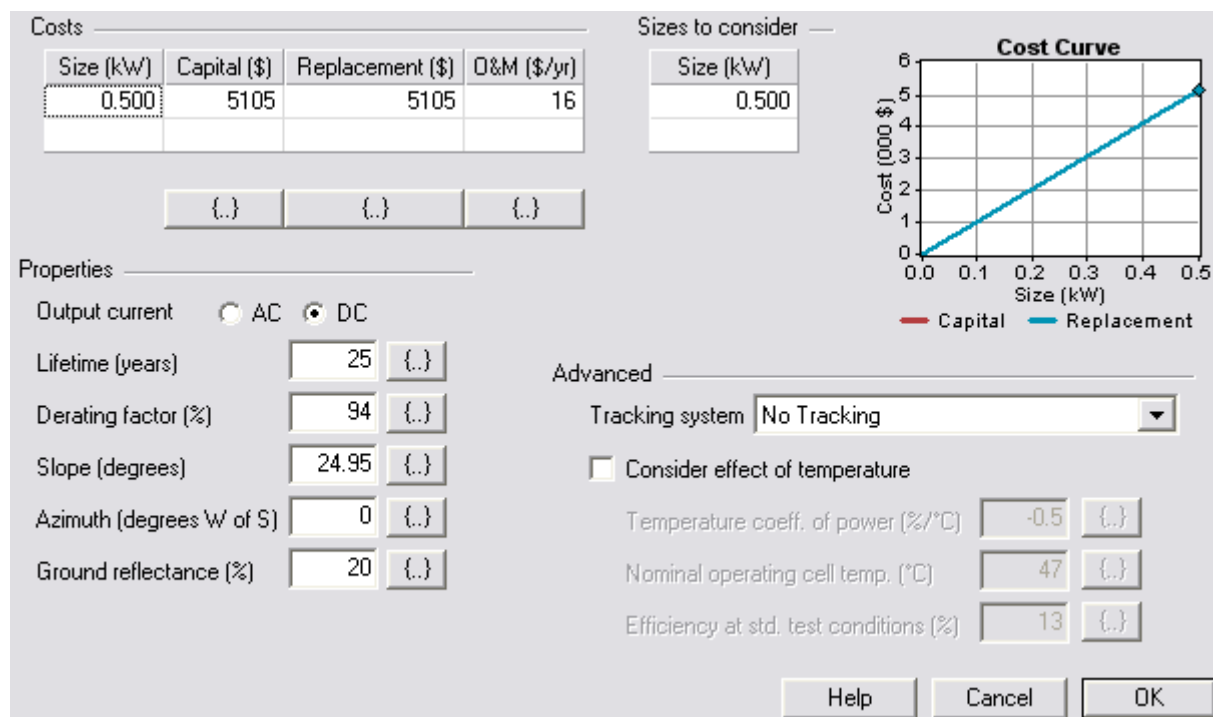
Tablica 6. Investicijski troškovi fotonaponskog sustava nazivne snage 500 W [13]

Fotonaponski sustav $P_{nom}=500\text{ W}$	Jed. Cijena (kn/kom)	Kom	Investicijski troškovi [#]	
			(kn)	(\$)
Solarni modul Solaris 125W _p /12V	5060	4	20240	4400
Regulator napona BZ 500W 12-48V LCD MPPT	1850	1	1850	400
Kutni krovni nosač	350	4	1400	305
Ukupno:			23490	5105

tečaj: 4,60 kn/\$

Pošto HOMER automatski pretpostavlja da je PV sustav izveden sa MPPT regulatorom napona, bitno je uključiti trošak zamjene MPPT regulatora napona (čiji je životni vijek oko 10 godina) u troškove rada i održavanja. Budući da je naznačeni životni vijek PV sustava oko 25 godina, a životni vijek projekta 25 godina, troškovi zamjene cjelokupnog sustava ne utječu na HOMER-ov izračun.

Na slici 41. prikazani su osnovni podaci koje je potrebno znati prilikom modeliranja PV sustava: životni vijek PV sustava (modula), faktor gubitaka f_{pv} (*derating factor*), sustav praćenja kretanja Sunca (*tracking system*), kut nagiba PV modula β (*slope*), azimut te koeficijent refleksije tla (*ground reflectance*) ili albedo. Također su prikazani investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja.



Slika 41. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]

7.4.4. Pretvarač

Svaki sustav koji sadrži izmjenične (AC) i istosmjerne (DC) komponente zahtjeva pretvarač. Potrebno je odrediti nazivnu snagu pretvarača (u kW) te unijeti investicijske troškove (u \$), troškove zamjene (u \$), te troškove rada i održavanja (u \$/god.). Prema smjeru pretvorbe energije pretvarači se dijele na izmjenjivače i ispravljače.

Izmjenjivač – pretvara istosmjernu komponentu u izmjeničnu. Potrebni podaci:

- Životni vijek – očekivano vrijeme rada izmjenjivača, u godinama,
- Efikasnost – efikasnost pretvorbe istosmjerno u izmjenično, u %,
- Izmjenjivač radi istovremeno s AC generatorom - ako je to moguće, potrebno je naznačiti. Izmjenjivači koji ne mogu tako raditi nazivaju se sklopni izmjenjivači.

Ispravljač - pretvara izmjeničnu komponentu u istosmjernu. Potrebni podaci:

- Snaga povezana s izmjenjivačem – nazivna snaga ispravljača u odnosu na izmjenjivač, izražena u %,
- Efikasnost – efikasnost pretvorbe izmjenično u istosmjerno, u %.

Prilikom odabira pretvarača za potrebe projekta, uzeti su pretvarači koji su dostupni na hrvatskom tržištu. U projektu je efikasnost pretvorbe pretvarača 94%, a životni vijek im je 10 godina.

Tablica 7. Troškovi investicije te rada i održavanja pretvarača [13]

Nazivna snaga (kW)	Investicijski troškovi (\$)	Troškovi zamjene (\$)	Troškovi rada i održavanja (\$)
0.5	190 (870 kn)	190	0
1	375 (1720 kn)	375	0

7.4.5. Troškovi projekta

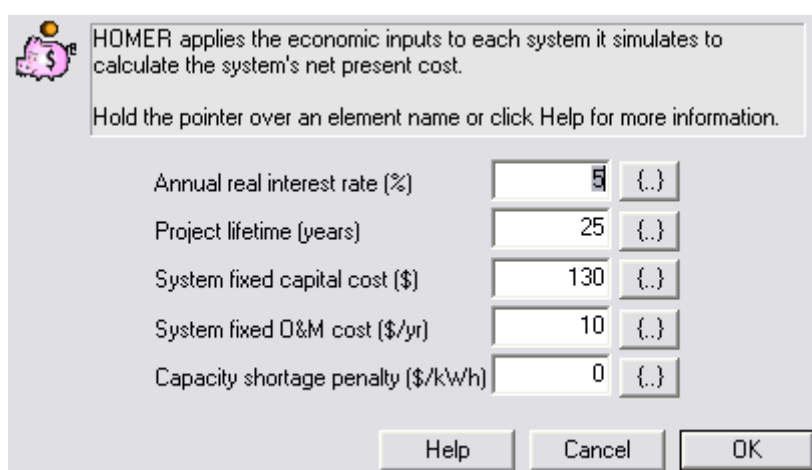
HOMER može računati troškove sa unesenim podacima (npr. godišnja kamatna stopa, životni vijek projekta, fiksni troškovi, »penali» zbog nemogućnosti proizvodnje) za svaki sustav posebno.

Kamatna stopa, koju unosimo, je godišnja kamatna stopa (oznaka: i , jedinica: %). Koristi se za svođenje troškova investicije na godišnje vrijednosti. U projektu odabrana kamatna stopa je 5 %.

Životni vijek projekta je vremensko razdoblje za koje se računa rad projekta, odnosno broj godina preko kojih se računaju trenutni troškovi sustava. Kao životni vijek projekta smo pretpostavili životni vijek fotonaponskih panela, koji je 25 godina.

Početni investicijski trošak - ukupni trošak komponente pri njenom instaliranju u početku projekta, bez obzira na veličinu sustava (izražen u \$). Početni investicijski trošak je postavljen kao 2,5 % vrijednosti ukupnog projekta, a to je u ovom slučaju 130 \$. U tu vrijednost je znači uključeno postavljanje fotonaponskog sustava, spajanje komponenti, troškovi vodiča i dr.

Troškovi rada i održavanja - ovi troškovi su godišnji troškovi koji se ponavljaju, bez obzira na veličinu sustava. U projektu smo za troškove rada i održavanja uzeli iznos od 10 \$/god. Taj iznos bi trebao pokriti troškove održavanja, te eventualni popravak neke od komponenti cijelog sustava.



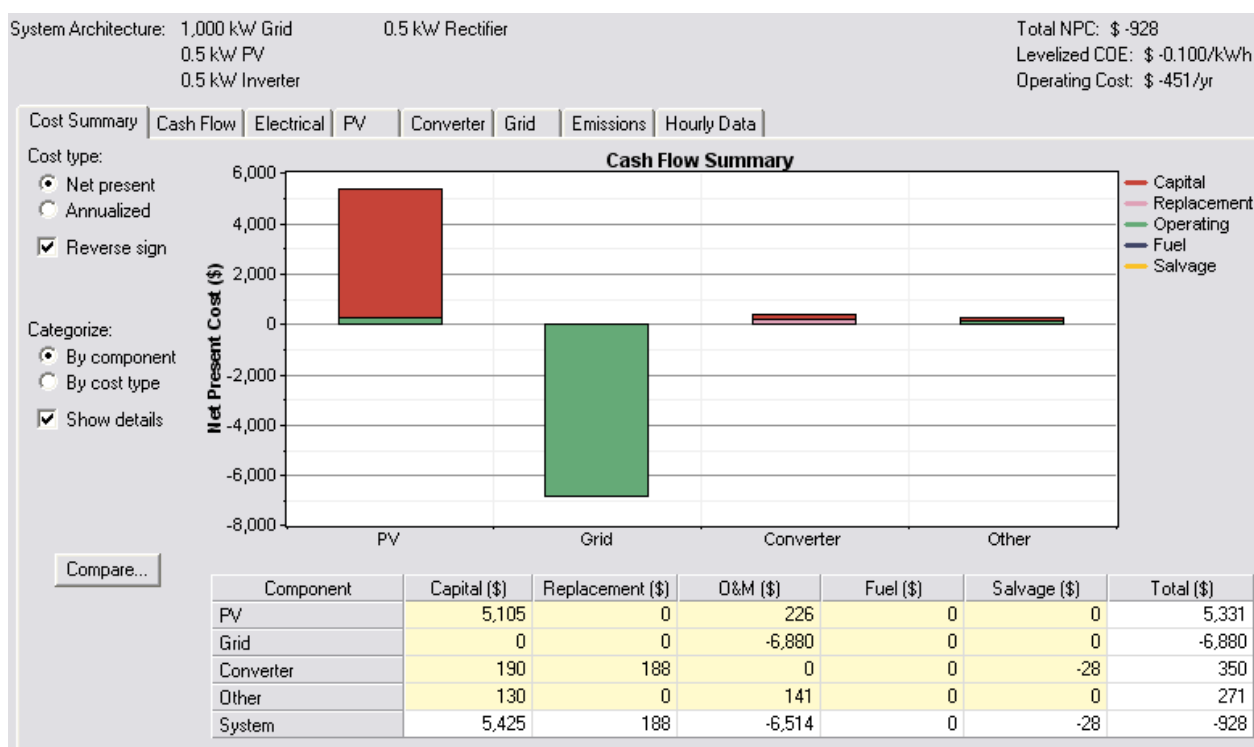
The screenshot shows a dialog box titled 'HOMER applies the economic inputs to each system it simulates to calculate the system's net present cost.' It contains five input fields with their respective values and units, each followed by a help icon ({}). At the bottom are 'Help', 'Cancel', and 'OK' buttons.

Parameter	Value	Unit
Annual real interest rate (%)	5	%
Project lifetime (years)	25	years
System fixed capital cost (\$)	130	\$
System fixed O&M cost (\$/yr)	10	\$/yr
Capacity shortage penalty (\$/kWh)	0	\$/kWh

Slika 42. Prikaz troškova projekta, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]

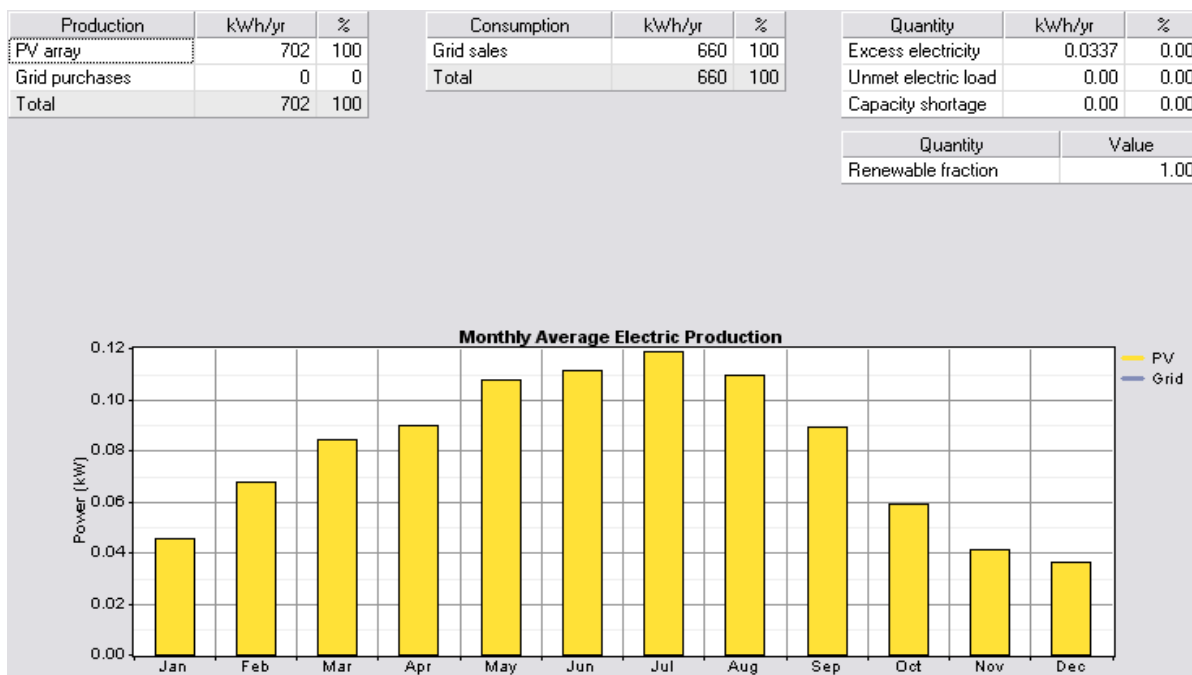
7.4.6. Rezultati simulacije

Po završetku unosa podataka, HOMER počinje sa simulacijom modeliranog sustava. Osim općih podataka o investicijskim troškovima, cijeni proizvedene energije, moguće je pogledati detaljne podatke o troškovima, proizvedenoj energiji te radu pojedinih komponenti svakog sustava koji je modeliran prilikom simulacije. Slika 43. daje osnovne podatke o sustavu i njegovim troškovima. U tablici su prikazani troškovi pojedinih komponenti sustava. Zadnji red tablice prikazuje zbroj svakog stupca.



