



**UNIVERZA V
MARIBORU**



**FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO**

Smetanova 17,

2000 Maribor

DIPLOMSKA NALOGA UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

**PRIMERJAVA DELOVNIH KARAKTERISTIK
RAZLIČNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV
PRI ENAKIH POGOJIH SONČNEGA SEVANJA**

Aleš Tomažič

Mentor : prof. dr. Josip Voršič

Somentor : prof. dr. Gorazd Štumberger



Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17
2000 Maribor

Številka: E-2578

Datum in kraj: 16. 12. 2009, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 90/2008)

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

1. **Alešu Tomažiču**, študentu univerzitetnega študijskega programa **ELEKTROTEHNIKA**, smer **MOČNOSTNA ELEKTROTEHNIKA**, se dovoljuje izdelati diplomsko delo pri predmetu **Splošna energetika**.
2. **MENTOR:** red. prof. dr. Josip Voršič
SOMENTOR: red. prof. dr. Gorazd Štumberger
3. **Naslov diplomskega dela:**
PRIMERJAVA DELOVNIH KARAKTERISTIK RAZLIČNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV PRI ENAKIH POGOJIH SONČNEGA SEVANJA
4. **Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:**
WORKING CHARACTERISTICS COMPARISON OF DIFFERENT PV MODULES UNDER THE SAME CONDITIONS OF SOLAR IRRADIANCE
5. Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije do 16. 12. 2010 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.



Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv.

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju dr. Josipu Voršiču in somentorju dr. Gorazdu Štumbergerju za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomske naloge. Posebna zahvala asistentu Sebastijanu Semetu. Zahvala tudi družini in prijateljem za vzpodbudo pri delu.

PRIMERJAVA DELOVNIH KARAKTERISTIK RAZLIČNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV PRI ENAKIH POGOJIH SONČNEGA SEVANJA

Ključne besede: sončna celica, fotonapetostni sistem, sončno sevanje, standardi in predpisi

UDK: [551.521.1:621.383.51]:621.311.243(043.2)

Povzetek: Diplomsko naloga opisuje sončne celice, fotonapetostne module in na kratko opisuje tudi ostale elemente fotonapetostnega sistema. Osredotočili smo se predvsem na obnašanje fotonapetostnih modulov pri danih pogojih sončnega sevanja. Rezultat diplomske naloge je posamezna predstavitev in medsebojna primerjava karakteristik najpogosteje uporabljenih fotonapetostnih modulov v praksi. To so moduli iz polikristalnega, monokristalnega in amorfne silicija. V delu so predstavljeni tudi standardi in predpisi s področja fotonapetostnih sistemov.

WORKING CHARACTERISTICS COMPARISON OF DIFFERENT PV MODULES UNDER THE SAME CONDITIONS OF SOLAR IRRADIANCE

Key words: solar cell, photovoltaic system, solar irradiance, standards and regulations

UDK: [551.521.1:621.383.51]:621.311.243(043.2)

Abstract: Diploma thesis describes the solar cells, photovoltaic modules and also briefly describes the other elements of photovoltaic system. It focuses mainly on the behavior of photovoltaic modules in given conditions of solar irradiance. The result of diploma thesis is individual presentation and comparison of characteristics of photovoltaic modules most commonly used in practice. These are the modules of polycrystalline, monocrystalline and amorphous silicon. In this paper are also presented the standards and regulations regarding photovoltaic systems.

» Brez spremembe načina razmišljanja, ne bomo zmožni rešiti problemov, ki smo jih ustvarili s trenutnim načinom razmišljanja. «

Albert Einstein

KAZALO

1	UVOD	1
2	SONČNO SEVANJE	3
2.1	Moč in energija sončnega sevanja	8
2.2	Osnove solarne geometrije	13
2.2.1	Zenitni kot , z [°]	14
2.2.2	Kotna višina sonca, α [°]	14
2.2.3	Azimut sonca, Φ [°]	15
3	SONČNE CELICE	20
3.1	Lastnosti in osnove delovanja sončnih celic	21
3.2	Vrste sončnih celic	28
3.2.1	Monokristalne in polikristalne silicijeve sončne celice	28
3.2.2	Amorfne silicijeve sončne celice	30
3.2.3	Druge vrste sončnih celic	32
3.3	Fotonapetostni moduli in parametri, ki vplivajo na njihovo karakteristiko	35
3.3.1	Parametri, ki vplivajo na električne karakteristike fotonapetostnih modulov 37	
3.4	Kratek opis ostalih elementov fotonapetostnega sistema	41
3.4.1	Razsmernik	41
3.4.2	Regulator polnjenja	42
3.4.3	Akumulatorske baterije	42
3.5	Fotonapetostni sistemi in njihova uporaba	43
3.5.1	Prednosti in slabosti izkoriščanja sončne energije	47
4	STANDARDI IN PREDPISI V FOTOVOLTAIKI	49
4.1	Splošni standardi	49
4.2	Standardi za sončne celice in module	50
4.3	Standardi za fotonapetostne sisteme kot celoto	52
4.4	Standardi za druge elemente fotonapetostnih sistemov	53
5	EKSPERIMENTALNI SISTEM	54
5.1	Opis eksperimentalnega sistema in poteka meritev	54
5.2	Opis elementov eksperimentalnega sistema	57
6	REZULTATI MERITEV	59
6.1	Vremenske razmere ob meritvah	59
6.2	Predstavitev sončnih modulov in njihove karakteristike	61
6.3	Prikaz nekaj meritev skozi celoten dan	69
6.3.1	Meritev4 (11 h) – polovična osenčenost vseh modulov	69
6.3.2	Meritev8 (13 h) – popolna osenčenost vseh modulov	71
6.3.3	Meritev10 (14 h) – malenkostna osenčenost (dve celici) na tretjem modulu (monokristal)	73
6.3.4	Meritev12 (15 h) - $\frac{1}{4}$ osenčenosti na tretjem modulu (monokristal)	75
6.4	Primerjava karakteristik fotonapetostnih modulov	77
6.4.1	Izkoristki fotonapetostnih modulov	77
6.4.2	Primerjava moči modulov glede na ceno	80
6.4.3	Primerjava moči modulov glede na njihovo površino	82
7	SKLEP	85

VIRI IN LITERATURA

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Prikaz direktnega, difuznega in odbitega sončnega sevanja na zemeljsko površje	4
Slika 2.2: Povprečno sončno sevanje skozi leto	4
Slika 2.3: Spekter sončne svetlobe, katere le del je vidna svetloba.....	5
Slika 2.4: Difuzijsko in direktno sončno sevanje.....	6
Slika 2.5: Standardizirana spektra sončnega sevanja (AM0 – zunajzemeljski, AM 1.5 – na Zemlji).....	10
Slika 2.6: Letna porazdelitev obsevanja na različnih lokacijah: Kartum (Sudan) in Ljubljana (SLO)	10
Slika 2.7: Povprečno dnevno trajanje sončnega sevanja za določene lokacije v SLO	11
Slika 2.8: Pyranometer	12
Slika 2.9: Prikaz višine in azimuta sonca v danem trenutku.....	15
Slika 2.10: Prikaz optimalnih naklonov modulov za karakteristične datume za področje SLO	16
Slika 2.11: Vpadni kot sončnega sevanja na površino sončnega modula ob različnih letnih časih	17
Slika 2.12: Diagram sončne poti za zemljepisno širino 46°33'39" in zemljepisno dolžino 15°39'12"(Maribor) v kartezični obliki za obdobje od junijskega do decembrskega solsticija(Diagram SunPathChart, Solar Radiation Monitoring Laboratory, University of Oregon)	18
Slika 2.13: Diagram sončne poti za zemljepisno širino 46°33'39" in zemljepisno dolžino 15°39'12"(Maribor)v kartezični obliki za dan meritev 12/11/2009(Diagram SunPathChart, Solar Radiation Monitoring Laboratory, University of Oregon)	18
Slika 3.1: Prostorski naboj v diodi	23
Slika 3.2: Delovanje sončne celice pri osvetlitvi	24
Slika 3.3: Model idealne sončne celice	25
Slika 3.4: Realni model sončne celice z upoštevanjem serijske upornosti R_s (predvsem upornost kontaktov) in paralelne upornosti R_p (upornost zaradi neidealne diode), katerih posledica sta padec napetosti realne sončne celice in parazitni toki.....	26
Slika 3.5: U-I karakteristika sončne celice s točko največje moči MPP (maximum power point)	27
Slika 3.6: Primer monokristalne (levo) in polikristalne sončne celice (desno)	30
Slika 3.7: Primer amorfne sončne celice.....	31
Slika 3.8: U-I karakteristike pri različnih jakostih sončnega sevanja.....	36
Slika 3.9: Karakteristike moči pri različnih jakostih sončnega sevanja.....	37
Slika 3.10: U-I karakteristika pri sevanju 1000W/m ² za različno število sončnih celic	38
Slika 3.11: U-I karakteristika dveh modulov z enakim številom celic in različno površino	39
Slika 3.12: U-I karakteristiki kristalnih in amorfni modulov	39
Slika 3.13: Vpliv sončnega sevanja na U-I karakteristiko	40
Slika 3.14: Vpliv temperature modula na U-I karakteristiko pri sevanju 1000W/m ²	41
Slika 3.15: Dosežene in planirane kumulativne instalirane kapacitete sončnih elektrarn do leta 2010.....	46
Slika 5.1: Shematski prikaz eksperimentalnega sistema za en modul	54
Slika 5.2: Program za zajemanje podatkov (simulink), za napetosti (zgoraj) in toke (spodaj) sončnih modulov	56
Slika 5.3: Uporabniški vmesnik za komunikacijo med uporabnikom in krmilnim sistemom dSPACE v programu ControlDesk	57

Slika 6.1: Potek sončnega sevanja skozi meritev.....	59
Slika 6.2: Podatki ARSO za dan meritev(12/11/2009), za področje Maribora	60
Slika 6.3: Postavitev modulov na terasi Tehniške fakultete v Mariboru	62
Slika 6.4: $U-I$ karakteristika za modul1(polikristalni)	63
Slika 6.5: Karakteristika moči za modul1 (polikristalni).....	64
Slika 6.6: $U-I$ karakteristika za modul2(amorfni).....	66
Slika 6.7: karakteristika moči za modul2 (amorfni)	66
Slika 6.8: $U-I$ karakteristika za modul3 (monokristalni)	68
Slika 6.9: Karakteristika moči za modul3 (monokristalni).....	68
Slika 6.10: Meritev 4 (11h).....	69
Slika 6.11: $U-I$ karakteristika za meritev4 (11h)	70
Slika 6.12: karakteristika moči za meritev4 (11h).....	71
Slika 6.13: Meritev 8 (13h).....	71
Slika 6.14: $U-I$ karakteristika za meritev8 (13h)	72
Slika 6.15: Karakteristika moči za meritev8 (13h)	72
Slika 6.16: Meritev 10 (14h).....	73
Slika 6.17: $U-I$ karakteristika za meritev10 (14h)	74
Slika 6.18: Karakteristika moči za meritev10 (14h).....	74
Slika 6.19: Meritev 12 (15h).....	75
Slika 6.20: $U-I$ karakteristika za meritev12 (15h)	76
Slika 6.21: Karakteristika moči za meritev12 (15h)	76
Slika 6.22 : Izkoristki posameznih modulov (aproksimativno).....	78
Slika 6.23 : Izkoristki posameznih modulov v odvisnosti od sončnega sevanja	78
Slika 6.24 : Izkoristki posameznih modulov skozi celotno meritev	79
Slika 6.25 : Primerjava izmerjene moči posameznih modulov napram ceni(aproksimativno)	81
Slika 6.26 : Primerjava izmerjene moči posameznih modulov napram ceni.....	81
Slika 6.27 : Primerjava izmerjene moči modulov glede na njihovo površino (aproksimativno).....	83
Slika 6.28 : Primerjava izmerjene moči modulov glede na njihovo površino.....	83

KAZALO TABEL

Tabela 1: Gostota moči sončnega sevanja pri različnih vremenskih razmerah	7
Tabela 2: Vrednosti faktorja zračne mase pri različnih višinah sonca nad obzorjem.....	9
Tabela 3: Potencial sončnega obsevanja (Maribor)	19
Tabela 4: Lastnosti različnih vrst sončnih celic	33
Tabela 5: Temperature okolice in modulov med meritvami.....	61
Tabela 6: MODUL 1 ; EvergreenSolar ES - 170 – RL.....	62
Tabela 7: MODUL 2 ; SCHOTT solar ASI 81	65
Tabela 8: MODUL 3 ; Energetica WS 105 M	67

Seznam uporabljenih simbolov :

AM – faktor zračne mase

P_{sev} [W] – moč sončnega sevanja

K_p [$\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$] – konstanta pyranometra

δ [°] – deklinacija

h [°] - urni kot

z [°] – zenitni kot

L [°] – zemeljska širina

l [°] – zemeljska dolžina

α [°] – kotna višina sonca

Φ [°] – azimut sonca

β [°] – naklon ploskve

ψ [°] – azimut ploskve

i [°] – vpadni kot

E [Ws] - energija fotona

h [$6,626 \cdot 10^{-34}$ Ws] - Planckova konstanta

ν [Hz] - frekvenca

c [m/s] - svetlobna hitrost

λ [nm] – valovna dolžina

K_{max} [Ws] - maksimalna kinetična energija fotoelektrona

Φ [Ws] - izstopno delo

I_{ph} [A] - fototok

I_s [A] - reverzni tok nasičenja diode

U [V] - napetost diode

U_t [V] - termična napetost

m - faktor diod

k [$1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K] - Boltzmanova konstanta

T [K] - temperatura

q [$1,6 \cdot 10^{-19}$ As] - naboj elektrona

I_{mpp} [A] - tok v točki MPP

U_{mpp} [V] - napetost v točki MPP

I_{sc} [A] - tok kratkega stika

U_{oc} [V] - napetost odprtih sponk

G [W/m^2] - sončno sevanje

H [Wh/m^2] - sončno obsevanje

T_a [°C] - temperatura okolice

T_{cell} [°C] - temperatura sončne celice

Seznam uporabljenih kratic :

PV - Photovoltaic (Fotovoltaika, fotonapetostni sistemi)
OVE - Obnovljivi viri energije
A.U - 1.A.E. (Ena astronomska enota~150 10⁶ km)
AM - Air mass (Faktor zračne mase)
STC - Standard test conditions (Standardni testni pogoji)
ECT – equivalent cell temperature (Ekvivalentna temperatura celice)
MPP - Maximum power point (Točka maksimalne moči)
FF - Fill factor (faktor polnjenja)
OC – open circuit (odprte sponke)
SC – short circuit (kratki stik)
EFG – metoda izdelovanja sončnih celic
CIS - Bakrov indijev selenid
GaAs - Galijev arzenid
CdTe - Kadmijev telurid
CuInSe₂ – Baker indijev diselenid
Apex – vrsta polikristalnih sončnih celic
IEC - International electrotechnical commision (Mednarodna elektrotehniška komisija)
TC - Technical committee (Tehnični komite)
ISO - International organization for standardization (Mednarodna organizacija za standardizacijo)
SIST - Slovenski inštitut za standardizacijo
IEEE - Institute of electrical and electronics engineers (Združenje elektro inženirjev)
DC/AC – direct current/alternative current (Enosmerno/izmenično)

1 UVOD

Sonce je glavni vir energije na zemlji, saj med drugim omogoča tudi fotosintezo. Sončna energija je prav gotovo energija prihodnosti. Naš planet jo prejema že pet milijard let in nič ne kaže da bi le-ta usahnila. Vsak dan zemlja od Sonca prejme več energije kot je celotno človeštvo porabi v celem letu. Letna količina sončne energije ki pade na Zemljo osem tisočkrat presega letne svetovne potrebe po primarni energiji. Glavna prednost sončne energije je da je gorivo zastonj, njegov vir pa neizčrpen. Problem je, da še vedno velika večina te energije ostaja nezajeta.

Letna količina sončne energije je z le manjšimi regionalnimi odstopanji na razpolago povsod po svetu v več kot zadostnih količinah. Fotovoltaika (PV – »Photovoltaics«); to je neposredna pretvorba sončne energije v električno že dokazuje, še bolj pa obeta, da bo k oskrbi z električno energijo pomembno pripomogla in pri tem ne bo obremenjevala okolja. Beseda fotovoltaika izvira iz grške besede "phos", ki pomeni svetlobo, in besede "volt". Preprosteje povedano, gre za pretvorbo svetlobe v elektriko. Pri tem sodelujeta tako direktno, kot tudi difuzno sončno sevanje. Pretvorba se izvrši v sončnih celicah. V večini primerov so izdelane iz silicija. Z združevanjem več sončnih celic dobimo fotonapetostne module. Z združevanjem več modulov in z uporabo drugih elementov kot so akumulatorji, regulatorji polnjenja in razsmerniki, lahko zgradimo poljubno močan sistem za oskrbo z električno energijo na katerikoli lokaciji, če je le na razpolago dovolj sončnega sevanja. Modularna zasnova fotonapetostnih (PV) generatorjev omogoča izdelovanje sistemov za oskrbo z električno energijo zelo različnih velikosti, od samo nekaj tisočink watta (npr. zapestne ure), do sistemov z močjo nekaj kWp za oddaljene porabnike (kot so na primer gorske kočje) in celo do omrežnih fotonapetostnih sistemov z močjo nekaj MWp. Fotonapetostni sistemi se v nekaterih pogledih razlikujejo od konvencionalnih energetskega sistemov. Na delovanje fotonapetostnih sistemov večinoma vplivajo lokalne klimatske razmere in navade uporabnikov. Njihovo dobro poznavanje pa je zelo pomembno pri načrtovanju, dimenzioniranju, namestitvi in vzdrževanju fotonapetostnih sistemov.

Pretvorba energije se zgodi ob vpadu sončnega sevanja na sprejemnik. Rastline s pomočjo fotosinteze pretvarjajo sončno energijo v kemično (biomasa), sončni zbiralniki v toploto, sončne celice pa pretvarjajo sončno energijo neposredno v električno energijo. Za praktično izrabo sončne energije je pomembno poznavanje količine in tip vpadnega sevanja na zemeljsko površino.

Danes je čedalje močnejša potreba po izrabi OVE (obnovljivih virov energije). Le-ti v nasprotju s fosilnimi gorivi ne povzročajo izpustov toplogrednih plinov v ozračje in so ekološko sprejemljivejši. Dejstvo pa je tudi, da so zaloge fosilnih goriv omejene in bo treba energijo v prihodnosti iskati drugje. Povečanje izrabe obnovljivih virov energije je ena pomembnejših strateških opredelitev EU, ki bo pripomogla k zmanjšanju škodljivih vplivov na okolje (predvsem emisij CO₂, kot glavnega toplogrednega plina, ki povzroča nezaželene in problematične klimatske razmere).

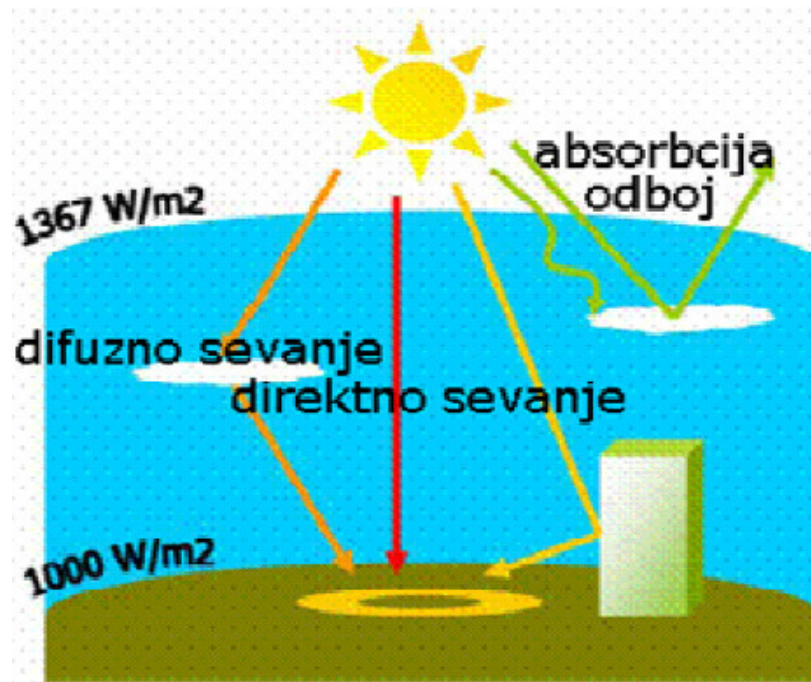
Pridobivanje električne energije s pomočjo sončne svetlobe postaja iz leta v leto cenejše in dostopnejše, saj se ta tehnologija čedalje bolj izpopolnjuje in postaja učinkovitejša ter s tem bolj zanimiva za vlagatelje. Sončna energija je nujno potrebna za skoraj vse procese ki potekajo v naravi. To je trajna in brezplačna oblika čiste energije, ki je dostopna skoraj povsod na Zemlji. Največja mogoča izraba sončne energije je nujen korak k zagotovitvi trajne oskrbe človeštva z energijo.

Vir .:[1]

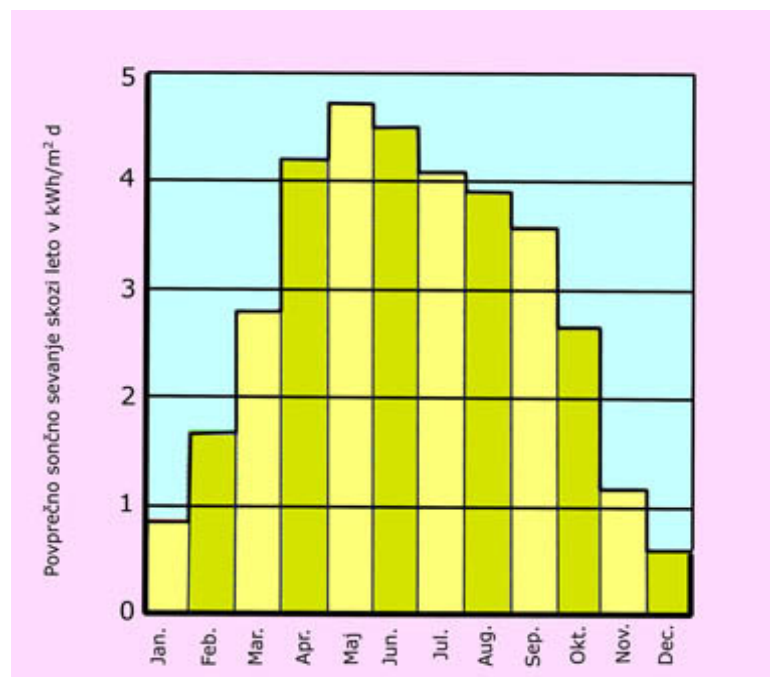
2 SONČNO SEVANJE

Ena od najpomembnejših dolgoročnih nalog človeštva je zagotavljanje energijskih potreb. Zato je izkoriščanje sončne energije ena od najpomembnejših strategij za prihodnost. Sevanje je način prenosa energije med dvema lokacijama preko elektromagnetnega valovanja. Vsako telo, ki ima temperaturo nad absolutno ničlo, seva. Sonce nenehno oddaja ogromne količine energije in le del doseže tudi naš planet. Srednja oddaljenost Zemlje od Sonca predstavlja eno astronomsko enoto (1 A.E.) in znaša približno 150 milijonov kilometrov. Sonce zajema več kot 99% celotne mase našega sončnega sistema in z energijo ki jo seva, omogoča življenje na Zemlji. Del sončne svetlobe se absorbira v zemeljsko atmosfero, del pa se odbije nazaj v vesolje. Sonce konstantno seva z gostoto moči 63 MW/m^2 . Od te količine pa je povprečna vrednost gostote moči sončnega sevanja na vrhu atmosfere, približno 1367 W/m^2 . Ta vrednost je tako imenovana solarna konstanta, katere vrednost z leti niha. Intenzivnost sončnega sevanja se vsekakor zmanjšuje znotraj atmosfere zaradi različnih dejavnikov kot je koncentracija vlage, prisotnost ozona, ogljikovega dioksida in onesnaženosti zraka. Velja, da se na poti skozi atmosfero izgubi približno 30% sončnega sevanja. Zemljino površje doseže torej okoli 1000 W/m^2 (**glej sliko 2.1**). Za naš geografski položaj (Slovenija) velja da se intenziteta sončnega sevanja dviguje do meseca maj/junij in nato do zime ponovno počasi upada (**slika 2.2**).

Vir . [20]

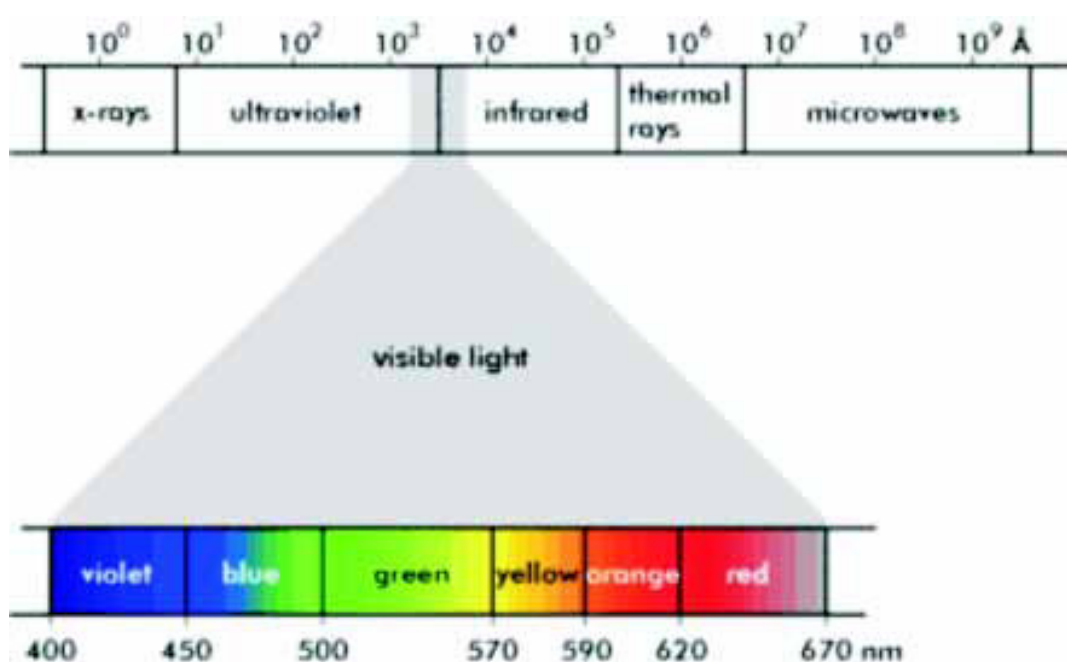


Slika 2.1: Prikaz direktnega, difuznega in odbitega sončnega sevanja na zemeljsko površje



Slika 2.2: Povprečno sončno sevanje skozi leto

Sončno sevanje je elektromagnetno valovanje, ki ga oddaja Sonce v širokem sevalnem spektru. Največji del energije sončnega sevanja je v pasu vidnega (400-750 nm; 40%) in infrardečega spektra (750-24000nm; 51%). Približno 9% celotne energije prispeva ultravijolični del spektra (200-400nm), preostalega sevanja pa je manj kot 1% celotne energije. Posamezne tehnologije pretvorbe sončnega sevanja lahko uspešno pretvarjajo le del tega vpadnega spektra. Npr. pri fotovoltaiiki je uporaben le spekter med 400nm in 1100nm (velja za Silicij).

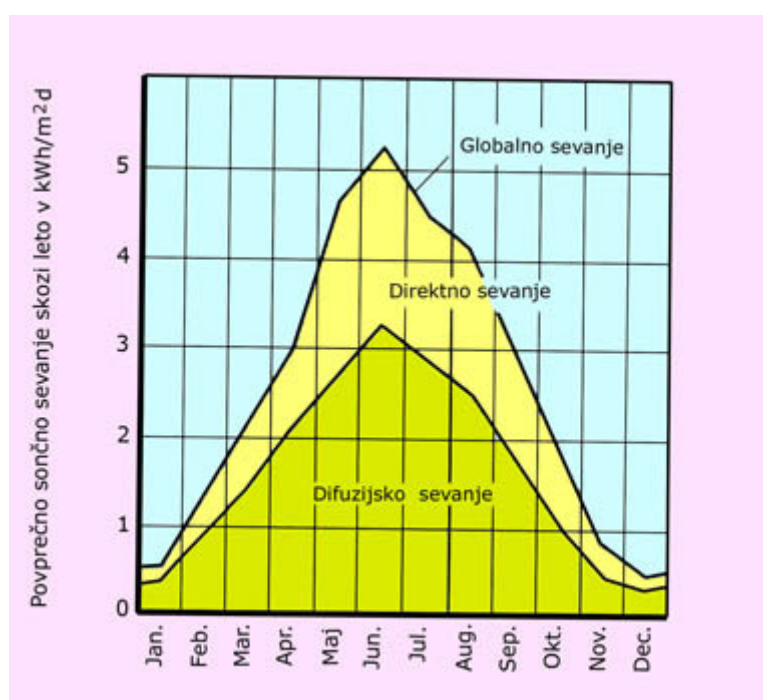


Slika 2.3: Spekter sončne svetlobe, katere le del je vidna svetloba

Za razumevanje pretvorbe sončne energije opisujemo sevanje s pretokom fotonov kot nedeljivih kvantnih delcev brez mase, a z gibalno količino in točno določeno energijo. Sončno sevanje je sestavljeno iz množice fotonov različnih energij. Porazdelitev fotonov glede na njihovo energijo (oziroma valovno dolžino) imenujemo sončni spekter, ki daje spektralno gostoto sevanja (**slika 2.3**). Človeško oko zaznava le del sončnega spektra kot vidno sevanje oziroma kot tako imenovano svetlobo.

Sončno sevanje ki doseže zemeljsko površje, imenujemo »globalno sevanje«. Globalno sevanje je vsota direktnega, difuznega in odbitega sončnega sevanja. Nanj vplivajo naslednji dejavniki :

- astronomski : pot zemlje okoli sonca, sončna aktivnost
- meteorološki : oblačnost, vlažnost zraka in prepustnost ozračja
- reliefni : nadmorska višina, oblika reliefa



Slika 2.4: Difuzijsko in direktno sončno sevanje

Globalno sevanje se določa skupaj iz usmerjenega direktnega in neusmerjenega difuzijskega sevanja (**glej sliko 2.4**), pri čemer se znotraj obeh krepijo plini, prah in drobčki vodne pare, ki bistveno odbijajo sevanje. Difuzijsko sevanje prispeva precej manj energije k skupnemu sončnemu sevanju kot direktno. To pa velja predvsem za jasne in sončne dni. Pri oblačnem dnevu in v primeru da so fotonapetostni moduli osenčeni, pa se delež difuznega sevanja močno poveča. Difuzno sevanje dobimo s sipanjem direktnega in odbitega sevanja na molekulah, aerosolih in kristalčkih v zraku. (**glej tabelo 1**).

Tabela 1: Gostota moči sončnega sevanja pri različnih vremenskih razmerah

vreme	jasno	meglono/oblačno (sonce slabo vidno)	oblačno (sonce ni vidno)
celotno sevanje [W/m ²]	600–1.000	200–400	50–150
difuzni delež [%]	10–20	20-80	80-100

Kot je bilo že omenjeno oblačnost vpliva na količino sončne energije na zemeljskem površju. Kadar med Sonce in našo opazovano točko pridejo oblaki, se velikost in tudi delež direktnega sevanja bistveno zmanjša v primerjavi z difuznim, ki nastane zaradi sipanja svetlobe v oblakih. Ravno difuzno sevanje igra pomembno vlogo pri uporabi sončne energije v osrednji Evropi. Delež difuznega sevanja v osrednji Evropi je med 40-odstotki junija in 80-odstotki decembra. Na področju Slovenije sonce sije od 1600 do 2650 ur letno. Tako vpade na 1 m² med 1000 in 1400 kWh sončne energije letno. Večina te energije je na razpolago med aprilom in oktobrom, le približno od 200 do 250 kWh pa je na voljo v zimskem času. Povprečno letno obsevanje v Sloveniji znaša 1070 kWh/m². Količina pretvorjene energije ni odvisna samo od lastnosti sončnega sevanja, temveč tudi s tehnično rešitvijo sistema ki pretvarja sončno energijo.

Vir . [1,21]

Tudi kadar je nebo jasno, se maksimalna gostota moči sevanja čez dan spreminja. Največ sevanja prispe opoldne, najmanj pa zgodaj zjutraj in pozno popoldne, ker ima sevanje daljšo pot skozi atmosfero (več absorpcije na poti) in je zato močnejše dušeno kot opoldne. Količina vpadne sončne energije na zemeljsko površino se bistveno spreminja zaradi spremenljivih atmosferskih pogojev (sončno, oblačno, megleno) in seveda od položaja Sonca tako preko dneva, kot tudi preko celotnega leta (letni časi). Severna polobla pozimi sprejema manj energije kot poleti. Oblaki so prevladujoč atmosferski faktor, ki omejujejo količino vpadnega sončnega sevanja na zemeljskem površju. Posledično področja s povprečno več oblačnosti (kotline, nižine ...) prejmejo manj sončne energije od področij, kjer je oblačnost dosti manjša (npr. puščave in suha področja).

2.1 Moč in energija sončnega sevanja

Gostoto moči sevanja označujemo z G in merimo v vatih na kvadratni meter [W/m^2]. **Sončno sevanje** je torej gostota moči na enoto površine. Razlikujemo direktno, difuzno in odbito komponento sončnega sevanja. Vsoto vseh treh delnih prispevkov sevanja pa imenujemo globalno sončno sevanje. Pri pretvorbi sončne energije v električno so seveda najbolj pomembni prispevki direktnega sevanja, v manjšem obsegu pa tudi prispevki difuznega in odbitega sevanja (predvsem pri oblačnem vremenu).

Energijo sevanja, to je integrirano moč preko določene časovne periode, imenujemo **sončno obsevanje** in jo označujemo s H . V tehniški praksi jo podajamo v kilovatnih urah na kvadratni meter [kWh/m^2]. Osnovna enota za sončno obsevanje je J/m^2 .

$$1\text{MJ} = 277,78 \text{ kWh} \quad \text{oziroma} \quad 1\text{kWh} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ MJ}$$

Tudi pri sončnem obsevanju ločimo direktno, difuzno in odbito komponento obsevanja. Glede na časovni interval ponavadi podajamo povprečne vrednosti. Glede na lego ploskev ločimo sončno obsevanje na vodoravne ploskve in sončno obsevanje na poljubno usmerjene ploskve. Največ energije sončnega obsevanja zemlja prejme med 9. uro dopoldan in 16. uro popoldan in seveda je le-to najmočnejše v poletnih mesecih in najšibkejše v zimskih mesecih. To je seveda treba pri načrtovanju sistema in pri montaži polja modulov kolikor je mogoče upoštevati. Osnovo za izračun oziroma ovrednotenje potenciala sončnega sevanja na dano ploskev (fotonapetostni modul), predstavlja globalno sončno obsevanje na vodoravno ploskev. Moduli bi seveda morali biti nameščeni tako, da bi bili v danem časovnem intervalu kar najmanj osenčeni oz. da bi imeli čim več tako imenovanih sončnih ur (število ur na dan, v katerih bi morala gostota moči sončnega sevanja znašati $1000\text{W}/\text{m}^2$). Povprečno število vršnih sončnih ur za Slovenijo je 3 do 3,5. Tega parametra ne smemo zamenjati s številom ur sončnega sevanja, ki pove, koliko ur na dan sonce dejansko sije.

Vir : [1]

Za praktično izrabo sončne energije je pomembno poznavanje količine in tipa vpadnega sevanja na zemeljsko površino (AM zračna masa). Jakost sončnega sevanja se stalno spreminja glede na čas dneva, vremenske razmere in letni čas.

Pojem zračna masa, opisuje slabljenje sončnega sevanja pri poti skozi atmosfero. Faktor zračne mase nam podaja dolžino poti žarka direktnega sončnega sevanja skozi ozračje, izraženo kot večkratnik poti do točke na nadmorski višini 0m, ko bi bilo sonce v zenitu (faktor zračne mase AM je zato vedno večji od 1, saj sonce pri nas dejansko nikoli ni v zenitu). V zenitno lego pride sonce samo v bližini ekvatorja do $\pm 23^\circ$ zemljepisne širine. Vrednost faktorja zračne mase AM=1, pomeni da je sonce navpično nad opazovališčem (zenit) in da sončni žarki do zemlje prepotujejo pot, ki ustreza enkratni debelini atmosfere. Povezavo med faktorjem zračne mase in kotno višino sonca podaja izraz 2.1 :

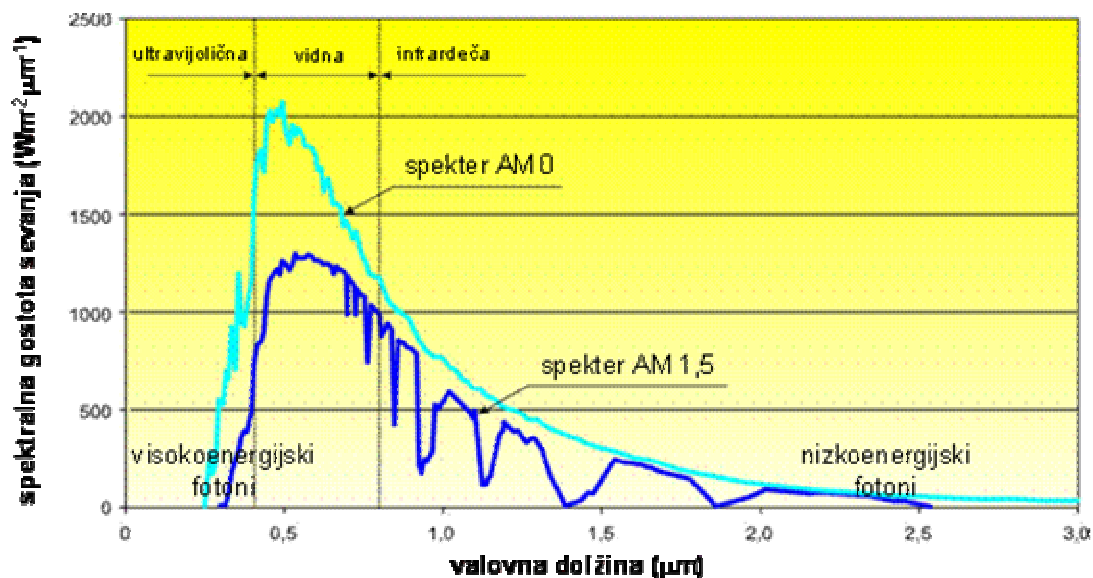
$$AM = \frac{1}{\sin \alpha} \quad (2.1)$$

α [°] – kotna višina sonca

Z nižanjem višine sonca na obzorju se faktor zračne mase AM večja, dolžina poti sončnega sevanja čez atmosfero se daljša, gostota moči sončnega sevanja na zemlji pa je vedno manjša. Zelo pomemben podatek je vrednost AM = 1,5 (STC), saj pri tej vrednosti faktorja zračne mase proizvajalci podajajo električne parametre modulov. Takrat je sonce $41,8^\circ$ nad obzorjem. (glej tabelo 2).

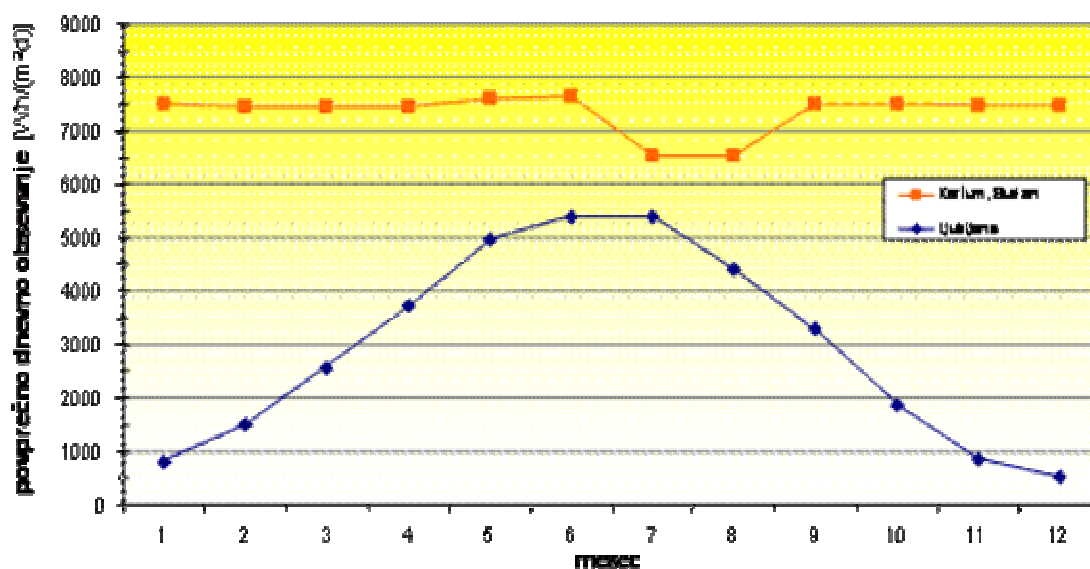
Tabela 2: Vrednosti faktorja zračne mase pri različnih višinah sonca nad obzorjem

AM	1	1,5	2
α	90°	$41,8^\circ$	30°



Slika 2.5: Standardizirana spektra sončnega sevanja (AM0 – zunajzemeljski, AM 1,5 – na Zemlji)

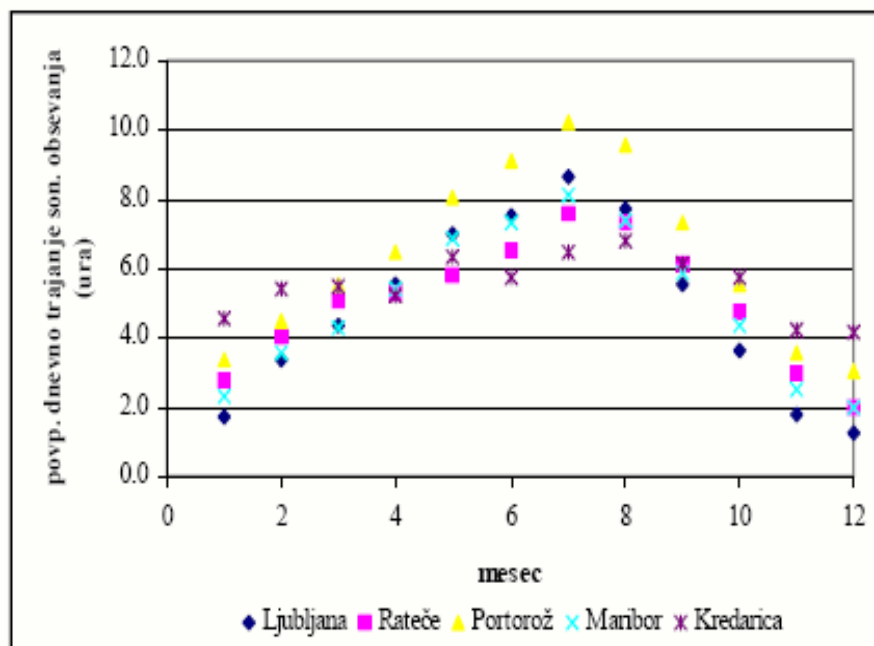
Spektralna gostota povprečnega zunajzemeljskega sevanja je prikazana na **sliki 2.5** kot spekter AM0. Odboj, sipanje in absorpcija v atmosferi zmanjšajo to vrednost za približno 30 odstotkov, tako da ob jasnem vremenu in zenitni legi sonca (AM1) vpada na zemeljsko površino okrog tisoč vatov na kvadratni meter ($1367W/m^2 \rightarrow 1000W/m^2$).



Slika 2.6: Letna porazdelitev obsevanja na različnih lokacijah: Kartum (Sudan) in Ljubljana (SLO)

Jakost sončnega sevanja se seveda spreminja tudi glede na geografski položaj. Jasno je, da so klimatski pogoji za izrabo sončne energije precej bolj ugodni recimo v krajih ob ekvatorju. Tam je mesečno obsevanje tudi mnogo bolj enakomerno, kot prikazuje **slika 2.6**.

Vir : [10,19]



Slika 2.7: Povprečno dnevno trajanje sončnega sevanja za določene lokacije v SLO

Tudi pri nas v Sloveniji so najboljše razmere, povprečno gledano skozi vse leto, na primorskem koncu. Na **sliki 2.7** so prikazane vrednosti za povprečno trajanje sončnega obsevanja za nekaj lokacij v Sloveniji.

Glede na to kateri del sončne energije bi radi merili, poznamo več merilnih instrumentov. Eden teh merilnikov s katerimi merimo jakost sončnega sevanja, je tudi pyranometer (**slika 2.8**). Z njim merimo celotno sončno sevanje na zemeljski površini. To je vsota direktnega in difuznega dela svetlobe. S pyranometrom lahko merimo tudi le difuzni del svetlobe in sicer tako, da senčimo pyranometer. S tem preprečimo da bi direktna svetloba padla na njegov senzor, merimo pa le difuzno. Direktno komponento sončnega sevanja je možno določiti tudi z dvema pyranometroma. Z enim merimo celotno sončno sevanje, drugi pa je senčen in z njim merimo le difuzni del. Direktni del sončnega sevanja je podan kot razlika med celotnim in difuznim sevanjem.



Slika 2.8: Pyranometer

Pri Pyranometru sončno sevanje prehaja skozi dve stekleni hemisferi in je absorbirano v črnem nanosu na sredini obeh hemisfer. Ti stekleni hemisferi prepuščata sevanje valovnih dolžin med 300nm in 2500nm, za preostali spekter pa sta neprosojni. Toplejša točka termočlena, ki je uporabljena kot detektor, je termično spojena s črnim nanosom. Hladnejša točka pa je termično spojena z ohišjem instrumenta. Termočlen je v resnici sestavljen iz niza več (~40) posameznih termočlenov, ki so vezani zaporedno. S takšno vezavo več termočlenov dobimo večjo napetost na izhodu merilnika. Kadar je instrument neosvetljen, se temperatura črnega nanosa ne spremeni glede na temperaturo ohišja. Takrat sta zato temperaturi vročega in hladnega spoja termočlena enaki in napetost na izhodu termočlena je ničelna. Kadar pa sončno sevanje segreje črn nanos na vročem spoju termočlena, hladen spoj pa ostane nespremenjen zaradi njegove bele barve, nastane na termočlenu temperaturna razlika, zaradi katere dobimo na izhodu napetost. Ta napetost je nato s strani proizvajalca kalibrirana (dobimo konstanto pyranometra) in nam direktno pomeni velikost sončnega sevanja.

Vir : [7]

Za izračun moči sončnega sevanja iz dobljene napetosti uporabimo izraz (2.2).

$$P_{sev} = \frac{U}{K_p} \quad (2.2)$$

U [V] – napetost na izhodu pyranometra

K_p [$\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$] – konstanta pyranometra

2.2 Osnove solarne geometrije

Osnovni geometrijski koti ki opisujejo položaj točke na zemlji glede na položaj Sonca, so zemljepisna širina, zemljepisna dolžina, deklinacija in urni kot. Iz njih izpeljemo zenitni kot, višina sonca in azimut sonca. Vpadno sončno sevanje pa opišemo še s tremi dodatnimi spremenljivkami. To so : naklon ploskve, azimut ploskve in vpadni kot.

Deklinacija, δ [°] – kot med zveznico središč zemlje in sonca ter ekvatorialno ravnino zemlje. Za določen dan v letu jo izračunamo z izrazom (2.3) :

$$\delta = 23,45 \sin [360(284 + n)/365] \quad (2.3)$$

n – zaporedni dan v letu

Deklinacijo izražamo v stopinjah in se med letom spreminja. Pozitivna je v primeru, da je ekvatorialna ravnina zemlje na strani ki gleda proti soncu, nagnjena proti južnemu polu (poletni solsticij). Negativna je pozimi, ko je ekvatorialna ravnina zemlje ki gleda proti soncu, nagnjena proti severnemu zemeljskemu polu. Ob pomladnem in jesenskem enakonočju je deklinacija 0°.

Urn timer, h [°] – urni kot točke na površini zemlje je kot, za katerega bi se le-ta morala zavrteti, da bi zveznica središča Zemlje in Sonca ležala na ravnini ki poteka skozi poldnevnik, na katerem leži dana točka in skozi središče zemlje. Ob sončnem poldnevu ima za določeno lokacijo vrednost nič, vsako uro pa se spremeni za 15°. Koti so po dogovoru pozitivni za popoldanske čase in negativni za dopoldanske čase.

$$h = \pm 15^\circ \text{ (število ur od/do sončnega poldneva)}$$

2.2.1 Zenitni kot, z [°]

Zenitni kot je kot med sončnimi žarki in navpičnico na vodoravno ploskev. Izražamo ga v stopinjah in je enak vpadnemu kotu (direktnega) sončnega sevanja na vodoravno ploskev.

Določimo ga z izrazom (2.4) :

$$z = \arccos(\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h) \quad (2.4)$$

L [°] – zemljepisna širina

δ [°] – deklinacija

h [°] - urni kot

2.2.2 Kotna višina sonca, α [°]

Položaj sonca opišemo s kotno višino sonca in azimutom (**slika 2.9**). Kotna višina sonca je kot med žarkom direktnega sončnega sevanja in med vodoravnico. Izračunamo jo z izrazom (2.5) :

$$\alpha = \arcsin(\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h) \quad (2.5)$$

L [°] – zemljepisna širina

δ [°] – deklinacija

h [°] – urni kot

Med zenitnim kotom in višino sonca velja naslednja povezava :

$$z + \alpha = 90^\circ$$

2.2.3 Azimut sonca, Φ [°]

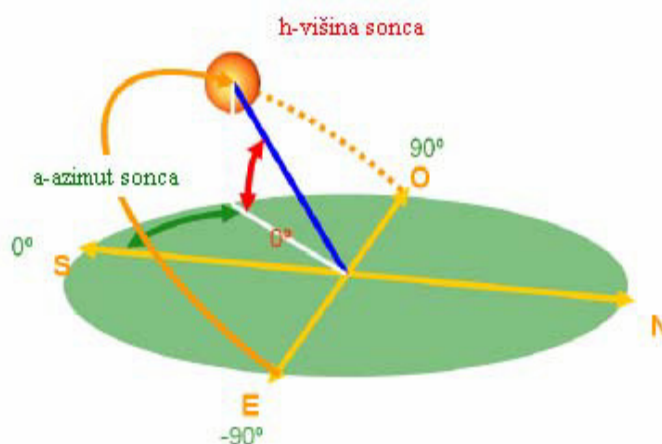
Azimut sonca je kot med projekcijo sončnega žarka direktnega sevanja na vodoravno ravnino in navpično ravnino v smeri juga. Azimut je v smeri juga 0° in ga merimo proti zahodu pozitivno in proti vzhodu negativno. Določimo ga z izrazom 2.6 :

$$\Phi = \arcsin (\cos \delta \sinh / \cos \alpha) \quad (2.6)$$

δ [°] – deklinacija

h [°] – urni kot

α [°] – kotna višina sonca

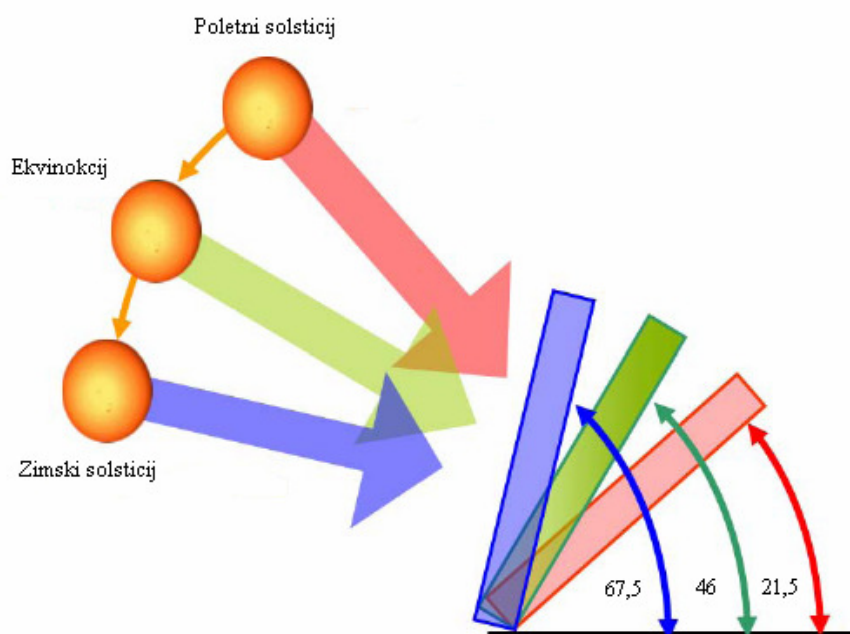


Slika 2.9: Prikaz višine in azimuta sonca v danem trenutku

V solarni geometriji poznamo še nekaj pomembnih parametrov :

- **azimut ploskve, Ψ [°]** ; je kot med projekcijo normale opazovane ploskve na vodoravno ravnino in smerjo proti jugu. Tudi tukaj so koti za ploskve usmerjene proti zahodu, pozitivni.

- **vpadni kot, i [°]** ; je kot med sončnimi žarki in normalo opazovane ploskve. Za vodoravno ravnino je vpadni kot enak zenitnemu kotu. Vedno težimo k temu da je vpadni kot kar se da majhen, takrat ko je sončnega sevanja največ. Idealno je torej, ko sončno sevanje pada na fotonapetostni modul pod pravim kotom(takrat je vpadni kot enak nič) .

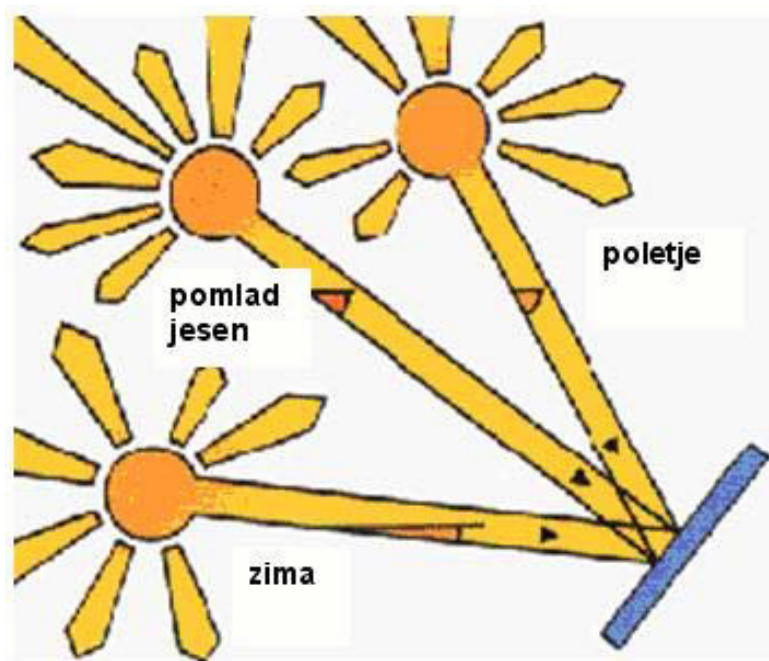


Slika 2.10: Prikaz optimalnih naklonov modulov za karakteristične datume za področje SLO

- **naklon ploskve, β [°]** ; je kot med opazovano ploskvijo in vodoravno ravnino. Ker je velika večina fotonapetostnih modulov montirana fiksno, je zelo pomembno poiskati optimalni naklon ploskve pod katerim bodo dani moduli skozi vse leto najbolj optimalno obsijani. Za področje Slovenije je ta kot med 35 – 40 °, odvisno od lokacije. Če namestitev

modulov ni fiksna, se ti optimalni koti seveda čez leto ustrezno spreminjajo (glej **sliki 2.10 in 2.11**).