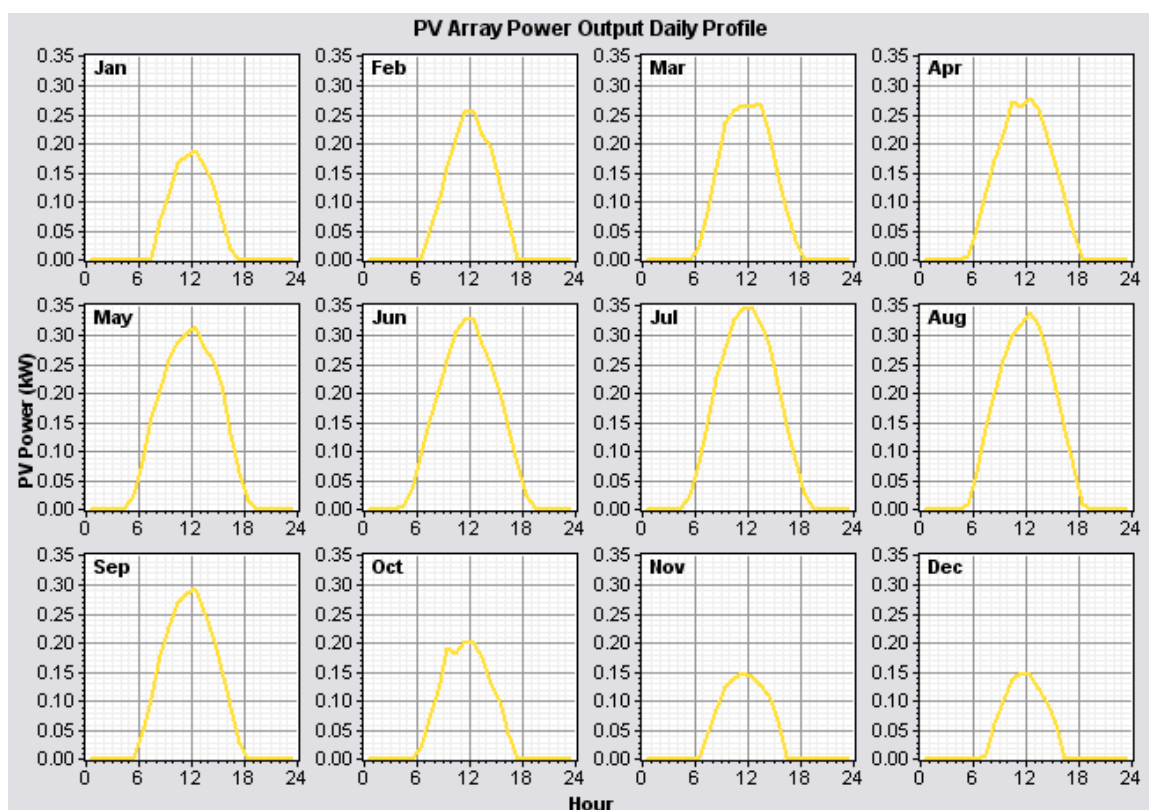
Slika 43. Prikaz troškova modeliranog sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]

Na slici 43. vidljivo je da se modelirani sustav sastoji se od 0.5 kW fotonaponskog sustava i 0.5 kW pretvarača. Investicijski troškovi sustava iznose 5425 \$. Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta uz kamatnu stopu od 5% iznose 5952 \$. Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 6880 \$, kada se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazimo do iznosa ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 928 \$. Prosječna cijena koju dobivamo za kWh proizvedene energije, umanjena za troškove fotonaponskog sustava iznosi 0.100 \$/kWh.

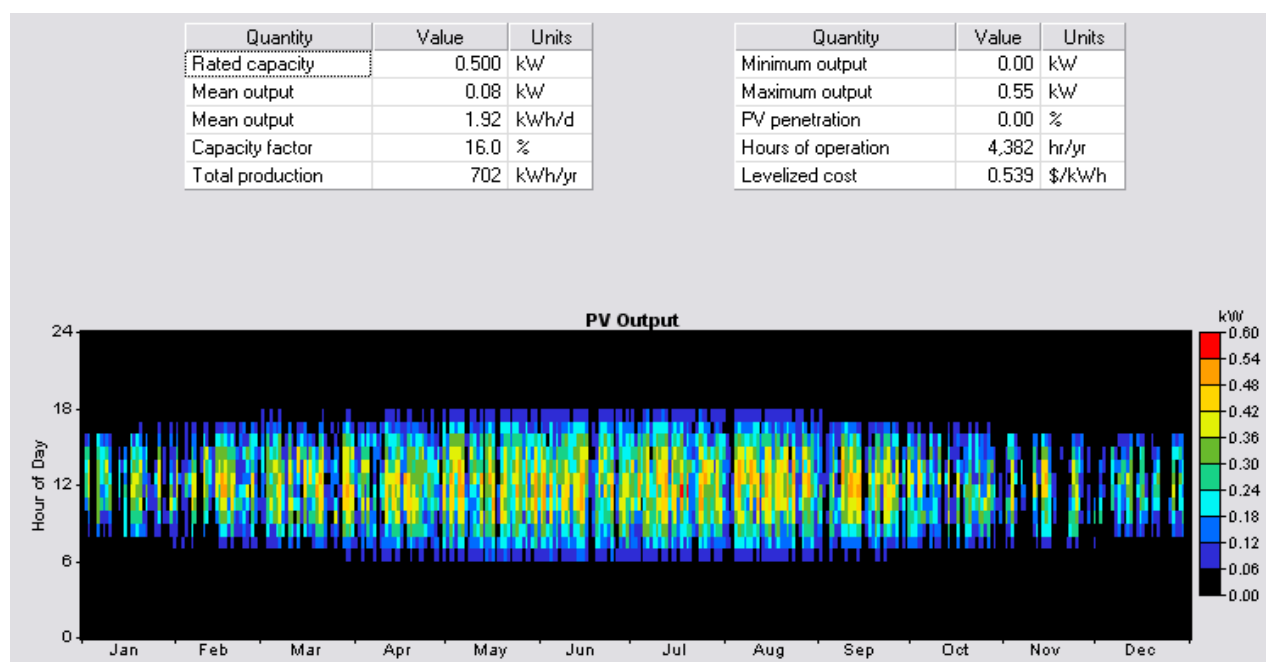


Slika 44. Podaci o proizvodnji električne energije, [Zgreb, PV sa fiksnim kutom]

Na slici 43. prikazani su podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava, odnose se na srednje godišnje vrijednosti. Proizvodnja električne energije od svibnja do kolovoza je između 79 kWh i 86 kWh, u ožujku, travnju i rujnu je između 58 kWh i 65 kWh, dok je u ostalim mjesecima bitno smanjena te je u prosincu čak ispod 29 kWh. Godišnja proizvodnja električne energije je 702 kWh/god, od čega je u mrežu predano 660 kWh/god. Slika 45. nam pokazuje podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Moduli su ciljano postavljeni pod godišnji optimalni kut od 24.95°. Slika 46. nam pokazuje kvalitativne podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Podatak o prosječnoj dnevnoj proizvodnji fotonaponskog sustava iznosi 1.92 kWh/dnevno te je točan na godišnjoj razini, dok je stvarni podatak za pojedine mjesece teško odrediti.



Slika 45. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]



Slika 46. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa fiksnim kutom]

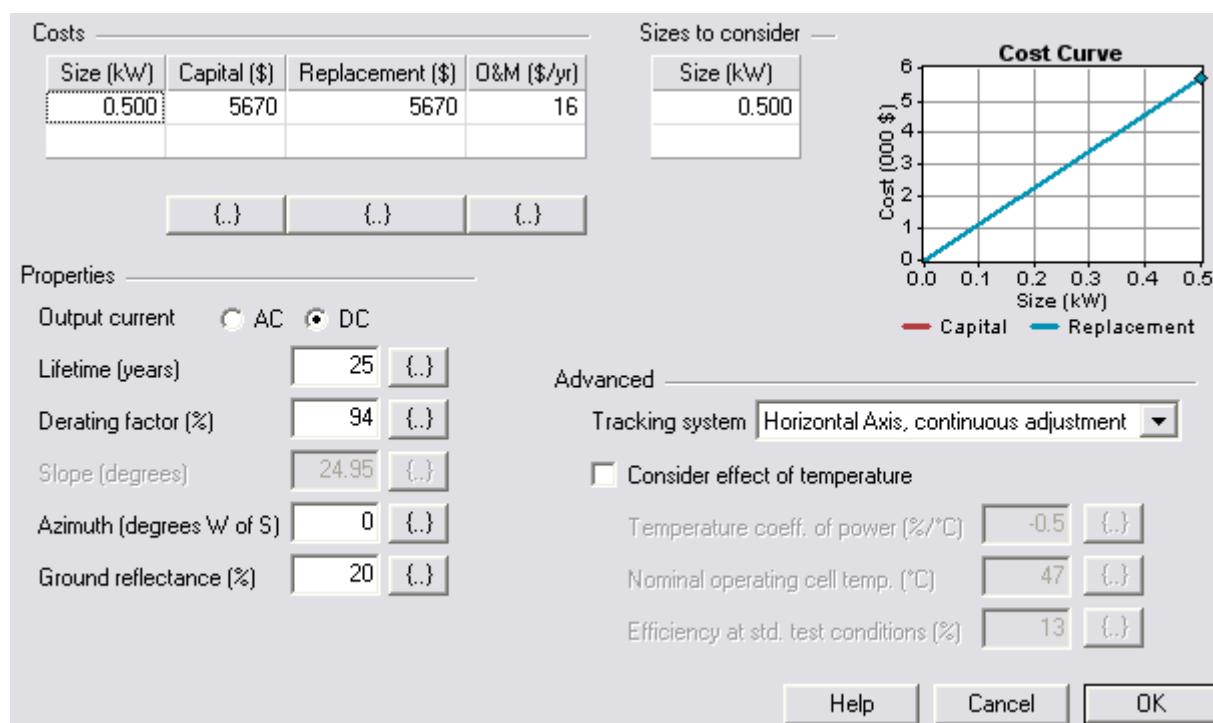
7.5. PROJEKT 2: Fotonaponski sustav sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Zagreb

Budući da se radi o istoj lokaciji fotonaponskog sustava kao i u projektu 1, podaci koji su vezani uz specifičnu lokaciju, u ovom slučaju Sunčevo zračenje, ostaju isti. Podaci koji se mijenjaju vezani su za izvedbu fotonaponskog sustava koji sada sadrži jednoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca. Stoga ćemo ponovno izvesti investicijske troškove za novi fotonaponski sustav (tablica 8.).

Tablica 8. Investicijski troškovi fotonaponskog sustava sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca nazivne snage 500 W [13]

Fotonaponski sustav $P_{nom}=500\text{ W}$	Jed. cijena (kn/kom)	Kom	Investicijski troškovi	
			(kn)	(\$)
Solarni modul Solaris 125W _p /12V	5060	4	20240	4400
Regulator napona BZ 500W 12-48V LCD MPPT	1850	1	1850	400
Etatrack active 400 sustav	3990	1	3990	870
Ukupno:			26080	5670

Osnovni podaci: životni vijek PV sustava (modula), faktor gubitaka f_{pv} (*derating factor*), azimut te koeficijent refleksije tla (*ground reflectance*) ili albedo su ostali isti. Jedini podatak koji smo mjenjali je sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca (*tracking system*), odabrali smo **Horizontal Axis, continuous adjustment**. Također su promijenjeni investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja (slika 47).



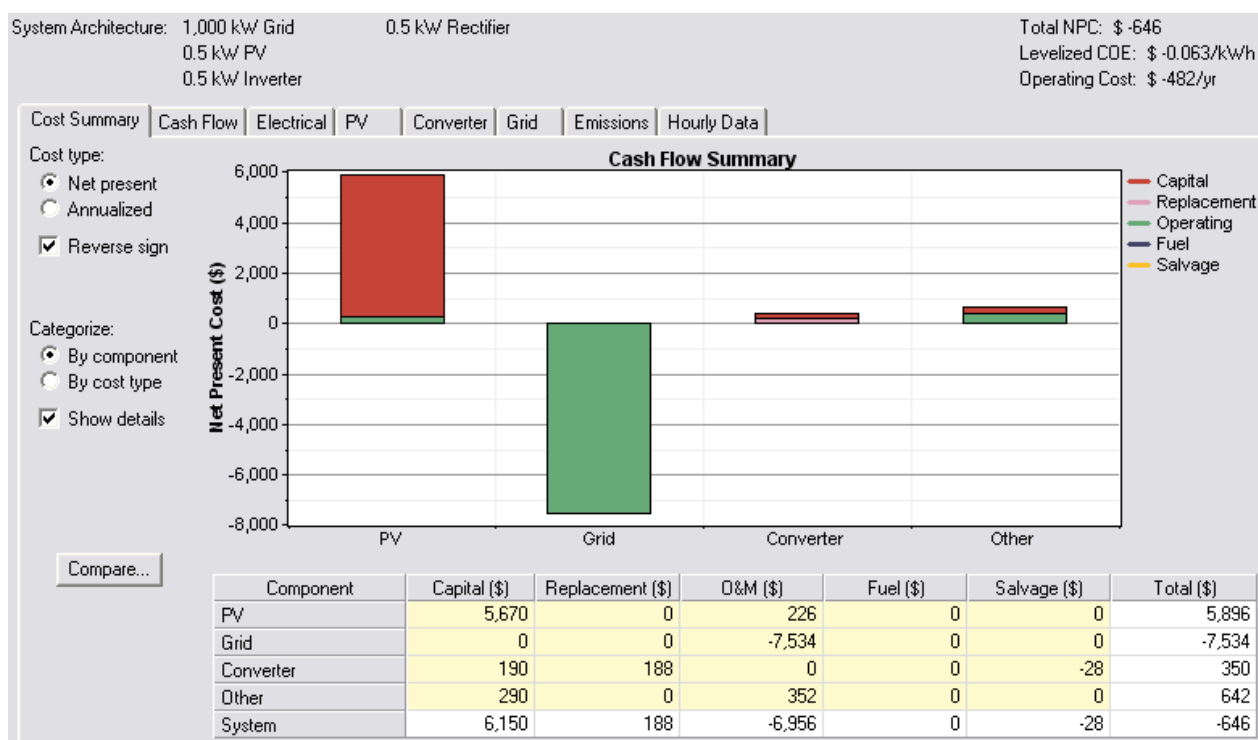
Slika 47. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Podaci koji su također promijenjeni u odnosu na projekt 1, su podaci vezani za troškove projekta. Početni investicijski trošak je postavljen kao 5 % vrijednosti ukupnog projekta (290 \$) , te je on duplo veći nego u projektu 1. Razlog tome je složeniji i skuplji fotonaponski sustav, samim time su i troškovi instalacije takvog sustava skuplji. U tu vrijednost je znači uključeno postavljanje fotonaponskog sustava, spajanje komponenti, troškovi vodiča i dr.

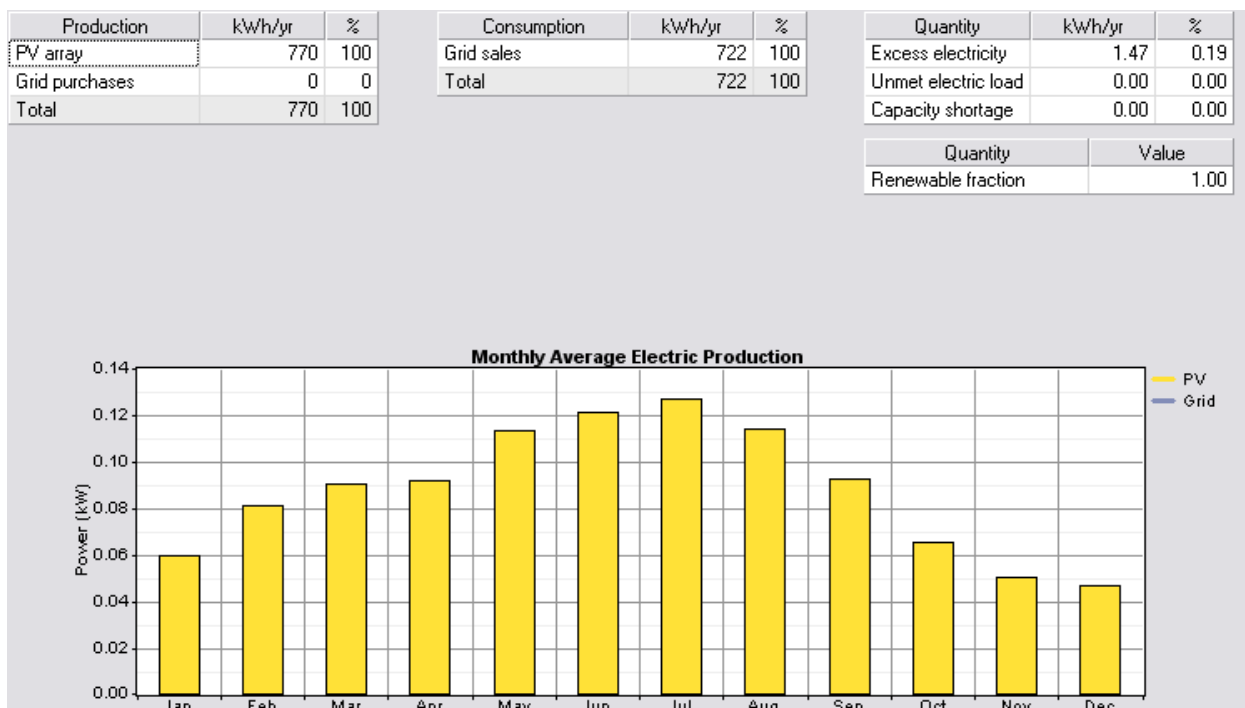
U projektu smo za troškove rada i održavanja uzeli iznos od 25 \$/god. Taj iznos bi trebao pokriti troškove održavanja fotonaponskog sustava i jednoosnog sustava za praćenje prividnog kretanja Sunca, te eventualni popravak neke od komponenti cijelog sustava.