Vir : [1]

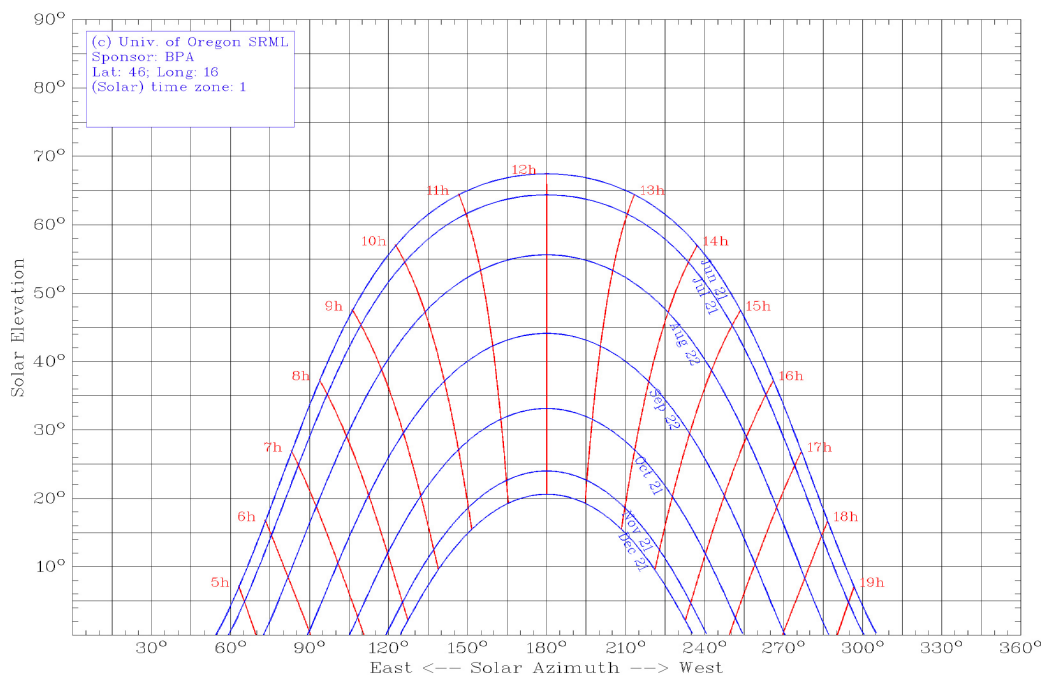


Slika 2.11: Vpadni kot sončnega sevanja na površino sončnega modula ob različnih letnih časih

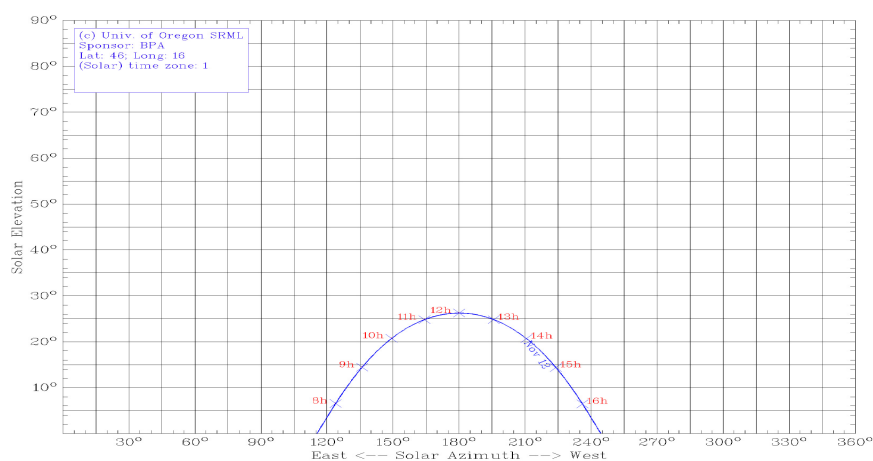
Diagram sončne poti (Ekliptični diagram; **glej sliki 2.12 in 2.13**), prikazuje navidezno pot sonca v kartezičnem koordinatnem sistemu za izbrani kraj in dan ter lego sonca ob danem času. Na **sliki 2.12** so prikazane krivulje sočnih poti od poletnega do zimskega solsticija, za drugo polovico leta je slika zelo podobna. Na **sliki 2.13** pa je prikazan diagram sončne poti prav za dan meritev (12/11/2009).

Abscisna os prikazuje azimut sonca, pri čemer 0° predstavlja orientacijo jug, negativne vrednosti kotov predstavljajo vzhod in pozitivne zahod. Na ordinati je prikazana višina sonca (kot med horizontom in lego sonca).

Kot je lepo vidno iz ekliptičnega diagrama, je bila pot sonca na dan meritev zelo nizka (november), kar je imelo za posledico precejšnje osenčenje modulov, v jutranjem in popoldanskem času meritev.



Slika 2.12: Diagram sončne poti za zemljepisno širino $46^{\circ}33'39''$ in zemljepisno dolžino $15^{\circ}39'12''$ (Maribor) v kartezični obliki za obdobje od junijskega do decembrskega solsticija(Diagram SunPathChart, Solar Radiation Monitoring Laboratory, University of Oregon)



Slika 2.13: Diagram sončne poti za zemljepisno širino $46^{\circ}33'39''$ in zemljepisno dolžino $15^{\circ}39'12''$ (Maribor)v kartezični obliki za dan meritev 12/11/2009(Diagram SunPathChart, Solar Radiation Monitoring Laboratory, University of Oregon)

Dva zelo pomembna dejavnika v postopku načrtovanja fotonapetostnega sistema sta analiza lokacije in ovrednotenje energijskega izplena. Tukaj je potrebno posebej paziti na

morebitno osenčenost postavljenih modulov, saj že zelo mala osenčenost znatno vpliva na izhodno moč modula. Slaba izbira teh dejavnikov nam lahko zelo poslabša učinkovitost delovanja sončne elektrarne in s tem posledično podaljša vračilno dobo naložbe. V **tabeli 3** je podan potencial sončnega obsevanja za Maribor v Wh/m² za tipični dan v mesecu (navedena je tudi povprečna letna vrednost).

Tabela 3: Potencial sončnega obsevanja (Maribor)

Mesec	H [Wh/m ²]
Januar	980
Februar	1680
Marec	2680
April	3750
Maj	4820
Junij	5160
Julij	5100
Avgust	4430
September	3430
Oktober	2220
November	1120
December	750
Letno povprečje	3010

Vir : [1]

3 SONČNE CELICE

Fizikalni pojav, ki omogoča pretvorbo svetlobe v elektriko (fotoefekt), je leta 1839 odkril francoski fizik Alexandre-Edmond Becquerel, ko je pri eksperimentu z dvema kovinskima elektrodama, potopljenima v elektrolit odkril, da prevodnost narašča z osvetljenostjo. Kot posebno ustrezen material se je za to izkazal polprevodniški element Silicij. Podobno odkritje, le da za selen, je leta 1873 uspelo Willoughbyju Smithu. To odkritje je bilo temelj za izdelavo prve selenske sončne celice; izdelali so jo leta 1877. Prvi natančen opis selenskih sončnih celic je sicer delo Charlesa Frittsa iz leta 1883. Leta 1905 pa je Albert Einstein teoretično razložil fotoefekt z dvojnimi značajem svetlobe, ki jo lahko obravnavamo kot valovanje ali kot tok delcev, in vpeljal pojem svetlobnega delca, ki ga danes imenujemo foton. Nobelovo nagrado ki jo je Einstein prejel 1. 1921, je dobil za razlago fotoefekta in ne kot velikokrat napačno mislimo, za relativnostno teorijo. Einsteinova teoretična predvidevanja je leta 1916 praktično dokazal Robert Andrews Millikan. Poljski znanstvenik Jan Czochralski je leta 1918 razvil metodo za pridobivanje monokristalnega silicija, ki je omogočala izdelavo prvih silicijevih monokristalnih sončnih celic. Prva silicijeva sončna celica je bila izdelana leta 1941. Leta 1932 so fotoefekt opazili tudi v kadmijevem selenidu, ki danes poleg silicija sodi med pomembnejše polprevodniške materiale pri izdelavi sončnih celic. Leta 1954 so v Bellovih laboratorijih – na podlagi polprevodniške industrije, ki se je začela razvijati s prvimi tranzistorji leta 1948 – objavili rezultate delovanja sončne celice s 4,5-odstotnim izkoristkom; že čez nekaj mesecev so ga povečali na 6 %. Te izjemno drage monokristalinske sončne celice so uporabljali skoraj izključno v satelitski tehniki za preskrbo z energijo. Šele sredi sedemdesetih let, v času »naftne krize«, zasledimo prvo večje zanimanje za praktično uporabo sončnih celic, najprej v ZDA (Solar Energy Programme, predsednika Carterja), pozneje tudi v drugih industrijskih državah. Leta 1976 izdelajo prvo amorfno silicijevo sončno celico. V osemdesetih letih se pojavijo prvi samostojni fotonapetostni sistemi. Izdelajo prva vozila s pogonom na sončno energijo. V laboratorijih uspejo izdelati sončne celice z zelo visokim

izkoristkom (preko 20%). V devetdesetih letih nastanejo največji svetovni proizvajalci sončnih celic, in fotovoltaika kot gospodarska panoga zaživi.

Vir : [5]

3.1 Lastnosti in osnove delovanja sončnih celic

Fotoelektrični pojav ali fotoefekt je torej pojav, pri katerem svetloba (elektromagnetno valovanje) izbije elektrone s kovinske površine na katero sveti. Izbite elektrone imenujemo fotoelektroni. Za fotoefekt je potrebna dovolj velika frekvenca oz. dovolj kratka valovna dolžina svetlobe. Energija svetlobe je odvisna od valovne dolžine in od te je odvisno tudi število sproščenih elektronov.

Ta pojav je prvi opazil Heinrich Hertz leta 1887 pri poizkusu s fotocelico. Pri klasični predstavi svetlobe kot valovanja bi morala biti maksimalna kinetična energija fotoelektronov K_{max} sorazmerna z gostoto svetlobnega toka. Poleg tega bi morala povzročiti fotoefekt svetloba s kakršnokoli frekvenco. Izkaže se, da je maksimalna kinetična energija popolnoma neodvisna od gostote svetlobnega toka. Fotoefekt povzroči le svetloba s frekvenco večjo od mejne frekvence ν_m . Einstein je predpostavil, da svetlobna energija ne priteka enakomerno, temveč prihaja periodično v obrokih imenovanih fotoni. Energijo fotona izračunamo po enačbi (3.1) :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.1)$$

E [Ws] - energija vpadne svetlobe (energija fotona)

ν [Hz] - frekvenca svetlobe

c [m/s] - svetlobna hitrost

λ [m] - valovna dolžina

h [$6,626 \cdot 10^{-34}$ Ws²] - Planckova konstanta

Elektron je izbit iz kovine ob interakciji s fotonom, kjer se foton izniči, elektron pa absorbira vso njegovo energijo. Pri tem mora foton prinesiti dovolj energije, sicer elektron ne preide v višje stanje. Maksimalna kinetična energija fotoelektrona je enaka:

$$K_{\max} = (h \nu) - \Phi \quad (3.2)$$

K_{\max} [Ws] – maksimalna kinetična energija fotoelektronov

Φ [Ws] - izstopno delo

Maksimalno kinetično energijo imajo ob izhodu iz kovine najšibkeje vezani elektroni. Pri večji gostoti svetlobnega toka je izbitih več elektronov, K_{\max} pa se ne spremeni. Fotoni z energijo enako Φ , predstavljajo svetlobo z mejno frekvenco ν_m oz. mejno valovno dolžino λ_m :

$$\Phi = h \nu_m = \frac{hc}{\lambda_m} \quad (3.3)$$

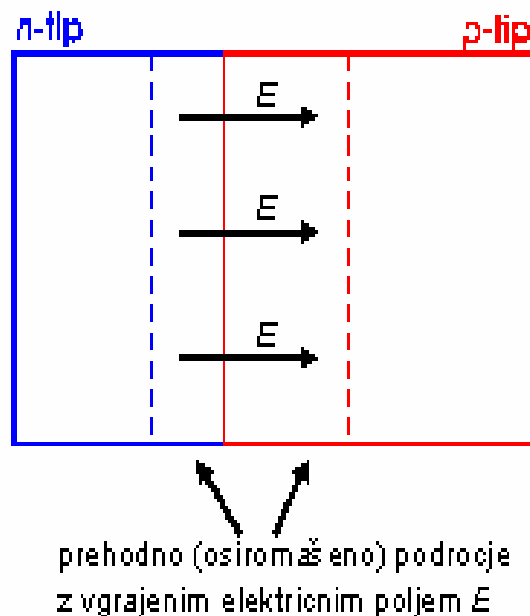
ν_m [Hz] – mejna frekvenca

λ_m [nm] – mejna valovna dolžina

Tako svetloba s frekvenco manjšo od ν_m oz. valovno dolžino daljšo od λ_m ne povzroča fotoefekta. Konverzija sončne energije, ki jo nosijo fotoni, se dogaja v sončnih celicah. Sončne celice so v osnovi polprevodniške diode velikih površin, zgrajene iz dveh različnih tipov polprevodniških plasti. Ena plast ima primesi donorjev, kar pomeni, da ima presežek elektronov. To plast imenujemo polprevodnik tipa n. Druga plast je tipa p in vsebuje primesi akceptorjev, kar pomeni da ji primanjkujejo elektroni, oziroma ima presežek vrzeli. Vlogo primesi (dopantov) se da najlažje razložiti pri siliciju. Silicij je štirivalenten kemijski element, v katerem se atomi medsebojno vežejo v kristal podobno kot pri diamantu. Če v strukturo vnesemo primesi fosforja, ki je petvalenten, ostane ena vez prosta in s tem en slabše vezani elektron. Pri dodajanju bora, ki je trivalenten, pa en elektron primanjkuje. Tako dobimo plasti tipa n in p, ki imata presežek oziroma primanjkljaj elektronov. Ko ta

dva tipa polprevodnika "staknemo" skupaj (slika 3.1), pride do difuzije nabojev preko stične površine.

Vir :[19]

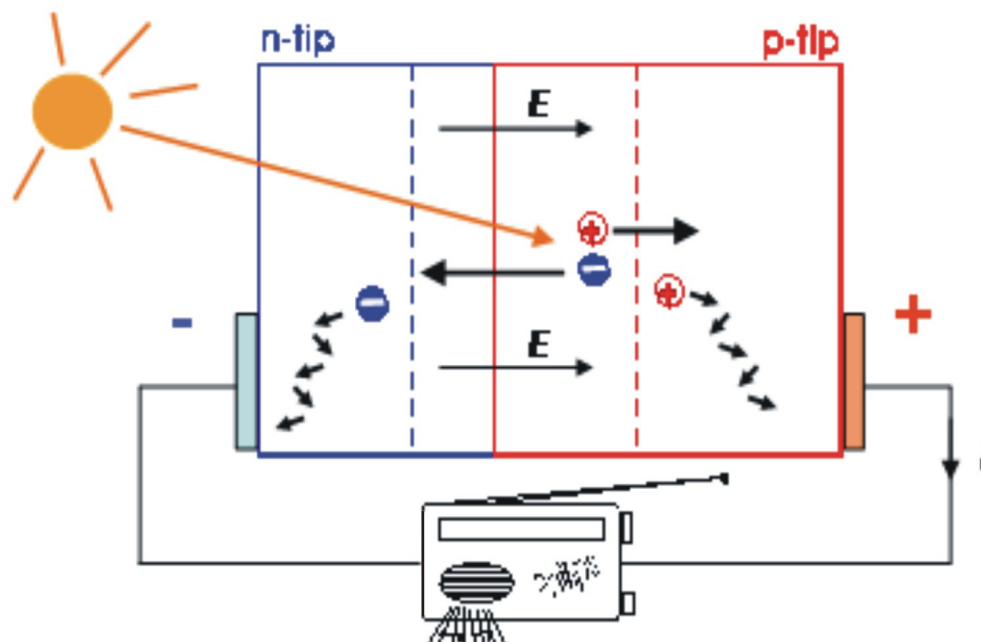


Slika 3.1: Prostorski naboj v diodi

Te staknitve v praksi dejansko ne moremo izvesti, a nam pomaga pri lažjem razumevanju sončne celice. Elektroni iz polprevodnika tipa n pričnejo prodirati v polprevodnik p tipa, medtem ko vrzeli prodirajo iz polprevodnika tipa p v tip n. Tako ob robu spoja v polprevodniku tipa p nastane negativni prostorski naboj, v tipu n pa pozitiven. Ustvarjeni naboj povzroči električno polje, in posledično ustvarja napetost (zaporna napetost ; za Si velja, da je približno 0,6 V), ki zavira nadaljnjo difuzijo delcev. Če nosilci ne bi imeli naboja in ne bi nastalo električno polje, bi delci prodirali tako dolgo, dokler ne bi bili enakomerno porazdeljeni po celotnem polprevodniku. Območje, kjer se poruši električna nevtralnost imenujemo prehodno (osiromašeno) področje ali področje prostorskega naboja. S priključitvijo zunanje napetosti na zgradbo z opisanim pn-spojem se zaviralno električno polje v prehodnem področju spreminja in skozi diodo lahko teče električni tok le v eni smeri. PN spoj je torej polprevodniška dioda.

V osvetljeni sončni celici se generirajo pari elektron-vrzel. Električno polje loči in povleče elektrone iz prehodnega področja v polprevodnik tipa n in vrzeli v polprevodnik tipa p.

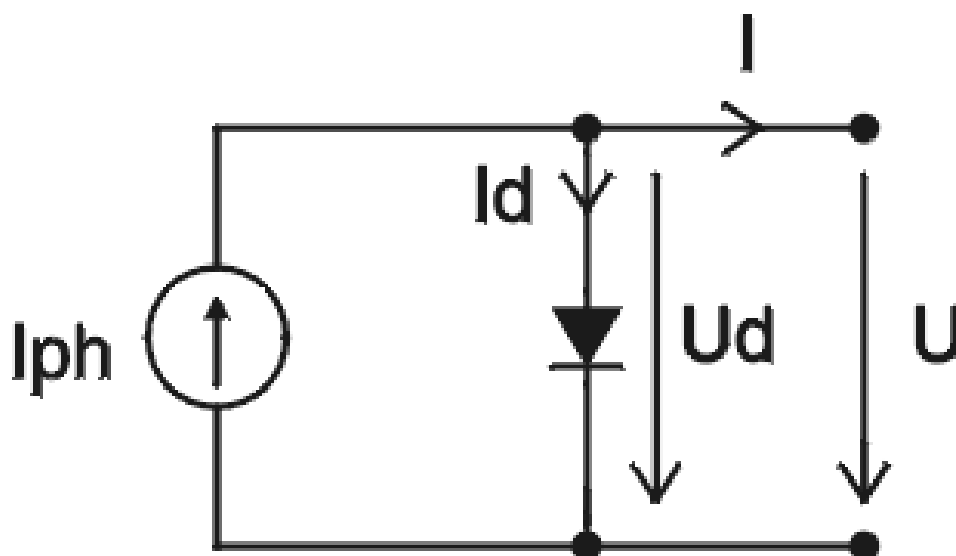
Vir : [19]



Slika 3.2: Delovanje sončne celice pri osvetlitvi.

Elektroni in vrzeli se nato v nevtralnem delu polprevodnika s pomočjo difuzije premikajo proti kontaktoma (**slika 3.2**). Ločitev elektronov in vrzeli povzroči napetostno razliko na kontaktih, ki ob priključitvi porabnika požene električni tok (približno 35 mA/cm^2 pri $0,55 \text{ V}$; velja za kristalne silicijeve sončne celice).

Učinkovitost sončnih celic je omejena s številnimi dejavniki. Energija svetlobe z večanjem valovne dolžine svetlobe pada. Največja valovna dolžina pri kateri ima svetloba še dovolj veliko energijo da izbije elektrone, za silicijeve sončne celice znaša $1,15 \text{ }\mu\text{m}$. Sevanje z večjo valovno dolžino povzroča le segrevanje sončnih celic. Lastne izgube sončnih celic nastopajo predvsem zaradi kontaktne mreže, notranje upornosti celice in zaradi refleksije sončnega sevanja na površini celice.



Slika 3.3: Model idealne sončne celice

Nadomestno vezje (idealne) sončne celice je prikazano na **sliki 3.3**. Sestavljata ga dioda in tokovni izvor, ki sta vezana paralelno. Tok tokovnega izvora je direktno sorazmeren vrednosti sončnega sevanja. Dioda predstavlja PN spoj sončne celice. Tok idealne sončne celice določimo z izrazom 3.4 :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{U}{mU_t}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

I_{ph} [A] – fototok, tok kratkega stika

I_s [A] - reverzni tok nasičenja diode (velikostnega reda $10^{-8}/m^2$)

U [V] - napetost diode

U_t [V] - termična napetost; 25,7 mV pri 25°C, (glej izraz 3.5)

m - faktor diode

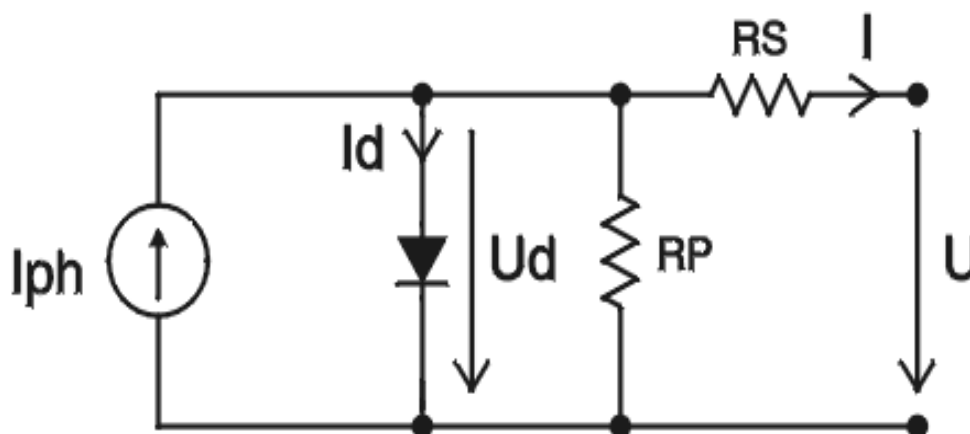
Termična napetost diode U_t , ima pri temperaturi 25 °C vrednost 25,7 mV (idealna dioda), določena pa je z izrazom (3.5):

$$U_t = \frac{kT}{q} \quad (3.5)$$

k [J/K] – Boltzmanova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$)

T [K] – temperatura

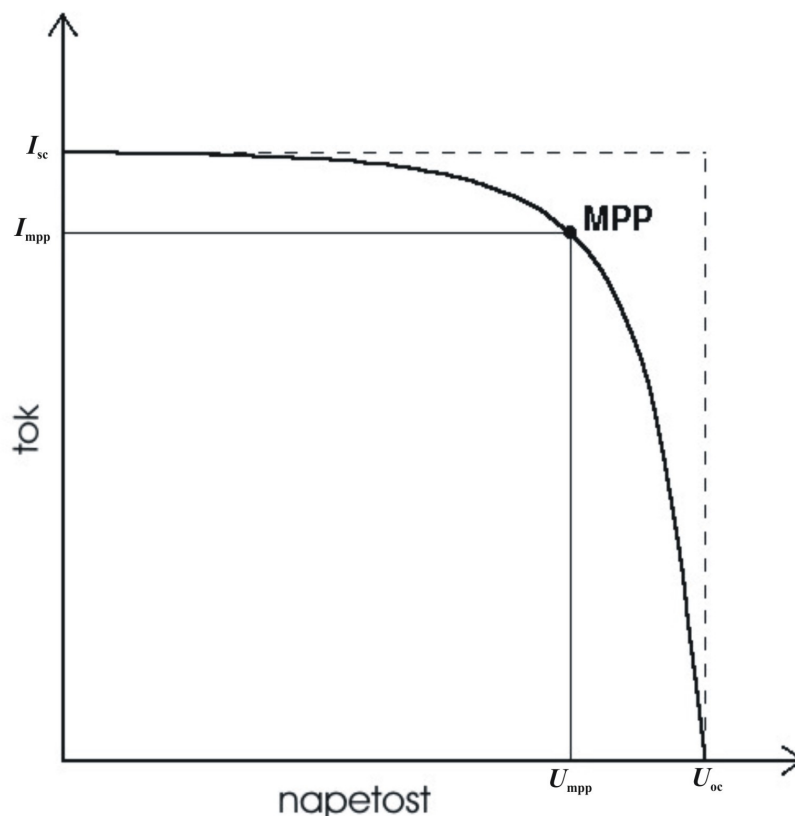
q [As] – naboj elektrona ($1,6 \cdot 10^{-19}$)



Slika 3.4: Realni model sončne celice z upoštevanjem serijske upornosti R_s (predvsem upornost kontaktov) in paralelne upornosti R_p (upornost zaradi neidealne diode), katerih posledica sta padec napetosti realne sončne celice in parazitni toki.

Delovno točko idealne sončne celice določata obremenitev celice in sončno obsevanje. S spreminjanjem vrednosti bremena v mejah med 0 in neskončno, lahko nastavljam poljubno delovno točko sončne celice (nastavitev U_c in I_c). Na **sliki 3.5** je prikazana U - I karakteristika sončne celice in izhodna moč celice med delovanjem celice v praznem teku in kratkem stiku.

Vir : [6]



Slika 3.5: U - I karakteristika sončne celice s točko največje moči MPP (maximum power point)

Zelo pomembna točka v U - I karakteristiki sončne celice je točka maksimalne moči - MPP. V praksi to točko le redko dosegamo, saj pri ustreznih vrednostih sončnega sevanja ki bi zagotavljale maksimalno izhodno moč, naraste tudi temperatura celice, kar posledično vpliva na zmanjševanje izhodne moči. Kot merilo kvalitete sončnih celic vpeljemo faktor polnjenja (fill factor - FF). Določimo ga z izrazom (3.6):

$$FF = \frac{U_{mpp} I_{mpp}}{U_{oc} I_{sc}} \quad (3.6)$$

I_{mpp} [A] – tok v točki MPP

U_{mpp} [V] – napetost v točki MPP

I_{sc} [A] – tok kratkega stika

U_{oc} [V] – napetost odprtih sponk

3.2 Vrste sončnih celic

Omejili se bomo na silicijeve kristalne sončne celice in na silicijeve amorfne sončne celice, kot najpogosteje uporabljane sončne celice v fotonapetostnih sistemih. Večji poudarek bomo dali tem vrstam celic tudi zato, ker smo le-te uporabili pri naših meritvah v diplomski nalogi.

3.2.1 Monokristalne in polikristalne silicijeve sončne celice

Učinkovitost sončnih celic je omejena s številnimi dejavniki. Energija fotonov z večanjem valovne dolžine svetlobe pada. Sevanje z večjo valovno dolžino povzroča le segrevanje sončnih celic. Foton lahko povzroči nastanek le enega para elektron-vrzel, zato se tudi pri manjših valovnih dolžinah od mejne pojavlja višek fotonov, ki prav tako le segrevajo celico. Zgornja meja pretvorbe vpadne svetlobne energije na sončno celico znaša približno 23 % (velja za silicijeve laboratorijske sončne celice). Pri uporabi drugih materialov je izkoristek lahko večji (laboratorijsko do 30%), zaradi širšega spektra svetlobe katere vpadno sevanje celica še lahko pretvori v električni tok.

Osnova za izdelavo celic je blok kristalnega silicija. Rezine silicija, ki so osnova za izdelavo sončnih celic režemo iz bloka z diamantno žago. Izrezane rezine debeline 1mm, ki so rezane na 1/10 mm natančno, se nato položi med dve plan paralelni nasproti rotirajoči kovinski plošči, s čimer dosežemo izravnavo obeh ravnin rezine na nekaj tisočink mm natančno. Nato sledi postopek izdelave celic, ki je sestavljen iz sledečih korakov. Najprej se dopirane rezine jedka do globine nekaj mikrometrov. Na ta način odstranimo nepravilnosti v strukturi kristala, ki so nastale zaradi žaganja, obenem pa se rezine na ta način tudi očisti. Temu postopku sledi difuzija. Pri temperaturi 800°C pride do difuzije fosforja, ki ga dovajamo v plinasti obliki, v notranjost materiala. Nastane N dopirana plast in oksidna plast bogata s fosforjem na vrhu rezine, zaradi reakcije s kisikom. Rezine se nato zložijo v obliko kocke, ki se nato jedka v kisikovi plazmi, s čimer odstranimo N plast na robovih. V naslednji fazi s pomočjo mokrega kemijskega jedkanja odstranimo še oksidne

plasti na površinah rezin. Na zadnji strani se nato izdelava površina kontaktov iz srebra, ki vsebuje 1% aluminija. Srebro se na površino celic tiska preko maske s posebnim postopkom. Nato se potiskano celico sintra pri visokih temperaturah. Na podoben način tiskamo še kontakte za povezavo na prednji strani celic. Tudi antirefleksno plast nanašamo na podoben način. Na izbiro imamo titanove paste.

Kristalne sončne celice so največkrat v obliki rezin, debeline 0,3 mm, rezanih iz Si ingota premera 10 do 15 cm, in generirajo okrog 35mA toka na cm^2 (skupaj do 2 A/celico) površine pri napetosti približno 550 mV pri polni osvetlitvi.

Mono- in polikristalne celice se razlikujejo tudi po barvi. Monokristalne so temno sive ali črne, polikristalne pa modre. (slika 3.6)

Monokristalne silicijeve sončne celice se najpogosteje uporabljajo pri fotonapetostnih sistemih, ker imajo največji izkoristek med sončnimi celicami (ta znaša v laboratoriju do 25 %, v serijski proizvodnji pa do 17,5 %) in dolgo življenjsko dobo (več kot 30 let). Izdelane so iz izredno čistega monokristalnega silicija, ki ga pridobivamo iz raztaljenega kremenčevega peska pri temperaturi 1300°C. Postopek izdelave (po iznajditelju imenovan »postopek Czochralskega«) je zahteven in drag, saj zahteva izredno čisto talino, natančno izdelavo in veliko energije. Monokristalne sončne celice imajo praviloma prisekane robove, kar jih poleg tudi urejene strukture površine že na prvi pogled razlikuje od polikristalnih celic. Monokristalne celice imajo visoke donose tudi ob nižji jakosti sončne svetlobe ali difuzne svetlobe. So med najdražjimi. Njihov izkoristek je med **14-17%**. Življenjska doba monokristalnih modulov presega trideset let, s tem da proizvajalci večinoma jamčijo doseganje 90% nazivne moči modula po 20 letih delovanja in doseganje 80% nazivne moči modula po 25 letih delovanja.

Te vrste modulov uporabljamo tam kjer zahtevamo čim višjo izhodno moč na enoto površine, torej predvsem tam kjer smo omejeni s prostorom postavitve (navtika, prometna signalizacija...)

Monokristal - element z urejeno kristalno strukturo; vsi atomi so med seboj lepo urejeni v celoto.

Polikristalne silicijeve sončne celice imajo manjši izkoristek kakor monokristalne (v laboratoriju do 21 %, v serijski proizvodnji pa do 15 %), vendar je njihova cena, zaradi enostavnejših proizvodnih postopkov nižja. Življenjska doba je približno enaka kot pri monokristalnih sončnih celicah, s tem da proizvajalci jamčijo doseganje 85% nazivne moči po 10 letih delovanja in 75% nazivne moči po 20 do 25 letih delovanja modula.

Polikristalne celice so primerne za večje strešne površine in postavitve na prostem. To so moduli, kateri se največ uporabljajo in imajo visoke izkoristke med **13-15%**.

Polikristal - element z delno urejeno kristalno strukturo; vsi atomi v določenem območju so med seboj lepo urejeni v celoto.



Slika 3.6: Primer monokristalne (levo) in polikristalne sončne celice (desno)

3.2.2 Amorfne silicijeve sončne celice

Amorfne sončne celice izdelujemo s podobnimi postopki, kot integrirana vezja. Zaradi tega tovrstne module večkrat imenujemo tudi tankoplastni moduli (thin-film modules). Postopek izdelave amorfnih sončnih celic je sledeč: najprej steklen substrat temeljito očistimo. Sledi nanašanje spodnje kontaktne plasti. Površina se nato strukturira - razdeli v trakove. V

vakuumu se pod vplivom visokofrekvenčnega električnega polja nanaša plast amorfne silicija. Ponovno sledi delitev v trakove. Nato sledi še nanašanje zgornjih kovinskih elektrod (**glej sliko 3.7**).



Slika 3.7: Primer amorfne sončne celice

Amorfne silicijeve sončne celice imajo precej slabši izkoristek (v laboratoriju do 12 %, v serijski proizvodnji pa do 10 %), se tudi hitreje starajo, njihova življenjska doba traja do 20 let, vendar so proizvodni stroški zanje precej nizki. Gostota toka znaša do 15 mA/cm², napetosti neobremenjenih celic pa so do 0,8 V, kar je več, kot pri kristalnih celicah. Večinoma jih uporabljamo za žepne računalnike, vrtno svetilke, polnilce navadnih baterij ipd. Celice iz amorfne silicija, za postavitve potrebujejo dvakrat tolikšno površino kot moduli s kristalnimi celicami, da dosežejo enake donose. Primerni za večje odprte površine kjer nismo omejeni s prostorom, so cenovno ugodnejši, izredno dobro delujejo pri slabši osvetljenosti in dobro izkoriščajo difuzno svetlobo. Ker so vse celice premoščene s premostitvenimi diodami, imajo ti moduli dobre lastnosti tudi pri delni osenčenosti. Zaradi ugodnejšega temperaturnega koeficienta pri visokih temperaturah, imajo amorfni moduli tudi boljši izkoristek pri višjih temperaturah modulov.

Posebnost novejših silicijevih amorfnih modulov je upadanje učinkovitosti v prvih nekaj mesecih, in to do določene vrednosti, ko se le-ta nato ustali (6-8%, odvisno od modula). Zato je potrebno pri načrtovanju sistemov iz tankoplastnih silicijevih modulov upoštevati

največjo moč na začetku delovanja, saj je le ta večja od moči ki jo proizvajalci navajajo kot nazivno moč v tehniški dokumentaciji. Proizvajalci jamčijo doseganje 80% nazivne moči po 20 letih delovanja. Izkoristki teh modulov segajo do **10%**.

Amorfni moduli - moduli iz amorfnega silicija, večkrat jih zaradi načina izdelave imenujemo tudi tankoplastni moduli. Spektralna občutljivost pri amorfnih celicah je pomaknjena bolj proti modri svetlobi, tako da je idealen izvor svetlobe za amorfne celice fluorescenčna žarnica.

Silicij - nekovinski element, ki sestavlja četrtno zemeljske skorje, večinoma pa se v naravi nahaja kot pesek (kremenčev pesek). Najdemo ga tudi v kombinaciji z drugimi elementi in v večini trdnih kamnin; tehnično je najpomembnejši polprevodnik in med najpomembnejšimi elementi sploh. Silicij je drugi najbolj pogost element po količini v zemljini masi. Tako ni problemov z zagotavljanjem surovin za sončne celice.

Vir : [6]

3.2.3 Druge vrste sončnih celic

Danes je na trgu že zelo veliko vrst različnih tipov sončnih celic, ki pa se iz takšnih ali drugačnih razlogov uporabljajo precej manj kot tri prej omenjene vrste. Naj omenimo le nekaj tipov. Ostale manj uporabljane sončne celice so še celice izdelane z EFG (Edge Defined Film fed Growth) metodo in APex celice iz silicija, celice izdelane iz kadmijevega telurida in celice izdelane iz bakrovega-indijevega selenida (CIS).

EFG celice se izdelujejo neposredno iz taline silicija, s čimer odpade žaganje na rezine, kar pomeni prihranek proizvodnih stroškov in prihranek materiala saj ni odpadnega materiala zaradi žaganja. Pri proizvodnem postopku izdelave EFG celic se iz taline silicija vleče trak silicija v obliki pravilne cevi z osmimi ravnimi stranicami. Dolžina cevi znaša nekaj m. Ravne stranice cevi se nato z laserjem razžagajo v posamezne sončne celice. Dimenzije posameznih sončnih celic znašajo 100x100 mm in so v večini primerov pravilne kvadratne oblike. To ima za posledico večjo moč modula ob manjši površini za razliko od kristalnih modulov, kjer so celice v obliki kvadrata s prisekanimi robovi. Kontakti so izvedeni v obliki bakrenih trakov, posamezne celice pa se nato združujejo na podoben način, kot pri ostalih vrstah celic.

Za razliko od EFG celic so Apex celice polikristalne z zaščitenim proizvodnim postopkom, proizvajajo jih le proizvajalec Astropower Inc.

Sončne celice iz galijevega arzenida (GaAs) se pogosto uporabljajo v vesoljski tehniki. So nevarne za okolje, njihova učinkovitost pa znaša približno 25 %.

Bakrov indijev diselenid (CuInSe₂ ali CIS) je tankoplasten material, ki je v laboratoriju že dosegel stopnjo učinkovitosti 17 %. Razvoj tehnologije tega materiala je obetaven, vendar je za zdaj še veliko težav pri njegovi izdelavi.

Proizvodnja sončnih celic iz kadmijevega telurida (CdTe) je dokaj poceni in bi lahko bila osnova za nizkocenovne fotonapetostne sisteme. Slabost te proizvodnje so strupene surovine, učinkovitost takih celic v laboratoriju znaša 16 %, v serijski proizvodnji pa približno 8 %.

Celice iz kadmijevega telurida in bakrovega-indijevega selenida (CIS) se zaenkrat uporabljajo v manjši meri in še to pretežno v laboratorijskih raziskavah. Komercialni moduli iz zadnjih omenjenih materialov so zaenkrat še zelo redki.

Tabela 4: Lastnosti različnih vrst sončnih celic

Material	Debelina	Izkoristek	Barva	Slabosti	Prednosti in perspektive
Monokristalne Si sočne celice	0,3 mm	15–18 %	Temno modre, črne z AR plastjo, sive brez AR plasti	Dolgotrajni proizvodni postopki, potrebno žaganje rezin	Najbolj raziskan material. Tudi v prihodnjih letih bo prevladoval na tržišč, posebej tam, kjer je potrebno veliko razmerje moč/površina.
Polikristalne Si sončne celice	0,3 mm	13-15%	Modre z AR plastjo, srebrno-sive brez AR plasti	V primerjavi s tankoplastnimi tehnologijami daljši proizvodnji postopki, potrebno žaganje rezin	Najpomembnejši material vsaj v naslednjih nekaj letih
Polikristalne transparentne sončne celice	0,3 mm	10%	Modre z AR plastjo,	Nižji izkoristek, posebni proizvodni	Celice zanimive za BIPV aplikacije. Možna tudi

			srebrno-sive brez AR plasti	postopki za doseganje prosojnosti celic	proizvodnja dvostranskih celic.
EFG	0,28 mm	14%	Modre z AR plastjo	Omejena uporaba proizvodnih postopkov	Možnost znižanja proizvodnih stroškov v prehodnosti. Ni žaganja rezin. Zelo hitra rast kristala.
Polikristalne Si celice v obliki traku	0,3 mm	12%	Modre z AR plastjo, srebrno-sive brez	Omejena uporaba proizvodnih postopkov	Možnost znatnega znižanja proizvodnih stroškov v prehodnosti. Ni žaganja rezin.
Apex (polikristalne Si) sončne celice	0,03 do 0,1 mm + keramični substrat	9,5%	Modre z AR plastjo, srebrno-sive brez AR plasti	Omejena uporaba proizvodnih postopkov	Možna proizvodnja v obliki traku, ni žaganja rezin, material veliko obeta. Možnost znatnega znižanja proizvodnih stroškov v prehodnosti
Monokristalne Si celice v obliki dendritne mreže	0,13 mm vključno s kontakti	13%	Modra z AR plastjo	Omejena uporaba proizvodnih postopkov	Možna proizvodnja v obliki traku, ni žaganja rezin
Amorfne sončne celice	0,0001 mm + 1 do 3 mm substrat	5-8%	Rdeče-modra, črna	Manjša učinkovitost, krajša življenjska doba.	Možna proizvodnja v obliki traku, ni žaganja rezin. Ob izboljšanju dolgoročnih lastnosti (izkoristek, življenjska doba) najbolj perspektiven material.
Kadmijev telurid (CdTe)	0,008 mm 3 mm steklen	6-9% (modul)	Temno zelene, črne	Strupene surovine	Možnost znatnega znižanja proizvodnih stroškov v prehodnosti

	substrat				
Bakrov indijev diselenid (CIS)	0,003 mm + 3 mm steklen substrat	7,5-9,5% (modul)	Črna	Omejene zaloge indija v naravi	Možnost znatnega znižanja proizvodnih stroškov v prehodnosti
Hibridne (HIT) sončne celice	0,02 mm	18%	Temno modra, črna	Omejena uporaba proizvodnih postopkov	Višja učinkovitost, boljši temperaturni koeficient in manjša debelina.

Vir : [5,16]

3.3 Fotonapetostni moduli in parametri, ki vplivajo na njihovo karakteristiko

Fotonapetostne module najpogosteje delimo glede na vrsto uporabljenih sončnih celic ali glede na namen uporabe. Moduli morajo ustrezati predpisanim standardom, kar zagotavlja njihovo dolgotrajno, zanesljivo in varno delovanje. Fotonapetostni moduli so v osnovi električno zaporedna vezava enakih sončnih celic. Tudi fotonapetostne module vežemo zaporedno- plus priključek prvega modula na minus priključek naslednjega modula itn. Takšna vezava nam da želeno napetost sistema, medtem kot tok sistema ostane enak nazivnemu toku enega modula če so uporabljeni enaki moduli, oziroma najšibkejšega modula, če so uporabljeni različni moduli. Tok modula lahko povečamo z več vezavami takšnih nizov vzporedno.

Proizvajalci osnovne električne podatke modulov navajajo pri standardnih preskusnih pogojih (STC). Le- ti so :

- sončno sevanje : 1000 W/m²
- Temperatura okolice : 25 °C
- faktor zračne mase : AM = 1,5

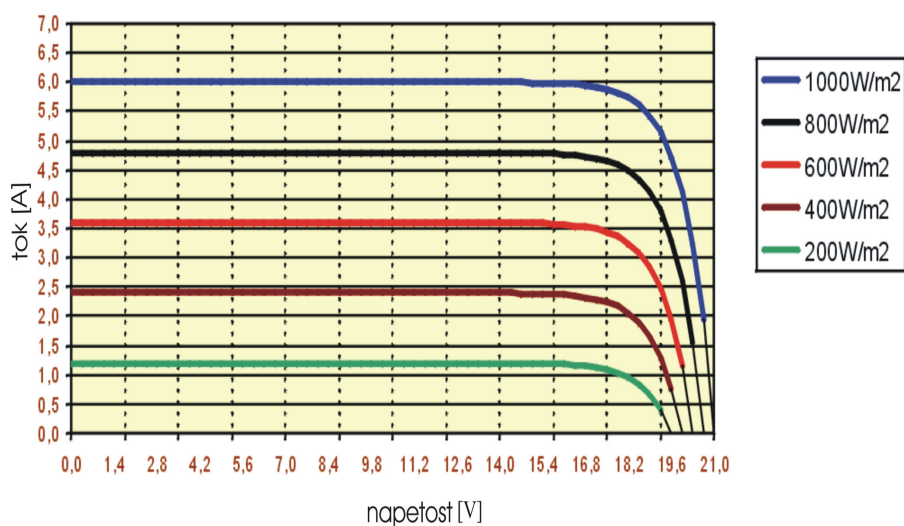
U-I karakteristiko fotonapetostnega modula konstruiramo iz karakteristik posameznih sončnih celic. Največji vpliv na električne parametre modula, torej na potek *U-I* karakteristike predstavljajo sončno sevanje, temperatura sončnih celic in delno ali celotno osenčenje modula. Vrednost izhodnega toka je sorazmerna jakosti sončnega sevanja.

Pomembne točke v karakteristiki so točka kratkega stika (I_{sc}), točka odprtih sponk (U_{oc}), in točka največje moči (P_{mpp}).

Napetost odprtih sponk U_{oc} z upadanjem temperature modulov narašča in je najvišja pri najnižjih temperaturah okolice. Tok kratkega stika I_{sc} z naraščanjem temperature narašča, vendar njegov temperaturni koeficient ni tako visok kot temperaturni koeficient napetosti odprtih sponk.

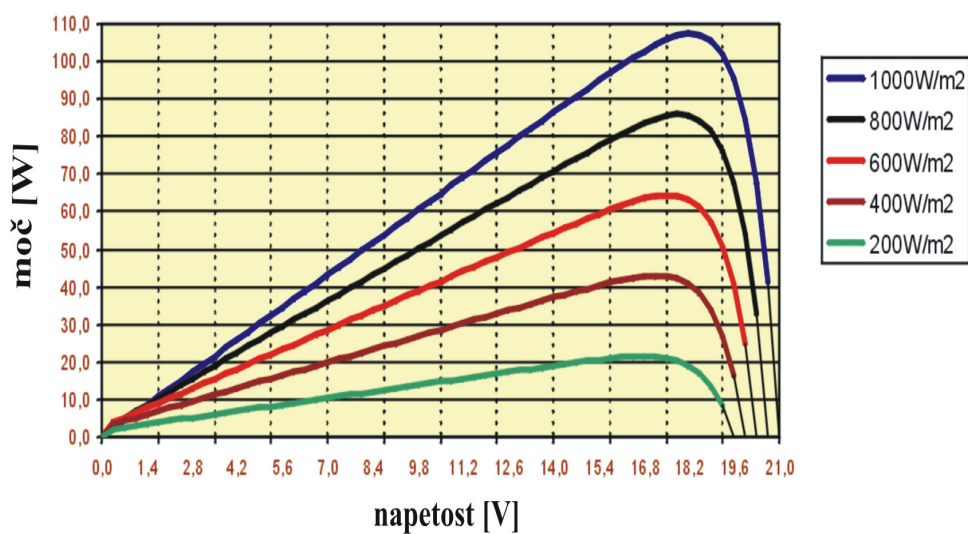
Moduli delujejo pri temperaturah, višjih od temperature okolice – temperatura modula je ponavadi 30-40 °C višja od temperature okolice.

Vir : [8]



Slika 3.8: $U-I$ karakteristike pri različnih jakostih sončnega sevanja

Na slikah 3.8 in 3.9 sta prikazani $U-I$ karakteristika in karakteristika moči fotonapetostnih modulov pri različnih jakostih sončnega sevanja.



Slika 3.9: Karakteristike moči pri različnih jakostih sončnega sevanja

Običajni izkoristek modulov katere lahko danes kupimo na trgu je med 10-17 %, pri čemer je območje toleranc nekje med +/- 2,5 - +/-10 %. Izbira tipa modulov je odvisna od razpoložljive površine strehe, naklona, položaja in orientacije.

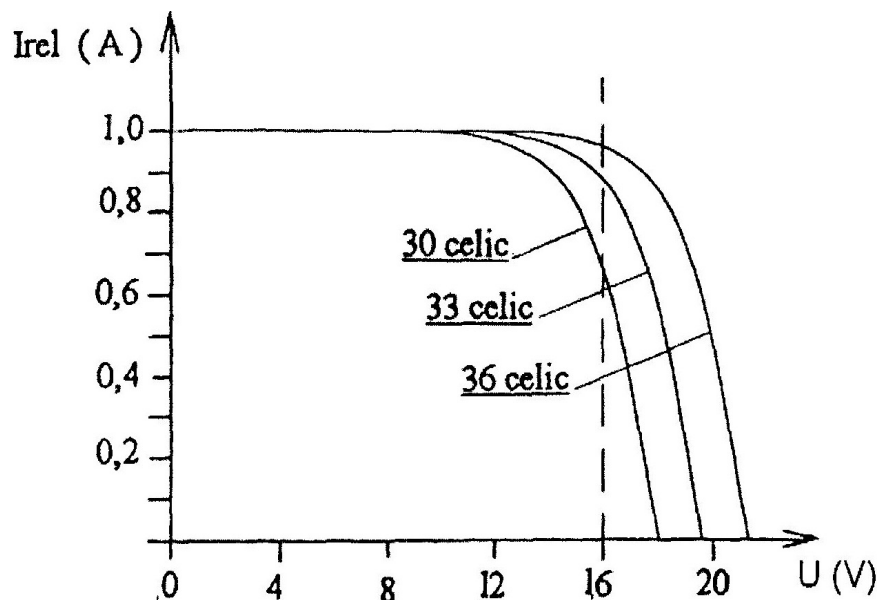
3.3.1 Parametri, ki vplivajo na električne karakteristike fotonapetostnih modulov

Največja moč ki jo želimo uporabljati, nam določa tok modula. Ta je odvisen od :

- števíla sončnih celic v modulu
- površine uporabljenih celic
- tehnologije izdelave sončnih celic
- sončnega sevanja modula
- temperature modula

a. Vpliv števila sončnih celic v modulu

Z vezavo celic vplivamo na izhodno napetost modula. Na **sliki 3.10** je prikazana $U-I$ karakteristika za modul z enako nazivno močjo, sestavljen s 30, 33 in 36 celicami.

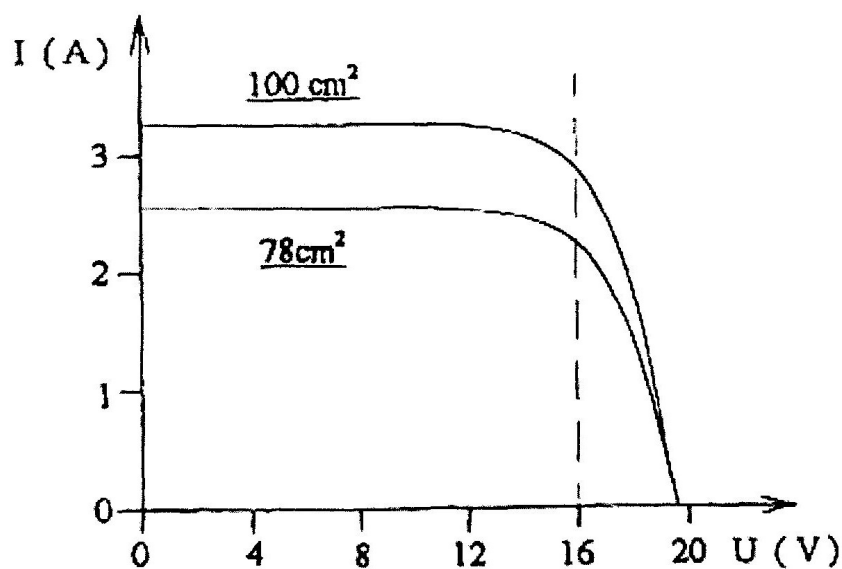


Slika 3.10: $U-I$ karakteristika pri sevanju 1000W/m^2 za različno število sončnih celic

Vidimo da z večanjem števila celic v modulu višamo izhodno napetost modula, medtem ko se njegov tok kratkega stika ne spreminja. Posledično je seveda tudi moč v točki najvišje moči (MPP), višja.

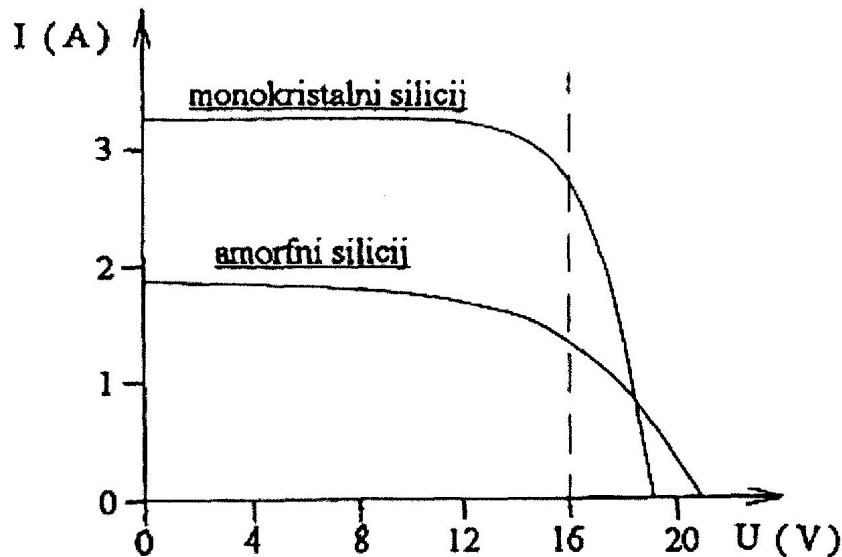
b. Vpliv površine uporabljenih sončnih celic

Nasprotno od prejšnjega primera, je največji kratkostični tok določen tudi s površino vsake celice, kar se lepo vidi na **sliki 3.11**. Iz primerjave vidimo, da modul s približno 25% večjo površino sončnih celic proizvaja 25% višji tok, pri 16V izhodne napetosti. Napetost odprtih sponk s spreminjanjem površine sončnih celic ostaja enaka.



Slika 3.11: U - I karakteristika dveh modulov z enakim številom celic in različno površino

c. Vpliv tehnologije izdelave sončne celice



Slika 3.12: U - I karakteristiki kristalnih in amorfnih modulov

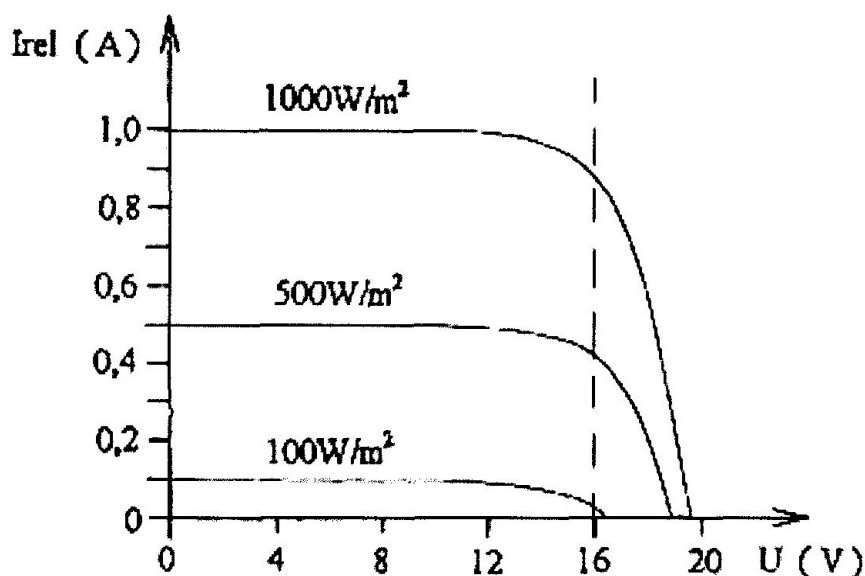
Različne tipe silicija primerjamo pri enaki površini celice in enakih testnih pogojih. Na **sliki 3.12** je razvidno, da monokristalni silicij proizvaja najvišji tok, polikristalni le rahlo nižjega, amorfni pa proizvaja skoraj polovico nižji tok kot monokristalni. Fotonapetostni

moduli iz monokristalnega silicija so najprimernejša izbira, ko pri omejenem prostoru potrebujemo čim večjo izhodno moč.

Med amorfnimi in kristalnimi moduli je razlika tudi v spektralnem odzivu, saj ima amorfni silicij večji odziv na valovne dolžine blizu modre svetlobe.

d. Vpliv sončnega sevanja modula

Na **sliki 3.13** imamo prikazane tri $U-I$ karakteristike modula pri različnih sončnih sevanjih.