7.5.1. Rezultati simulacije

Nakon što je HOMER proračunao sve moguće kombinacije sa zadanim varijablama u kategoriziranom prikazu pojavljuju se najisplativije kombinacije. Na slici 48. prikazan je modelirani sustav koji se sastoji od 0.5 kW fotonaponskog sustava i 0.5 kW pretvarača. Investicijski troškovi sustava iznose 6150 \$. Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta uz kamatnu stopu od 5 % iznose 6888 \$. Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 7534 \$, kada se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazimo do iznosa ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 646 \$. Prosječna cijena koju dobivamo za kWh proizvedene energije, umanjena za troškove fotonaponskog sustava iznosi 0.063 \$/kWh.

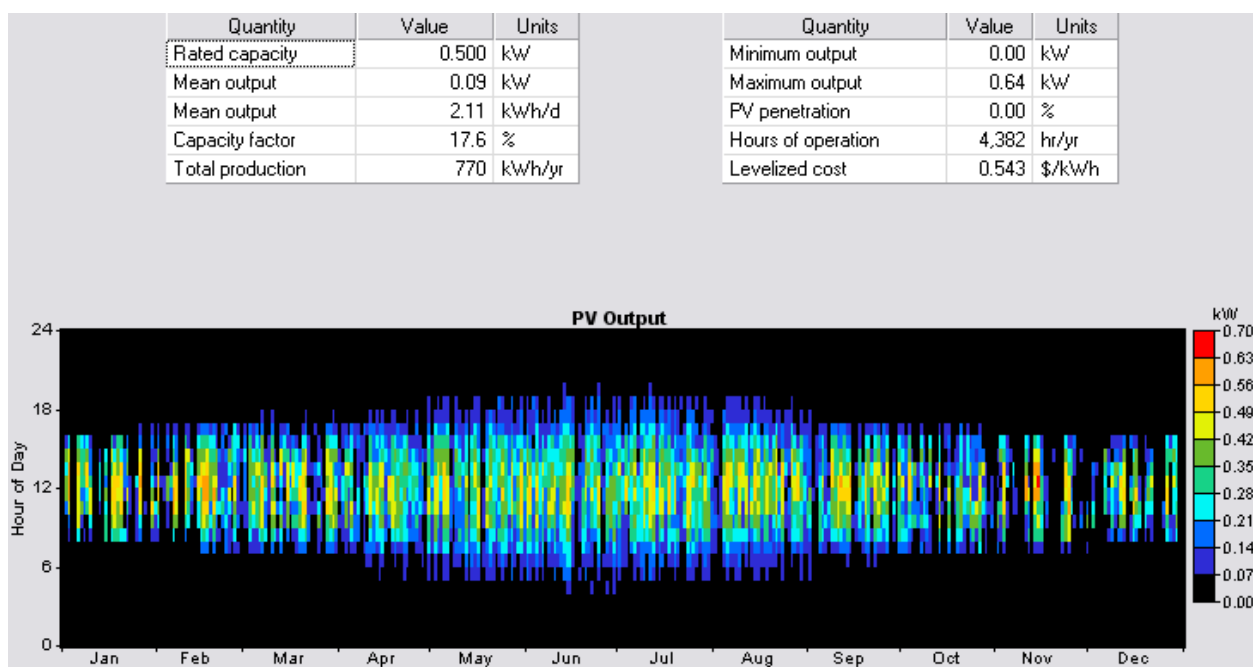


Slika 48. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

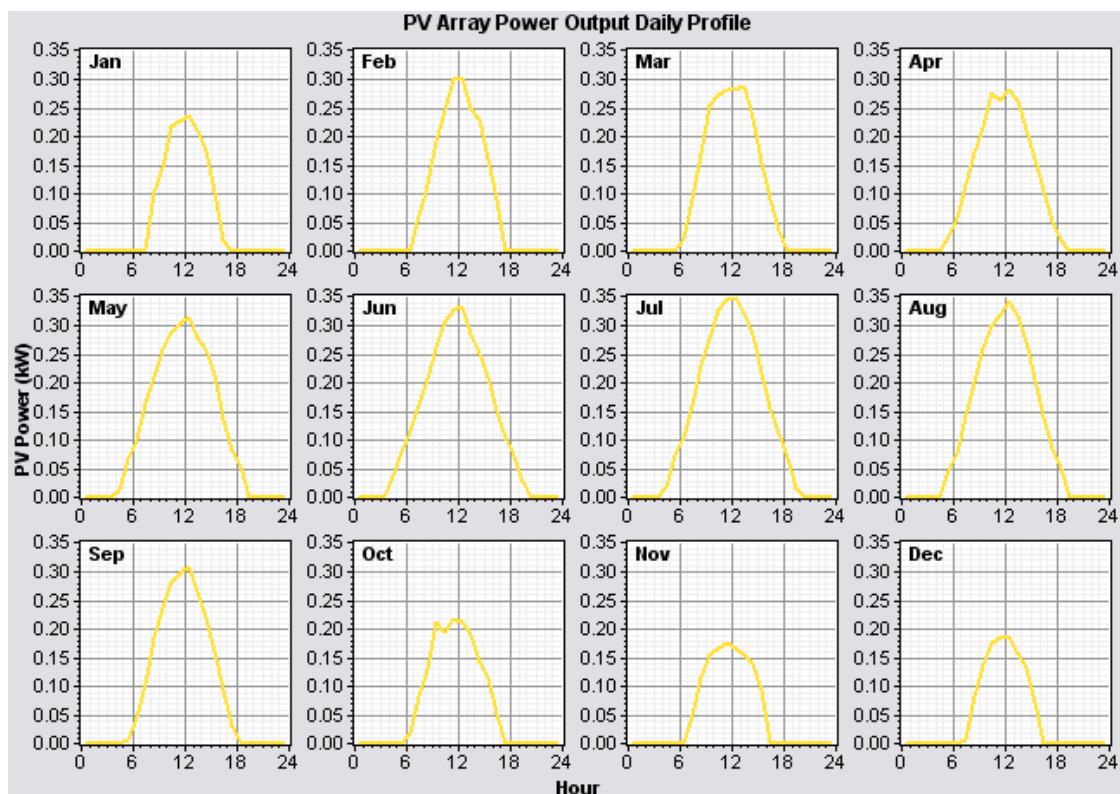


Slika 49. Podaci o proizvodnji električne energije, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Na slici 49. prikazani su podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava, odnose se na srednje godišnje vrijednosti. Vidi se da je proizvodnja električne energije slična kao i u projektu 1. Znači proizvodnja električne energije od svibnja do kolovoza je između 79 kWh i 93 kWh, u ožujku, travnju i rujnu je oko 65 kWh, dok je u zimskim mjesecima proizvodnja električne energije bitno smanjena, te je između 36 kWh i 43 kWh. Godišnja proizvodnja električne energije je 770 kWh/god, od čega je u mrežu predano 722 kWh/god. Slika 50. nam pokazuje kvalitativne podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Iz slike se vidi da je rad fotonaponskog sustava zadovoljavajući u većem dijelu godine, osim u zimskim mjesecima kada rad sustava ograničava globalno Sunčevo zračenje, koje je u tim mjesecima vidljivo slabije. Podatak o prosječnoj dnevnoj proizvodnji fotonaponskog sustava iznosi 2.11 kWh/dnevno. Slika 51. nam pokazuje podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava.



Slika 50. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]



Slika 51. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

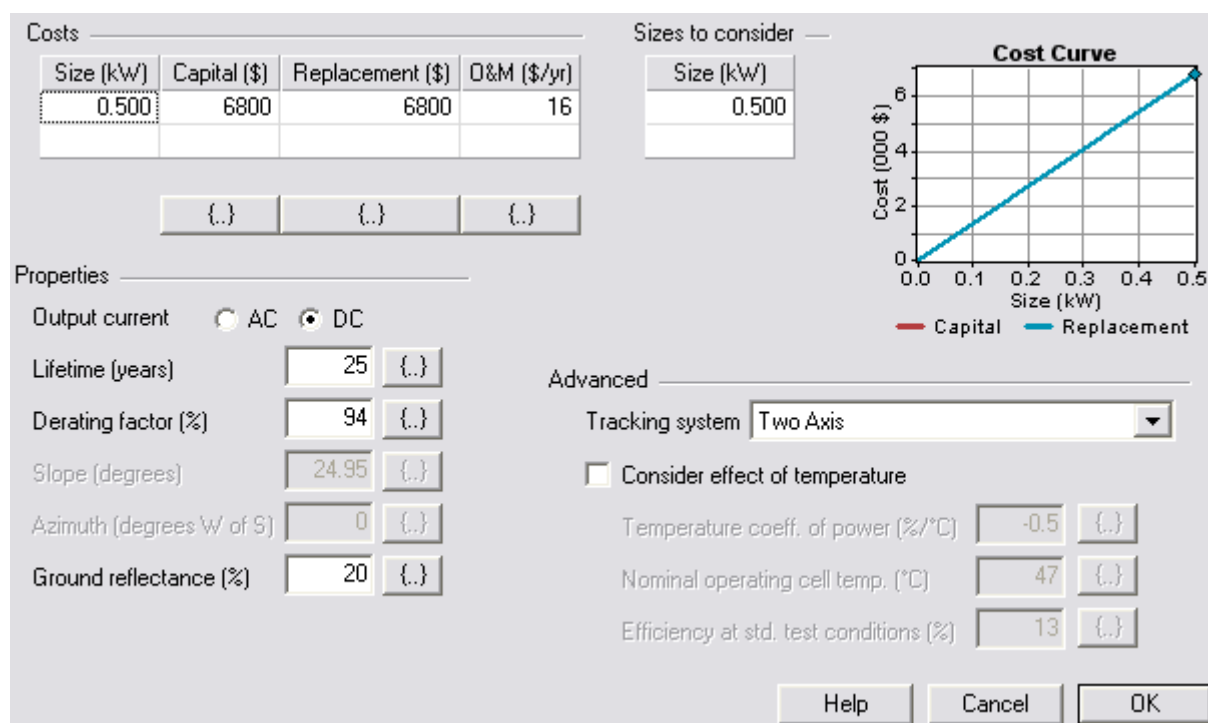
7.6. PROJEKT 3: Fotonaponski sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Zagreb

Budući da se radi o istoj lokaciji fotonaponskog sustava kao i u projektima 1 i 2, podaci koji su vezani uz specifičnu lokaciju, u ovom slučaju Sunčevo zračenje ostaju isti. Podaci koji se mijenjaju vezani su za izvedbu fotonaponskog sustava koji sada sadrži dvoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca. Stoga ćemo ponovno izvesti investicijske troškove za novi fotonaponski sustav (tablica 9).

Tablica 9. Investicijski troškovi fotonaponskog sustava sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca nazivne snage 500 W [13]

Fotonaponski sustav $P_{nom}=500\text{ W}$	Jed. cijena (kn/kom)	Kom	Investicijski troškovi	
			(kn)	(\$)
Solarni modul Solaris 125W _p /12V	5060	4	20240	4400
Regulator napona BZ 500W 12-48V LCD MPPT	1850	1	1850	400
Sunwise Pacific Sun Tracker SP 4150	9200	1	9200	2000
Ukupno:			31290	6800

Osnovni podaci: životni vijek PV sustava (modula), faktor gubitaka f_{pv} (*derating factor*), azimut te koeficijent refleksije tla (*ground reflectance*) ili albedo su ostali isti. Jedinu podatak koji smo mijenjali je sustav za praćenje prividnog kretanja sunca (*tracking system*), odabrali smo **Two Axis**. Također su promijenjeni investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja (slika 52).



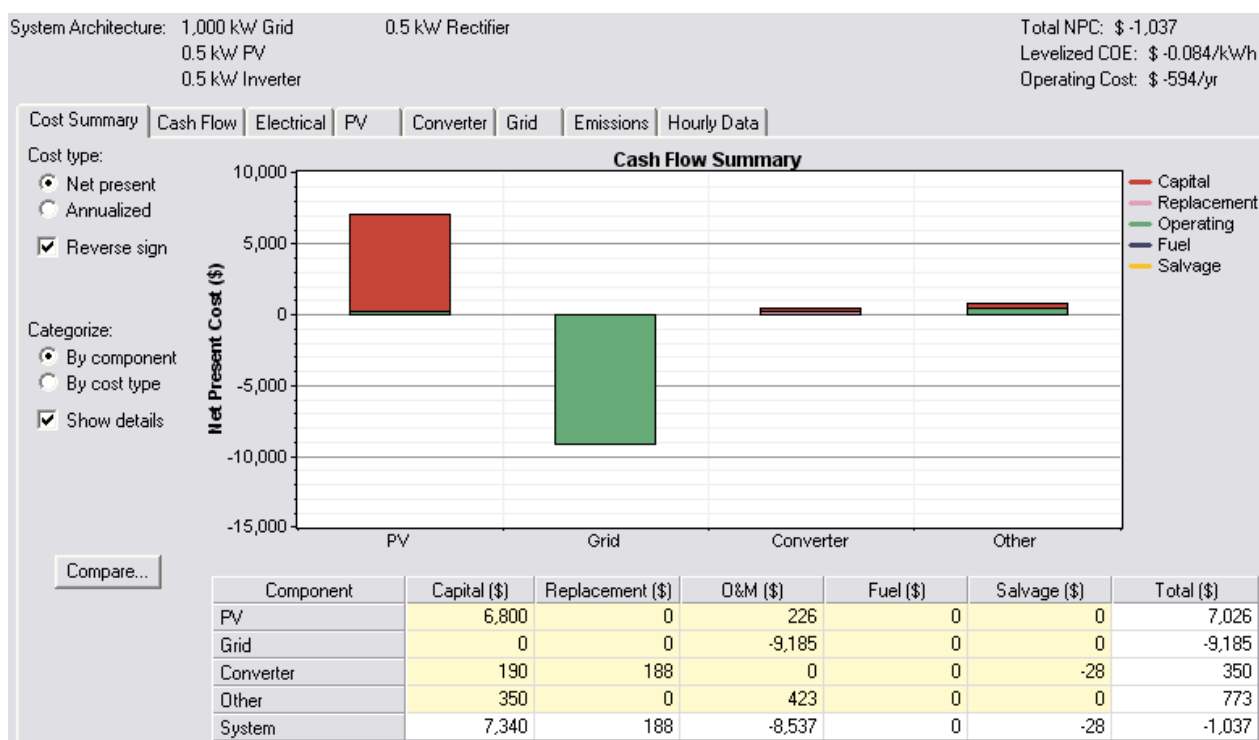
Slika 52. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Podaci koji su također promjenjeni u odnosu na projekt 2, su podaci vezani za troškove projekta. Početni investicijski trošak je postavljen kao 5 % vrijednosti ukupnog projekta (350 \$). Razlog tome je složeniji i skuplji dvoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca, samim time su i troškovi instalacije takvog sustava skuplji.