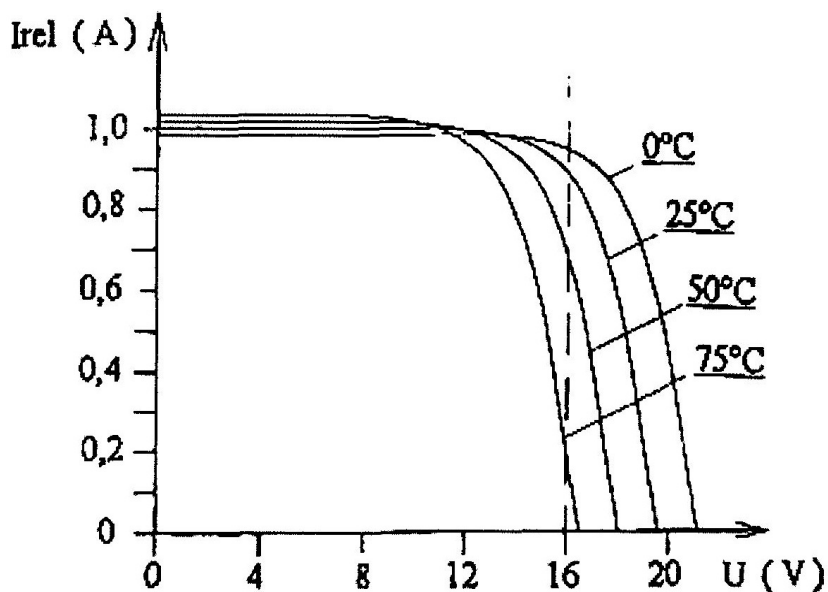


Slika 3.13: Vpliv sončnega sevanja na $U-I$ karakteristiko

Opazimo lahko, da se z večanjem sončnega sevanja tok kratkega stika večja dosti hitreje kot napetost odprtih sponk. Seveda je tudi moč v točki največje moči zelo odvisna od jakosti sončnega sevanja. Karakteristika modula pri sončnem sevanju 1000W/m^2 , ustreza karakteristiki modula ko sonce sveti direktno nanj.

e. Vpliv temperature modula

Pri sončnem sevanju na modul, se le-ta segreva in s tem se spreminjajo tudi njegove električne lastnosti. Pri direktnem sevanju na modul z 1000W/m^2 in rastočih temperaturah nad 0°C , napetost odprtih sponk U_{oc} pada, tok kratkega stika I_{sc} pa narašča. Torej je napetost odprtih sponk pri najnižjih temperaturah najvišja, tok kratkega stika pa najnižji.



Slika 3.14: Vpliv temperature modula na U - I karakteristiko pri sevanju $1000\text{W}/\text{m}^2$

Tukaj je treba tudi omeniti da temperaturni koeficient toka kratkega stika ni tako visok kot temperaturni koeficient napetosti odprtih sponk. Na **sliki 3.14** vidimo, da je U_{oc} precej bolj odvisna od spremembe temperature, kot je to primer s I_{sc} .

Da ohranimo sončne celice hladne, moramo pri montaži sončnih modulov zagotoviti cirkulacijo zraka okoli modulov. Proizvajalci podajajo U - I karakteristike modulov pri 25°C .

Vir : [18]

3.4 Kratek opis ostalih elementov fotonapetostnega sistema

3.4.1 Razsmernik

Razsmernik je najpomembnejši del povezave fotonapetostnega sistema z javnim elektroenergetskim omrežjem. Je elektronska naprava za pretvarjanje enosmernega toka v izmenični. Pri samostojnih fotonapetostnih sistemih uporabljamo pravokotni in sinusni razsmernik. S pravokotnim razsmernikom napajamo žarnice, televizijske sprejemnike, delovna orodja, torej vse električne naprave, ki lahko obratujejo z električno energijo nižje kakovosti. S sinusnim razsmernikom pa občutljivejše naprave (npr. osebne računalnike, CD- in DVD-predvajalnike).

Pri omrežnih fotonapetostnih sistemih (sončnih elektrarnah) uporabljamo omrežni razsmernik. Ta pretvarja enosmerno napetost v izmenično napetost sinusne oblike, ki je sinhronizirana z napetostjo javnega elektroenergetskega omrežja. Razsmernik deluje popolnoma avtomatizirano. Ko je sončnega obsevanja dovolj za paralelno obratovanje z omrežjem, kontrolna enota sproži sinhronizacijo z omrežjem in pošilja vanj energijo.

Razsmernik med obratovanjem stalno sledi točki največje moči sončnega modula. V mraku, ko ne dobi več dovolj moči iz sončnega modula, se razsmernik samodejno izklopi iz omrežja, ugasne in ne porablja energije za lastno delovanje. Ob polni obremenitvi, ko obstaja nevarnost pregrevanja, si razsmernik sam zmanjša izhodno moč in tako prepreči okvaro.

3.4.2 Regulator polnjenja

Pri samostojnem sončnem fotonapetostnem sistemu je uporaba regulatorja polnjenja nujna. Regulatorji imajo podnapetostno zaščito, kar pomeni da izključujejo porabnike, kadar pade napetost baterije pod določeno mejo in jo tako zaščitijo pred popolnim izpraznjenem; prav tako tudi prekinejo polnjenje, ko je baterija polna in jo tako zaščitijo pred prenapolnjenjem. Dražji regulatorji imajo tudi zaslon na katerem lahko odčitamo napetost baterije, tok porabnikov in polnilni tok.

3.4.3 Akumulatorske baterije

Baterije nam v otočnih fotonapetostnih sistemih služijo kot shranjevalniki energije. Shranjeno energijo porabimo takrat ko nimamo na voljo dovolj energije. Od akumulatorskih baterij zahtevamo naslednje lastnosti :

- čim boljši izkoristek pri polnjenju oziroma praznjenju
- dolgotrajno zmožnost cikličnega delovanja
- čim manj vzdrževanja

Najprimernejše baterije za sončne fotonapetostne sisteme so svinčeve solarne baterije s tehnologijo »dryfit« (namesto elektrolita imajo med ploščami nabrizgan gel). Te baterije še nimajo konkurence. Njihova uporaba je zelo preprosta, saj jih moramo le postaviti in

priključiti, in delujejo. Ker je pri njih sproščanje plinov zanemarljivo, jih lahko postavimo v bivalne prostore. Imajo dolgo življenjsko dobo in so primerne za vsakovrsten transport (zračni, cestni, železniški, ladijski).

Odperte klasične baterije potrebujejo v nasprotju s tehnologijo dryfit stalno vzdrževanje, pri njih se sprošča veliko plinov, zato morajo biti nameščene v posebnem prostoru kjer je urejeno prezračevanje in so nameščena lovilna korita za kislino; njeno izlitje lahko povzroči hudo onesnaženje okolja. Zaradi vsebnosti kisline prav tako ne ustrezajo mednarodnim predpisom na področju transporta. Transport kisline je treba opraviti s posebej za to prilagojenimi vozili. Življenjska doba je enaka kot pri baterijah v tehnologiji dryfit.

Obstajajo še druge tehnologije baterij, npr. NiCa, AGM, zagonske, traksijske baterije oziroma akumulatorji, ki se večinoma uporabljajo za zagon ali pogon vozil, za sončne fotonapetostne sisteme pa zaradi specifičnosti in ekološke vprašljivosti niso primerne. Ker so cenejše od prej omenjenih, jih še vedno pogosto uporabljajo tudi pri fotovoltaiki, kjer pa imajo kratko življenjsko dobo. Ker jih moramo pogosto menjati, z njimi močno obremenjujemo okolje, so pa tudi med najdražjimi elementi fotonapetostnega sistema.

3.5 Fotonapetostni sistemi in njihova uporaba

Sončne fotonapetostne sisteme delimo v dve osnovni skupini:

1. Samostojni sončni fotonapetostni sistemi:

- a) brez akumulatorja
- b) z akumulatorjem in enosmernimi porabniki
- c) z izmeničnimi porabniki
- č) hibridni

2. Omrežni sončni fotonapetostni sistemi:

- a) fiksni
- b) s sledilnikom sonca

1. Samostojne sončne fotonapetostne sisteme uporabljamo tam, kjer ni možnosti priklopa na javno elektroenergetsko omrežje: v planinskih kočah, počitniških hišah, počitniških

prikolicah, gliserjih, jadrnicah in drugih plovilih, telekomunikacijskih napravah (npr. repetitorjih), meteoroloških postajah, v cestni in železniški signalizaciji, svetilnikih ipd. Zelo primerni so tudi za uporabo v izjemnih okoliščinah, na primer ob naravnih nesrečah (viharjih, poplavadah, požarih, potresih), ko z električno energijo oskrbujejočasne bolnišnice, šole, namestitvene objekte, komunikacijske in druge objekte. Njihova prednost je v tem, da jih lahko postavimo izredno hitro in z njimi nemoteno zagotavljamo električno energijo do popravila poškodovanega električnega omrežja, kar po naravnih nesrečah praviloma traja zelo dolgo. Uporabljamo jih lahko tudi za črpanje in pripravo pitne vode iz površinskih voda ali podtalnice. Ker je danes na svetu več kot milijarda ljudi brez čiste pitne vode, je njeno zagotavljanje ena temeljnih nalog človeštva v prihodnosti. Samostojni sončni fotonapetostni sistemi so pomembno prispevali k informacijski revoluciji v zadnjih desetletjih, saj brez njih ne bi bilo množičnega razvoja komunikacijskih satelitov, ki so postavili temelje za razvoj komunikacij, interneta, informacijskih tehnologij in računalništva. Sončna celica je precej prispevala tudi k možnostim prenosa govora in podatkov, ki so dandanes samoumevne.

Samostojne sončne fotonapetostne sisteme delimo v več podskupin:

a) brez akumulatorja; To so sistemi, pri katerih sončni modul z napetostnim regulatorjem priključimo neposredno na porabnik (npr. polnilec za prenosni telefon, za prenosni računalnik) ali je vanj že integriran (npr. v žepnem kalkulatorju). Solarni polnilec za prenosni telefon žepni kalkulator na sončne celice

b) z akumulatorjem in enosmernimi porabniki; To so sistemi, pri katerih sončni modul prek regulatorja polnjenja polni baterijo. Na regulator neposredno priključimo 12V, 24V ali 48V porabnike. Primeri take uporabe so počitniške hiše in planinske postojanke z enosmernimi porabniki, železniška in cestna signalizacija, črpališča za vodo, jadrnice, svetilniki ipd.

c) z izmeničnimi porabniki; To so sistemi, pri katerih sončni modul prek regulatorja polnjenja polni baterijo. Na baterijo pa priključimo razsmernik, ki pretvarja enosmerni tok v izmenični tok. V objektu imamo enako napeljavo, kot če bi bili priključeni na električno omrežje, le da vir električne energije prihaja iz baterije prek razsmernika. Primeri take uporabe so počitniške hiše in planinske postojanke z izmeničnimi porabniki, infrastrukturni objekti na območjih brez priključkov na omrežje, gliserji in druga plovila.

č) *hibridni sončni fotonapetostni sistem*; Pri teh sistemih je vse enako kot pri sistemih z izmeničnimi porabniki, le da je dodaten vir napajanja še vetrni generator ali agregat. Take sisteme uporabljamo predvsem pri večjih objektih, kjer s soncem ne moremo zagotoviti dovolj električne energije. Primeri take uporabe so večje planinske kočje, mobilni sistemi pri elementarnih nesrečah ipd.

2. Omrežne sončne fotonapetostne sisteme (sončne elektrarne) uporabljamo izključno za proizvodnjo električne energije, ki se lahko pošilja v javno električno omrežje. Poznamo dve vrsti omrežnih sistemov:

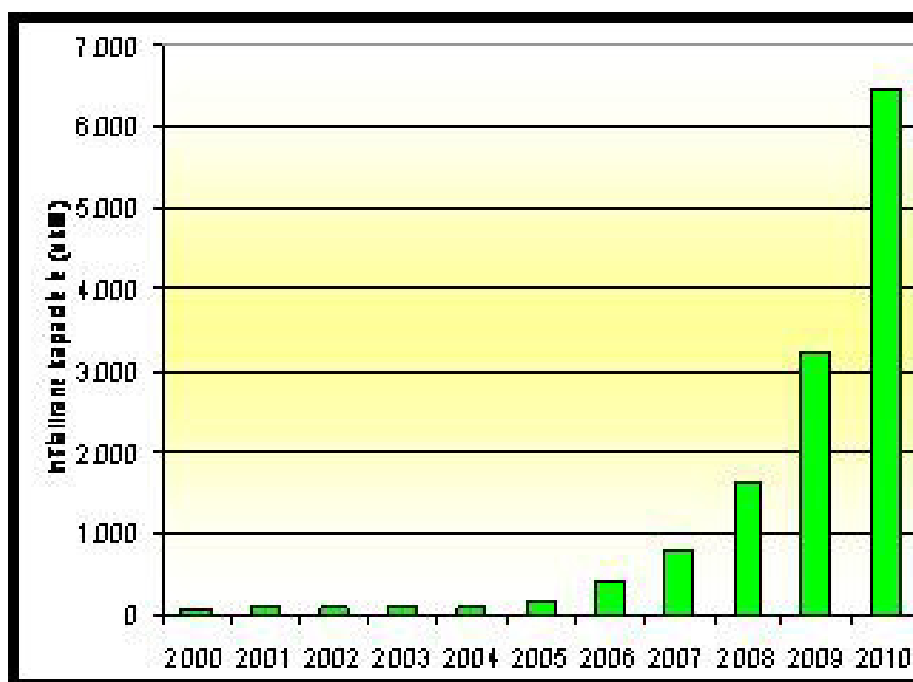
a) *fiksni*; Te sisteme nameščamo v zgradbe ali na infrastrukturne objekte. Vgradimo jih na primer v streho ali fasado zgradbe, lahko pa jih uporabimo kot nadstrešek na parkiriščih; druga možnost je namestitev teh sistemov na že obstoječe konstrukcije, na primer na protihrupno zaščito na avtocestah, na mostove ipd. Sončne module damo na fasado stavbe, običajno na južno stran, potem ko je fasada že narejena. To so večinoma sistemi manjših moči. Lahko pa jih v fasado tudi vgradimo in pri tem uporabimo delno prosojne sončne module, ki prepuščajo svetlobo v stavbo. Takšni moduli so primerni tudi za prosojno zasteklitev (npr. okna, steklenjaki, hodniki) ali kot del senčila (npr. žaluzije). Za vgraditev v streho uporabljamo strešnike s sončnimi moduli, ki se polagajo enako kot klasični strešniki. Z njimi lahko streho pokrijemo deloma ali v celoti. Električno spajanje je preprosto, poteka z MC-konektorji. Sončni moduli, namenjeni za vgraditev v strehe in fasade, so večinoma izdelani po naročilu, lahko so različnih barv, oblik (npr. trikotni, trapezni) in dimenzij. Taki sončni moduli lahko v prihodnosti postanejo zanimivi tudi za arhitekto, ki naj bi se dejavneje vključili v načrtovanje novih stavb (npr. večjih porabnikov energije, kot so nakupovalni centri, šole, dvorane). Sončno elektrarno pa lahko postavimo tudi kot samostojen objekt na primerno osončenem območju. Prednost takšnih sistemov je v možnosti izbora najugodnejše lokacije glede na sončno obsevanje, vendar se lahko povečajo stroški zaradi nakupa zemljišča in gradnje nosilne konstrukcije ter vzdrževanja (potrebno je varovanje takega sistema).

b) *s sledilnikom sonca*; Taki sistemi se od fiksnih razlikujejo le po dodatni napravi za sledenje sonca. S tem dosežemo 20–30 % (lahko tudi več) boljši izkoristek sistema.

Načrtovanje

Načrtovanje fotonapetostnega sistema je zelo pomembno. Na izračun vpliva tako lega objekta kot tudi geografska širina. Pomembno je, da predvidimo vse porabnike, ki jih bomo uporabljali, njihovo moč ter čas delovanja posameznih porabnikov.

Primer : Za postavitev sončne elektrarne moči 1 kWp potrebujemo površino med 7-10 m². Letni izplen takšnega sistema (za področje Slovenije) je cca. 1100 kWh. Stroški za postavitev 1 kWp sistema so seveda različni pri raznih izvajalcih in se gibljejo nekje od 3500 – 5000 evrov. Cena sončnih celic se že nekaj časa vztrajno znižuje, vendar so stroški postavitve sončne elektrarne še vedno zelo visoki, navkljub vse višjim izkoristkom sončnih celic.



Slika 3.15: Dosežene in planirane kumulativne instalirane kapacitete sončnih elektrarn do leta 2010

Visoke cene pa seveda zavirajo še večji razcvet te prihajajoče gospodarske panoge. S predvideno 50% rastjo v naslednjem desetletju se bo instalirana kapaciteta sončnih elektrarn povečala iz 6,5 MW (predvidena kapaciteta konec leta 2010, **slika 3.15**) na 550 MW do leta 2020. To pa bi ob letni porabi energije, ki znaša okoli 12.000 GWh, pomenilo že 4,6%, kar pa ni več zanemarljivo. Ta rast je seveda lahko manjša, lahko je pa tudi večja.

Sistem bo dobro deloval samo tedaj, če bo izračun pravilen. Pri načrtovanju sončnega fotonapetostnega sistema so potrebne tudi mnoge izkušnje, zato je to bolje prepustiti strokovnjakom.

Vir : [21]

3.5.1 Prednosti in slabosti izkoriščanja sončne energije

Prednosti:

1. Elektroenergetski vplivi; Pri sončnem fotonapetostnem sistemu ni primarnih energijskih stroškov oziroma stroškov transporta energije, stroški vzdrževanja so neznatni, sončni moduli ne vsebujejo gibljivih delov, ki bi se lahko obrabili. Gorivo (sončno sevanje) je zastoj in razmeroma enakomerno razporejeno po vsem površju Zemlje. Čas ko sončne elektrarne proizvedejo največ električne energije (podnevi), se ujema s časom največje porabe elektrike.

2. Okoljevarstveni vplivi; Delovanje sončnih fotonapetostnih sistemov ne povzroča sproščanja škodljivih snovi v okolje ali hrupa, zaradi zmanjšanih potreb po proizvodnji elektrarn na fosilna goriva se zmanjšujejo emisije toplogrednih plinov, težkih kovin, manj je kislega dežja in smoga v urbanih okoljih.

Primer : koliko CO₂ se sprosti pri proizvodnji 1kWh:

- premog > 850g
- plin > 350g
- sončna svetloba ~50g

3. Socialni vplivi; Proizvodnja sončnih fotonapetostnih sistemov se povečuje za približno 30% na leto (v zadnjih letih celo več). To je danes ena najhitreje rastočih gospodarskih panog na svetu, kar zagotavlja nova delovna mesta, razvoj novih proizvodov in tehnologij ter odpira nova tržišča. V nerazvitem svetu odpira delovna mesta za krajevne montažerje in vzdrževalce sistemov, kar zagotavlja tudi ugoden socialni vpliv.

4. Arhitekturni vpliv; Sončni fotonapetostni sistemi se čedalje bolj vključujejo v sodobne arhitekturne rešitve in tako prispevajo k zanimivim rešitvam pridobivanja električne energije.

Slabosti:

Slabost teh sistemov je predvsem v težavnosti izkoriščanja sončne energije zaradi različnega sončnega obsevanja posameznih lokacij in v dejstvu, da so kljub občutnemu padcu cen še vedno razmeroma dragi. Vendar so obeti za izboljšanje razmer dobri, saj je razvoj obnovljivih virov energije in s tem tudi fotovoltaike eden od osrednjih ciljev energetske politike Evropske unije, ki se čedalje bolj zaveda, da so zaloge fosilnih goriv omejene. Z ustrezno državno pomočjo, podobno kot jo prejema industrija fosilnih goriv, bi se proizvodnja sončnih elektrarn lahko bistveno pocenila in postala konkurenčna obstoječim elektrarnam.

Vir : [3,9,19]

4 STANDARDI IN PREDPISI V FOTOVOLTAIKI

Tehnični odbor TC 82, ki je bil ustanovljen leta 1981, ima v svetu 22 članic in 11 opazovalk. V različnih delovnih skupinah od katerih v nekaterih sodelujejo tudi predstavniki drugih tehničnih odborov, trenutno sodeluje več kot 100 strokovnjakov. Najpomembnejše naloge odbora so priprava mednarodnih standardov s področja fotovoltaike, oziroma pretvorba energije svetlobe v električno energijo in priprava standardov za posamezne elemente fotonapetostnih sistemov. Zaradi hitrega razvoja tovrstnih tehnologij v zadnjih letih čaka odbor v naslednjih letih veliko dela. Najpomembnejša področja ki bodo zahtevala še posebej veliko pozornosti, pa so na primer predpisi s področja razgradnje modulov, novih tankoplastnih tehnologij (CIS, CdTe...), vplivov na okolje v povezavi z razgradnjo oziroma z novimi tankoplastnimi tehnologijami, obratovanja sistemov v ekstremnih pogojih in podobno.

4.1 Splošni standardi

V to skupino lahko razvrstimo vse standarde, ki se nanašajo na postopke merjenja sončnega sevanja, kalibracijo merilnih instrumentov in podobno. Ker slovenskih standardov nimamo, so navedeni angleški izrazi. Pri pomembnejših standardih je naveden tudi slovenski opis.

ISO 9845-1, Solar energy – Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions – Part 1 : Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5 .

Standard opisuje referenčni model spektralne porazdelitve energije sončnega sevanja pri tleh glede na različne pogoje – 1. del : Direktno in hemisferično vpadno sončno sevanje pri AM = 1,5 .

SIST EN 61725, Analitični izrazi za dnevne sončne profile.

4.2 Standardi za sončne celice in module

Sem spadajo na primer standardi, ki predpisujejo merjenje karakteristik sončnih celic, testiranje sončnih celic, postopke izdelave, mehansko in električno testiranje fotonapetostnih modulov, merjenje $U-I$ karakteristik modulov in podobno.

SIST EN 60891, Postopki za temperaturno in sevalno korekcijo izmerjenih karakteristik $U-I$ fotonapetostnih generatorjev iz kristalnega silicija.

SIST EN 60904-1, Fotonapetostne naprave – 1. del: Merjenje fotonapetostnih $U-I$ karakteristik.

SIST EN 60904-2, Fotonapetostne naprave – 2. del: Zahteve za referenčne sončne celice. Standard opisuje zahteve, ki jih mora izpolnjevati referenčna sončna celica.

SIST EN 60904-2/A1, Fotonapetostne naprave – 2. del: Zahteve za referenčne sončne celice – Dopolnilo A1 za upoštevanje značilnosti tankoplastnega silicija.

SIST EN 60904-3, Fotonapetostne naprave – 3. del: Postopki merjenja prizemnih fotonapetostnih sončnih naprav s podatki referenčnega spektralnega sevanja.

Obravnava merilne postopke za zemeljske PV sisteme. Nanaša se na sledeče sisteme s kristalnimi sončnimi celicami: posamezne kristalne (poli ali monokristalne) sončne celice z ali brez zaščitne zasteklitve, sklopi sončnih celic ali ravni moduli.

SIST EN 60904-5, Fotonapetostne naprave – 5. del: Določnje ekvivalentne temperature celice (ECT) fotonapetostnih (PV) naprav po metodi napetosti odprtih spolk.

SIST EN 60904-6, Fotonapetostne naprave – 6. del: Zahteve za referenčne sončne module.

SIST EN 60904-6/A1, Fotonapetostne naprave – 6. del: Zahteve za referenčne sončne module- Dopolnilo A1 za upoštevanje značilnosti tankoplastnega silicija.

SIST EN 60904-7, Fotonapetostne naprave – 7. del: Izračunavanje napake zaradi spektralnega neujemanja pri preskušanju fotonapetostnih naprav.

SIST EN 60904-8, Fotonapetostne naprave – 8. del : Merjenje spektralnega odziva fotonapetostne (PV) naprave.

SIST EN 60904-10, Fotonapetostne naprave – 10. del : Metode merjenja linearnosti.

SIST EN 61215, Prizemni fotonapetostni (PV) moduli s kristalnim silicijem – Ocena zasnove in odobritev tipa.

Podaja zahteve za PV module, ki se uporabljajo za namene na zemlji za dolgoročno uporabo na prostem, kot je definirano po IEC 60721-2-1. Nanaša se samo na kristalne module.

SIST EN 61277, Prizemni fotonapetostni (PV) sistemi za proizvodnjo energije – Splošno in vodilo. Podaja pregled zemeljskih fotonapetostnih sistemov in funkcionalnih elementov teh sistemov.

SIST EN 61345, UV- preizkus za fotonapetostne (PV) module.

SIST EN 61646, Tankoplastni prizemni fotonapetostni moduli – zahteve za klasifikacijo in tipsko preizkušanje.

Podaja zahteve za načrtovanje in preizkušanje tankoplastnih fotonapetostnih modulov za zemeljske fotonapetostne sisteme, namenjene dolgotrajnemu obratovanju v zmernih klimatskih razmerah na prostem.

SIST EN 61721, Odpornost fotonapetostnega modula proti poškodbam zaradi naključnega udarca (preizkus odpornosti proti udarcu). Določa zahteve, ki jih morajo izpolnjevati moduli v zvezi z mehansko odpornostjo na udarce.

SIST EN 61829, Fotonapetostno polje iz kristalnega silicija – Merjenje $U-I$ karakteristike na mestu vgradnje.

Opisuje postopke za merjenje karakteristike modula s sončnimi celicami iz kristalnega silicija na kraju delovanja, in postopke za določanje karakteristik ob standardnih obratovalnih pogojih in izbranih temperaturah ali vrednostih sončnega sevanja iz izmerjenih podatkov.

JRC – ISPRA 503, Qualification test procedures for crystalline silicon photovoltaic modules.

Določa različne zahteve, ki jih morajo pri testiranju izpolnjevati fotonapetostni moduli.

4.3 Standardi za fotonapetostne sisteme kot celoto

K fotonapetostnemu sistemu kot celoti spadajo različni standardi, ki predpisujejo načine spremljanja delovanja fotonapetostnih sistemov ali podajajo smernice za načrtovanje in instalacijo takšnih sistemov. Sem spadajo na primer tudi varnostni predpisi, ki jih je potrebno upoštevati pri inštalaciji takšnih sistemov.

SIST EN 61124, Samostojni fotonapetostni (PV) sistemi – Preverjanje zasnov.

SIST EN 61194, Značilni parametri samostojnih fotonapetostnih sistemov. Standard določa glavne električne, mehanske in okoljske parametre, ki omogočajo opis in analizo delovanja samostojnih fotonapetostnih sistemov.

SIST EN 61683, Fotonapetostni (PV) sistemi – Pretvorniki moči – Postopki za merjenje učinkovitosti.

Podaja smernice za merjenje učinkovitosti naprav za konverzijo energije v samostojnih sistemih ali v sistemih, ki obratujejo paralelno z električnim omrežjem. Izhod obravnavanih naprav je lahko stabilna enosmerna napetost (DC/DC konverterji) ali izmenična napetost stabilne frekvence (DC/AC konverterji)

SIST EN 61702, Vrednotenje direktno sklopljenih fotonapetostnih črpalnih sistemov.

SIST EN 61724, Spremljanje zmogljivosti fotonapetostnega sistema – Smernice za merjenje, izmenjavo podatkov in analizo.

SIST EN 61727, Fotonapetostni (PV) sistemi – Značilnosti omrežnega vmesnika.

Standard določa zahteve vmesnika med fotonapetostnim sistemom in javnim omrežjem in določa tehnične zahteve, ki jih mora izpolnjevati takšna povezava.

SIST TP IEC 61836, Sončni fotonapetostni sistemi – Izrazi in simboli.

Predstavljeni so pojmi in simboli iz IEC standardov, ki se nanašajo na fotonapetostne sisteme.

4.4 Standardi za druge elemente fotonapetostnih sistemov

Standardi ki spadajo v to skupino, se nanašajo na akumulatorje, elemente za prenapetostno zaščito in druge elemente fotovoltaičnih sistemov, ki ne spadajo v nobeno od že omenjenih skupin.

SIST EN 61173, Prenapetostna zaščita fotonapetostnih sistemov za proizvodnjo energije – vodilo.

Podaja smernice za prenapetostno zaščito fotonapetostnih sistemov, tako za samostojne sisteme, kot tudi za sisteme, ki delujejo paralelno z električnim omrežjem.

IEC 61427, Secondary cells and batteries for solarphotovoltaic energy systems – General requirements and methods of test.

Podaja splošne informacije o zahtevah, ki jih morajo izpolnjevati akumulatorji v fotonapetostnih sistemih in tipične metode testiranja za ugotavljanje lastnosti akumulatorjev. Standard ne zajema specifičnih informacij, kot so načrtovanje kapacitete, metode polnjenja akumulatorjev ali načrtovanje fotonapetostnega sistema.

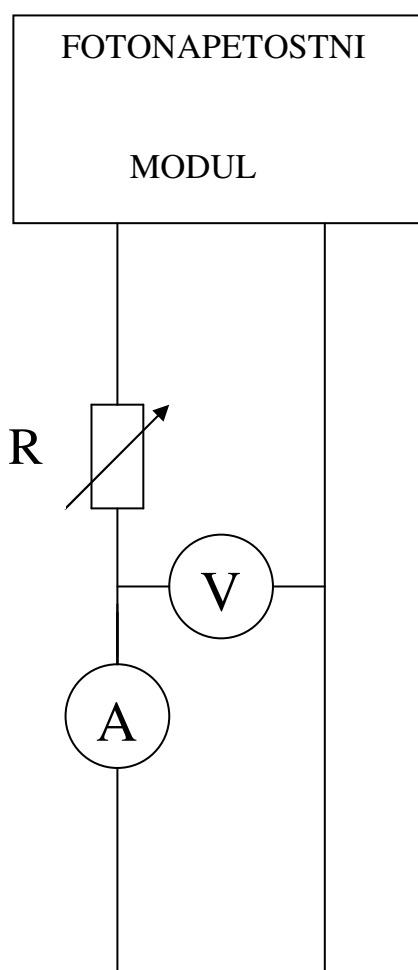
IEC 61683, Fotonapetostni sistemi – postopki za merjenje učinkovitosti.

Vir : [2,18,20]

5 EKSPERIMENTALNI SISTEM

5.1 Opis eksperimentalnega sistema in poteka meritev

Delovne karakteristike različnih tipov fotonapetostnih modulov smo ovrednotili z meritvami, ki smo jih izvedli z v ta namen sestavljenem laboratorijskem eksperimentalnem sistemu. Pri izvedbi eksperimentalnega sistema smo uporabili fotonapetostne module, termometer (infrardeči), drsne upore, diferenčne sonde za merjenje napetosti in leme za merjenje toka, krmilno enoto dSPACE 1103 PPC ter osebni računalnik.



Slika 5.1: Shematski prikaz eksperimentalnega sistema za en modul

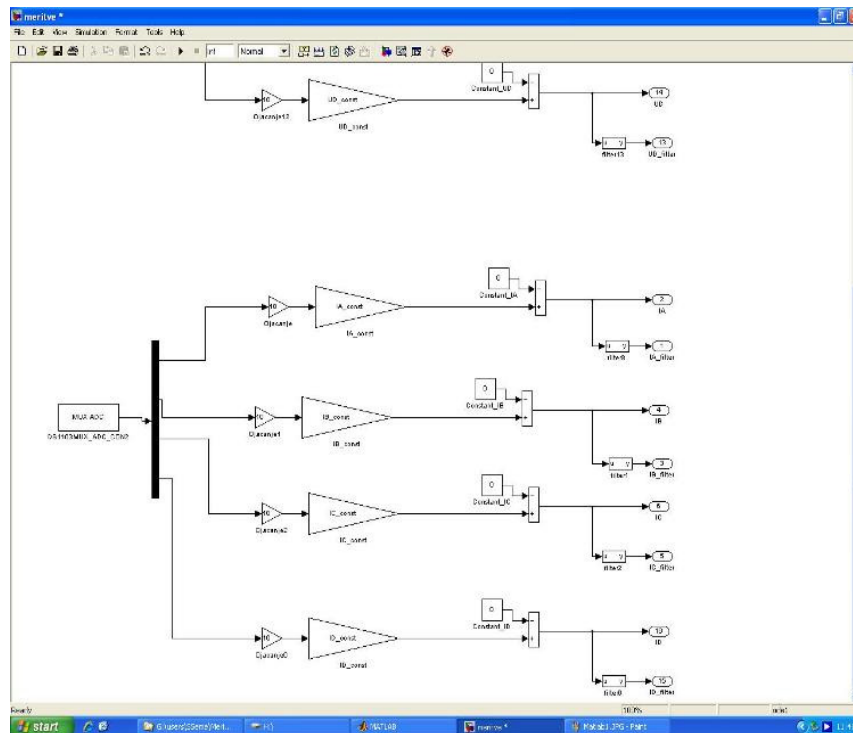
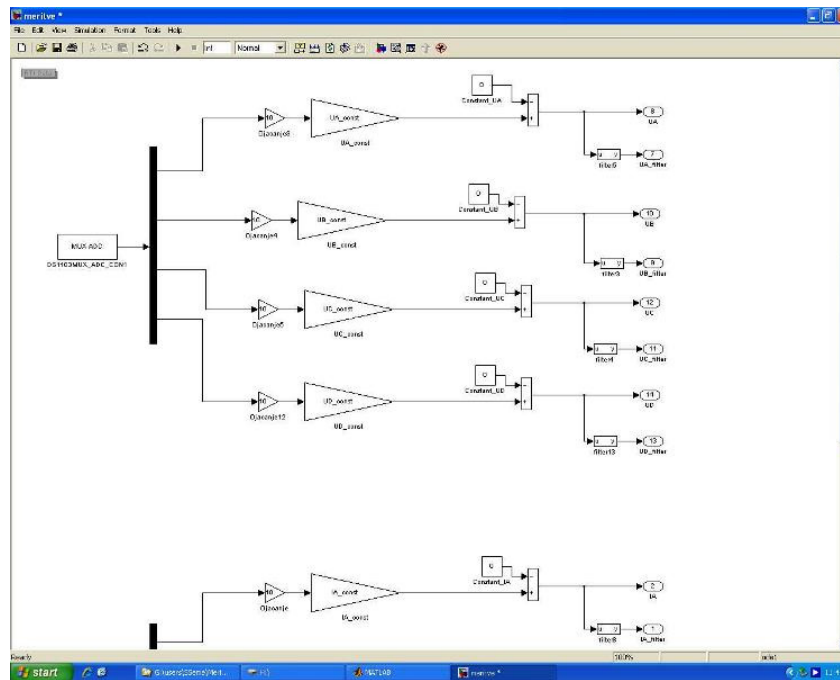
Eksperimentalni sistem prikazuje **slika 5.1**. Fotonapetostne module (polikristalni, monokristalni in amorfni), smo namestili na terasi Fakultete za elektrotehniko in računalništvo, Maribor, na že pripravljene nosilce. Meritve smo opravljali pri fiksni namestitvi modulov, saj je takšna opcija tudi najpogostejša v praksi. Module smo namestili fiksno pod kotom 35° , saj je ta naklonski kot optimalen kot skozi vse leto za obravnavano področje (mesto Maribor). Meritve smo opravljali na kot že omenjeno treh različnih vrstah fotonapetostnih modulov, ki so danes daleč najbolj prisotni pri gradnji sončnih elektrarn.

Priključke modulov smo povezali s priključno omarico na terasi, katera je bila povezana z laboratorijem. V laboratoriju smo pripravljene instrumente povezali s priključki modulov in vse skupaj povezali z računalnikom. Dogovorili smo se, da si zaporedne meritve sledijo v razmaku tridesetih minut, saj nam krajši interval ne bi pomembno spremenil zelenih rezultatov. Meritve smo opravljali na dva načina:

- pri odprtih sponkah

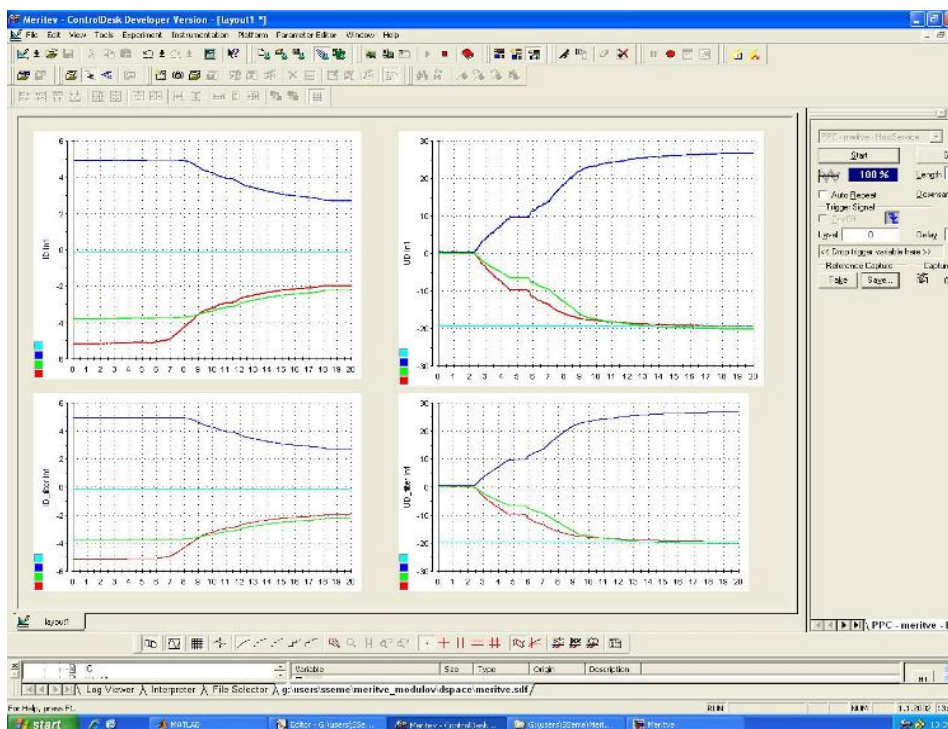
- z bremenom R (drsnik drsnega upora ki nam je predstavljal breme, smo v intervalu 20s pomaknili od položaja maksimalne upornosti do položaja, ko je upornost nič. Torej do kratkega stika. Tako smo lahko posneli $U-I$ karakteristiko za posamezni modul.)

Med posameznimi meritvami smo merjene spremenljivke zajemali s pomočjo krmilnega sistema dSPACE 1103 PPC in osebnega računalnika. Za meritev tokov smo uporabili tokovne senzorje LEM, za meritev napetosti pa diferenčne sonde. Oboji pretvorijo merjeno veličino v napetost, ki jo pripeljemo na vhode analogno/digitalnih pretvornikov krmilnega sistema. Omenjeni signali se vzorčijo vsakih $100 \mu\text{s}$. **Slika 5.2** prikazuje program za zajemanje merjenih spremenljivk (za napetost in tok), s krmilnim sistemom dSPACE 1103 PPC, ki je sestavljena v programskem paketu Matlab/Simulink z ustrežno knjižnico Real-time interface (RTI1103).



Slika 5.2: Program za zajemanje podatkov (simulink), za napetosti (zgoraj) in toke (spodaj) sončnih modulov

Za prikazovanje in shranjevanje časovnih potekov napetosti in tokov smo v programu ControlDesk sestavili uporabniški vmesnik, ki je prikazan na **sliki 5.6**. Ta omogoča komunikacijo med programom ki se izvaja na krmilnem sistemu dSPACE 1103 PPC in uporabnikom. Z njim smo sprožili 20sekundni interval v katerem smo zajemali podatke.



Slika 5.3: Uporabniški vmesnik za komunikacijo med uporabnikom in krmilnim sistemom dSPACE v programu ControlDesk

5.2 Opis elementov eksperimentalnega sistema

Drсни upor

Drсни upor proizvajalca METREL tipa PRN 3/322, $3 \times 10 \Omega - 3 \times 5,7 \text{ A}$, $I_{\max}: 3 \times 8 \text{ A/15 min}$, smo uporabili za simulacijo bremena na modulih. S pomikanjem drsnega upora od maksimalne upornosti proti ničli, smo posneli $U-I$ karakteristike modulov od odprtih spenk do kratkega stika.

Merilniki toka in napetosti

Za merjenje tokov smo uporabili merilne tokovne senzorje LEM tipa HY 10-P, ki delajo na principu Hall-ovega efekta. Primarna in sekundarna stran sta galvansko ločeni. Glede na to, da imajo uporabljeni tokovni senzorji tokovni izhod in ne napetostnega, imamo na izhodu upor določene velikosti s katero lahko nastavimo merilno območje. Napajalna napetost LEM-a je $\pm 12 \dots \pm 15 \text{V}$.

Napetosti smo merili s pomočjo treh diferenčnih sond HAMEG HZ 115 pri katerih je maksimalna vhodna napetost 1500 V (peak), izhodni signal je napetost maksimalne vrednosti $\pm 15 \text{V}$.

Termometer

Za merjenje temperature okolice in temperature modulov, smo uporabljali infrardeči termometer FLUKE 61. Termometer ima temperaturni doseg $-18 - 275^\circ\text{C}$, $630 - 670 \text{ nm}$, izhodna napetost $< 1 \text{ mV}$.

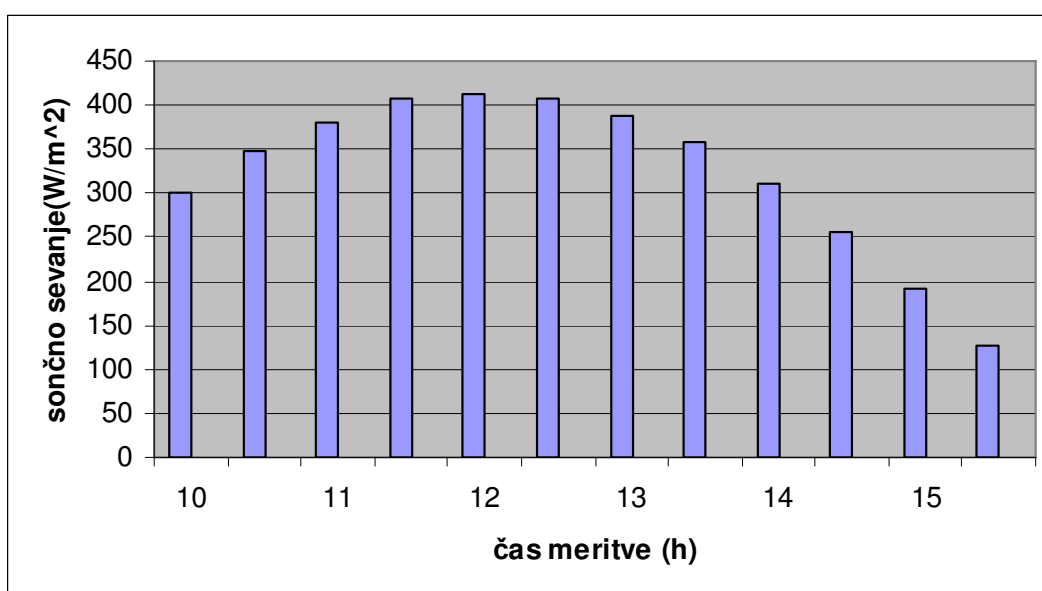
Krmilna enota dSPACE PPC 1103

Krmilno enoto dSPACE smo uporabili za zajemanje izmerjenih podatkov s časom vzorčenja $100 \mu\text{s}$ ter prikazovanje teh rezultatov in poznejšo obdelavo na osebнем računalniku. Programska oprema vsebuje knjižnico DS1103 Real-Time Interface (RTI) za programiranje krmilnega sistema v programskem paketu Matlab/Simulink, prevajalnik za C programski jezik Microtec ter program ControlDesk za komunikacijo med krmilnim sistemom dSPACE PPC1103 in uporabnikom, ki omogoča prikaz izmerjenih vrednosti v realnem času.

6 REZULTATI MERITEV

6.1 Vremenske razmere ob meritvah

Prikazan je potek meritev na dan 12/11/2009. Cilj naloge je bil torej izmeriti karakteristike sončnih modulov za dane vremenske razmere, jih med seboj primerjati in podati svoje videnje obnašanja modulov ob različnem sončnem sevanju, temperaturi, osenčenosti...



Slika 6.1: Potek sončnega sevanja skozi meritve

Vreme na dan meritev je bilo jasno s sončnim sevanjem med 150 – 420 W/m², temperatura okolice pa je dosegla 12°C, glej **slika 6.1**.

Meritve smo opravljali skozi ves dan oziroma med časom, ko je bila intenziteta sončnega sevanja dovolj velika za merodajne rezultate. Testirali smo v mesecu oktobru in novembru, ko moč sonca seveda ni tako velika, kot v poletnih mesecih. Sicer pa cilj naše naloge ni bil ugotavljati in meriti veličine modulov pri standardnih pogojih, ampak izmeriti vrednosti pri

dejanskih razmerah in jih potem med seboj primerjati. Manjšo težavo nam je povzročala precej nizka pot sonca v tem letnem času, kar je imelo za posledico precejšnje osenčenje modulov v jutranjih in popoldanskih urah. Ker je znano, da je osenčenost modulov največji sovražnik pri izkoriščanju sončne energije, naša postavitve modulov nikakor ne bi bila primerna za postavitve sončne elektrarne, mi pa smo s tem dobili še podatke kako se moduli obnašajo pri delni osenčenosti.

Ker smo uporabljali drsni upor (10Ω), s katerim seveda nismo mogli nastaviti želene velike upornosti pri točki odprtih sponk (U_{oc}), teoretično bi bila neskončna, nam ni posnelo popolne $U-I$ karakteristike, torej od točke odprtih sponk, kjer je tok enak nič. Dodatne podatke, kot recimo sončno sevanje, smo pridobili s pomočjo ARSO baze podatkov, glej **slika 6.2**.

Datum	Temperatura [°C]	Obsevanje [W/m ²]	Relativna vlaga [%]	Padavine [mm]	Veter [m/s]	Smer vetra [°]	Tlak [kPa]	Temp. primankljaj [°C dan]	Vetrni potencial [W/m ²]
12.11.2009 00:00	2,1	0	94	0,00	0	346	978	13,4	0
12.11.2009 00:30	1,5	0	95	0,00	1	308	978	15,0	1
12.11.2009 01:00	1,2	0	95	0,00	0	281	978	15,0	0
12.11.2009 01:30	0,9	0	95	0,00	0	276	978	15,0	0
12.11.2009 02:00	0,8	0	95	0,00	0	303	979	15,0	0
12.11.2009 02:30	0,4	0	95	0,00	0	317	979	15,0	0
12.11.2009 03:00	0,3	0	96	0,00	0	320	979	15,0	0
12.11.2009 03:30	0,0	0	96	0,00	1	330	979	15,0	1
12.11.2009 04:00	-0,1	0	97	0,00	0	300	979	15,0	0
12.11.2009 04:30	-0,2	0	97	0,00	0	315	979	15,0	0
12.11.2009 05:00	-0,3	0	97	0,00	0	346	979	15,0	0
12.11.2009 05:30	-0,5	0	97	0,00	0	320	979	15,0	0
12.11.2009 06:00	-0,5	0	97	0,00	0	300	980	15,0	0
12.11.2009 06:30	-0,7	0	97	0,00	0	301	980	15,0	0
12.11.2009 07:00	-0,9	0	97	0,00	0	322	980	15,0	0
12.11.2009 07:30	-1,0	53	97	0,00	0	303	980	15,0	0
12.11.2009 08:00	-0,6	142	97	0,00	0	192	981	15,0	0
12.11.2009 08:30	0,6	215	94	0,00	0	177	981	15,0	0
12.11.2009 09:00	1,3	184	90	0,00	0	319	981	15,0	0
12.11.2009 09:30	2,6	263	84	0,00	0	234	981	15,0	0
12.11.2009 10:00	4,6	302	73	0,00	0	156	981	15,0	0
12.11.2009 10:30	6,4	349	71	0,00	0	169	982	15,0	0
12.11.2009 11:00	7,7	381	69	0,00	0	174	982	15,0	0
12.11.2009 11:30	9,3	407	58	0,00	0	146	982	15,0	0
12.11.2009 12:00	10,2	413	56	0,00	0	160	981	15,0	0
12.11.2009 12:30	10,6	408	51	0,00	1	174	981	15,0	1
12.11.2009 13:00	10,9	389	47	0,00	1	157	981	15,0	4
12.11.2009 13:30	11,1	358	48	0,00	2	150	981	15,0	8
12.11.2009 14:00	11,3	311	48	0,00	2	153	981	15,0	6
12.11.2009 14:30	11,5	255	50	0,00	2	160	981	15,0	5
12.11.2009 15:00	11,6	192	52	0,00	2	157	981	15,0	7
12.11.2009 15:30	11,7	126	52	0,00	2	173	981	15,0	7
12.11.2009 16:00	11,4	59	54	0,00	2	187	981	15,0	8
12.11.2009 16:30	9,9	6	62	0,00	2	162	981	15,0	8
12.11.2009 17:00	8,1	0	73	0,00	2	153	981	15,0	12
12.11.2009 17:30	7,8	0	76	0,00	2	160	981	15,0	15
12.11.2009 18:00	7,4	0	77	0,00	0	51	981	15,0	0
12.11.2009 18:30	6,2	0	81	0,00	1	330	982	15,0	1
12.11.2009 19:00	5,9	0	80	0,00	0	323	982	15,0	0
12.11.2009 19:30	5,8	0	81	0,00	0	329	982	15,0	0
12.11.2009 20:00	4,8	0	86	0,00	0	332	982	15,0	0
12.11.2009 20:30	3,8	0	90	0,00	1	334	982	15,0	1
12.11.2009 21:30	3,3	0	90	0,00	0	323	983	15,0	0
12.11.2009 22:00	3,1	0	88	0,00	0	263	983	15,0	0
12.11.2009 22:30	2,5	0	91	0,00	0	271	983	15,0	0
12.11.2009 23:00	2,2	0	92	0,00	0	10	984	15,0	0
12.11.2009 23:30	2,1	0	93	0,00	0	324	984	15,0	0

Slika 6.2: Podatki ARSO za dan meritev(12/11/2009), za področje Maribora

Zraven toka in napetosti modulov, smo merili še temperaturo okolice in temperaturo fotonapetostnih modulov, tako na prednji kot na hrbtni strani (glej tabelo 5). . Te meritve smo opravljali z infrardečim termometrom.

Vir : [11,12]

Tabela 5: Temperature okolice in modulov med meritvami

Meritev [h]	T_{ok} [°]	T_{M1} [°]	$T_{M1hrbet}$ [°]	T_{M2} [°]	$T_{M2hrbet}$ [°]	T_{M3} [°]	$T_{M3hrbet}$ [°]
M1-9.30	3.4	15.3/-2.8	20.4	12.1/-5.1	16.7	13.7/-3.1	16.5
M2-10.00	4.6	17.2/-2.4	23.2	14.4/-4.6	20.2	15.2/-2.4	20.8
M3-10.30	6.4	22.8/0.1	28.6	20.8/-2.6	27.2	19.4/0.6	27.1
M4-11.00	7.7	26.2/0.2	33.2	25.8/-0.4	32.4	25.4/1.2	27.2
M5-11.30	9.3	29.4/2.2	37.2	27.8/0.8	35.4	26.8/2.8	16.4
M6-12.00	10.2	6.4/0.4	18.4	1.4/0.2	7.8	16.2/3.2	20.2
M7-12.30	10.6	12.1/1.2	24.2	25.8	33.2	31.2	34.6
M8-13.00	10.9	26.2	33.2	25.4	33.4	30.6	33.4
M9-13.30	11.1	27.2	30.8	27.2	31.2	27.2	32.2
M10-14.00	11.3	25.6	30.6	25.6	31.8	26.4	31.2
M11-14.30	11.5	23.4	29.4	23.4	29.1	23.4/7.8	27.6
M12-15.00	11.6	16.8	22.4	16.8	22.6	17.8/2.8	22.6
M13-15.30	11.7	13.1	17.8	12.6	17.6	13.6/2.2	17.8

Opravili smo trinajst meritev (med 9.30 – 15.30 uro), v razmaku trideset minut. V prvih nekaj meritvah je bilo prisotno precejšnje osenčenje modulov, kar se je precej poznalo na karakteristikah. Najboljša osvetljenost vseh modulov je bila od 13h do 14.30h (M8-M11), takrat smo dobili seveda tudi najboljše rezultate. V zadnjih meritvah je bila zopet prisotna osenčenost modulov zaradi nizke poti sonca. Delovne karakteristike modulov smo posneli od točke odprtih sponk (U_{oc} , $I=0$) do točke kratkega stika (I_{sc} , $U=0$) v periodi 20s. Kot je že bilo omenjeno, zaradi prenizke upornosti drsnega upora (10Ω), s katerim smo simulirali breme, karakteristik nismo mogli posneti čisto iz točke odprtih sponk. Kasneje bomo podrobneje opisali le nekaj meritev skozi cel dan, kjer smo opazili zanimive rezultate.

6.2 Predstavitev sončnih modulov in njihove karakteristike

Jih bomo opisali kar v zaporedju postavitve (desna proti levi, **glej sliko 6.3**) in kasnejših označbah. Prvi na desni je torej polikristalni modul (modul 1), drugi z desne je amorfni modul (modul 2) in prvi z leve je monokristalni modul (modul 3). Na sliki je še en monokristalni modul (drugi z leve), ki pa pri meritvah ni bil upoštevan. Uporabili smo torej tri različne, najpogosteje danes uporabljene vrste fotonapetostnih modulov v praksi:

Označba za module, ki bo uporabljena kasneje v tekstu.

MODUL 1 : polikristalni modul, temno-modra

MODUL 2 : amorfni modul , zelena

MODUL 3 : monokristalni modul, rdeča



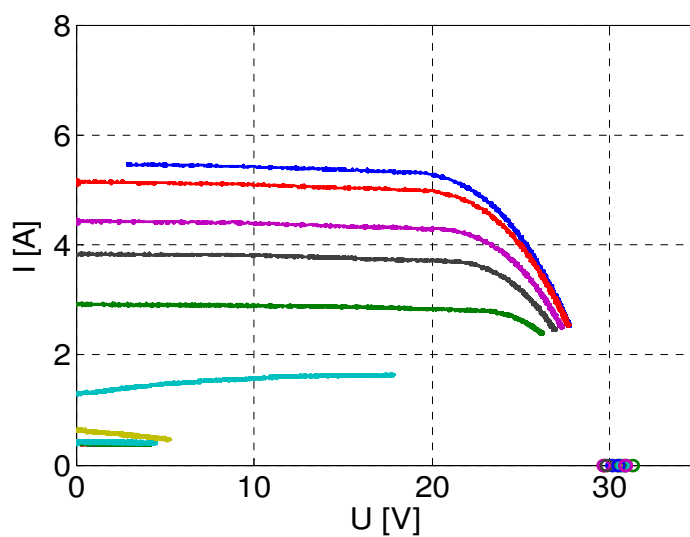
Slika 6.3: Postavitev modulov na terasi Tehniške fakultete v Mariboru

Tabela 6: MODUL 1 ; EvergreenSolar ES - 170 – RL

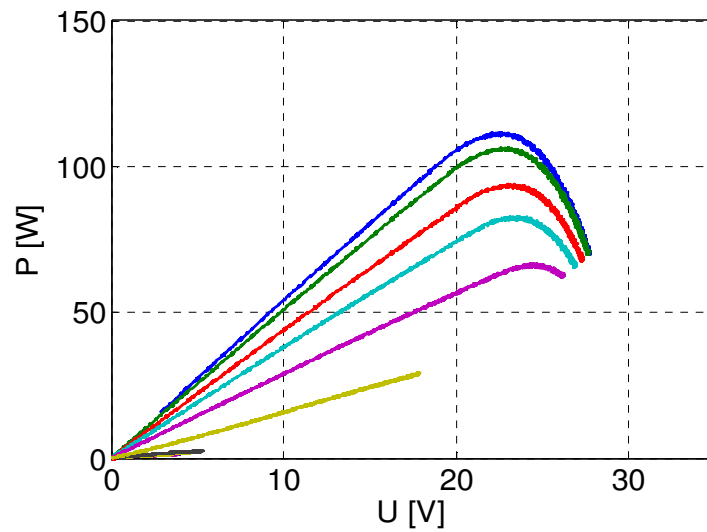
Material	Polikristalni silicij
Dimenzije [mm]	1570 x 953 x 41
Površina [m²]	1.496
Teža [kg]	18.23
Št. celic	18 x 6 = 108

P_{mpp} [W]	170
U_{mpp} [V]	25.3
I_{mpp} [A]	6.72
U_{oc} [V]	32.4
I_{sc} [A]	7.55
Predvidena cena [€/W]	3

Kot modul1 je predstavljen modul iz polikristalnega silicija z nazivno močjo 170W. Ima največjo nazivno moč izmed vseh izbranih modulov, ima pa tudi največjo površino. Na slikah 6.4 in 6.5 sta prikazani dobljeni U - I karakteristika in karakteristika moči za dani modul za nekaj meritev.