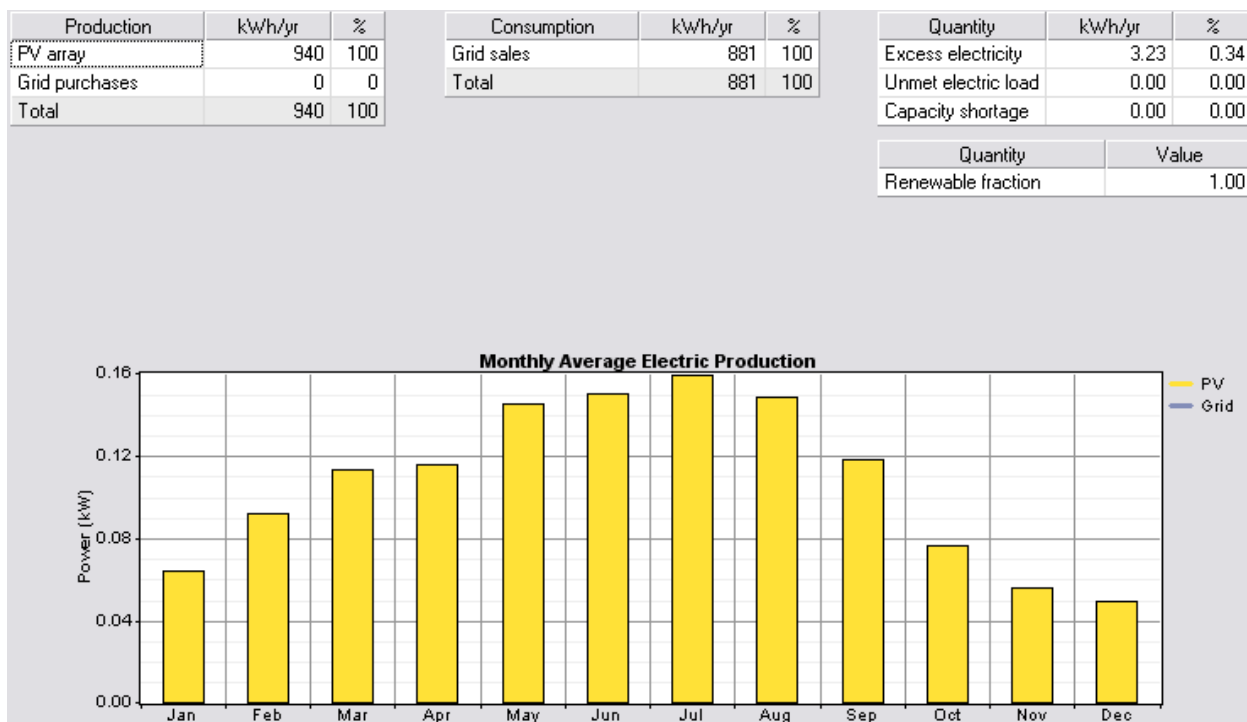
U projektu smo za troškove rada i održavanja uzeli iznos od 30 \$/god. Taj iznos bi trebao pokriti troškove održavanja fotonaponskog sustava i dvoosnog sustava za praćenje prividnog kretanja Sunca, te eventualni popravak neke od komponenti cijelog sustava.

7.6.1. Rezultati simulacije

Nakon što je HOMER proračunao sve moguće kombinacije sa zadanim varijablama u kategoriziranom prikazu pojavljuju se najisplativije kombinacije. Na slici 53. prikazan je modelirani sustav koji se sastoji od 0.5 kW fotonaponskog sustava i 0.5 kW pretvarača. Investicijski troškovi sustava iznose 7340 \$. Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta uz kamatnu stopu od 5 % iznose 8149 \$. Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 9185 \$, kada se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazimo do iznosa ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 1037 \$. Prosječna cijena koju dobivamo za kWh proizvedene energije, umanjena za troškove fotonaponskog sustava iznosi 0.084 \$/kWh.

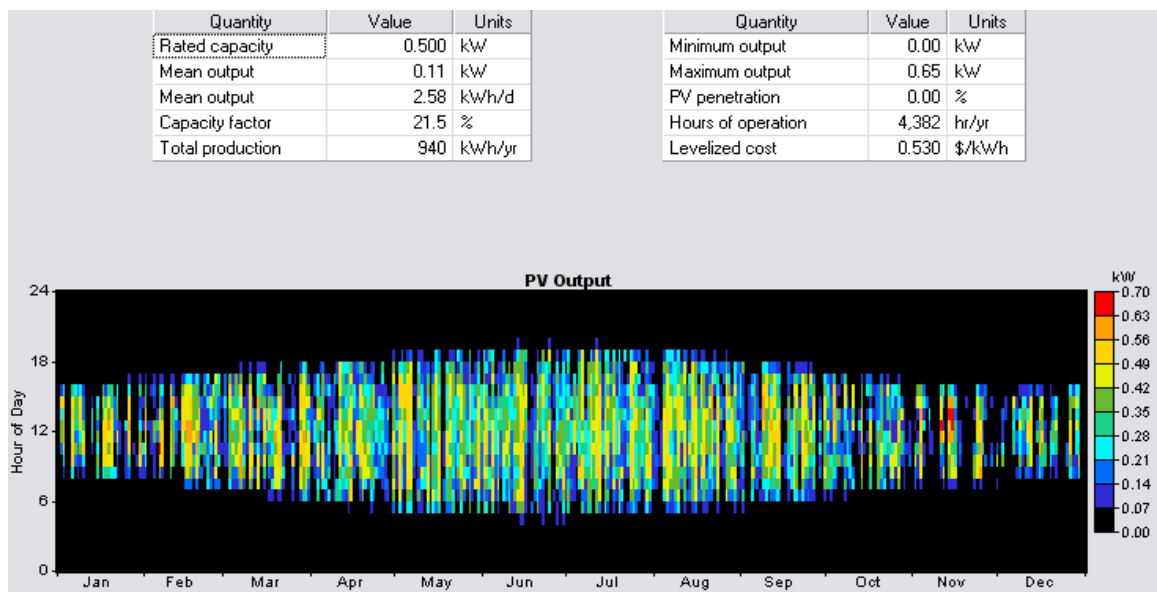


Slika 53. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

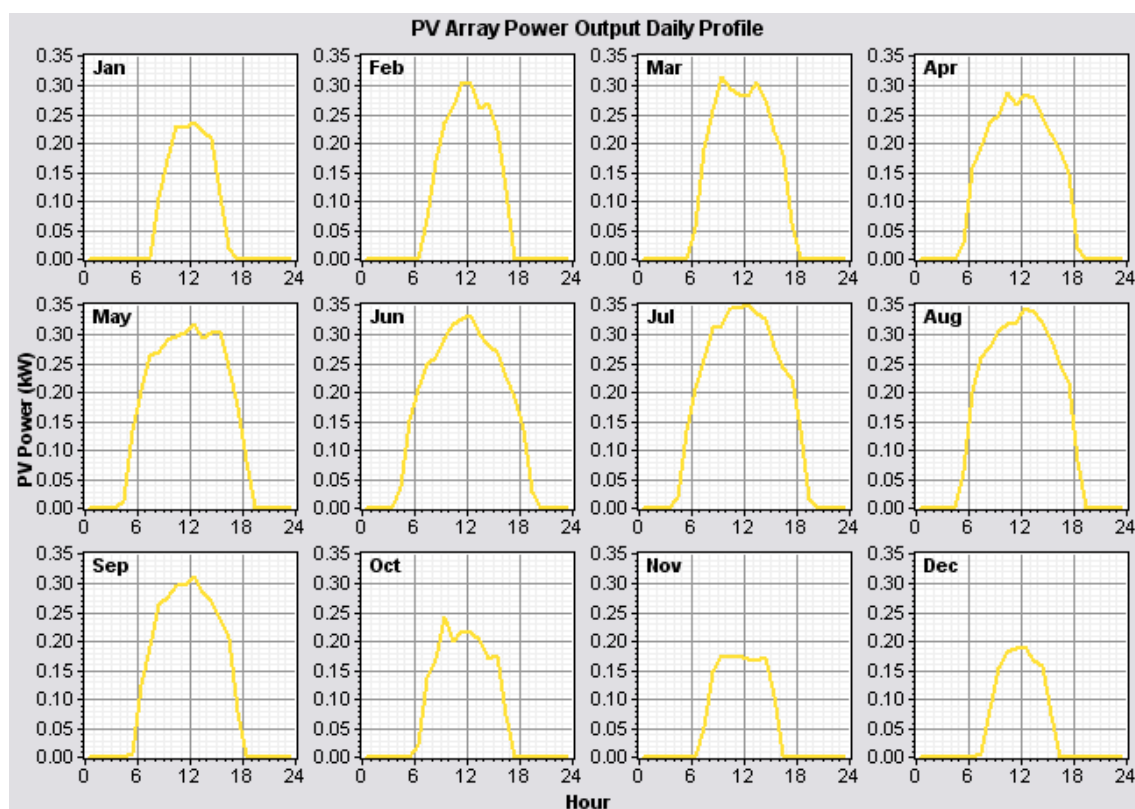


Slika 54. Podaci o proizvodnji električne energije, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Na slici 54. prikazani su podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava, odnose se na srednje godišnje vrijednosti. Na slici se vidi da je proizvodnja električne energije bitno veća nego u projektima 1 i 2, razlog tome je dvoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca. Znači proizvodnja električne energije od svibnja do kolovoza je između 100 kWh i 115 kWh, u ožujku, travnju i rujnu je nešto ispod 86 kWh, dok je u zimskim mjesecima proizvodnja električne energije bitno smanjena, te je negdje između 36 kWh i 50 kWh. Godišnja proizvodnja električne energije je 940 kWh/god, od čega je u mrežu predano 881 kWh/god. Slika 55. nam pokazuje kvalitativne podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Iz slike se vidi da je rad fotonaponskog sustava zadovoljavajući u većem dijelu godine, osim u zimskim mjesecima kada rad sustava ograničava globalno Sunčevo zračenje, koje je u tim mjesecima vidljivo slabije. Podatak o prosječnoj dnevnoj proizvodnji fotonaponskog sustava iznosi 2.58 kWh/dnevno. Slika 56. nam pokazuje podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava..



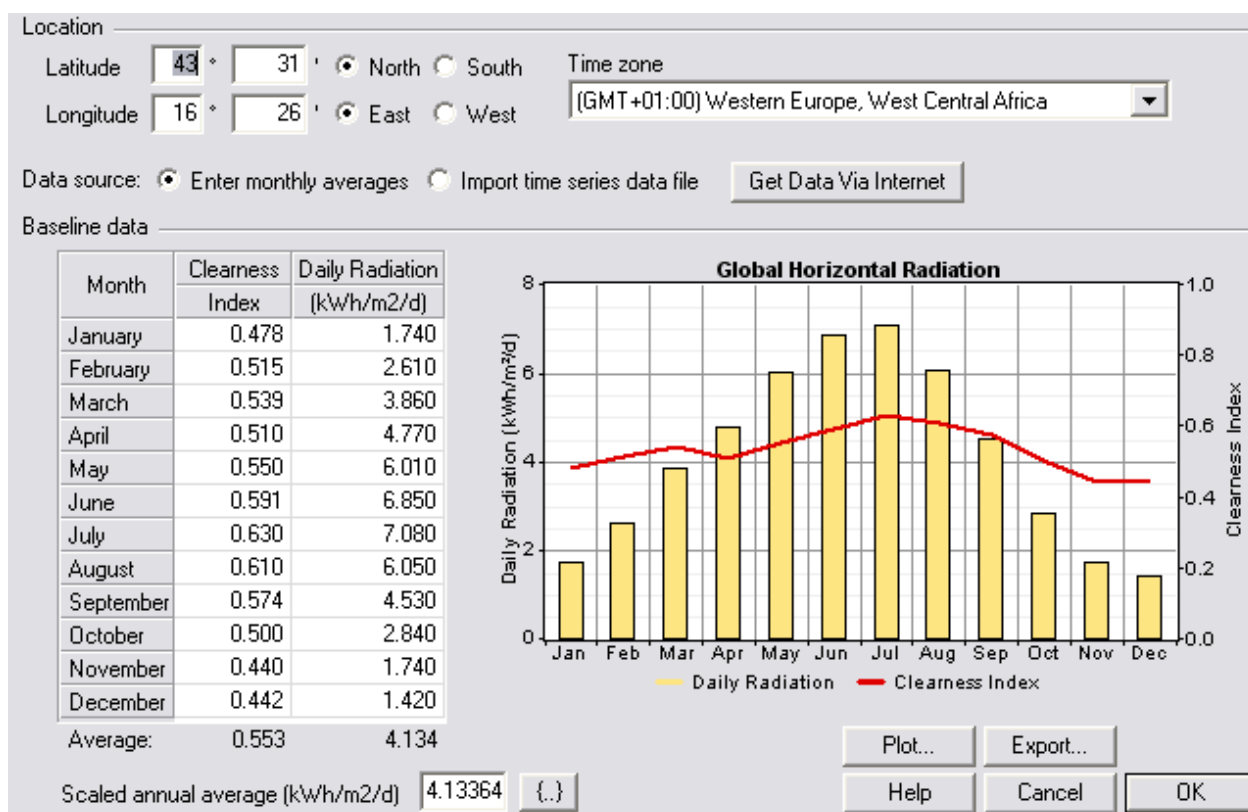
Slika 55. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]



Slika 56. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Zagreb, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

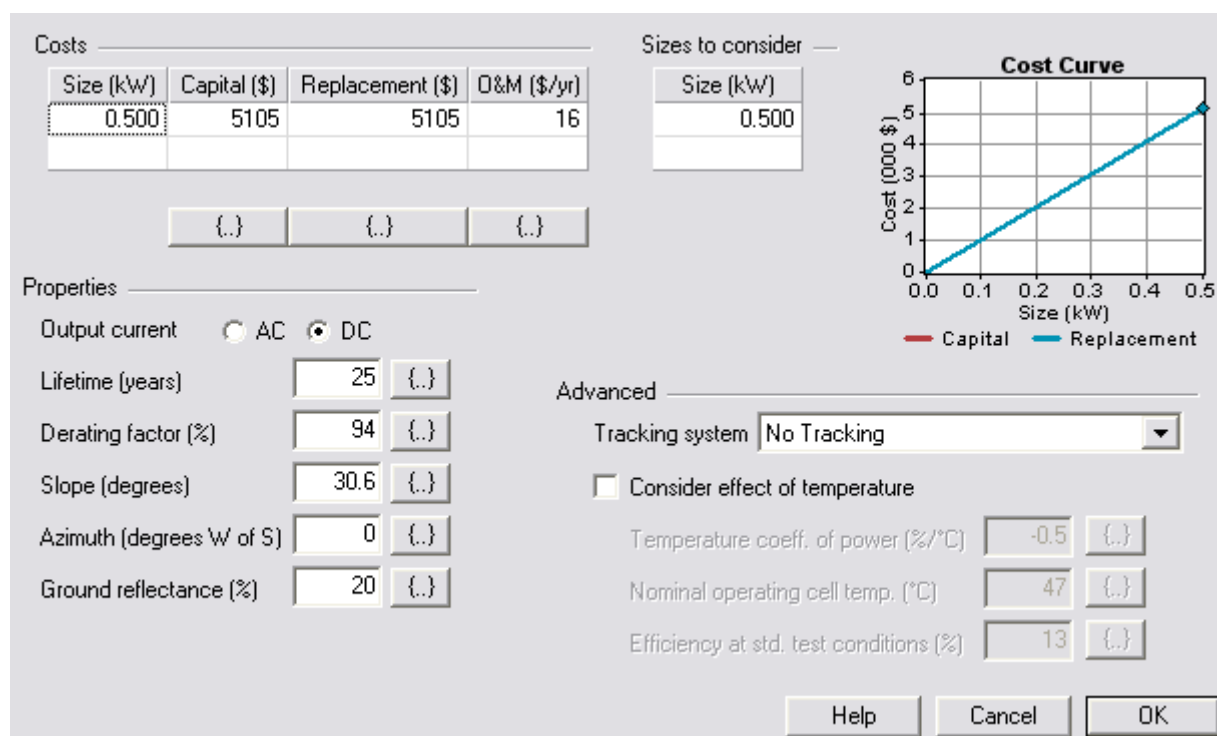
7.7. PROJEKT 4: Fotonaponski sustav sa fiksnim kutom , lokacija grad Split

Budući da se ne radi o istoj lokaciji fotonaponskog sustava kao i u projektima 1, 2 i 3, podaci koji su vezani uz specifičnu lokaciju, u ovom slučaju Sunčevo zračenje se mijenjaju (slika 57).



Slika 57. . Prosječne srednje mjesečne vrijednosti ukupnog dnevnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu za grad Split te ostali podaci potrebni za simulaciju

Podaci koji se ne mijenjaju vezani su za izvedbu fotonaponskog sustava koji je sada kao i u projektu 1 pod fiksnim kutom. Stoga nema potrebe ponovno izvoditi investicijske troškove za isti fotonaponski sustav (pogledati tablicu 6).



Slika 58. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Split, PV sa fiksnim kutom]

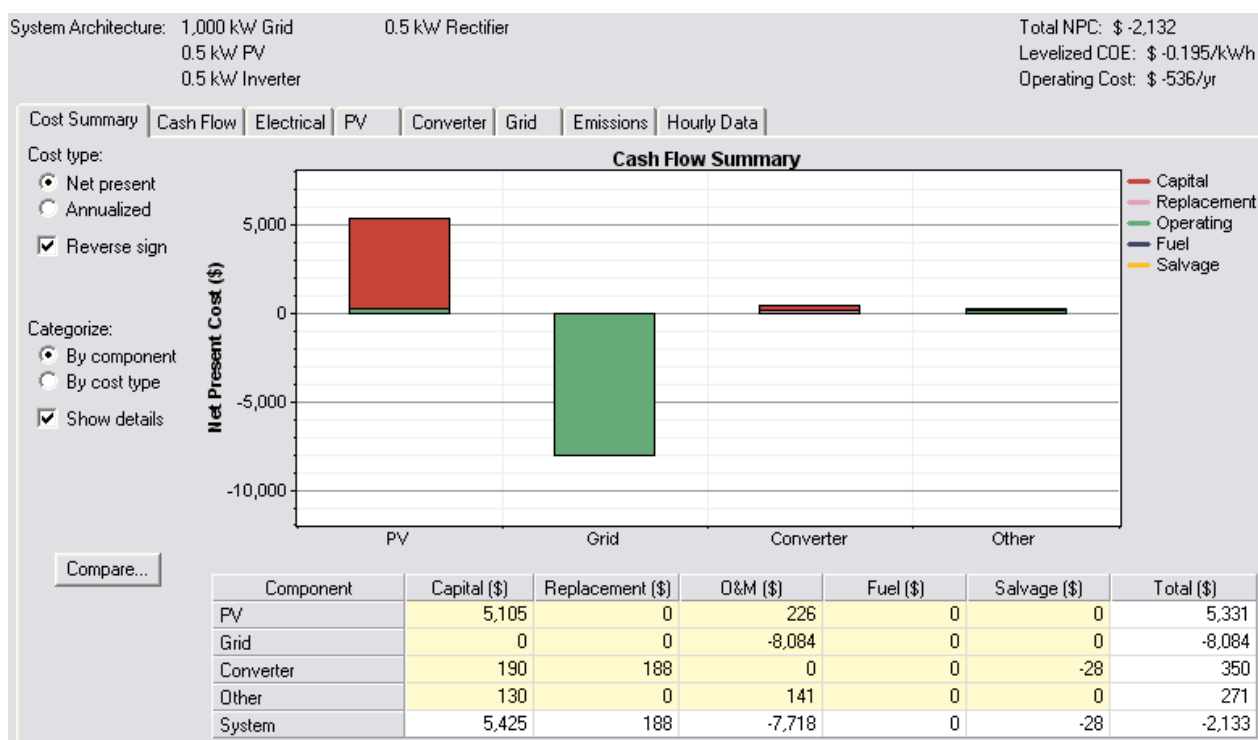
Osnovni podaci: životni vijek PV sustava (modula), faktor gubitaka f_{pv} (*derating factor*), azimut te koeficijent refleksije tla (*ground reflectance*) ili albedo su ostali isti. Jedini podatak koji smo mijenjali je kut nagiba PV modula β (*slope*), koji je preporučen u priručniku za energetske korištenje Sunčevog zračenja za lokaciju grada Splita on sada iznosi 30.60° [2].

Podaci koji su također nisu promijenjeni u odnosu na projekt 1, su podaci vezani za troškove projekta. Početni investicijski trošak je postavljen kao 2.5 % vrijednosti ukupnog projekta (130 \$). U tu vrijednost je znači uključeno postavljanje fotonaponskog sustava, spajanje komponenti, troškovi vodiča i dr.

U projektu smo za troškove rada i održavanja uzeli iznos od 10 \$/god. Taj iznos bi trebao pokriti troškove održavanja, te eventualni popravak neke od komponenti cijelog sustava.

7.7.1. Rezultati simulacije

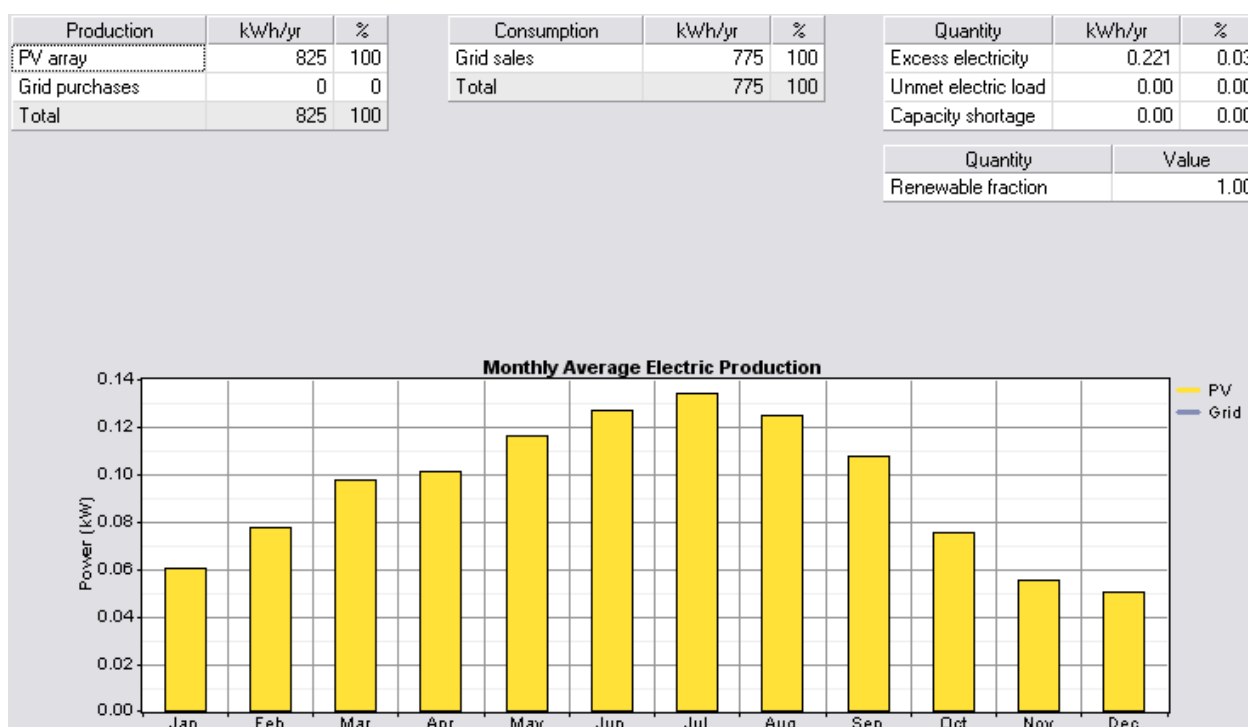
Nakon što je HOMER proračunao sve moguće kombinacije sa zadanim varijablama u kategoriziranom prikazu pojavljuju se najisplativije kombinacije. Na slici 59. vidljivo je da se modelirani sustav sastoji se od 0.5 kW fotonaponskog sustava i 0.5 kW pretvarača. Investicijski troškovi sustava iznose 5425 \$. Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta uz kamatnu stopu od 5% iznose 5952 \$. Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 8084 \$, kada se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazimo do iznosa ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 2133 \$. Prosječna cijena koju dobivamo za kWh proizvedene energije, umanjena za troškove fotonaponskog sustava iznosi 0.195 \$/kWh.



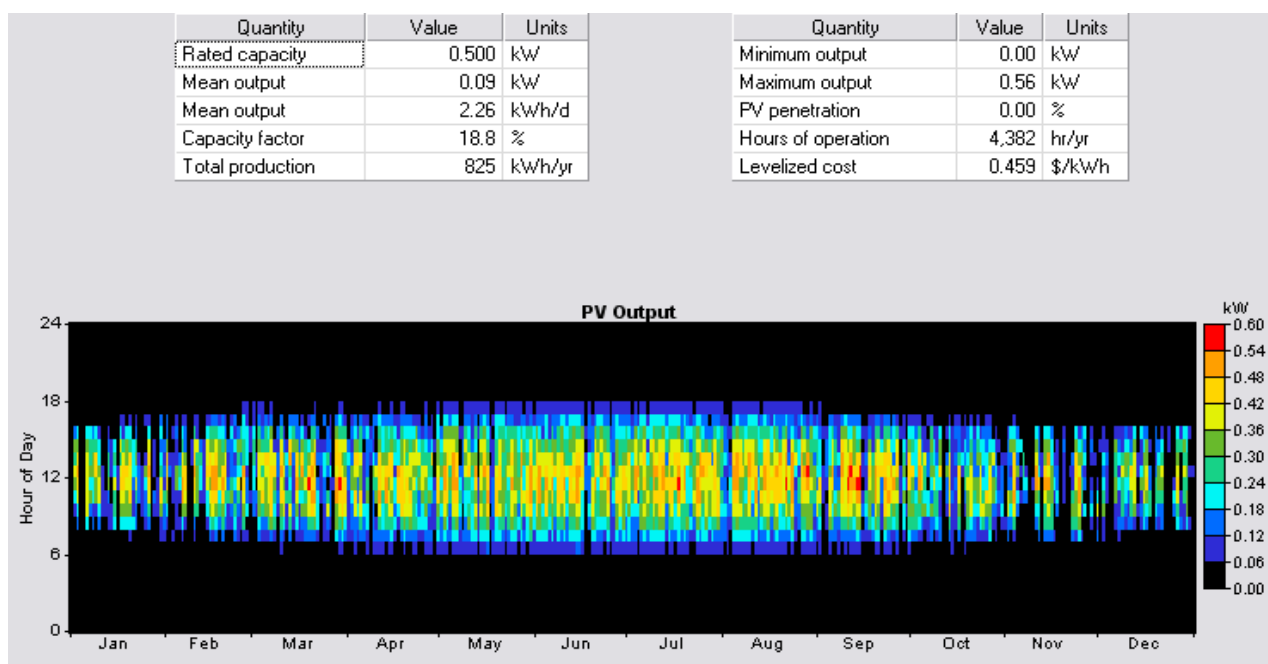
Slika 59. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Split, PV sa fiksnim kutom]

Na slici 60. prikazani su podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava, odnose se na srednje godišnje vrijednosti. Iz slike se vidi da je proizvodnja

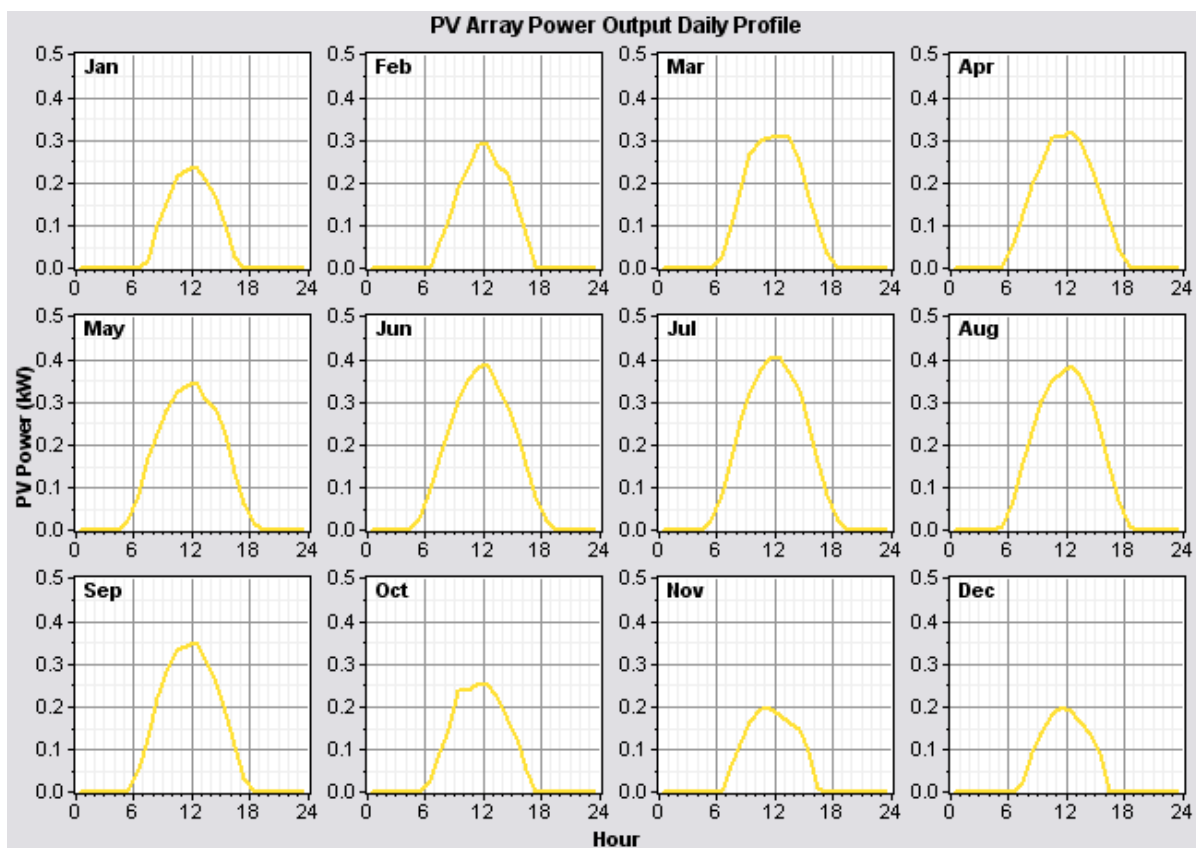
električne energije po mjesecima bitno različita i veća nego u projektu 1, razlog tome je bolja lokacija grada Splita. Znači proizvodnja električne energije je u lipnju, srpnju i kolovozu najveća, te je ona nešto viša od 86 kWh. U ožujku, travnju i rujnu ona je oko 72 kWh, dok je u zimskim mjesecima ona između 36 kWh i 43 kWh. Godišnja proizvodnja električne energije je 825 kWh/god. Slika 61. nam pokazuje kvalitativne podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Iz slike se vidi da je rad fotonaponskog sustava bolji od onog u projektu 1, razlog tomu je naravno bolja lokacija grada Splita. Podatak o prosječnoj dnevnoj proizvodnji fotonaponskog sustava iznosi 2.26 kWh/dnevno te je točan na godišnjoj razini, dok je stvarni podatak za pojedine mjesece teško odrediti. Slika 62. nam pokazuje podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Moduli su ciljano postavljeni pod godišnji optimalni kut od 30.60°.



Slika 60. Podaci o proizvodnji električne energije, [Split, PV sa fiksnim kutom]



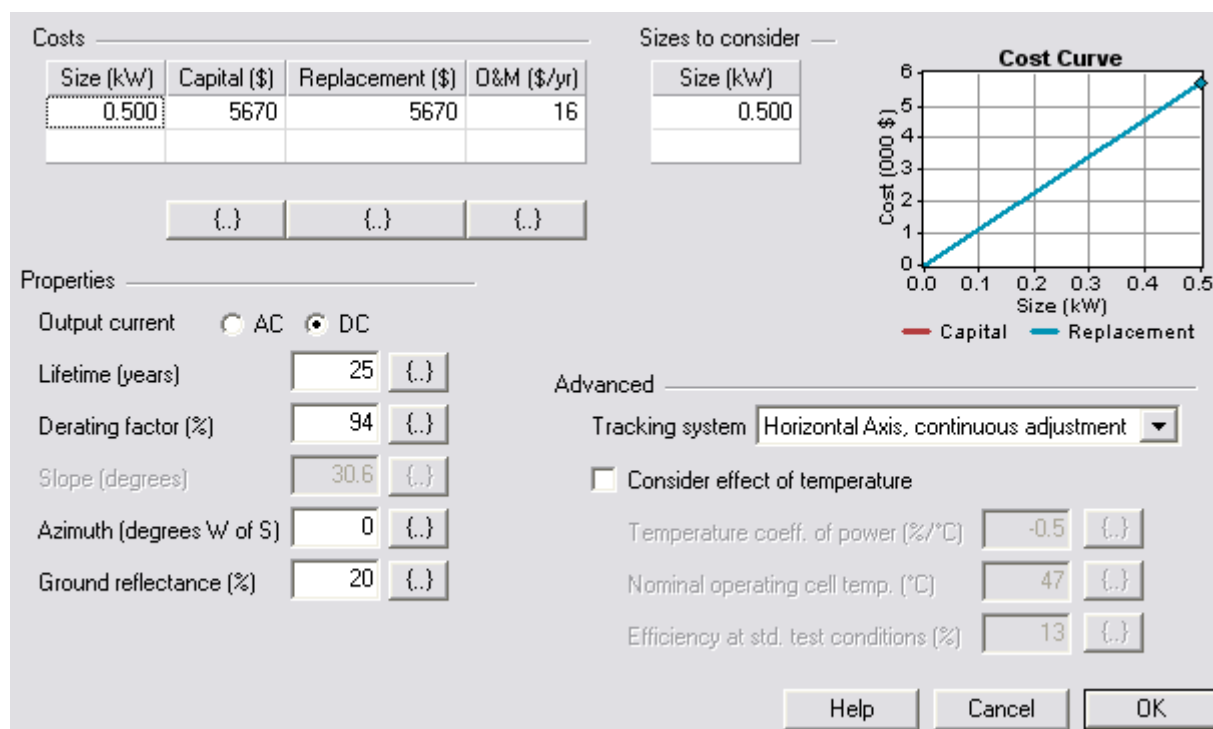
Slika 61. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Split, PV sa fiksnim kutom]



Slika 62. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Split, PV sa fiksnim kutom]

7.8. PROJEKT 5: Fotonaponski sustav sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Split

Budući da se radi o istoj lokaciji fotonaponskog sustava kao i u projektu 4 podaci koji su vezani uz specifičnu lokaciju, u ovom slučaju Sunčevo zračenje ostaju isti. Podaci koji se mijenjaju vezani su za izvedbu fotonaponskog sustava koji sada sadrži jednoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca. Kako je izvedba fotonaponskog sustava identična onoj u projektu 2, nema potrebe da ponovno izvodimo investicijske troškove za novi fotonaponski sustav (pogledati tablicu 8.).



Slika 63. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Osnovni podaci: životni vijek PV sustava (modula), faktor gubitaka f_{pv} (derating factor), azimut te koeficijent refleksije tla (ground reflectance) ili albedo su ostali isti. Jedini podatak koji smo mijenjali je sustav za praćenje prividnog kretanja sunca

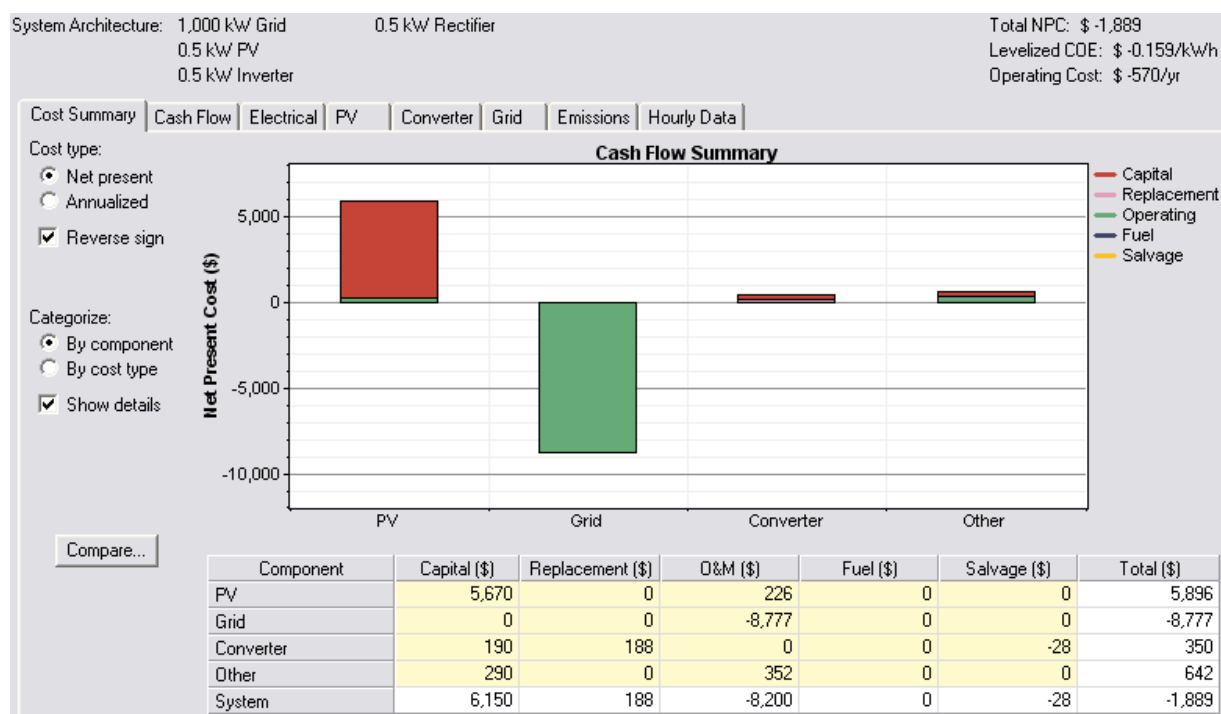
(tracking system), odabrali smo **Horizontal Axis, continuous adjustment**. Također su promijenjeni investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja (slika 63.).

Podaci koji su također nisu promijenjeni u odnosu na projekt 2, su podaci vezani za troškove projekta. Početni investicijski trošak je postavljen kao 5 % vrijednosti ukupnog projekta (290 \$). Razlog tome je složeniji i skuplji fotonaponski sustav, samim time su i troškovi instalacije takvog sustava skuplji. U tu vrijednost je znači uključeno postavljanje fotonaponskog sustava, spajanje komponenti, troškovi vodiča i dr.

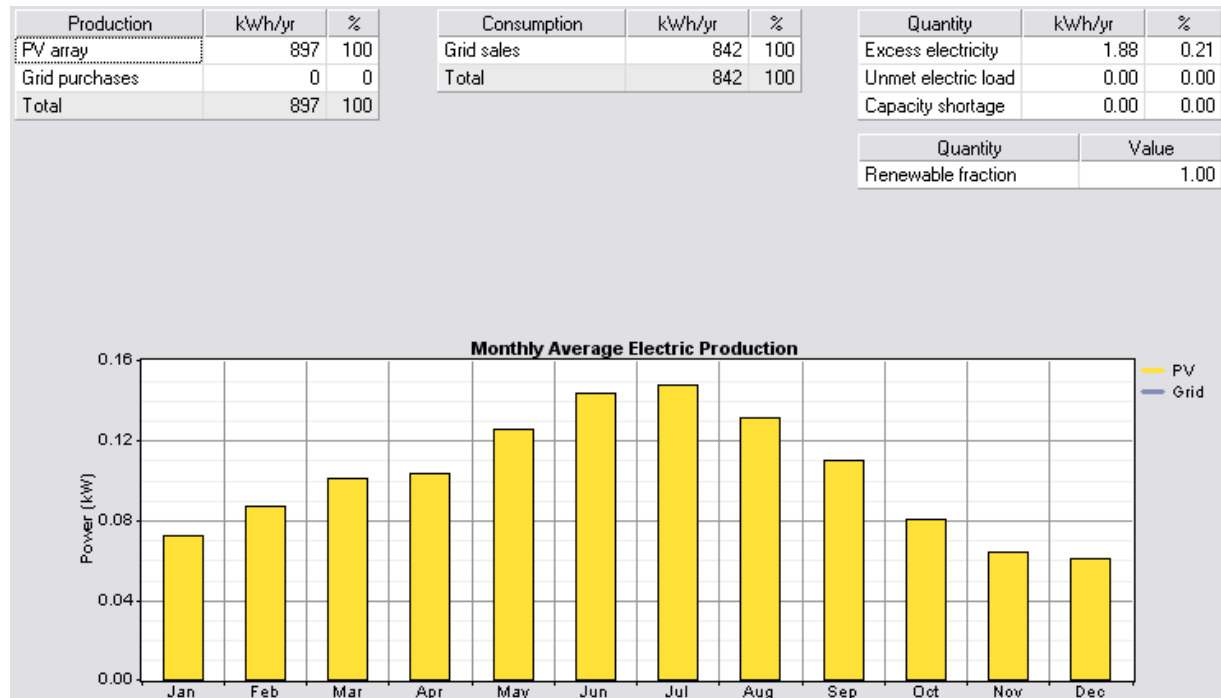
U projektu smo za troškove rada i održavanja uzeli iznos od 25 \$/god. Taj iznos bi trebao pokriti troškove održavanja fotonaponskog sustava i jednoosnog sustava za praćenje prividnog kretanja Sunca, te eventualni popravak neke od komponenti cijelog sustava.

7.8.1. Rezultati simulacije

Nakon što je HOMER proračunao sve moguće kombinacije sa zadanim varijablama u kategoriziranom prikazu pojavljuju se najisplativije kombinacije. Na slici 64. vidljivo je da se modelirani sustav sastoji se od 0.5 kW fotonaponskog sustava i 0.5 kW pretvarača. Investicijski troškovi sustava iznose 6150 \$. Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta uz kamatnu stopu od 5% iznose 6888 \$. Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 8777 \$, kada se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazimo do iznosa ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 1889 \$. Prosječna cijena koju dobivamo za kWh proizvedene energije, umanjena za troškove fotonaponskog sustava iznosi 0.159 \$/kWh.

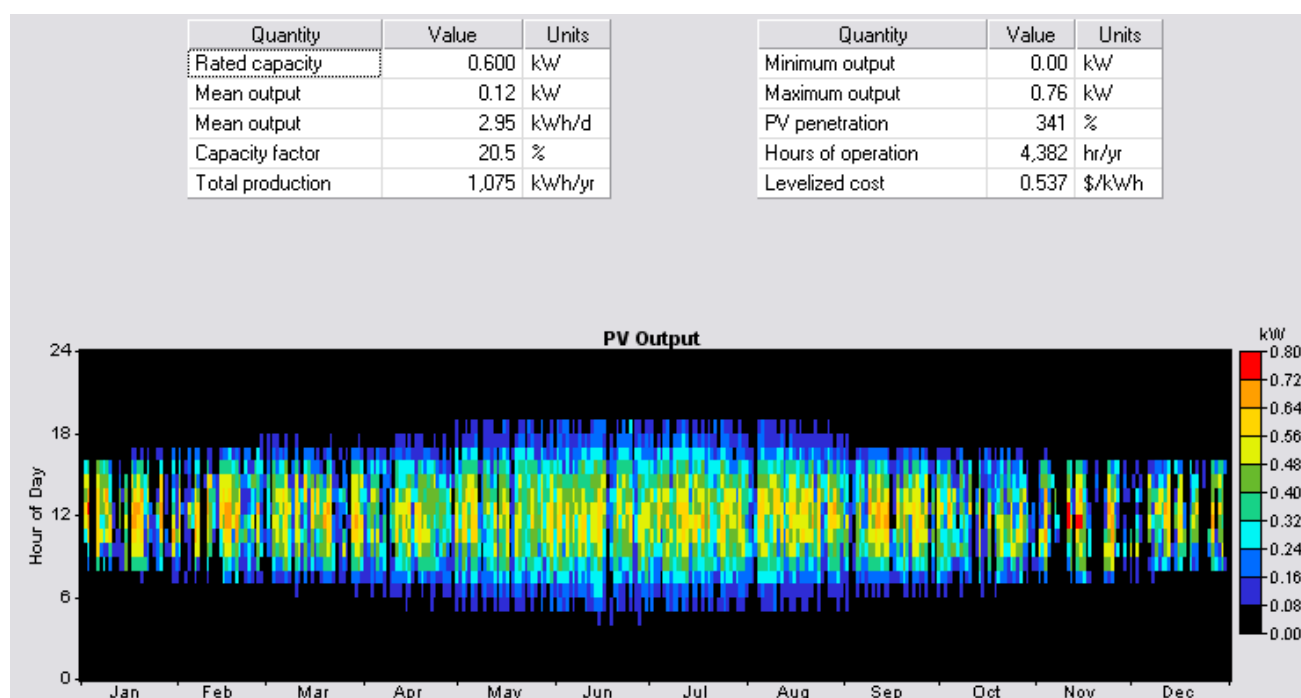


Slika 64. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]



Slika 65. Podaci o proizvodnji električne energije, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Na slici 65. prikazani su podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava, odnose se na srednje godišnje vrijednosti. Vidi se da je proizvodnja električne energije slična kao i u projektu 4. Znači proizvodnja električne energije od svibnja do kolovoza je između 86 kWh i 108 kWh, u ožujku, travnju i rujnu je oko 72 kWh, dok je u zimskim mjesecima proizvodnja električne energije bitno smanjena, te je između 43 kWh i 50 kWh. Godišnja proizvodnja električne energije je 897 kWh/god, od čega je u mrežu predano 842 kWh/god. Slika 66. nam pokazuje kvalitativne podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Iz slike se vidi da je rad fotonaponskog sustava zadovoljavajući u većem dijelu godine, osim u zimskim mjesecima kada rad sustava ograničava globalno Sunčevo zračenje, koje je u tim mjesecima vidljivo slabije. Podatak o prosječnoj dnevnoj proizvodnji fotonaponskog sustava iznosi 2.95 kWh/dnevno. Slika 67. nam pokazuje podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava.



Slika 66. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

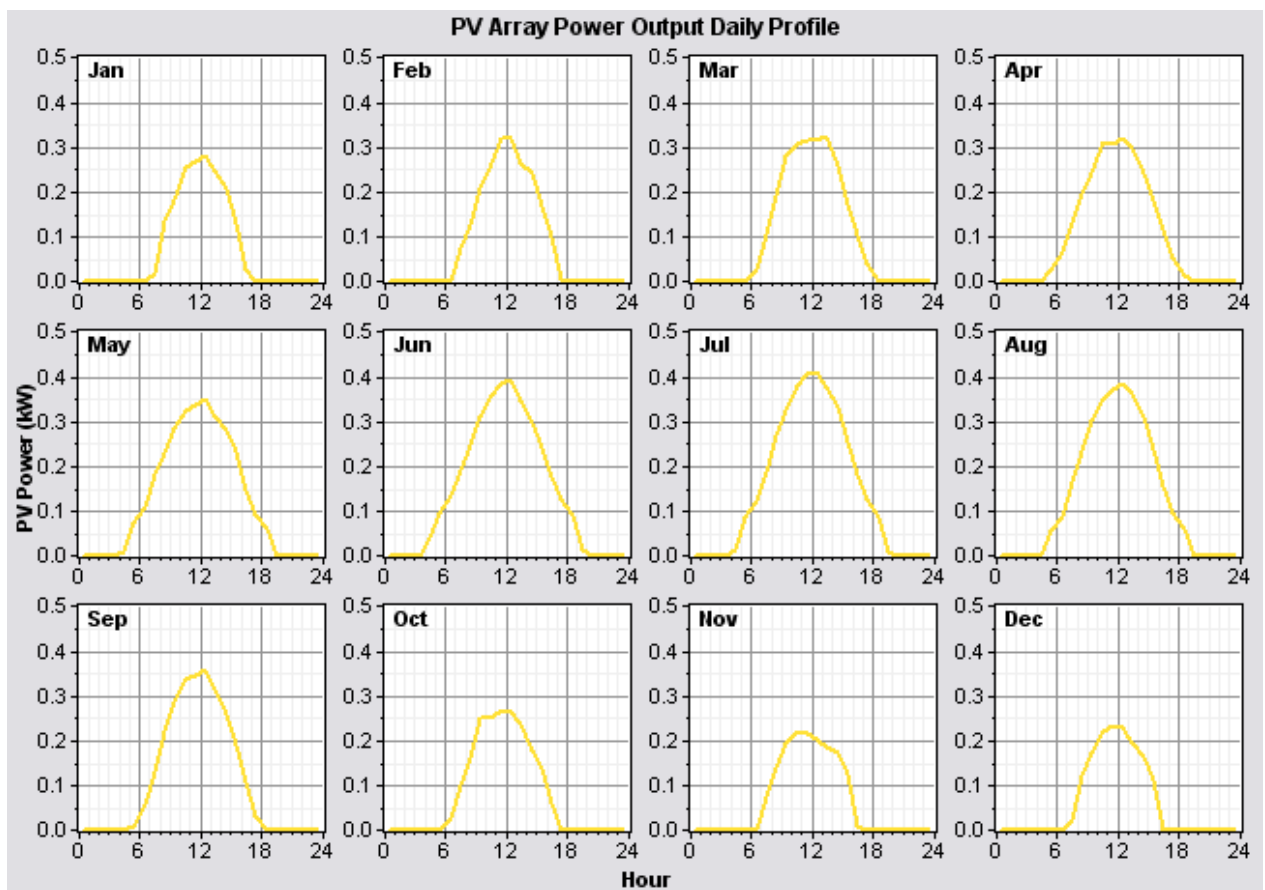
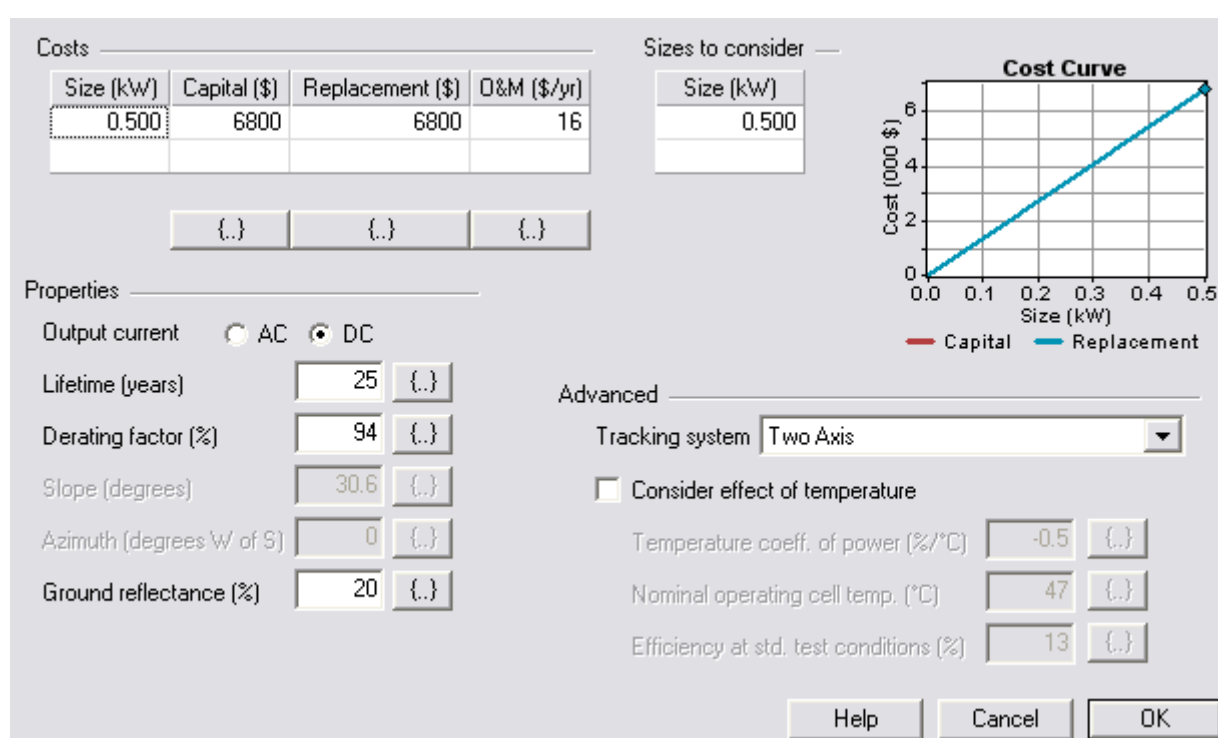


Figure 67. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Split, PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

7.9. PROJEKT 6: Fotonaponski sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca, lokacija grad Split

Budući da se radi o istoj lokaciji fotonaponskog sustava kao i u projektima 4 i 5, podaci koji su vezani uz specifičnu lokaciju, u ovom slučaju Sunčevo zračenje ostaju isti. Podaci koji se mijenjaju vezani su za izvedbu fotonaponskog sustava koji sada sadrži dvoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca. Kako je izvedba fotonaponskog sustava identična onoj u projektu 3, nema potrebe da ponovno izvodimo investicijske troškove za isti fotonaponski sustav (pogledati tablicu 9.).



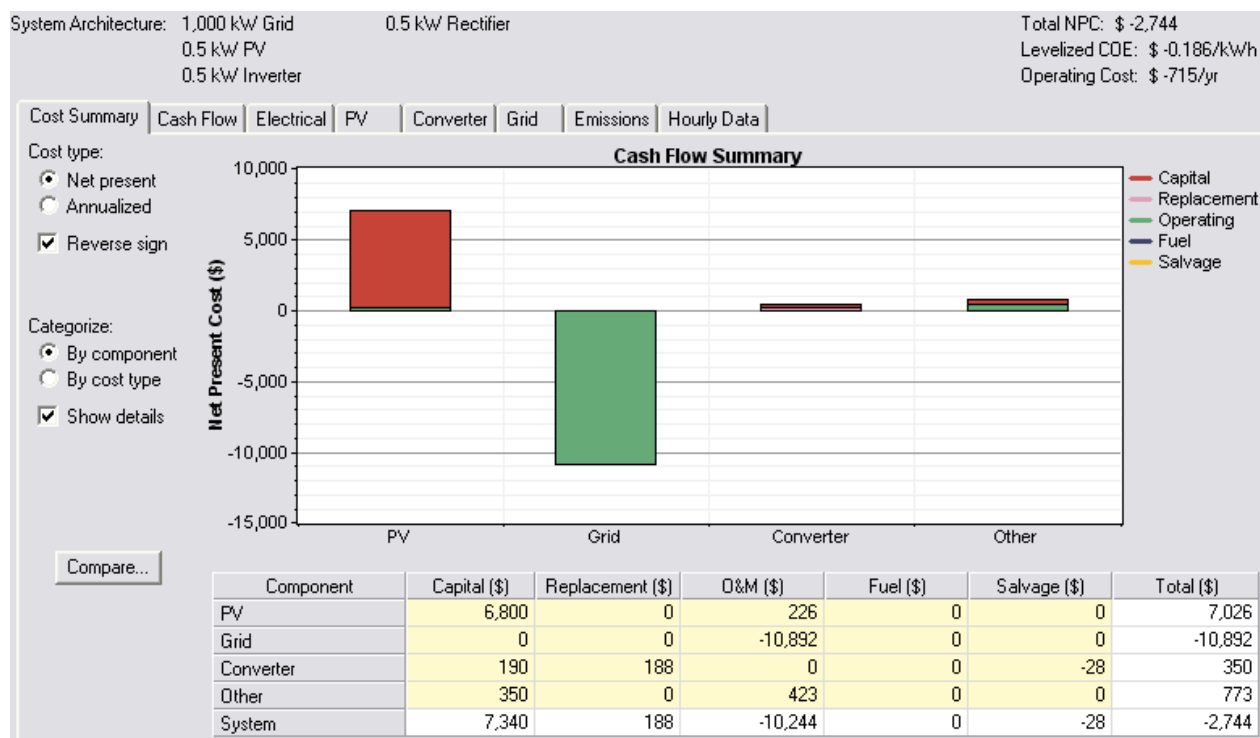
Slika 68. Prikaz podataka potrebnih za modeliranje PV sustava te investicijski, zamjenski te troškovi rada i održavanja, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Podaci koji su također nisu promijenjeni u odnosu na projekt 3, su podaci vezani za troškove projekta. Početni investicijski trošak je postavljen kao 5 % vrijednosti ukupnog projekta (350 \$). Razlog tome je složeniji i skuplji dvoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca, samim time su i troškovi instalacije takvog sustava skuplji.

U projektu smo za troškove rada i održavanja uzeli iznos od 30 \$/god. Taj iznos bi trebao pokriti troškove održavanja fotonaponskog sustava i dvoosnog sustava za

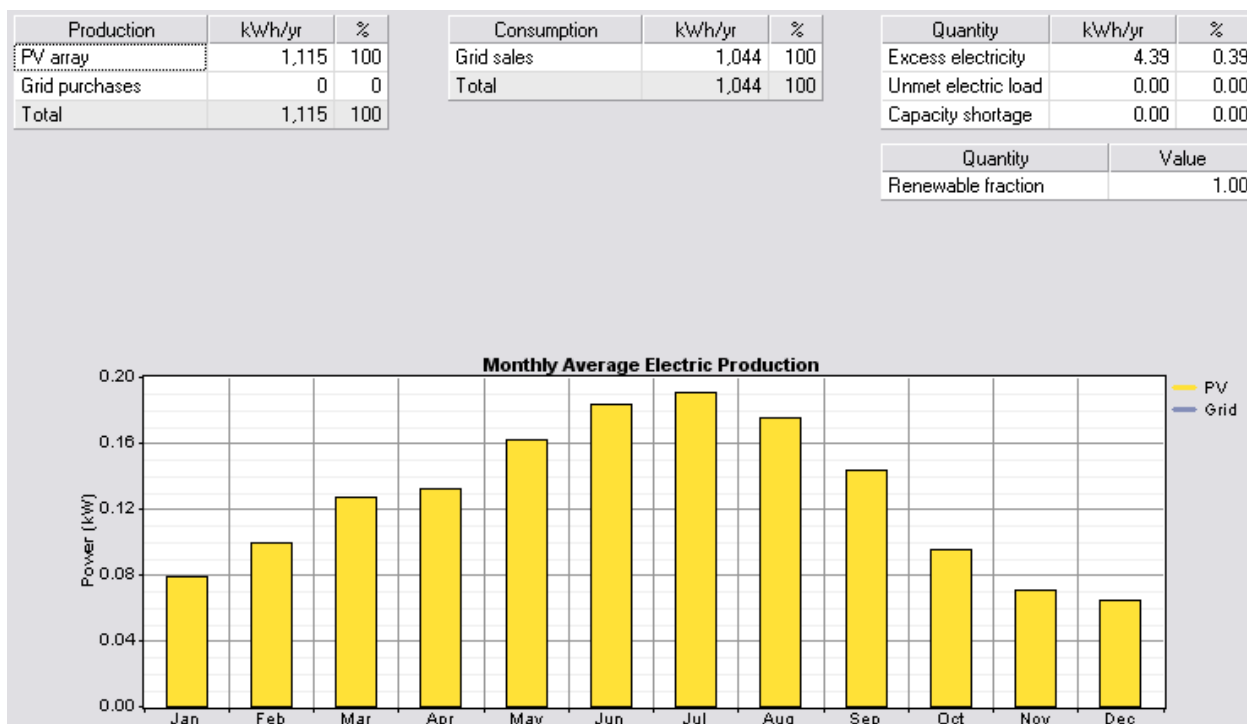
praćenje prividnog kretanja Sunca, te eventualni popravak neke od komponenti cijelog sustava.

7.9.1. Rezultati simulacije



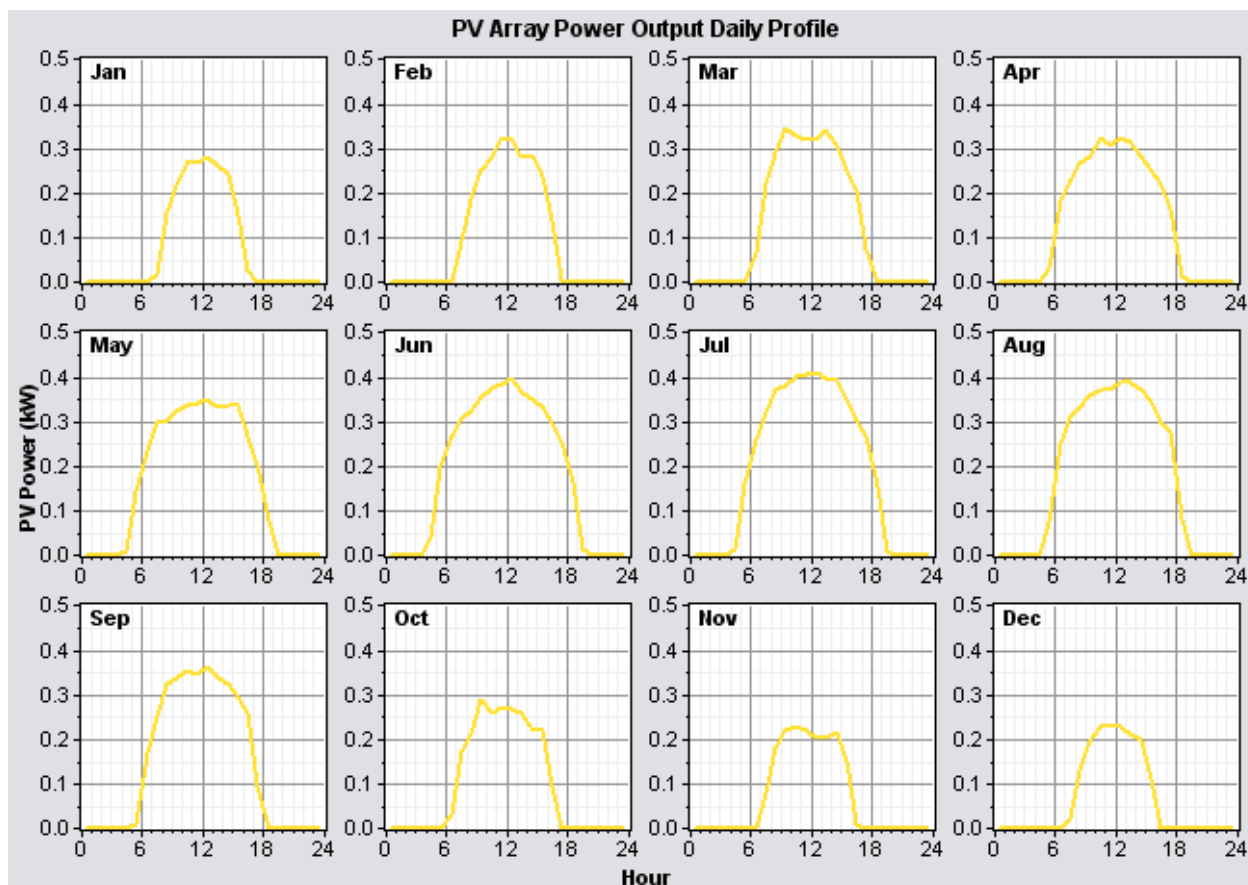
Slika 69. Prikaz troškova sustava te podaci o cijeni proizvedene energije, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Nakon što je HOMER proračunao sve moguće kombinacije sa zadanim varijablama u kategoriziranom prikazu pojavljuju se najisplativije kombinacije. Na slici 69. prikazan je modelirani sustav koji se sastoji od 0.5 kW fotonaponskog sustava i 0.5 kW pretvarača. Investicijski troškovi sustava iznose 7340 \$. Ukupni troškovi sustava izračunati za životni vijek projekta uz kamatnu stopu od 5 % iznose 8149 \$. Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku iznosi 10892 \$, kada se od tog iznosa oduzmu ukupni troškovi, dolazimo do iznosa ukupne zarade na fotonaponskom sustavu od 2744 \$. Prosječna cijena koju dobivamo za kWh proizvedene energije, umanjena za troškove fotonaponskog sustava iznosi 0.186 \$/kWh.

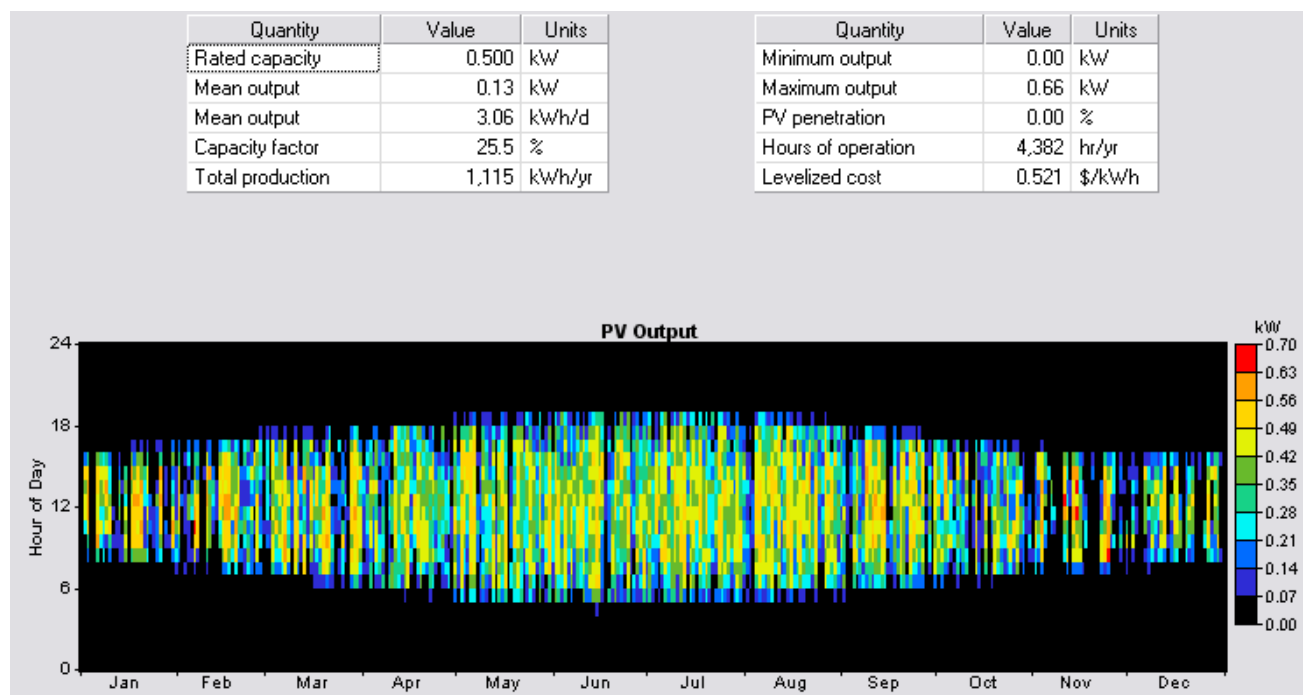


Slika 70. Podaci o proizvodnji električne energije, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

Na slici 70. prikazani su podaci o proizvodnji električne energije modeliranog sustava, odnose se na srednje godišnje vrijednosti, Na slici se vidi da je proizvodnja električne energije bitno veća nego u projektima 4 i 5, razlog tome je dvoosni sustav za praćenje prividnog kretanja Sunca. Znači proizvodnja električne energije od svibnja do kolovoza je između 115 kWh i 137 kWh, u ožujku, travnju i rujnu je iznad 86 kWh, dok je u zimskim mjesecima proizvodnja električne energije bitno smanjena, te je negdje između 50 kWh i 58 kWh. Godišnja proizvodnja električne energije je 1115 kWh/god, od čega je u mrežu predano 1044 kWh/god. Slika 71. nam pokazuje podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Slika 72. nam pokazuje kvalitativne podatke o dnevnom radu fotonaponskog sustava. Iz slike se vidi da je rad fotonaponskog sustava zadovoljavajući u većem dijelu godine, osim u zimskim mjesecima kada rad sustava ograničava globalno Sunčevo zračenje, koje je u tim mjesecima vidljivo slabije. Podatak o prosječnoj dnevnoj proizvodnji fotonaponskog sustava iznosi 3.06 kWh/dnevno.



Slika 71. Dijagram dnevnog rada fotonaponskog sustava, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]



Slika 72. Dijagram dnevnog rada i kvalitativni podaci o radu fotonaponskog sustava, [Split, PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca]

8. Sumiranje rješenja projektnih zadataka dobivenih HOMEROM

Pošto su fotonaponski sustavi modelirani za različite lokacije i za različite izvedbe samog fotonaponskog sustava nužno je, preglednosti radi, rezultate prikazati u zbirnom obliku (tablice 10 i 11).

Tablica 10. Prikaz rješenja projektnih zadataka dobivenih HOMER-om [lokacija, grad Zagreb]

	Lokacija	Fotonaponski sustav	Investicijski troškovi sustava Ukupni troškovi sustava (25 god. uz kamatu 5%)	Proizvedena električna energija Energija predana u mrežu	Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku	Iznos ukupne zarade na fotonaponskom sustavu	Prosječna cijena koju dobijemo za kWh električne energije
PR.1	Zagreb	0.5 kW PV sa fiksnim kutom	5425 \$ ili 24955 kn	702 kWh/god	6880 \$ ili 31650 kn	928 \$ ili 4270 kn	0.100 \$/kWh ili 0.46 kn/kWh
			5952 \$ ili 27380 kn	660 kWh/god			
PR.2	Zagreb	0.5 kW PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca	6150 \$ ili 28290 kn	770 kWh/god	7534 \$ ili 34660 kn	646 \$ ili 2975 kn	0.063 \$/kWh ili 0.29 kn/kWh
			6888 \$ ili 31685 kn	722 kWh/god			
PR.3	Zagreb	0.5 kW PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca	7340 \$ ili 33765 kn	940 kWh/god	9185 \$ ili 42255 kn	1037 \$ ili 4770 kn	0.084 \$/kWh ili 0.39 kn/kWh
			8149 \$ ili 37485 kn	881 kWh/god			

Tablica 11. Prikaz rješenja projektnih zadataka dobivenih HOMER-om [lokacija, grad Split]

	Lokacija	Fotonaponski sustav	Investicijski troškovi sustava Ukupni troškovi sustava (25 god. uz kamatu 5%)	Proizvedena električna energija Energija predana u mrežu	Ukupni iznos dobiven za isporučenu električnu energiju prema tarifnom pravilniku	Iznos ukupne zarade na fotonaponskom sustavu	Prosječna cijena koju dobijemo za kWh električne energije
PR.4	Split	0.5 kW PV sa fiksnim kutom	5425 \$ ili 24955 kn	825 kWh/god	8084 \$ ili 37190 kn	2133 \$ ili 9815 kn	0.195 \$/kWh ili 0.90 kn/kWh
			5952 \$ ili 27380 kn	775 kWh/god			
PR.5	Split	0.5 kW PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca	6150 \$ ili 28290 kn	897 kWh/god	8777 \$ ili 40375 kn	1889 \$ ili 8690 kn	0.159 \$/kWh ili 0.73 kn/kWh
			6888 \$ ili 31685 kn	842 kWh/god			
PR.6	Split	0.5 kW PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca	7340 \$ ili 33765 kn	1115 kWh/god	10892 \$ ili 50105 kn	2744 \$ ili 12625 kn	0.186 \$/kWh ili 0.86 kn/kWh
			8149 \$ ili 37485 kn	1044 kWh/god			

Iz rezultata se vidi da je na obje lokacije isplativa ugradnja dvoosnog sustava za praćenje prividnog kretanja Sunca, te on pridonosi većoj proizvodnji električne energije, u odnosu na fotonaponski sustav sa fiksnim kutom. Time amortizira troškove ugradnje takvog jednog sustava. Ugradnja jednoosnog sustava za praćenje prividnog kretanja Sunca nije se pokazala isplativom, na obje lokacije, i to zbog činjenice da razlika u količini proizvedene energije, u odnosu na fotonaponski sustav sa fiksnim kutom, nije dovoljna da bi nadomjestila troškove ugradnje takvog jednog sustava.

Bitno je naglasiti da su rješenja projektnih zadataka dobivena HOMER računalnim simulacijskim programom korektna za sustave na mreži kao višegodišnji prosjek i mogu poslužiti za analizu izvedivosti, ali na osnovu tih rješenja nije moguće garantirati pouzdanost fotonaponskog sustava u stvarnoj realizaciji projekta. Teško je

predvidjeti konstantnost Sunčevog zračenja, ponašanje komponenti u stvarnim uvjetima, troškove instaliranja, održavanja i zamjene komponenti, te druge stvari koje utječu na instalaciju takvog jednog fotonaponskog sustava.

Na osnovu rezultata dobivenih računalnim simulacijskim programom HOMER, možemo zaključiti sljedeće:

- sustavi poredani po isplativosti za lokaciju grada Zagreba:
 1. 0.5 kW PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (1037 \$ ili 4770 kn)
 2. 0.5 kW PV sa fiksnim kutom (928 \$ ili 4270 kn)
 3. 0.5 kW PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (646 \$ ili 2975 kn)
- sustavi poredani po količini proizvedene električne energije za lokaciju grada Zagreba:
 1. 0.5 kW PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (940 kWh/god)
 2. 0.5 kW PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (770 kWh/god)
 3. 0.5 kW PV sa fiksnim kutom (702 kWh/god)
- sustavi poredani po isplativosti za lokaciju grada Splita:
 1. 0.5 kW PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (2744 \$ ili 12625 kn)
 2. 0.5 kW PV sa fiksnim kutom (2133 \$ ili 9815 kn)
 3. 0.5 kW PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (1889 \$ ili 8690 kn)
- sustavi poredani po količini proizvedene električne energije za lokaciju grada Splita:
 1. 0.5 kW PV sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (1115 kWh/god)
 2. 0.5 kW PV sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca (897 kWh/god)
 3. 0.5 kW PV sa fiksnim kutom (825 kWh/god)

9. Zaključak

Sunčevo zračenje koje upada na plohu kolektora fotonaponskog sustava mijenja se tijekom dana, mjeseca i godine, a ovisi i o zemljopisnom položaju promatranog mjesta te lokalnim klimatskim uvjetima. Dnevne promjene upadnog zračenja prvenstveno su vezane uz promjenu upadnog kuta na plohu kolektora kao posljedica gibanja Zemlje oko Sunca. Najbolju iskorištenost Sunčeve energije omogućava sustav koji kontinuirano prati prividno gibanje Sunca tijekom dana i postavlja plohu kolektora pod kutom koji omogućuje njenu najveću ozračenost (slučaj kad Sunčeve zrake upadaju okomito na plohu). Međutim, upitna je isplativost takvog sustava. Zato je računalnim simulacijskim programom HOMER provedena energetska-ekonomska analiza različitih izvedbi fotonaponskih sustava. Uspoređeni su fotonaponski sustavi sa fiksnim kutom, sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca i sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca. Također istraživanje je provedeno i za različite lokacije, grad Zagreb i grad Split.

HOMER je računalni simulacijski program koji izvodi potreban broj simulacija na osnovi unesenih parametara te na osnovi troškova odabire najbolje rješenje. Točnost rezultata simulacije ovise o unesenim podacima, posebice sa ekonomskog aspekta. Za dani projekt, investicijski troškovi svih komponenti su realni i većinom preuzeti sa hrvatskog tržišta. Također, tehnički podaci komponenti koje su razmatrane prilikom modeliranja fotonaponskih sustava su preuzeti sa specifikacija komponenti. Dakle, stvoreni su dobri preduvjeti za kvalitetna rješenja modeliranih fotonaponskih sustava.

Rješenja dobivena HOMER-om mogu poslužiti za analizu izvedivosti. Ali na osnovi tih rješenja nije moguće garantirati pouzdanost fotonaponskih sustava u stvarnoj realizaciji projekata, zato što je teško predvidjeti konstantnost Sunčevog zračenja, te ponašanje komponenata u stvarnim uvjetima. Upravo zbog istih razloga, odnosno generalne nemogućnosti predviđanja promjenjivosti Sunčeva zračenja te ponašanja pojedinih komponenti za vrijeme rada, nema niti potrebe za nekakvom dodatnom analizom ponašanja fotonaponskih sustava "boljim" računalnim simulacijskim programom.

10. Literatura

1. Kulišić, P; Vuletin, J; Zulim, I: "Sunčane ćelije", Školska knjiga, Zagreb, (1994).
2. Matić, Zdeslav: "Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske, Priručnik za energetske korištenje Sunčevog zračenja", Energetski institut Hrvoje požar, Zagreb, (2007).
3. Kulišić, P: "Novi izvori energije, II. dio, Sunčana energija i energija vjetra", Školska knjiga, Zagreb, (1991).
4. Solar Tracker, preuzeto 21. 04. 2008. s http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tracker
5. "Solarna tehnologija, časopis za projektante, proizvođače, distributere i korisnike solarnih sustava", broj 4, 5 i 6, Hrvatska udruga za sunčevu energiju, Zagreb, (2007).
6. "Case Study of Identical Arrays: One Tracked vs One Fixed", preuzeto 21. 04. 2008. s http://www.wattsun.com/pdf/Wattsun_Tracking_Advantage.pdf
7. "Independent Comparison", preuzeto 21. 04. 2008. s http://www.wattsun.com/pdf/Tracked_fixed.pdf
8. Urli, N: "Hrvatska solarna kuća, studija izvodljivosti", Zagreb, rujan 2002.
9. Perić, M; Trontl, K; Baće, M: "Poboljšanje pristupa optimizaciji položaja fotonaponskog modula i izračuna efektivne ozračenosti plohe modula", preuzeto 21. 04. 2008. s http://www.hrbi.hr/images/files/izdavastvo_76.pdf
10. Bilić, Z: "Napajanje udaljenog stambenog objekta pomoću energije vjetra i sunčevog zračenja", Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2006.
11. Betti, T: "Optimalni kut nagiba fotonaponskog panela", Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, veljača 2001.
12. Eol meteo: "Katalog solarnih kitova", preuzeto 5. 06. 2008. s <http://www.eolmeteo.hr/solarnikitovi.pdf>
13. Omnibus d.o.o: "Cijenik solarne opreme", preuzeto 5. 06. 2008. s http://www.omnibus.hr/cjenik_solarne_opreme.htm
14. Tehničke karakteristike i cijena Trojan baterija, preuzeto 5. 06. 2008. s <http://www.trojan-battery.com>,
15. Solar Energy Technologies Program, preuzeto 5. 06. 2008. s <http://www1.eere.energy.gov/solar/index.html>,
16. PV-GIS, preuzeto 5. 06. 2008. s <http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/solradframe.php?en&europe>
17. Energetski institut Hrvoje Požar: "Obnovljivi izvori energije", preuzeto 5. 06. 2008. s http://www.eihp.hr/hrvatski/e_obnovljivi.htm
18. NASA Surface meteorology and Solar Energy HOMER Data, preuzeto 5.06.2008. s <http://www.eosweb.larc.nasa.gov>