Slika 6.4: U - I karakteristika za modul1(polikristalni)



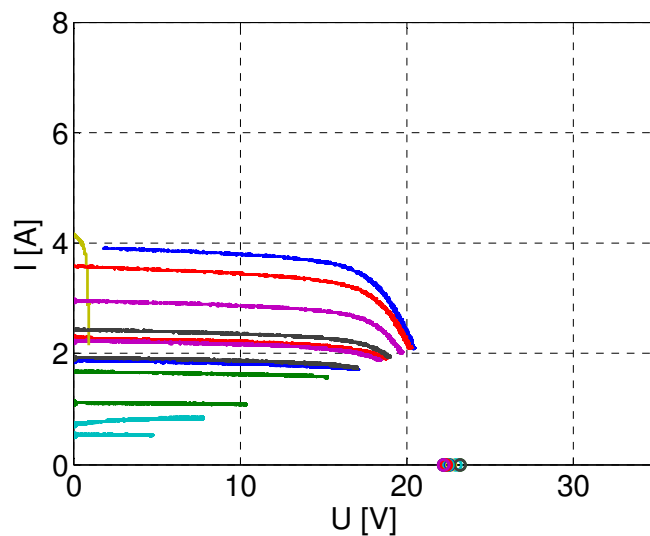
Slika 6.5: Karakteristika moči za modul1 (polikristalni)

Iz karakteristik lahko razberemo, da smo izmerili največji tok kratkega stika okoli 5,5 A, in da so bile napetosti odprtih sponk skozi celotno meritev okoli 30 V. Na karakteristiki moči lahko vidimo da so vrednosti v točki največje moči, dosegale do največ 115 W. Modul1 ima precejšnje število celic (108), kar zelo dobro vpliva na njegove izkoristke.

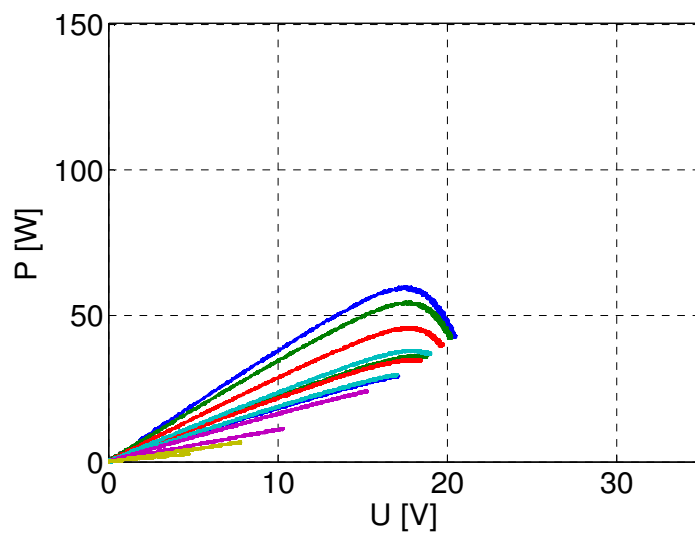
Tabela 7: MODUL 2 ; SCHOTT solar ASI 81

Material	Amorfni silicij
Dimenzije [mm]	1308 x 1108 x 50
Površina [m²]	1.449
Teža [kg]	19
P_{mpp}-začetna [W]	99
P_{mpp}-stabilizirana [W]	81
U_{mpp} [V]	17.1
I_{mpp} [A]	4.73
U_{oc} [V]	23
I_{sc} [A]	5.82
Predvidena cena [€/W]	2.5

Kot modul2 imamo predstavljen modul iz amorfnega silicija ali tudi tankoplastni, kot se pogosto uporablja ime za ta tip sončnih modulov. Glede na njegovo površino ima precej nižjo nazivno moč kot prvi modul, le 81W. Med podatki za ta modul lahko vidimo dve vrednosti za moč v točki največje moči, začetno in stabilizirano. Posebnost novih silicijevih amorfnih modulov je namreč upadanje učinkovitosti v prvih nekaj mesecih delovanja do določene vrednosti, ko se le-ta ustali (6% - 8%, odvisno od vrste modula). Zaradi tega pojava imajo novi moduli torej nekoliko večji izkoristek (seveda tudi višjo izhodno moč), kot pa je navedeno v specifikacijah, kar je treba upoštevati pri načrtovanju systemske tehnike oziroma razsmernikov.



Slika 6.6: U - I karakteristika za modul2(amorfni)



Slika 6.7: karakteristika moči za modul2 (amorfni)

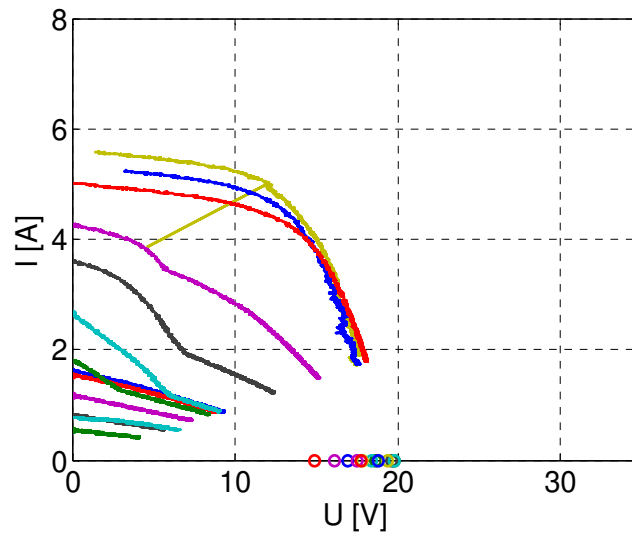
Iz obeh karakteristik na slikah 6.6 in 6.7 lahko razberemo, da smo največji tok kratkega stika izmerili nekje do 4A, napetosti odprtih sponk pa so bile okoli 22V. Moč v točki

največje moči (MPP) je dosegla vrednost 60W. Ta tip fotonapetostnih modulov ima, med izbranimi, najnižje maloprodajne cene na watt.

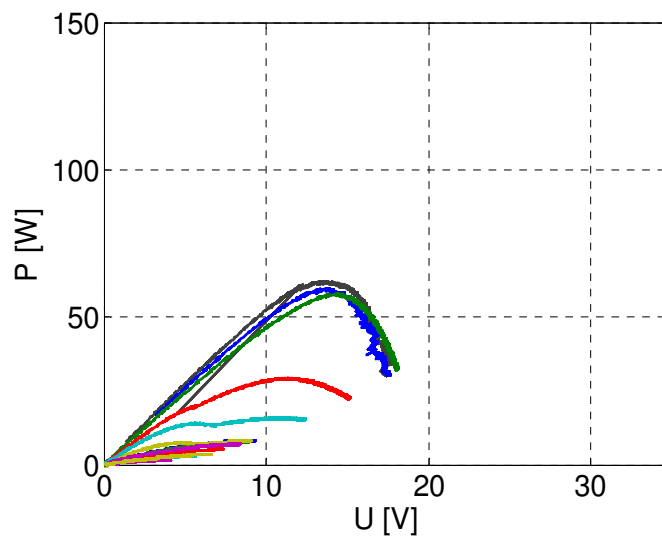
Tabela 8: MODUL 3 ; Energetica WS 105 M

Material	Monokristalni silicij
Dimenzije [mm]	1445 x 645 x 34
Površina [m²]	0.932
Teža [kg]	11.2
Št. Celic	4 x 9 = 36
P_{mpp} [W]	105
U_{mpp} [V]	16.4
I_{mpp} [A]	6.41
U_{oc} [V]	21
I_{sc} [A]	7.2
Predvidena cena [€/W]	3.5

Kot modul3 imamo predstavljen modul iz monokristalnega silicija. Zaradi dražjega postopka izdelave, ima tudi najdražjo maloprodajno ceno. Modul3 ima daleč najmanjšo površino. Monokristalni moduli so znani po precejšnjih izhodnih močeh na razmeroma malih površinah. Iz $U-I$ karakteristike in karakteristike moči na **sliki 6.8 in 6.9** lahko vidimo, da smo največji tok kratkega stika izmerili pri slabih 6A, napetosti odprtih spenk pa so se gibale od 15V do 20V. Na karakteristiki moči lahko razberemo, da je moč presegala vrednosti 60W. Ta modul je sestavljen iz precej manjšega števila celic kot modul iz polikristalnega silicija.



Slika 6.8: U - I karakteristika za modul3 (monokristalni)



Slika 6.9: Karakteristika moči za modul3 (monokristalni)

Treba je opozoriti, da podatki v karakteristikah modulov, ki jih navajajo proizvajalci, veljajo za standardne preizkuševalne pogoje (STC) :

- sončno sevanje : 1000 W / m^2
- temperatura okolice : $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- faktor zračne mase : $AM = 1,5$

6.3 Prikaz nekaj meritev skozi celoten dan

Podrobneje smo prikazali štiri meritve skozi celoten dan. Zjutraj, v času največjega sončnega sevanja in popoldan.

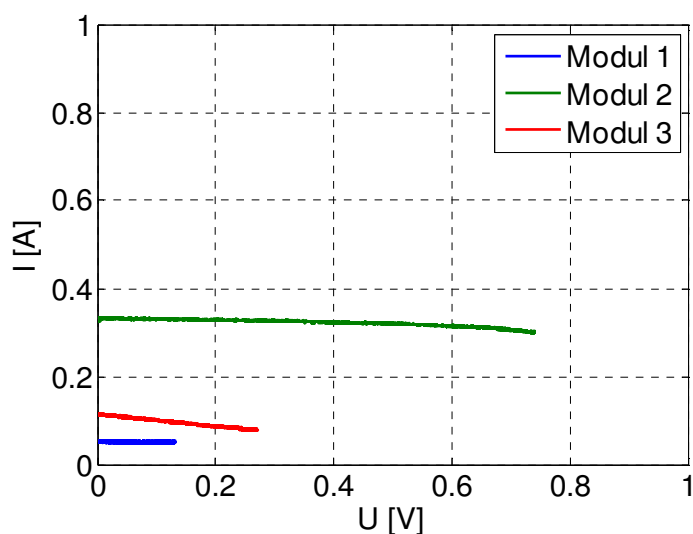
6.3.1 Meritev4 (11 h) – polovična osenčenost vseh modulov



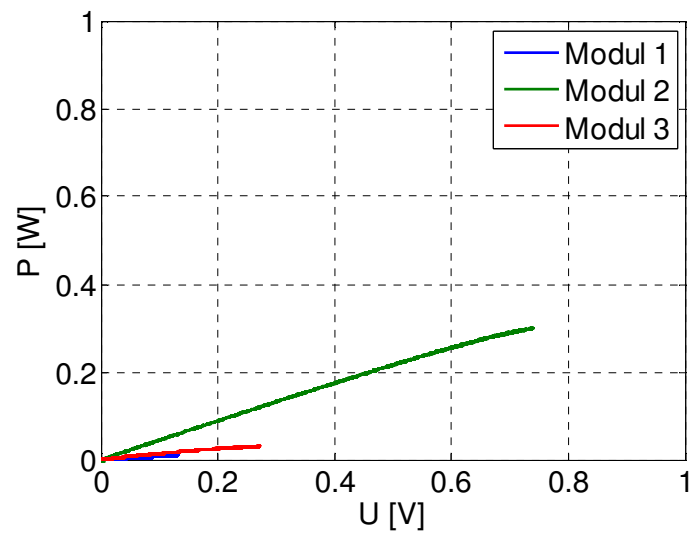
Slika 6.10: Meritev 4 (11h)

Med meritvijo je jakost sončnega sevanja znašala 381 W/m^2 , temperatura okolice pa je bila $7.7 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura na površini fotonapetostnih modulov je znašala okoli $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Ker so bili moduli med meritvijo precej osenčeni (glej sliko 6.10), smo merili tudi temperaturo na osenčenem delu površine modula, kjer je znašala le okoli 1°C . Zaradi takšne razlike, moduli seveda niso delovali optimalno in so pretvarjali sorazmerno malo moči.

V takšnih razmerah se je kot najboljši modul pokazal amorfni (modul2, zelena), saj je dajal nekajkrat večje izkoristke kot preostala kristalna modula. Vidimo tudi na U - I karakteristiki in karakteristiki moči na slikah 6.11 in 6.12, da karakteristika amornega modula precej odstopa. Amorfní moduli so znani po tem, da so primernejši za postavitev kjer lahko pričakujemo več osenčenosti. Ti moduli tudi boljše izkoriščajo difuzno svetlobo. Podobne rezultate smo dobili pri vseh meritvah pri katerih je bila prisotna osenčenost na vseh modulih.



Slika 6.11: U - I karakteristika za meritev4 (11h)



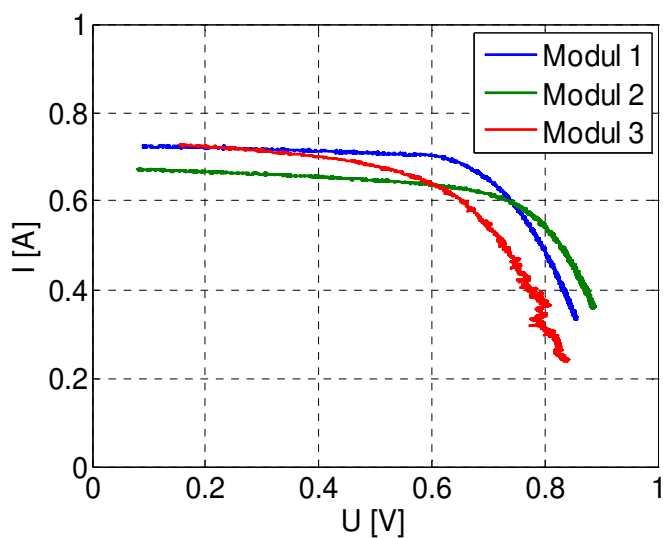
Slika 6.12: karakteristika moči za meritev4 (11h)

6.3.2 Meritev8 (13 h) – popolna osončenost vseh modulov

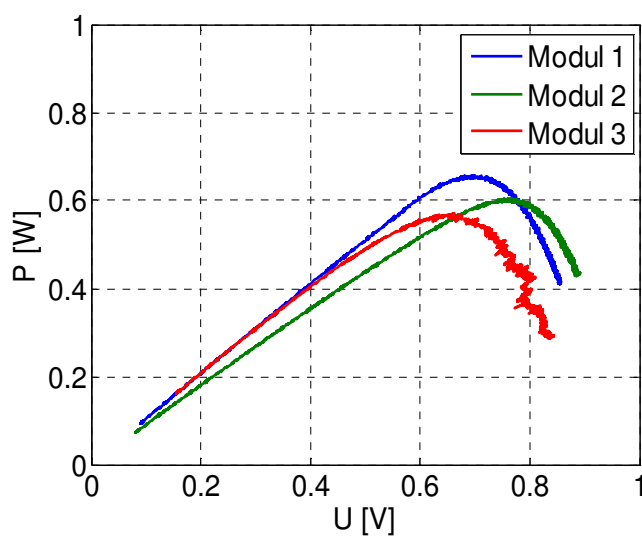


Slika 6.13: Meritev 8 (13h)

Pri tej meritvi smo imeli najboljše pogoje, vsi moduli so bili popolnoma osončeni (glej **slika 6.13**). Jakost sončnega sevanja je znašala 389 W/m^2 . Temperatura okolice je bila slabih 11°C . Tudi temperature modulov so bile po celotni površini podobne, okoli 30°C . Na hrbtni strani modulov je bila temperatura približno 33°C .



Slika 6.14: U - I karakteristika za meritev8 (13h)



Slika 6.15: Karakteristika moči za meritev8 (13h)

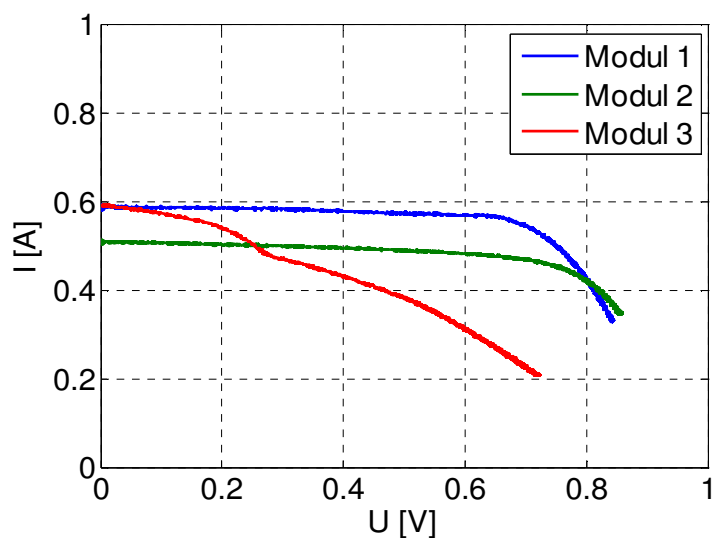
Tukaj smo dobili tudi največje izkoristke in vsi moduli so bili precej izenačeni. Kot lahko opazimo na obeh karakteristikah na slikah **6.14** in **6.15**, je mogoče malo nepričakovano nizke vrednosti dajal monokristalni modul³. Najboljše rezultate je tako kot pri večini meritev pod optimalnimi pogoji dal polikristalni modul¹.

6.3.3 Meritev¹⁰ (14 h) – malenkostna osenčenost (dve celici) na tretjem modulu (monokristal)



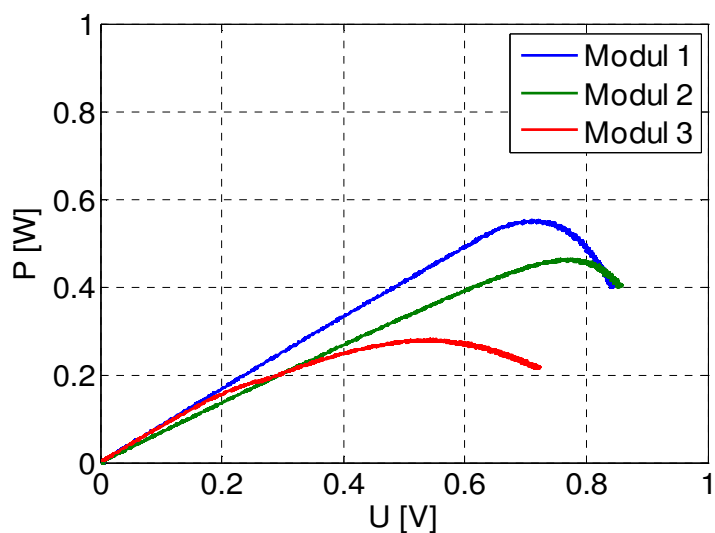
Slika 6.16: Meritev 10 (14h)

Pri tej meritvi so bili moduli še vedno popolnoma osenčeni, le na tretji modul (monokristal, rdeča), je že padla senca na dve celici (glej **slika 6.16**). To se je odražalo tudi na karakteristikah modulov, saj je karakteristika monokristalnega modula precej odstopala od ostalih dveh, kateri pa sta bili še precej izenačeni. Jakost sončnega sevanja je med meritvijo znašala 311 W/m^2 . Temperatura okolice je bila $11.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura modulov se je gibala med $25\text{-}26 \text{ }^\circ\text{C}$, na osenčeni strani tretjega modula seveda precej manj ($9 \text{ }^\circ\text{C}$), na hrbtne strani modulov je bila temperatura okoli $31 \text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 6.17: U - I karakteristika za meritev10 (14h)

Na U - I karakteristiki na **sliki 6.17** lahko opazimo kako že majhna osenčenost monokristalnega modula vpliva na njegovo karakteristiko. Vidimo da zelo strmo pada. Karakteristika amorfne modula je bila konstantno nižja od karakteristike polikristalnega, ki je dajal najboljše rezultate.



Slika 6.18: Karakteristika moči za meritev10 (14h)

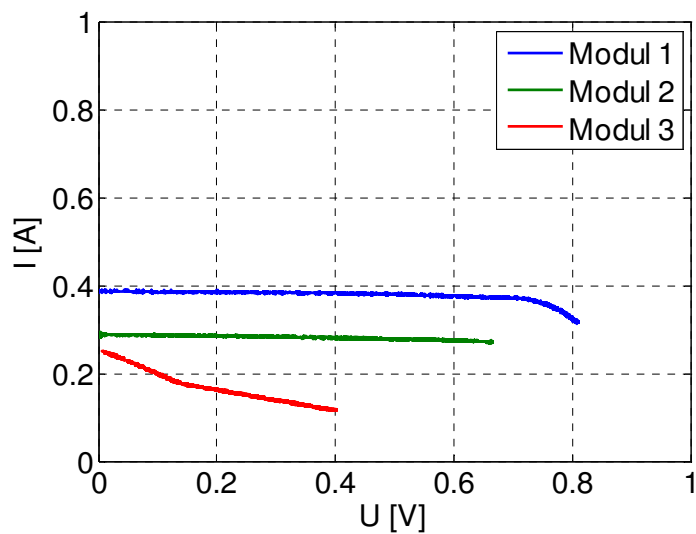
Na karakteristiki moči (glej sliko 6.18) vidimo, da je monokristalni modul zaradi precej male osenčenosti dajal skoraj le polovične vrednosti moči napram polikristalnemu modulu.

6.3.4 Meritev 12 (15 h) - ¼ osenčenosti na tretjem modulu (monokristal)

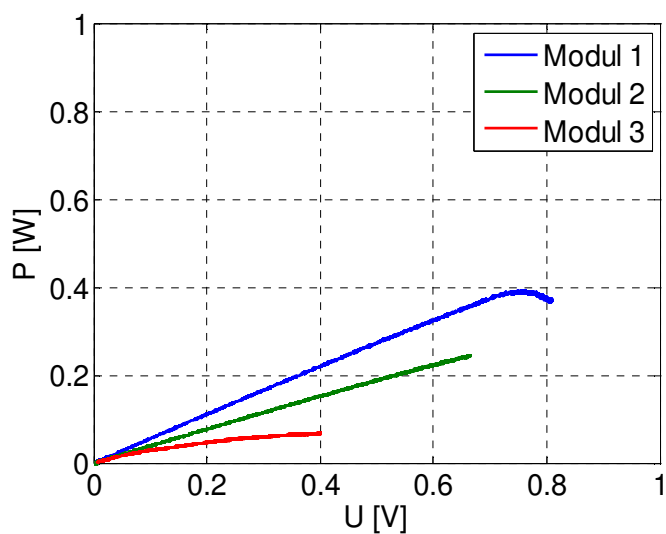


Slika 6.19: Meritev 12 (15h)

Pri meritvi 12 ob petnajsti uri je bila jakost sončnega sevanja 192 W/m^2 . Temperatura okolice je bila $11.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Tukaj smo imeli podobno situacijo kot pri prejšnji meritvi, s tem da je tukaj bila osenčena že četrtnina tretjega monokristalnega modula (10 celic), glej sliko 6.19. Tudi temperature modulov so bile že dosti nižje, le okoli 17°C . Na osenčenem delu monokristalnega modula le okoli 3°C . Na hrbtni strani modulov so bile temperature še okoli 22°C .



Slika 6.20: U - I karakteristika za meritev12 (15h)



Slika 6.21: Karakteristika moči za meritev12 (15h)

To se je seveda spet pokazalo na karakteristikah (glej slike 6.20 in 6.21), kjer je zopet monokristalni modul najbolj odstopal. Vidi pa se že, da tudi karakteristiki ostalih dveh modulov nista bili optimalni, saj sta dosegali le nekje polovične rezultate glede na meritev8

(13h), kjer smo dobili najboljše rezultate. Vseeno pa smo tudi tukaj, kot pri skoraj vseh meritvah, najboljše rezultate dobili za fotonapetostni modul iz polikristalnega silicija.

6.4 Primerjava karakteristik fotonapetostnih modulov

Na koncu smo naredili še primerjavo karakteristik fotonapetostnih modulov. Primerjali smo dane izkoristke skozi meritev, proizvedeno moč modulov glede na njihovo ceno in proizvedeno moč modulov glede na njihovo površino.

6.4.1 Izkoristki fotonapetostnih modulov

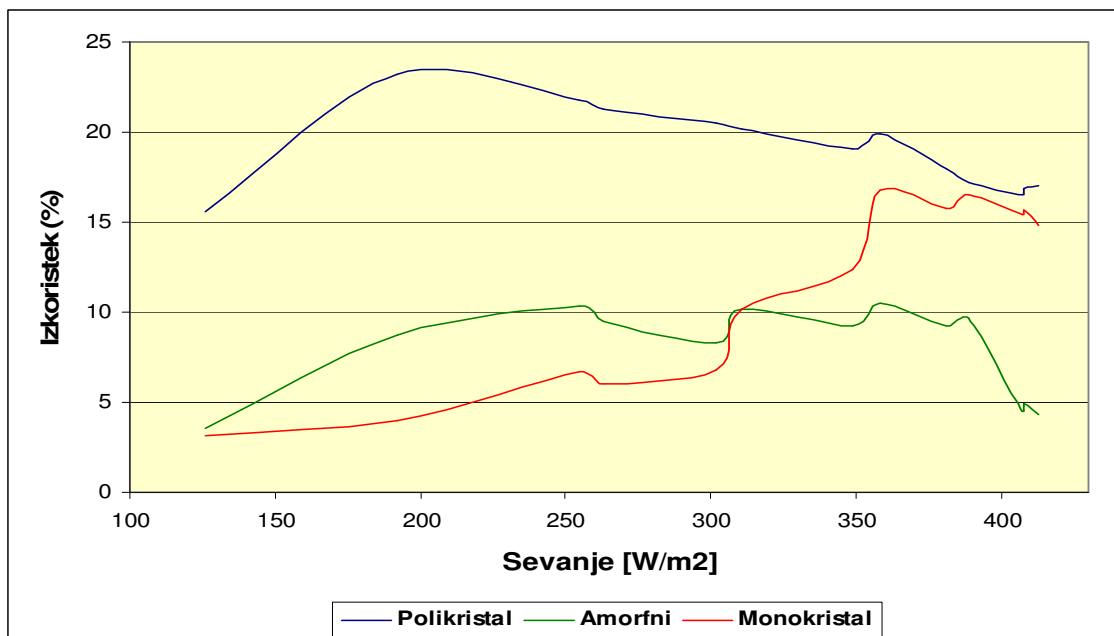
Proizvajalci fotonapetostnih modulov izkoristke podajajo kot razmerje energije ki jo modul proizvede, napram energiji vpadnega sončnega sevanja na modul. To se podaja ponavadi pri standardnih testnih pogojih. Svoje izkoristke imajo seveda tudi ostali elementi fotonapetostnega sistema, kot so celica, razsmernik... Mi smo izkoristek podali pri pogojih, ki so bili v času naših meritev in sicer smo ga izračunavali po izrazu 6.1. Raznih parametrov, kot so faktor zračne mase, kotna višina ali azimut sonca nismo vključevali v diplomsko nalogo, saj so bile vse meritve izvedene za vse module pri enakih pogojih.

$$\eta = \left(\frac{P_{izm} / A}{G} \right) \cdot 100(\%) \quad (6.1)$$

P_{izm} [W] – izmerjena moč posameznega modula

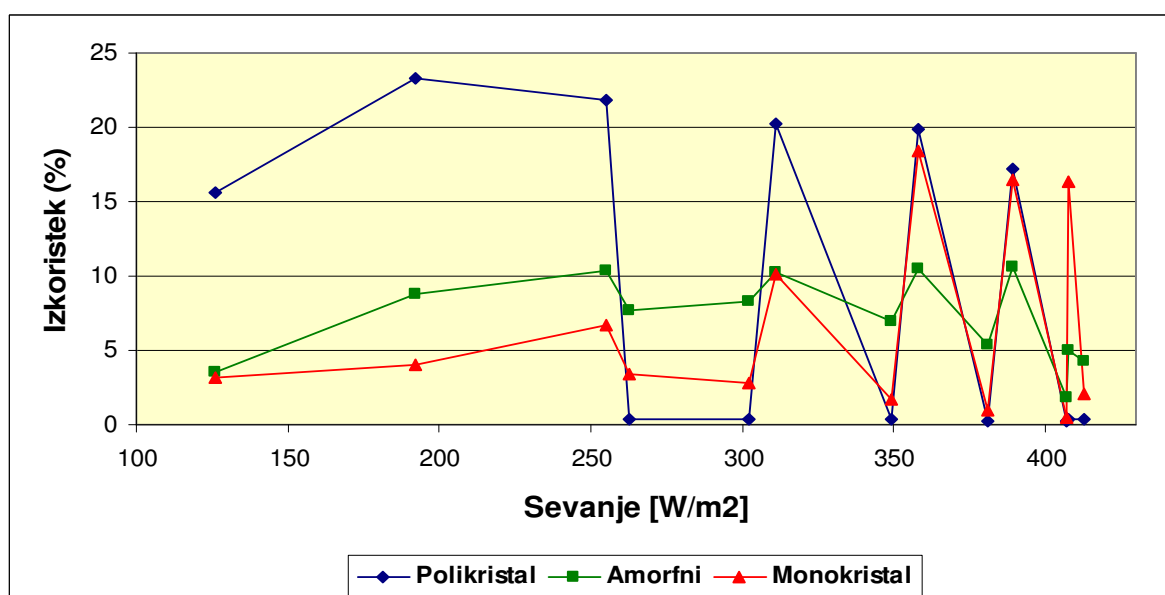
A [m²] – površina modula

G [W/m²] – sončno sevanje



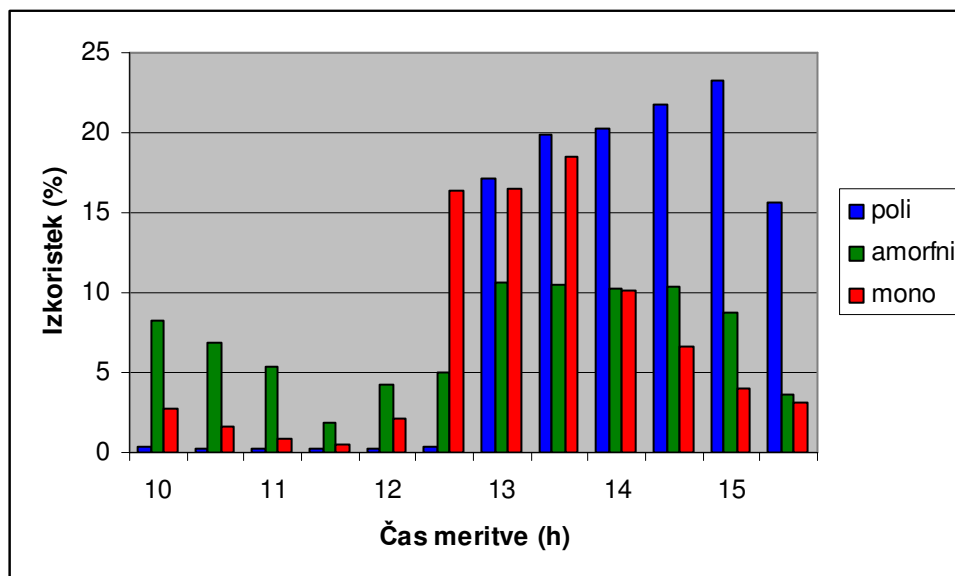
Slika 6.22 : Izkoristki posameznih modulov (aproksimativno)

Na **sliki 6.22** so podane vrednosti za izkoristke modulov aproksimativno. To pomeni, da smo izključili nekatere točke v katerih je zaradi vremenskih razmer (predvsem sence), prišlo do precejšnjih odstopanj.



Slika 6.23 : Izkoristki posameznih modulov v odvisnosti od sončnega sevanja

Na **sliki 6.23** imamo podoben prikaz izkoristkov, s tem da smo vključili prav vse točke meritev. Na tej sliki je moč opaziti točke delne osenčenosti modulov, saj sta tam polikristalni in monokristalni modul dajala zelo nizke rezultate. V teh meritvah, smo kot že omenjeno, najboljše rezultate dobili pri amorfnem modulu.



Slika 6.24 : Izkoristki posameznih modulov skozi celotno meritev

Kot je razvidno iz **slike 6.24** v začetnih nekaj meritvah zelo odstopa izkoristek amorfnega modula. To je posledica precejšnje osenčenosti vseh modulov v prvih petih meritvah (tudi do tri četrtine površine modula). Fotonapetostni moduli iz amorfnega silicija imajo precej ugodnejše karakteristike v primeru slabše osvetljenosti in delne osenčenosti. Kristalna modula sta bila zelo izenačena, nobeden od njiju pa ni dajal omembe vredne količine moči. V meritvi7 ob 12.30h, se je senca umikala z leve proti desni strani in sta tako amorfni kot polikristalni modul bila še osenčena, ko je bil monokristalni modul že popolnoma osenčen. Zato tam takšna razlika v izkoristku. V nekaj naslednjih meritvah so se za nekaj časa razmere stabilizirale, kar se vidi tudi v precej izenačenih vrednostih izkoristkov polikristalnega in monokristalnega modula. Najslabši izkoristek glede na svojo nazivno moč je imel amorfni modul. Za le-te so nasploh znani nekoliko nižji izkoristki. V zadnjih nekaj meritvah je bil monokristalni modul spet malenkost osenčen, kar pa se je zelo poznalo na njegovem izkoristku, precej bolj kot se je na začetnih meritvah na amorfnem modulu.

6.4.2 Primerjava moči modulov glede na ceno

Ker se na trgu pojavljajo vedno novejši fotonapetostni moduli, teh ki smo jih uporabili v naših testih ni več v redni prodaji. Zato smo njihove cene sorazmerno znižali. Okvirne cene za uporabljene module so :

- polikristalni modul: 3€/W
- amorfni modul: 2,5€/W
- monokristalni modul: 3,5€/W

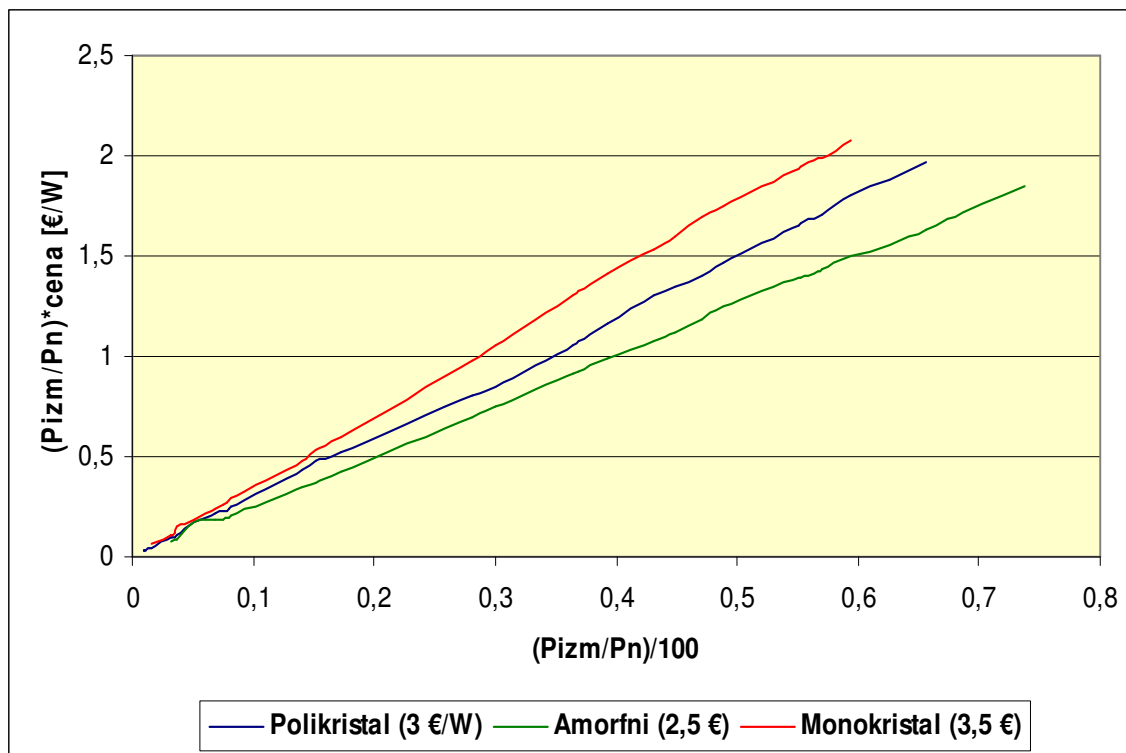
Ceno na en watt nazivne moči smo izračunavali z izrazom 6.2 :

$$\text{€/W} = \frac{P_{izm}}{P_n} \cdot (\text{cena modula €/W}) \quad (6.2)$$

P_{izm} [W] – izmerjena moč posameznega modula

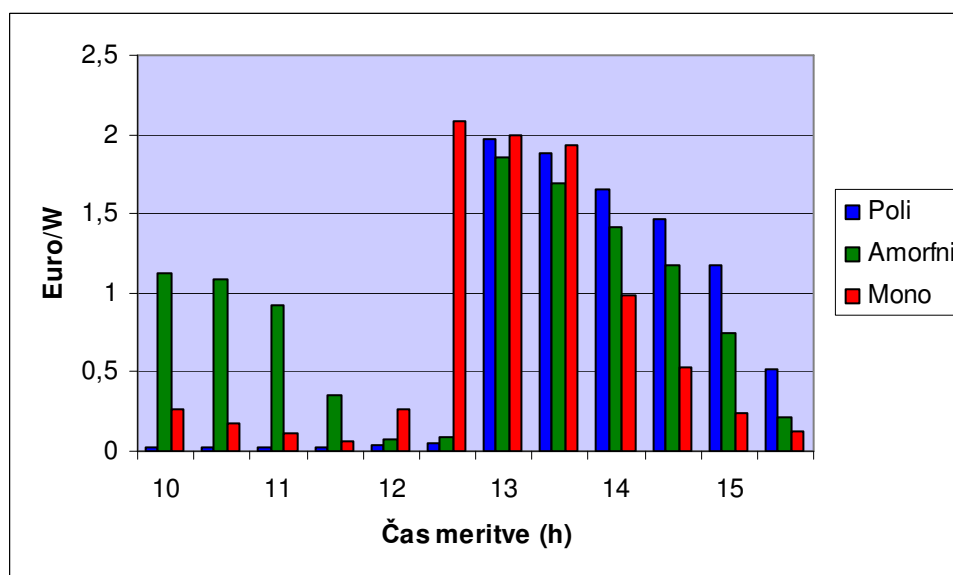
P_n [W] – nazivna moč modula

€/W – okvirna cena za 1W nazivne moči modula



Slika 6.25 : Primerjava izmerjene moči posameznih modulov napram ceni(aproksimativno)

Na **sliki 6.25** so aproksimativno prikazane primerjave izmerjenih moči modulov glede na ceno plačano za en watt nazivne moči modula



Slika 6.26 : Primerjava izmerjene moči posameznih modulov napram ceni

Če naredimo izračune in primerjavo samo pri meritvah kjer smo dobili najoptimalnejše rezultate lahko ugotovimo da so nam vsi trije moduli dajali zelo podobne rezultate. Pa vseeno, za odtenek je največ moči glede na plačano ceno za modul proizvajal monokristalni modul. Malenkost slabše, a zelo podobne rezultate sta nam dala amorfni in polikristalni modul, kot vidimo na **sliki 6.26**. Seveda je zopet pri meritvah s prisotno osenčenostjo najboljše rezultate dal amorfni modul, s tem tudi največ moči za ceno na watt.

6.4.3 Primerjava moči modulov glede na njihovo površino

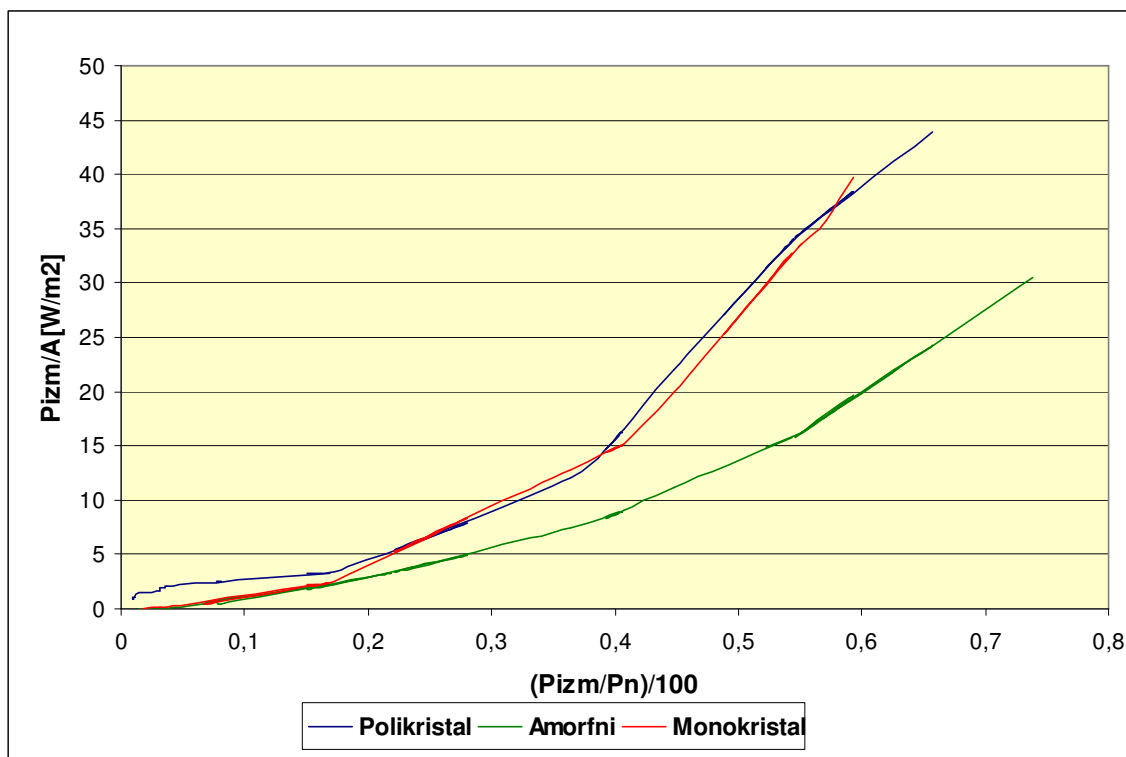
Želeli smo narediti tudi primerjavo med izmerjeno močjo modulov napram njihovi površini. Te vrednosti smo preračunavali z izrazom 6.3, kjer pa smo morali seveda vpeljati faktor (P_{izm}/P_n), ki nam je poenotil module zaradi različnih nazivnih moči.

$$W/m^2 = \frac{P_{izm}}{P_n} \frac{P_{izm}}{A} \quad (6.3)$$

P_{izm} [W] – izmerjena moč posameznega modula

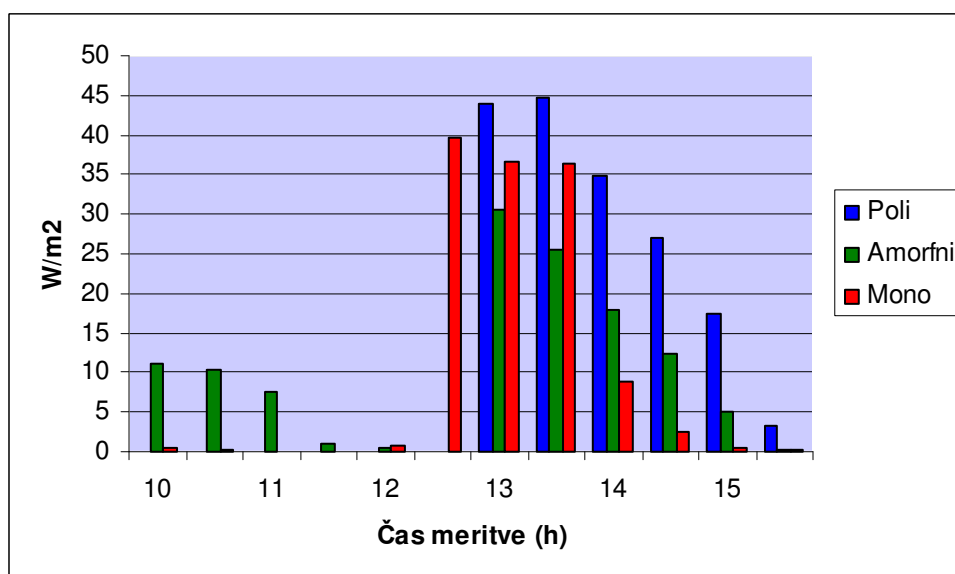
P_n [W] – nazivna moč modula

A [m²] – površina modula



Slika 6.27 : Primerjava izmerjene moči modulov glede na njihovo površino (aproximativno)

Na sliki 6.27 je aproksimativno prikazana primerjava izmerjenih moči glede na njihovo površino. Tudi tukaj je torej prikazana zvezna krivulja, brez meritev kjer je zaradi osenčenosti posameznih modulov prihajalo do precejšnjih odstopanj rezultatov.



Slika 6.28 : Primerjava izmerjene moči modulov glede na njihovo površino

Ko smo delali primerjavo izmerjene moči modulov glede na njihovo površino, smo ugotovili da je najboljše rezultate pokazal polikristalni modul (**slika 6.28**). Tukaj se je glede na prejšnje slabe rezultate zelo približal monokristalni modul, saj je ta vrsta modulov tudi poznana po tem da je nekako najboljša izbira, ko potrebujemo višjo izhodno moč pri manjši površini, torej ko smo omejeni s prostorom. Iz diagrama lahko vidimo, da sta si karakteristiki za monokristalni in polikristalni modul zelo podobni. Najslabše rezultate smo tukaj dobili pri modulu iz amorfnega silicija. Še enkrat omenjam, da smo relevantne primerjave lahko naredili le med meritvami, ko so bili vsi moduli osončeni. Ko so bili vsi moduli enako osončeni, je kot smo že prej omenili, precej boljši izkoristek imel prav amorfn modul. Zato je seveda tudi proizvajal največ moči glede na njegovo površino v tem času.

7 SKLEP

V današnjem svetu pokurimo veliko fosilnih goriv, ki imajo zelo slab vpliv na okolje. Ker pa so fosilna goriva količinsko omejena, jim seveda rastejo cene. V prihodnosti je rešitev v izkoriščanju naravnih virov energije, kot je recimo tudi Sonce. Fotonapetostni sistemi so zagotovo prava rešitev, saj lahko z njimi električno energijo pridobivamo neposredno iz Sonca. Energija pridobljena iz Sonca, tudi nima škodljivih vplivov na okolje kot energija pridobljena iz fosilnih goriv. Fotovoltaika je že nekaj časa ena najhitreje rastočih gospodarskih panog, tako v svetu kot pri nas. Kljub precejšnji začetni investiciji se za sončno elektrarno odloča vse več potrošnikov. V Sloveniji je v naslednjem desetletju (torej do leta 2020), predvidena rast kapacitete instalirane moči sončnih elektrarn na 550 MW, kar bi pomenilo že okoli 5% potrebne energije ob povprečni letni porabi 12.000GWh. Kar pa ni več zanemarljiva številka.

Fotonapetostni sistemi danes ponujajo več tipov fotonapetostnih modulov, ampak še vedno prednjačijo predvsem tri vrste modulov. To so moduli iz monokristalnega silicija, polikristalnega silicija in amorfne silicija (tankoplastni). Vsak tip modula ima seveda svoje prednosti in slabosti ob različnih variantah namestitve in potrebah potrošnika.

Mi smo si v diplomskem delu zadali nalogo, da testiramo prav te tri najpogosteje uporabljene tipe modulov v praksi. Tako smo ob danih pogojih merili njihove delovne karakteristike. V diagramih smo podali njihove izkoristke in izplen modulov glede na njihovo površino ter ceno. Ker so se nam vremenske razmere in osončenost modulov tekom meritev spreminjale, smo torej lahko dobili rezultate v različnih pogojih sončnega sevanja vendar še vedno identičnih za vse module za dano meritev.

Tukaj je potrebno omeniti da zaradi razmeroma kratkega časa testiranja (neprimeren letni čas, slabši vremenski pogoji, časovna omejitev), rezultati najbrž niso takšni kot bi bili, če bi se meritve izvajale v daljšem časovnem obdobju. Do manjših odstopanj je verjetno prišlo tudi zaradi pomanjkanja pyranometra pri meritvah, torej neposrednega merjenja sončnega sevanja na samih moduli. Na fakulteti je planirana nabava takšnega instrumenta, tako da se bodo lahko tovrstna testiranja fotonapetostnih modulov v prihodnje izvajala na še višjem

nivoju. Potrebo po tej vrsti testiranja sončnih modulov, sem v mnogih pogovorih z izvajalci sončnih elektrarn vsekakor zaznal.

Rezultati naših meritev pa so seveda tudi pokazatelj nekaterih rezultatov, v nekaterih točkah morda tudi nepričakovanih in ne čisto v skladu s podatki proizvajalcev.

Tako smo ugotovili da je ob enakem delnem osenčenju vseh modulov, daleč najboljše rezultate dajal amorfni modul, medtem ko sta ostala modula dajala precej izenačene a zelo majhne izkoristke. To daje modulom iz amorfnega silicija veliko prednost pred ostalima dvema pri postavljanju sončne elektrarne na lokacijah, kjer čez leto lahko pričakujemo precejšnjo osenčenost modulov. Ko so bili vsi moduli popolnoma osončeni, pa je polikristalni modul dajal nekoliko boljše rezultate kot monokristalni, medtem ko je amorfni modul dajal skoraj polovico nižje izkoristke. Ti podatki se precej skladajo z navedbami proizvajalcev, s tem da je pri nas modul iz polikristalnega silicija dajal še nekoliko boljše rezultate od pričakovanih. Ta podatek govori v podporo trendu pri gradnji sončnih elektrarn, ki gre predvsem v smeri uporabe polikristalnih fotonapetostnih modulov. Konec koncev je naš edini proizvajalec fotonapetostnih modulov BISOL, specializiran za proizvodnjo modulov prav iz polikristalnega silicija.

Omeniti velja tudi da je modul iz monokristalnega silicija ob le mali osenčenosti (dve celici), dajal občutno slabše rezultate kot pri popolni osenčenosti, kar je še en pokazatelj tega, da je osenčenost največji sovražnik pri pridobivanju energije iz fotonapetostnih modulov.

Podali smo tudi podatke o izplenu modulov glede na njihovo ceno. Cene fotonapetostnih modulov se skoraj dnevno spreminjajo, tako da smo ker pač nismo uporabljali novih modulov, vzeli okvirne cene na watt nazivne moči. Tu smo opazili, da vsi trije moduli dajejo precej podobne rezultate napram njihovi maloprodajni ceni.

Pri meritvah izmerjene moči modulov glede na njihovo površino, smo dobili precej slabše rezultate pri modulu iz amorfnega silicija kot pri ostalih dveh. Monokristalni in polikristalni modul sta tukaj dajala precej podobne rezultate, a tudi tukaj je bil slednji nekoliko boljši.

Iz meritev je torej moč razbrati, da ima vsak modul svoje prednosti in slabosti v nekaterih določenih pogojih, vsekakor pa je povprečno gledano 'zmagovalec' naših meritev, sončni modul iz polikristalnega silicija.

VIRI IN LITERATURA

- [1] D.Lenardič, *Fotonapetostni sistemi, priročnik, Fakulteta za elektrotehniko Ljubljana, Ljubljana 2009*
- [2] V. Martinčič, M. Koprivšek, *Fotonapetostni sistemi, Elektrotehniška revija, 2, (2009), str. 47-52*
- [3] *Izkoriščanje sončne energije za proizvodnjo električne energije s pomočjo fotonapetostnih sistemov – slovenski priročnik, Fakulteta za elektrotehniko, 2004*
- [4] *A Vision for Photovoltaic Technology for 2030 and Beyond, European Commision DG RTD, 2004.*

Medmrežje :

- [5] : <http://www.pvresources.com/si/fotovoltaika.php>
- [6] : <http://www.pvresources.com/si/soncnecelice.php>
- [7] : <http://sl.wikipedia.org/wiki/Pyranometer>
- [8] : <http://www.pvresources.com/si/moduli.php>
- [9] : <http://www.pvresources.com/si/uporaba.php>
- [10] : <http://www.pvresources.com/si/lokacija.php>
- [11] : <http://www.arso.gov.si/cd/klima1/Zaslon/Podnebje.html>
- [12] : http://sl.wikipedia.org/wiki/Geografija_Slovenije#Podnebje
- [13] : <http://www.soncna-elektrarna.net/fotovoltaika>
- [14] : <http://www.google.si/#qfotovoltaika+sunlrradiance>
- [15] : <http://www.erevija.com/>
- [16] : <http://www.pv-platforma.si/>
- [17] : <http://www.pvresources.com/en/standards.php>
- [18] : <http://www.pv.fe.uni-lj.si/>
- [19] : http://lsd.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm
- [20] : <http://cienciaviva.pt/rede/energija>
- [21] : http://erevija.com/clanek/36/Ogrevanje_s_soncem

UNIVERZA V MARIBORU
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
(ime fakultete)

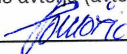
IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE VERZIJE DIPLOMSKEGA DELA IN
OBJAVI OSEBNIH PODATKOV AVTORJA

Ime in priimek avtorja (avtorice): Aleš Tomažič
Vpisna številka: 93352764
Študijski program: FERI-E UNI MOČNOSTNA ELEKTROTEHNIKA
Naslov diplomskega dela: PRIMERJAVA DELOVNIH KARAKTERISTIK RAZLIČNIH
FOTONAPETOSTNIH MODULOV PRI ENAKIH POGOJIH SONČNEGA SEVANJA
Mentor: Josip Voršič
Somentor: Gorazd Štumberger

Podpisani-a Aleš Tomažič izjavljam, da sem za potrebe arhiviranja oddal-a elektronsko verzijo diplomskega dela v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Diplomsko delo sem izdelal-a sam-a ob pomoči mentorja. V skladu s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 16/2007) dovoljujem, da se zgoraj navedeno diplomsko delo objavi na portalu Digitalne knjižnice Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija diplomskega dela je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal-a za objavo v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Podpisani-a izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum zagovora, naslov zaključnega dela) na spletnih straneh in v publikacijah UM.

Kraj in datum:
Maribor, 17.03.2010

Podpis avtorja (avtorice):




Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17
2000 Maribor

IZJAVA O USTREZNOSTI DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani mentor JOSIP VORŠIČ izjavljam, da je
(ime in priimek mentorja)

študent ALES TOMAŽIČ izdelal diplomsko
(ime in priimek študenta-tke)

delo z naslovom: PRIMERJAVA DELOVNIH KARAKTERISTIK

RAZLIČNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV PRI ENAKIH POGOJIH
(naslov diplomskega dela) SONČNEGA SEVANJA

v skladu z odobreno temo diplomskega dela, Navodili o pripravi diplomskega dela in
mojimi navodili.

Datum in kraj:

22.3.2010, MARIBOR

Podpis mentorja:

