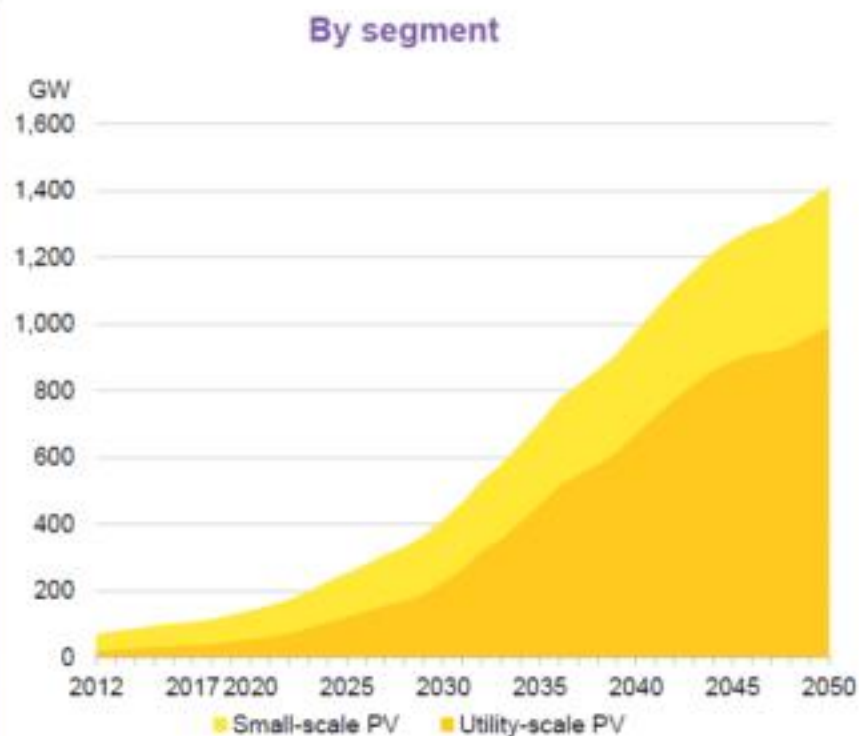
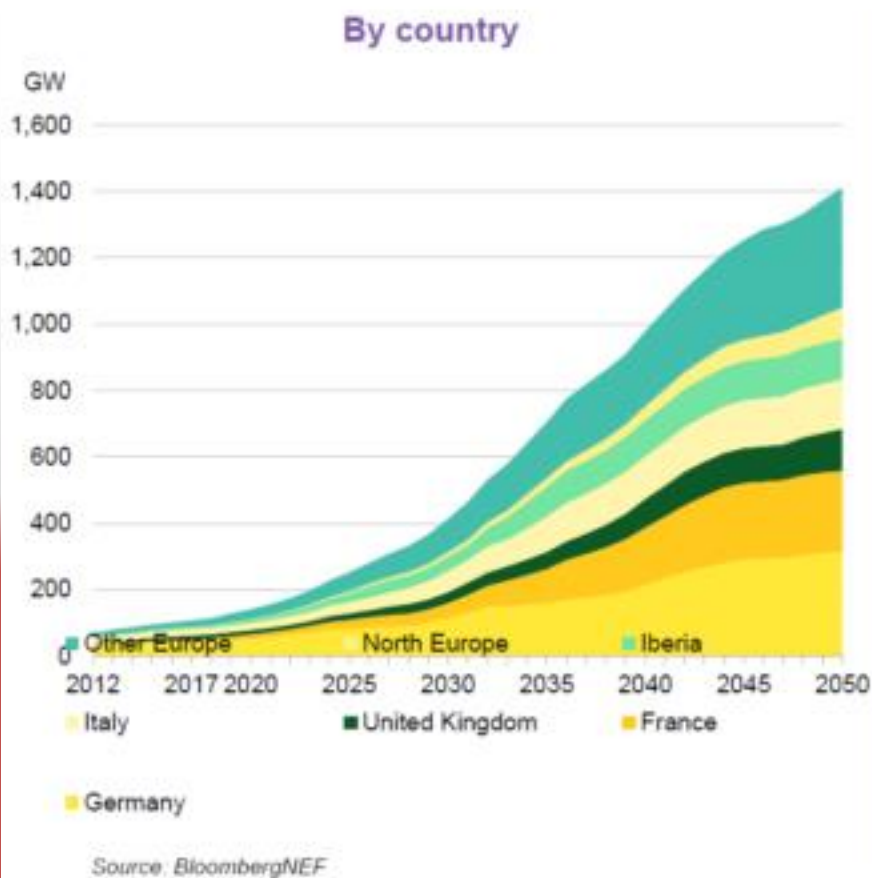


Solarna energetika

Cumulative PV capacity installed in Europe



< 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 > kWh/m²

Solarna energetika

Masa	$M_s = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Prečnik	$D_s = 1,39 \cdot 10^6 \text{ km}$
Površinska temperatura	$T_p = 5700 \text{ }^\circ\text{C}$
Snaga zračenja sa površine	$S_I = 64 \text{ MW/m}^2$
Udaljenost od Zemlje	$d_{(S,Z)} = (147 \div 152) \cdot 10^6 \text{ km}$
Luminoznost	$L = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$

- Snaga Sunčevog zračenja (Luminoznost):

$$P(S) = L = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

- Godišnja energija Sunčevog zračenja:

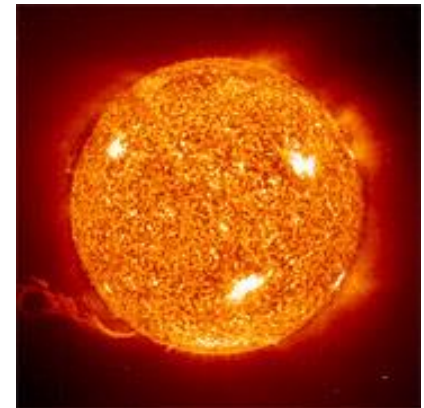
$$EN(S) = 3,36 \cdot 10^{30} \text{ Wh/god}$$

- Snaga Sunčevog zračenja na površini Zemljine atmosfere:

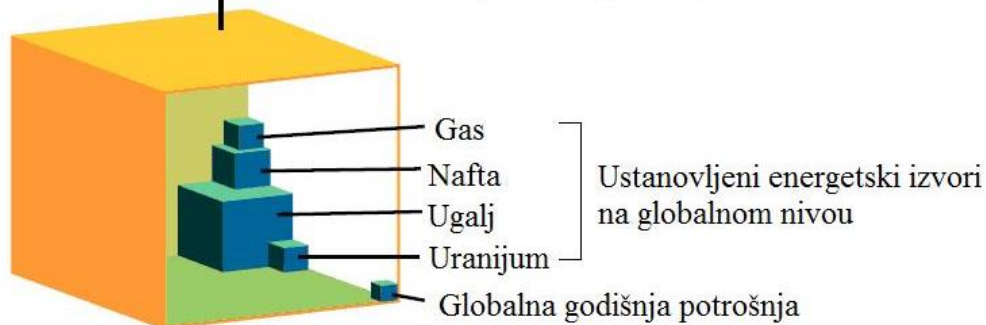
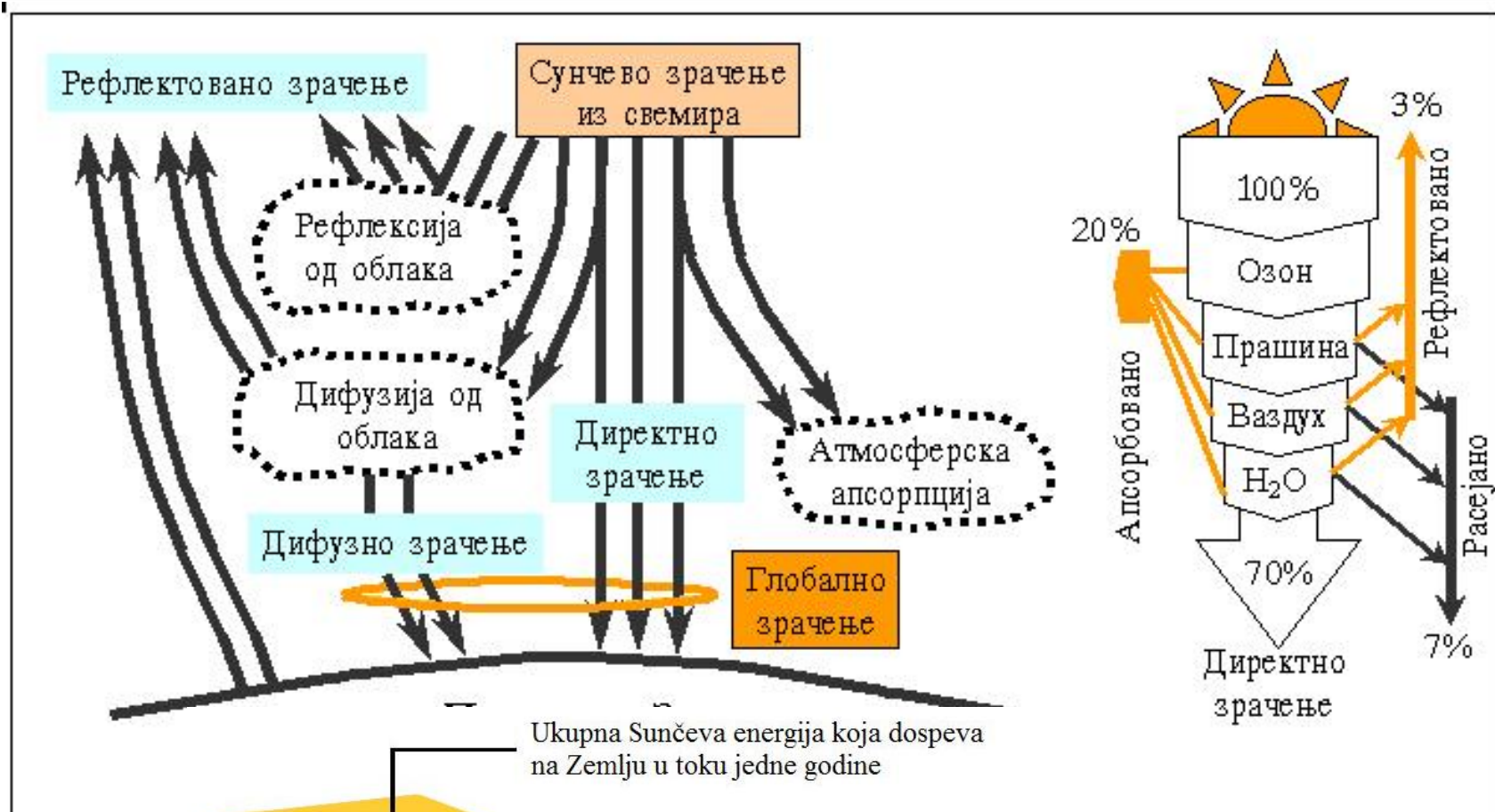
$$P(S \rightarrow AZ) = 0,5 \cdot 10^{-9} P(S) = 1,73 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

- Godišnja energija Sunčevog zračenja koju prihvata Zemlja sa atmosferom

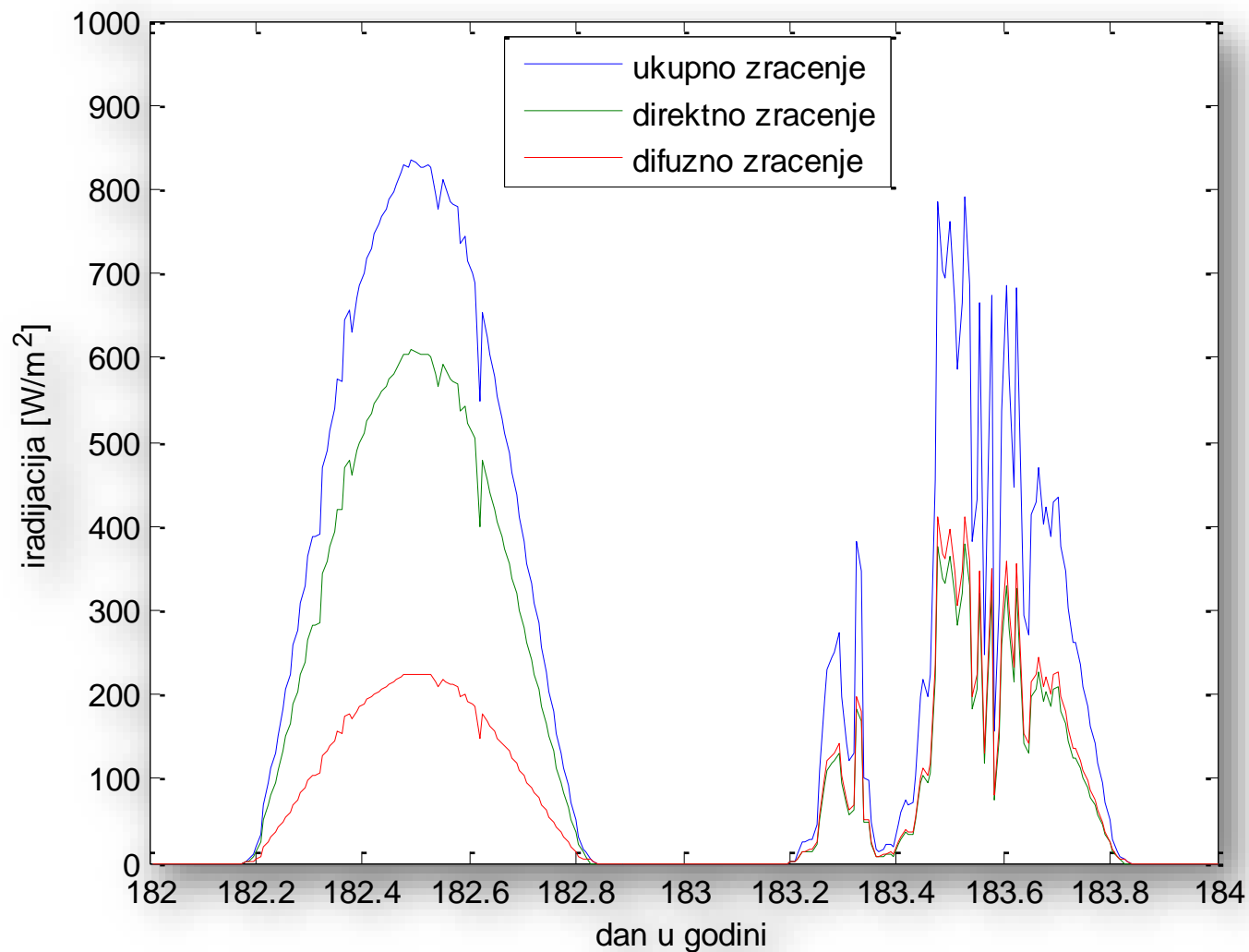
$$E(S \rightarrow AZ, Z) = 10^{21} \text{ Wh/god}$$



Sunčev zračenje na Zemlji

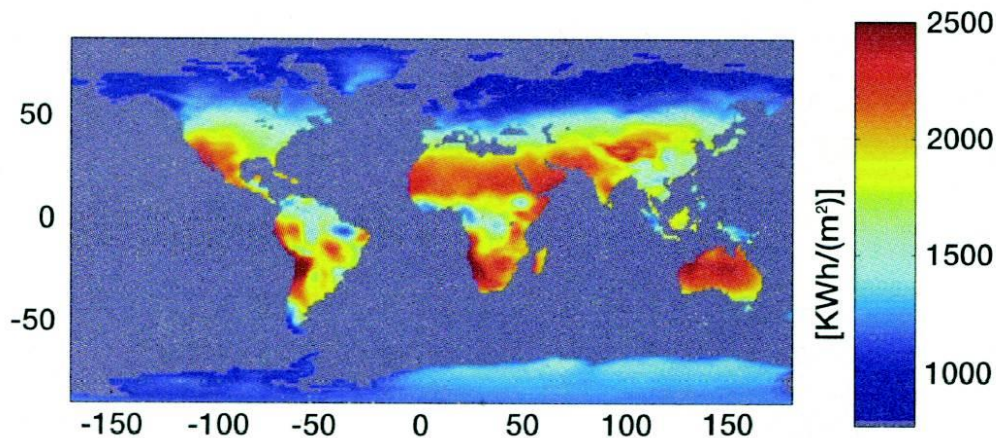


Sunčev zračenje na Zemlji



Sunčev zračenje na Zemlji

- Godišnja proizvodnja električne energije u svetu: $16 \cdot 10^{15}$ Wh/god
- Snaga Sunčevog zračenja na lokacijama blizu ekvatora: 250 W/m^2
- Moderni fotonaponski paneli mogu proizvesti 160 kWh/m^2
- Za generisanje $16 \cdot 10^{15}$ Wh/god neophodna površina pod panelima je 100000 km^2 (6 krugova prečnika po 146 km)



Osnovni načini korišćenja energije Sunca:

- Fotonaponska konverzija solarne energije
- Toplotna konverzija solarne energije



Sunčevo zračenje na Zemlji

- **Iradijacija** [W/m^2] – predstavlja snagu Sunčevog zračenja po jedinici površine
- **Insolacija** [Wh/m^2] – predstavlja količinu solarne energije koja je apsorbovana na određenoj površini u toku određenoj vremena
- **Solarna konstanta** – predstavlja srednju godišnju iradijaciju na gornjoj granici Zemljine atmosfere (srednja vrednost ekstraterestričkog solarnog fluksa):

$$SC=1367 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (1377 \text{ W}/\text{m}^2)$$

- U gornjim slojevima atmosfere prosečna vrednost iradijacije je $342 \text{ W}/\text{m}^2$ zbog loptastog oblika i rotacije Zemlje
- Najveća iradijacija na Zemljinoj površini iznosi oko $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ kada se Sunce nalazi u zenitu (pri čistoj atmosferi i vedrom danu) – **jedno sunce**
- Prosečna vrednost iradijacije na površini Zemlje je $230 \text{ W}/\text{m}^2$
- Potencijalna energija zračenja za Srbiju iznosi oko $2500 \text{ kWh}/\text{m}^2$ godišnje, a stvarna oko $1270 \text{ kWh}/\text{m}^2$ godišnje



Spektar sunčevog zračenja

- Energija jednog kvanta (fotona) elektromagnetnog zračenja:

	iradijacija I (W/m ²)	srednja energija fotona (eV)
van atmosfere	1367	1.48
na površini mora– Sunce u zenitu	1060	1.32
na površini mora– Sunce 20° iznad horizonta	750	1.20
na površini mora– Sunce 20° iznad horizonta, vazduh vlažan	600	1.18
na površini mora– oblačno	100	1.44

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} d\lambda$$

$$I = \int_0^{\infty} P_{\lambda} d\lambda$$



Sunčevo zračenje na Zemlji

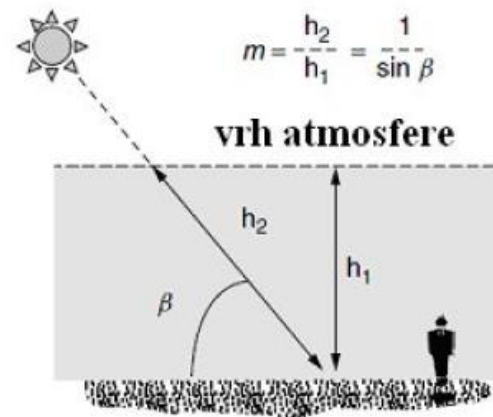
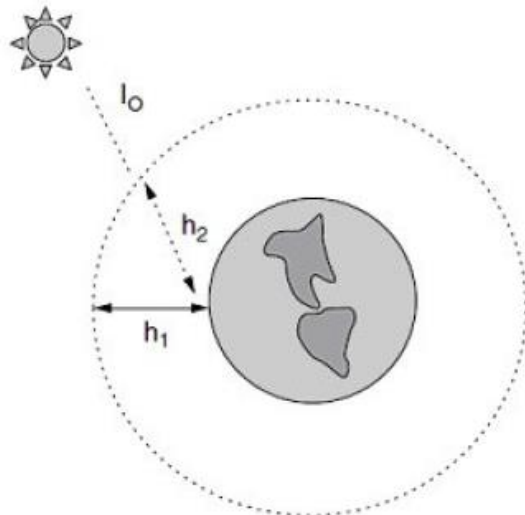
- Koeficijent vazdušne mase (AM – Air Mass) pokazatelj debljine atmosfere, tj. putanje kroz atmosferu kroz koju prolazi direktan Sunčev zrak

$$m = AM = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\sin \beta}$$

h_1 – dužina puta zraka kroz atmosferu kada je Sunce u zenitu

h_2 – dužina puta zraka kroz atmosferu do površine Zemlje

β – altitudni ugao Sunca



Objašnjenje koeficijenta vazdušne mase

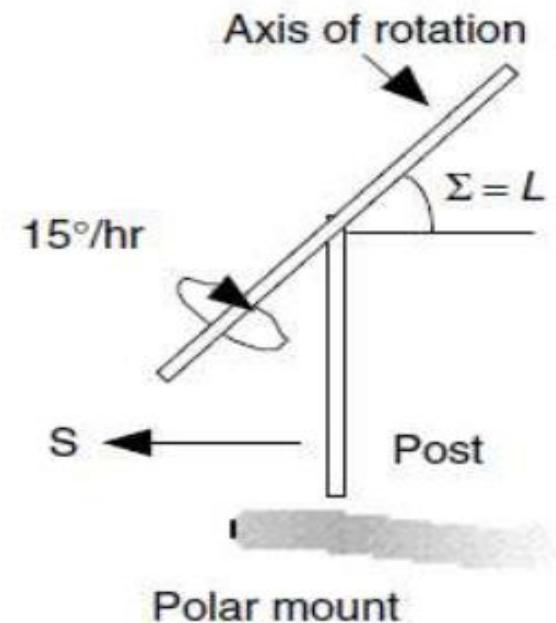
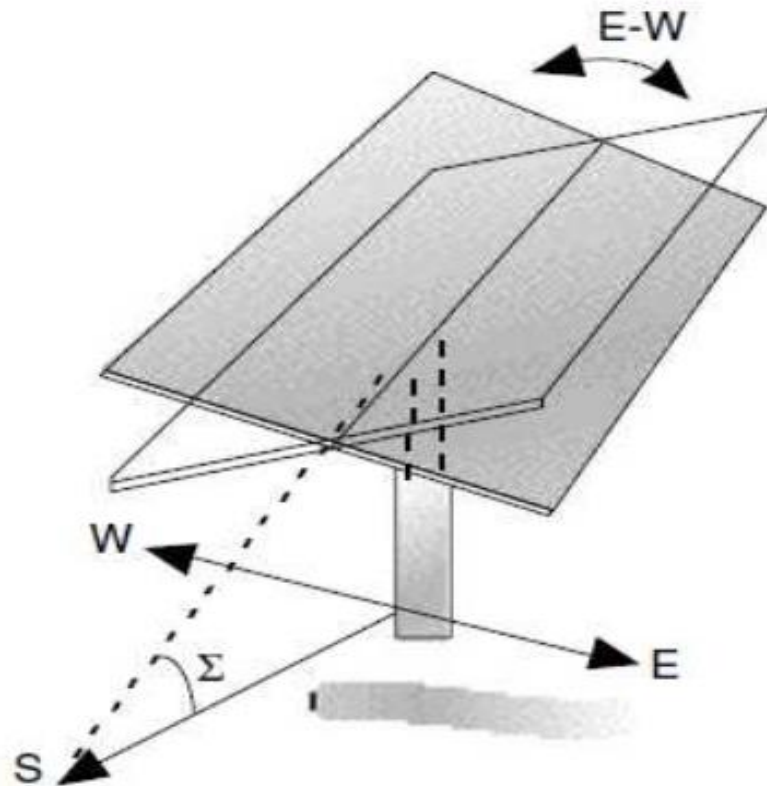


Upadni uglovi zračenja

Upadni ugao θ između direktnog zračenja i normale na kolektor ...

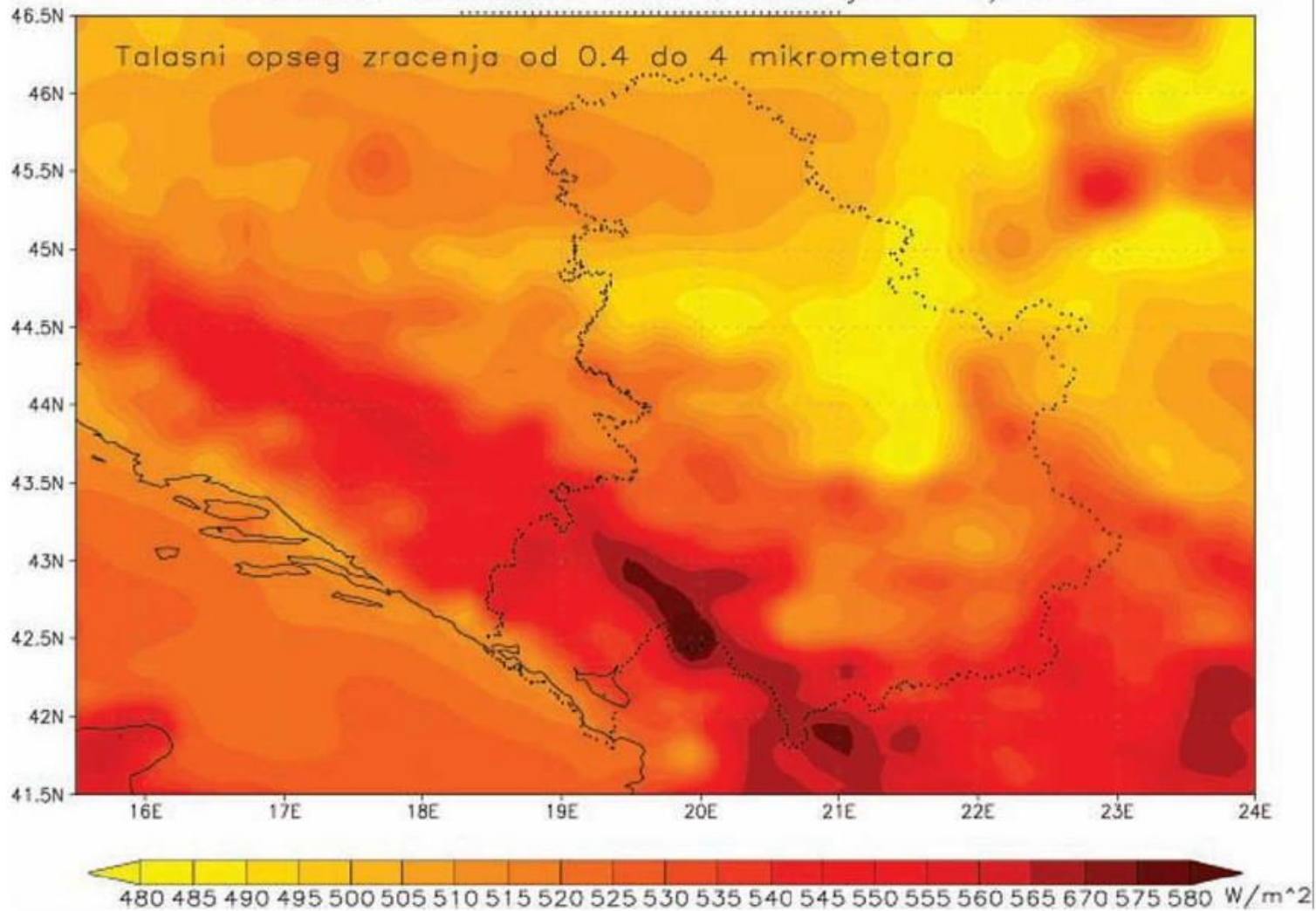
Azimut kolektora ϕ_c , nagib (*tilt*) kolektora

Σ solarni azimut ϕ_s , visinski ugao β ...



Merenje

Dolazno kratkotalasno zracenje :: W/m^2

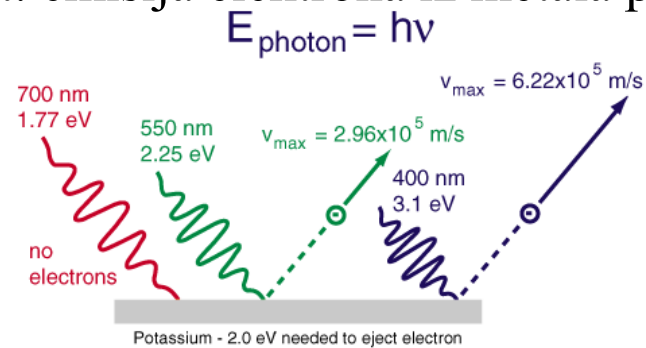


žni za



Fotonaponska konverzija solarne energije

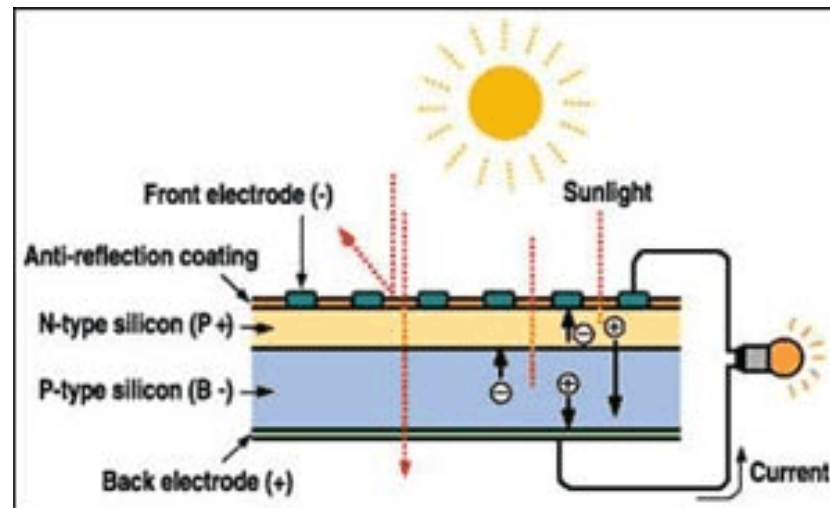
- fotoelektrični efekat: emisija elektrona iz metala pod dejstvom svetlosti



Photoelectric effect

Fotoelektrični efekat na primeru materijala od kalijuma

- fotonaponski efekat: stvaranje napona (struje) u materijalima pod dejstvom svetlosti

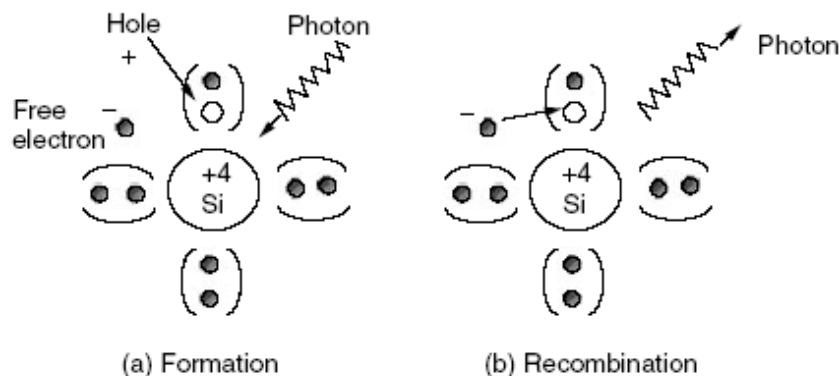


Fotonaponski efekat u poluprovodničkom materijalu



Fotonaponska konverzija solarne energije

- foton koji ima energiju veću od 1.12 eV može osloboditi elektron
- slobodan elektron se može rekombinovati sa šupljinom (LEDs)
- kretanje elektrona i šupljina u poluprovodniku



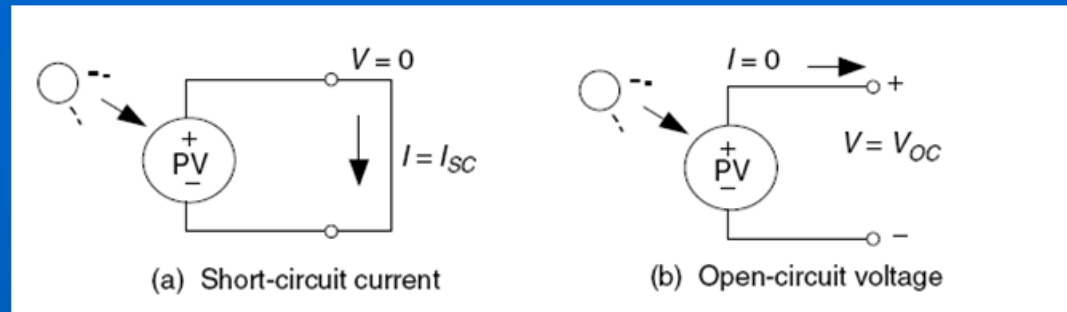
Formiranje para elektron šupljina i rekombinacija

Energetske barijere poluprovodnika i kritične talasne dužine fotona koje utiču na efikasnost fotonaponskog materijala

Fotonaponski materijal	Si	GaAs	CdTe	InP
Energetska barijera (eV)	1.12	1.42	1.5	1.35
Talasna dužina (μm)	1.11	0.87	0.83	0.92

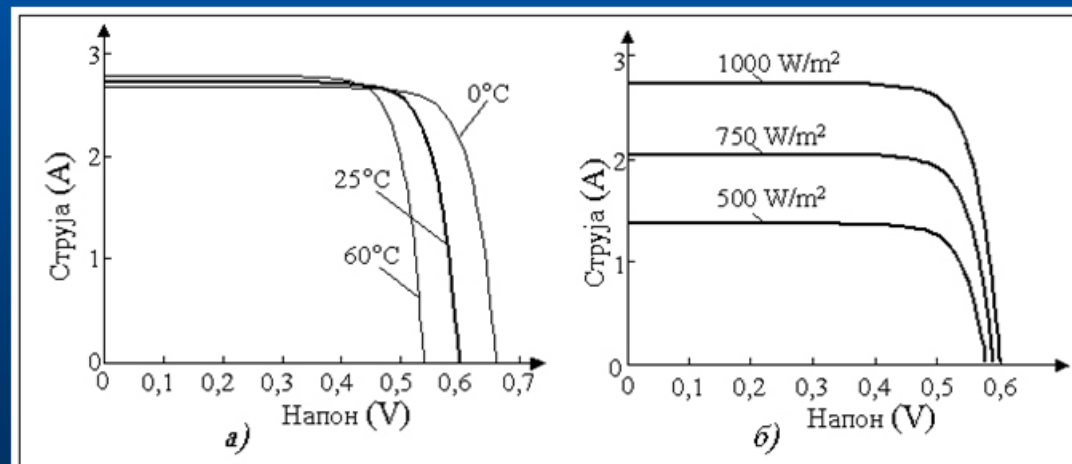


Fotonaponska konverzija solarne energije



Slika 16: Fotonaponska ćelija u kratkom spoju i otvorenom kolu

$$0 = I_{sc} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \Rightarrow V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$

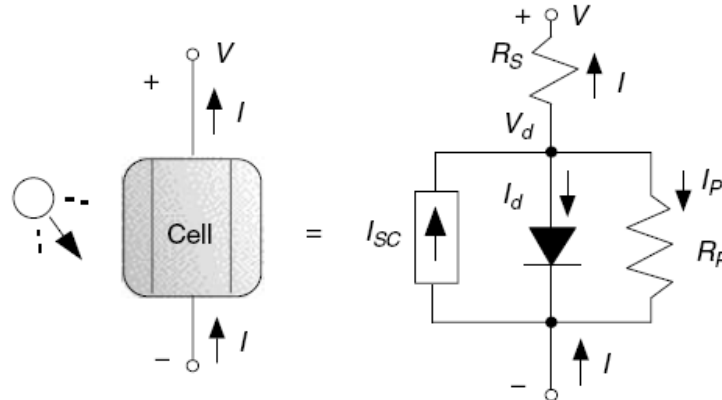


Slika 17: Uticaj temperature i iradijacije na karakteristiku fotonaponske ćelije

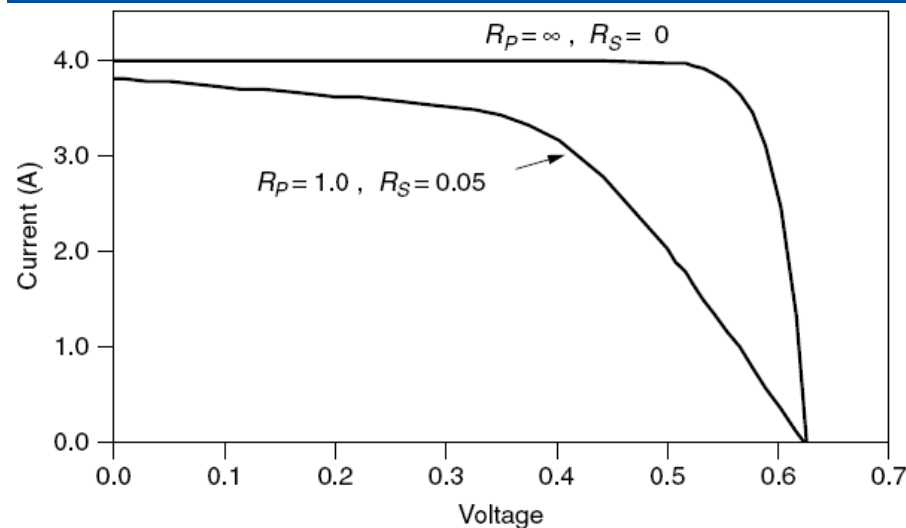


Fotonaponska konverzija solarne energije

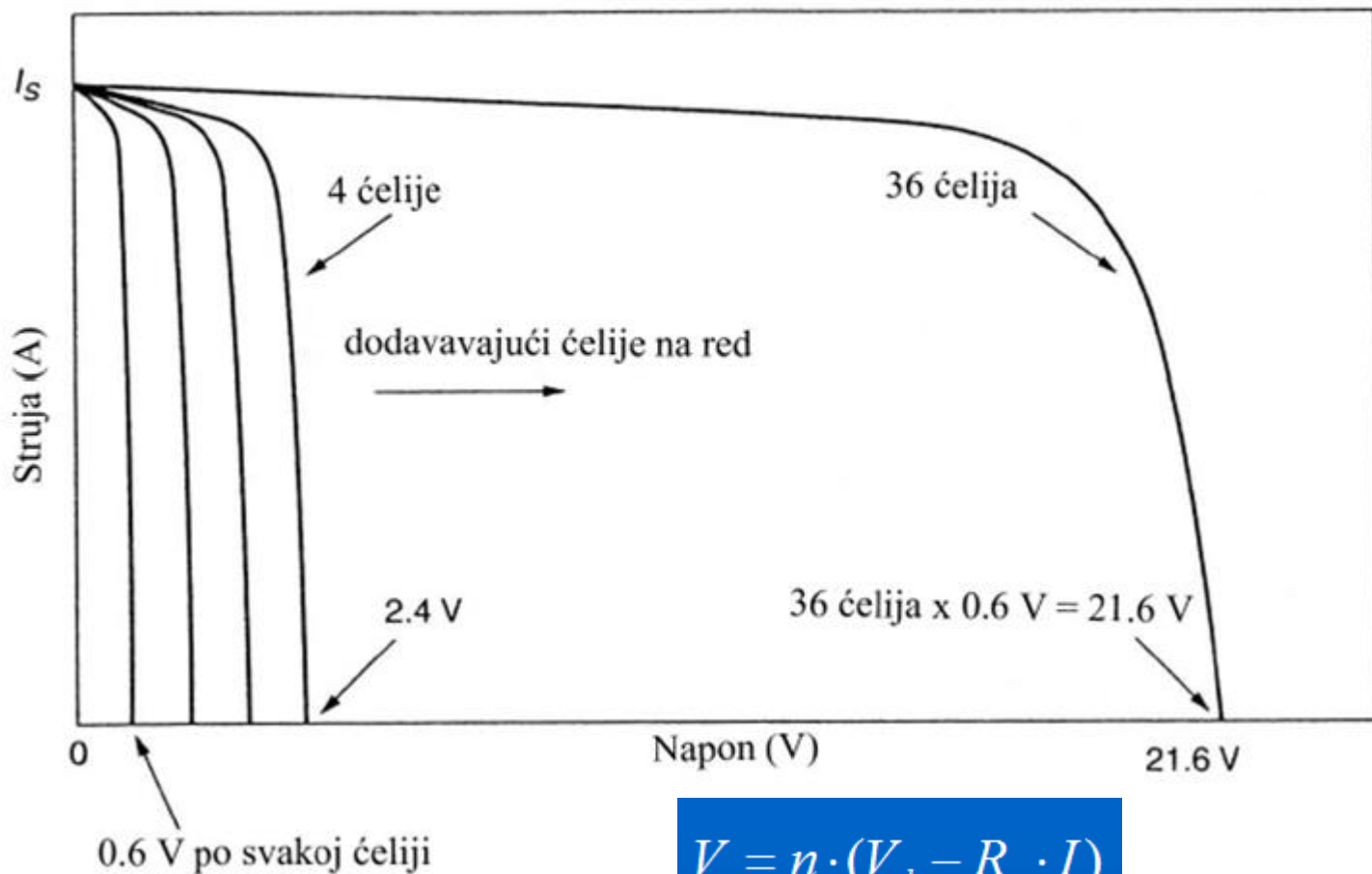
- Realna fotonaponska ćelija u sebi ima otpore koji su redno i paralelno vezani pa važi:



$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V + R_s \cdot I)}{kT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p}$$



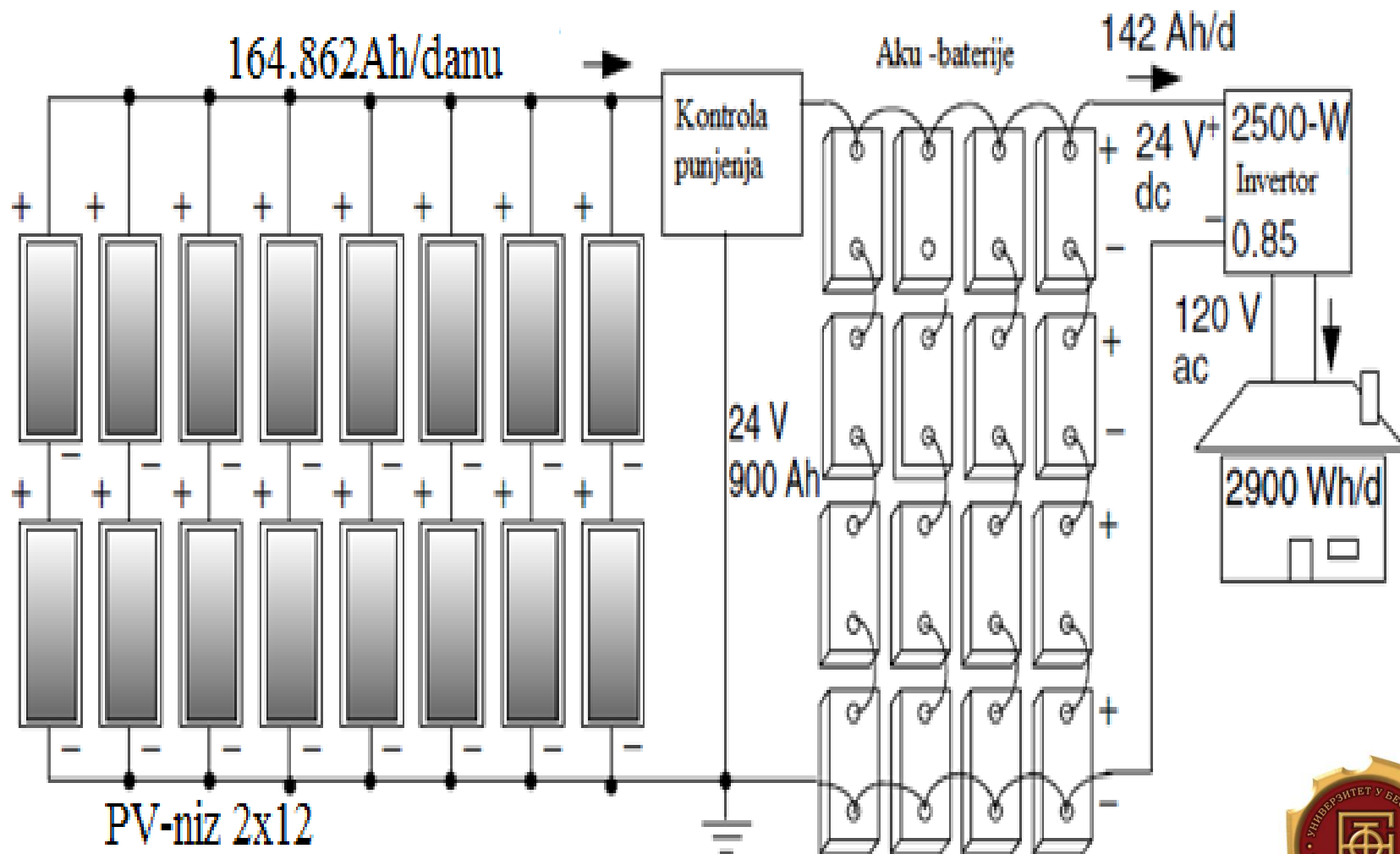
Fotonaponski moduli i paneli



- U-I karakteristika fotonaponskog modula



Fotonaponski moduli i paneli



Fotonaponska konverzija solarne energije

- koeficijent efikasnosti i ostali tehnički parametri u realnim eksploatacionim uslovima se razlikuju od STC
- temperatura ćelije u fotonaponskom modulu:

$$T_{PV} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^{\circ}}{0.8} \right) \cdot I_C$$

- **NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)** je temperatura ćelije u fotonaponskom modulu pri:
 - temperaturi ambijenta od **20⁰**
 - solarnoj iradijaciji od **0.8 kW/m²**
 - brzini vetra od **1m/s**
- *T_{amb}* – temperatura ambijenta
- *I_C* – solarna iradijacija

$$T_{PV} = T_{amb} + \gamma \left(\frac{I_C}{1 \text{ kW/m}^2} \right)$$

$$\gamma = 25^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta V_{OC} = -0.37\% / ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta I_{SC} = 0.05\% / ^{\circ}\text{C}$$

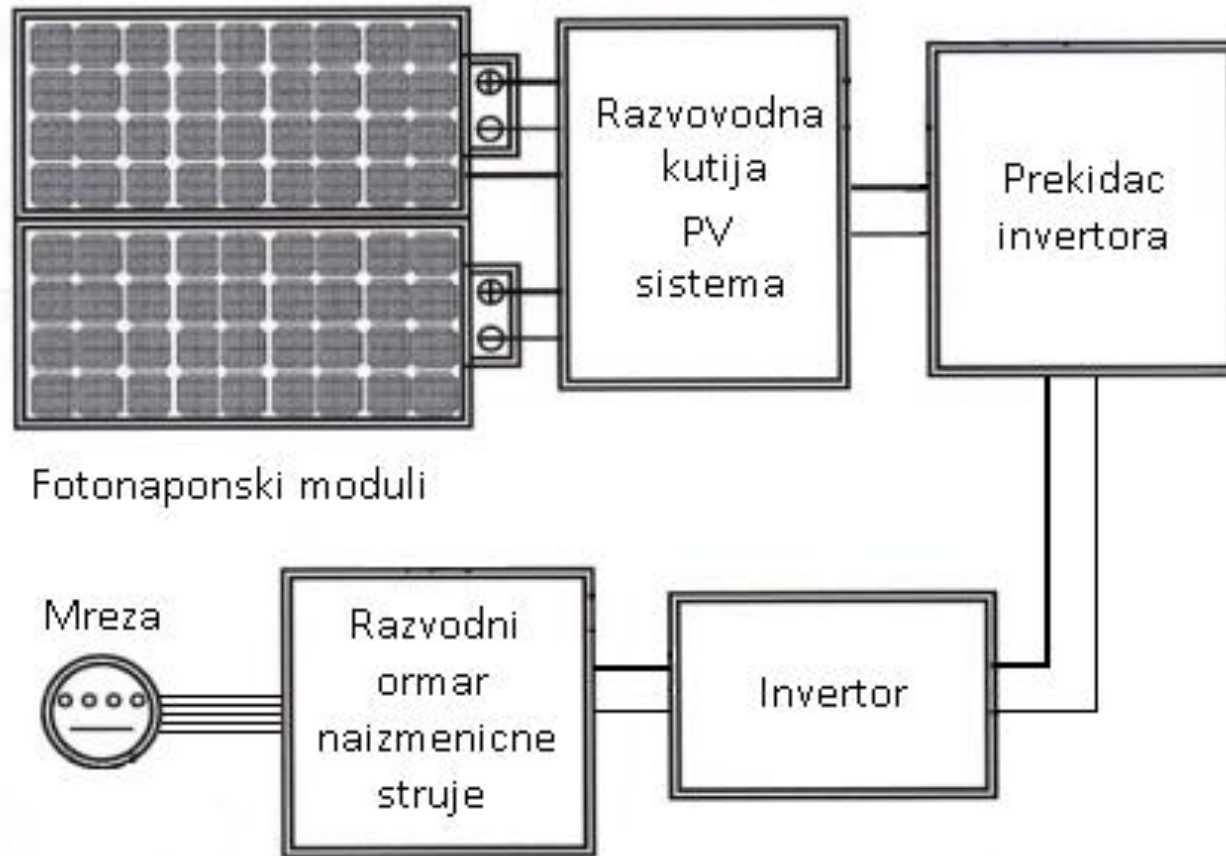
$$\Delta P_{DC} = -0.5\% / ^{\circ}\text{C}$$

$$V_{OC} = V_{OC,STC} \left(1 + \Delta V_{OC} (T_{PV} - 25^{\circ}) \right)$$

$$I_{SC} = I_{SC,STC} \left(1 + \Delta I_{SC} (T_{PV} - 25^{\circ}) \right)$$

$$P_{DC} = P_{DC,STC} \left(1 + \Delta P_{DC} (T_{PV} - 25^{\circ}) \right)$$

Fotonaponski sistemi



- Samostalni sistemi
- Hibridni sistemi
- Povezani na distributivnu mrežu



Fotonaponski sistemi

$$\text{Energija (kWh/god)} = P_{ac} \text{ (kW)} \cdot CF \cdot 8760 \text{ (h/god)}$$

PV – nominalna snaga (ac)

CF – Capacity Factor

$$8760 = 24 \text{ (h/dan)} \cdot 365 \text{ (dan/god)}$$

$$CF = (\text{h/dan "sunca u piku"}) / (24 \text{ h/dan})$$

Neto merenje

- Ovakav ugovor, kada se brojilo okreće u oba smera, naziva se neto merenje
- Račun domaćinstva za energiju je samo taj neto iznos, koji PV-sistem nije u mogućnosti da isporuči



Primer

PV - modulima treba zameniti 3600 kWh/god potrošnje jedne kuće. Koliko kW (dc)

panela treba kupiti i kolika je površina za to potrebna?

Pretpostaviti:

Faktor kapaciteta $CF=0,2375$,

Koeficijent efikasnosti konverzije $\eta_{con}=0,75$,

Koeficijent efikasnosti kolektora $\eta_{col}=0,125$.

$$\text{Energija (kWh/god)} = P_{ac} \text{ (kW)} \cdot CF \cdot 24 \cdot 365 \text{ (h/god)}$$

$$P_{ac} = 3600 / (0,2375 \cdot 24 \cdot 365) = 1,73 \text{ kW}$$

- $\eta_{con}=0,75$ (dc/ac efikasnost invertora, uticaj temperature, prašina)

$$P_{dc} = P_{ac} / \eta_{con} = 1,73 / 0,75 = 2,3 \text{ kW}$$

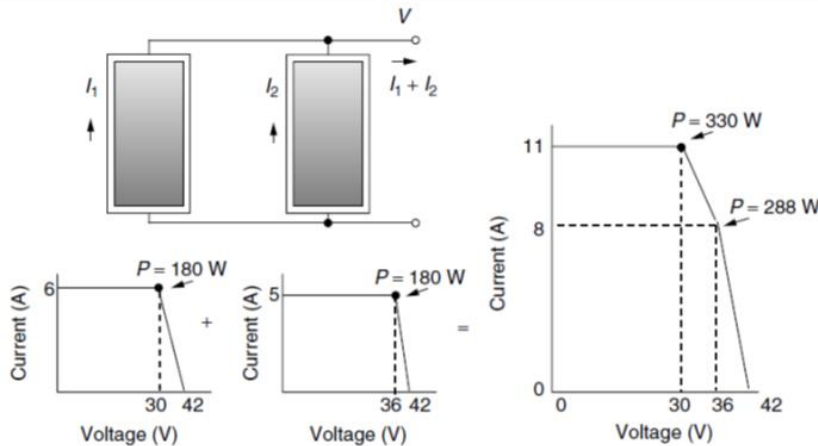
- $\eta_{col}=0,125$ (efikasnost monokristalnih modula)

$$P_{dc} = 1 \text{ (kW/m}^2 \text{ insolacije)} \cdot A \text{ (m}^2\text{)} \cdot \eta_{col}$$

$$A = 2,3 / (1 \cdot 0,125) = 18,4 \text{ m}^2$$



Fotonaponski sistemi



$$P_{DC(STC)} = N \cdot P_{DC(STC)1}$$

$$P_{AC} = P_{DC(STC)} \cdot \eta_Z \cdot \eta_N \cdot \eta_T \cdot \eta_{inv} \cdot \left(\frac{I_c}{1000 \text{ W/m}^2} \right)$$

$$T_{PV} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) \cdot I_{PV}$$

$$P_{DC(PTC)} = P_{DC(STC)} \cdot \eta_T = P_{DC(STC)} \left(1 - 0.005(T_{PV} - 25^{\circ}) \right)$$

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} 100\%$$

Manufacturer:	Xantrex	Xantrex	Xantrex	Sunny Boy	Sunny Boy
Model:	STXR1500	STXR2500	PV 10	SB2000	SB2500
AC power:	1500 W	2500 W	10,000 W	2000 W	2500 W
AC voltage:	211–264 V	211–264 V	208 V, 3Φ	198–251 V	198–251 V
PV voltage range	44–85 V	44–85 V	330–600 V	125–500 V	250–550 V
MPPT:					
Max input voltage:	120 V	120 V	600 V	500 V	600 V
Max input current:	—	—	31.9 A	10 A	11 A
Maximum efficiency:	92%	94%	95%	96%	94%



Fotonaponski sistemi

- dnevna električna energija koja se predaje elektrodistributivnom sistemu izražena preko srednje dnevne insolacije, površine i prosečne dnevne efikasnosti panela:

$$W_d[\text{kWh}] = \bar{I}_{\text{PV}}[\text{kWh/m}^2] \cdot A[\text{m}^2] \cdot \eta_{\text{av}} \quad (5)$$

- snaga PV sistema pri iradijaciji od "jednog sunca":

$$P_{\text{AC}}[\text{kW}] = 1[\text{kW/m}^2] \cdot A[\text{m}^2] \cdot \eta_{1\text{-sunce}} \quad (6)$$

- dnevna električna energija koja se predaje elektrodistributivnoj mreži izražena preko broja sati "zenita sunca", uz pretpostavku da je $\eta_{\text{av}} = \eta_{1\text{-sunce}}$:

$$W_d[\text{kWh}] = P_{\text{AC}}[\text{kW}] \cdot \frac{\bar{I}_{\text{PV}}[\text{kWh/m}^2]}{1[\text{kW/m}^2]} = P_{\text{AC}}[\text{kW}] \cdot h_z[\text{broj sati "zenita sunca"}] \quad (7)$$

- dnevna električna energija koja se predaje elektrodistributivnoj mreži izražena preko faktora kapaciteta:

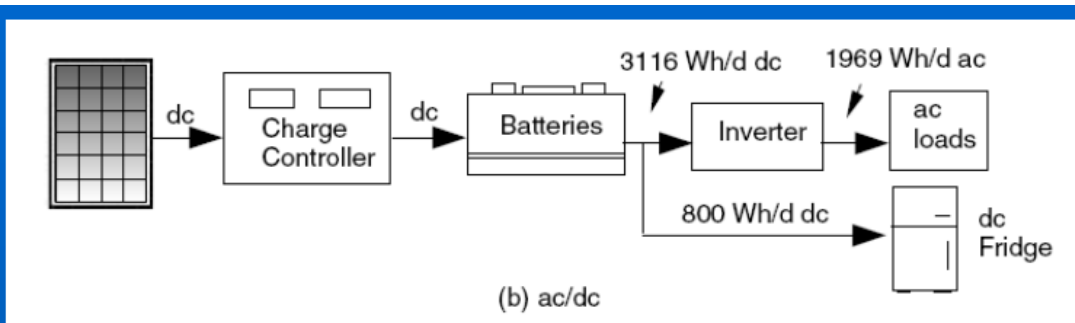
$$W_d[\text{kWh}] = P_{\text{AC}}[\text{kW}] \cdot CF \cdot 24[\text{h}] \quad (8)$$

- faktor kapaciteta na dnevnom nivou za mrežno povezane PV sisteme:

$$CF = \frac{h_z[\text{broj sati "zenita sunca"}]}{24 \text{ h}} \quad (9)$$



Fotonaponski sistemi



- ekvivalentna DC snaga potrošnje:

$$W_{DC\ tot} = W_{DC} + \frac{W_{AC}}{\eta_{inv}}$$

- DC napon sistema:

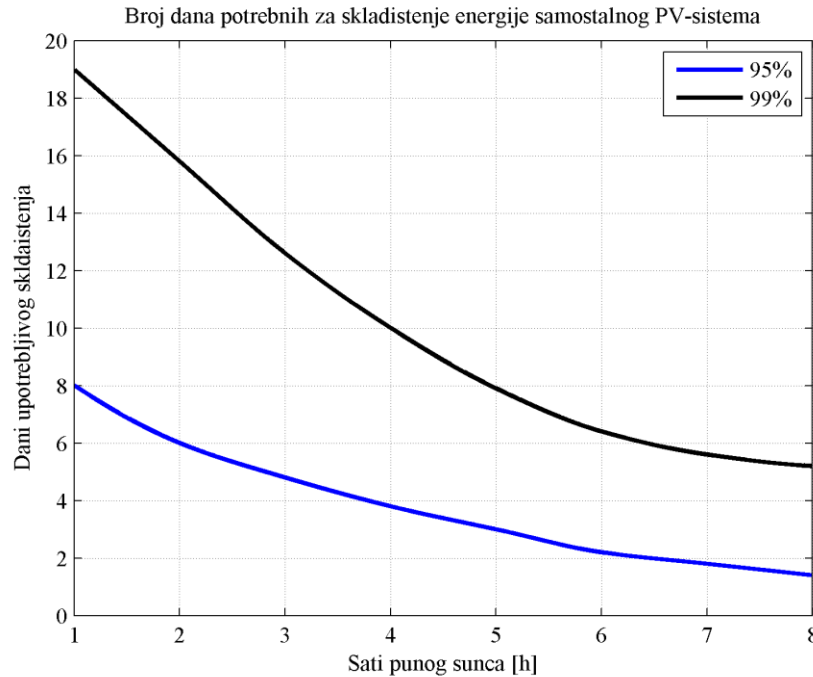
Maximum ac Power	System dc Voltage
<1200 W	12 V
1200–2400 W	24 V
2400–4800 W	48 V

- potrošnja izražena u Ah:

$$(Ah)_{load} = \frac{W_{DC\ tot}}{U_s}$$



Fotonaponski sistemi



$$(Ah)_{stor} = (Ah)_{load} \cdot n_{stor}$$

$$(Ah)_{usable_stor} = \frac{(Ah)_{stor}}{(MDOD) \cdot (T, DR)}$$

$$n_{bs} \geq \frac{U_s}{U_b}$$

$$n_{bp} \geq \frac{(Ah)_{usable_stor}}{(Ah)_b}$$

BATTERY	Voltage	Weight (lbs)	Ah @ C/20	Ah @ C/100
Concorde PVX 5040T	2	57	495	580
Trojan T-105	6	62	225	250
Trojan L16	6	121	360	400
Concorde PVX 1080	12	70	105	124
Surette 12CS11PS	12	272	357	503

Temperatura [C]

Temperatura (°C)

Fotonaponski sistemi

- Dimenzionisanje PV panela

- amper-sati iz PV modula na osnovu srednje dnevne insolacije (broja sati zenitnog sunca)

$$(Ah)_M = I_m \cdot \bar{I}_{PV} \cdot \eta_c \cdot \eta$$

- Kulonova efikasnost baterija

$$\eta_c = \frac{(Ah)_{out}}{(Ah)_{in}}$$

- η uvažava gubitke zbog zaprljanja i starenje modula

- broj redno vezanih modula u grani i broj grana sa modulima

$$n_{Ms} \geq \frac{U_s}{U_m}$$

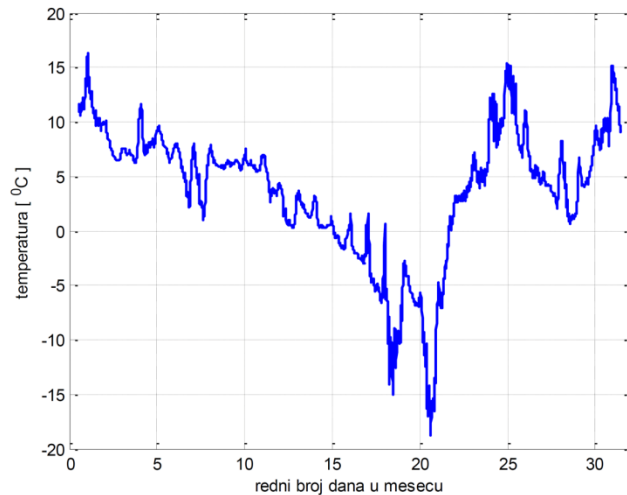
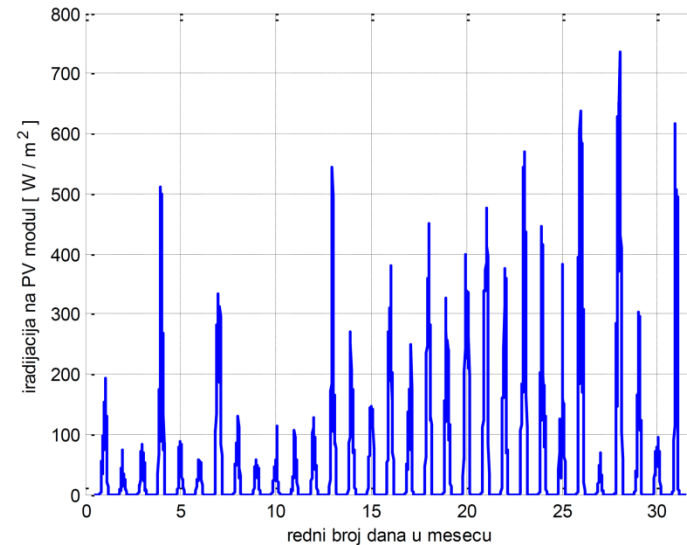
$$n_{Mp} \geq \frac{fr \cdot (Ah)_{load}}{(Ah)_M}$$

- fr predstavlja solarnu frakciju, tj. udeo PV sistema u proizvodnji hibridnog sistema



Primer

mesec	Insolacija na horizontalnoj površini (kWh/m ²)	Insolacija na PV modul (kWh/m ²)
januar	0.9356	1.4773
februar	1.9239	2.8193
mart	2.8159	3.4812
april	5.2047	5.7718
maj	5.9947	5.9599
jun	5.7685	5.4638
jul	6.7838	6.5763
avgust	5.3237	5.5977
septembar	3.9721	4.7639
oktobar	2.1189	2.8590
novembar	1.3227	2.1089
decembar	0.7106	1.1092



Na osnovu karakteristika potrošača (frižider, osvetljenje, TV, telefon, mikrotalasna...) u domaćinstvu procenjena je jednosmerna potrošnja od 0Wh i naizmenična potrošnja od 2240Wh. Snaga aparata koji koriste AC napon je procenjena na 1552W. Efikasnost invertora je usvojena da bude 90% (0,9). Za minimalnu insolaciju korišćeni su snimljeni podaci koji se odnose na kritičan mesec decembar. Minimalna insolacija koja se očitava sa grafika iz Tabele i iznosi 1,1092. Minimalna izmerena temperatura za mesec decembar iznosi -18,8°C i ona je očitana sa grafika. Tip PV modula koji je izabran je Kyocera KC-120-1, a tip baterije je Trojan L16. Za unete podatke dobijeni su rezultati da je potrebno 44 PV modula i 28 baterija. PV moduli trebaju biti vezani 2 redno i 22 paralelno, a baterije 4 redno i 7 paralelno.



Rešenje



Wdc

Wac

Pac

Skr

Tmin

efikasnost invertora

Dostupnost

Proracun

Broj PV modula

paralelno:

redno:

Broj baterija

paralelno:

redno:

Izbor PV

I

U

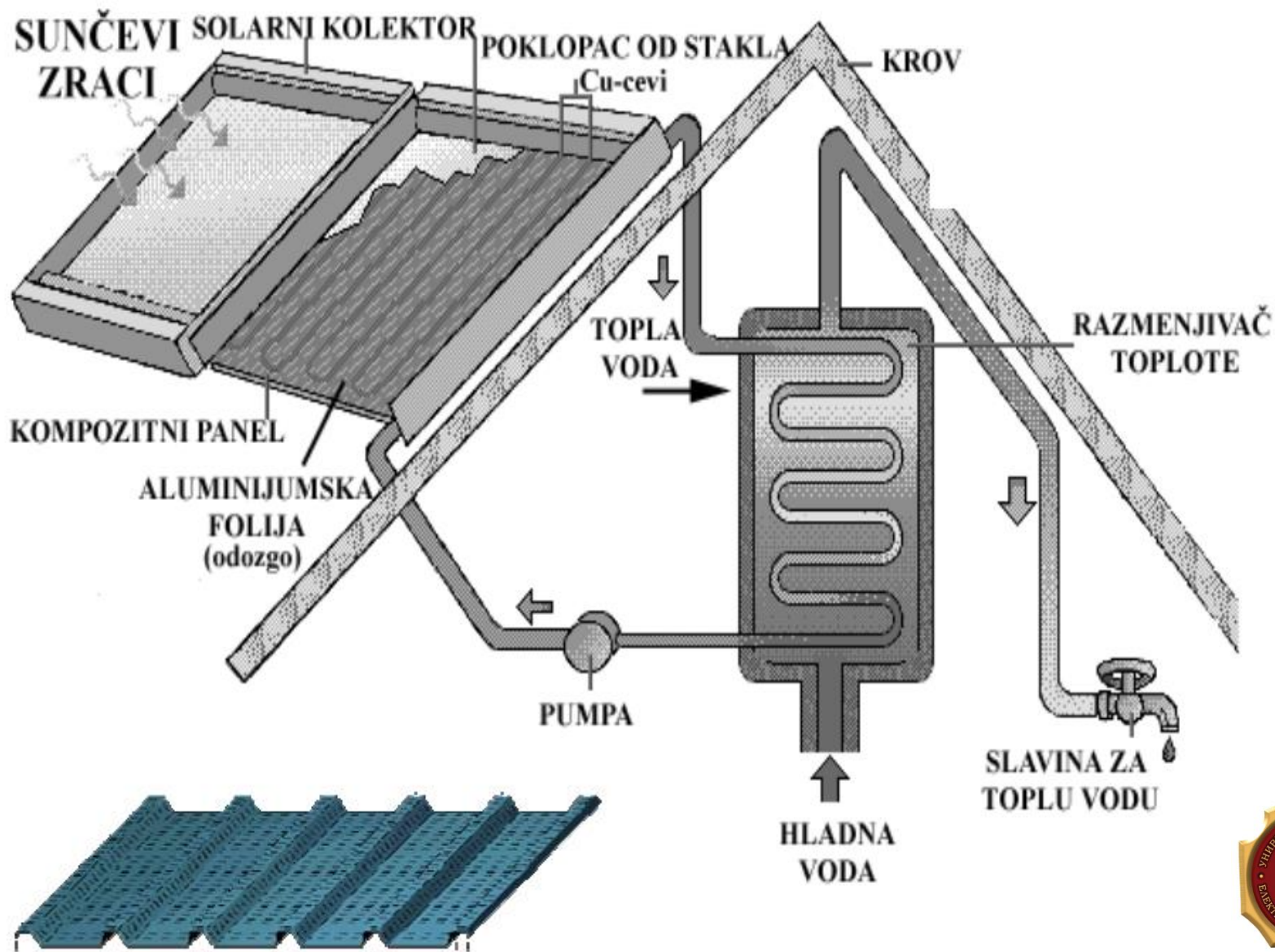
Izbor baterije

U

kapacitet

Izlaz

Fototermička konverzija solarne energije



Fototermička konverzija solarne energije



Heliostat

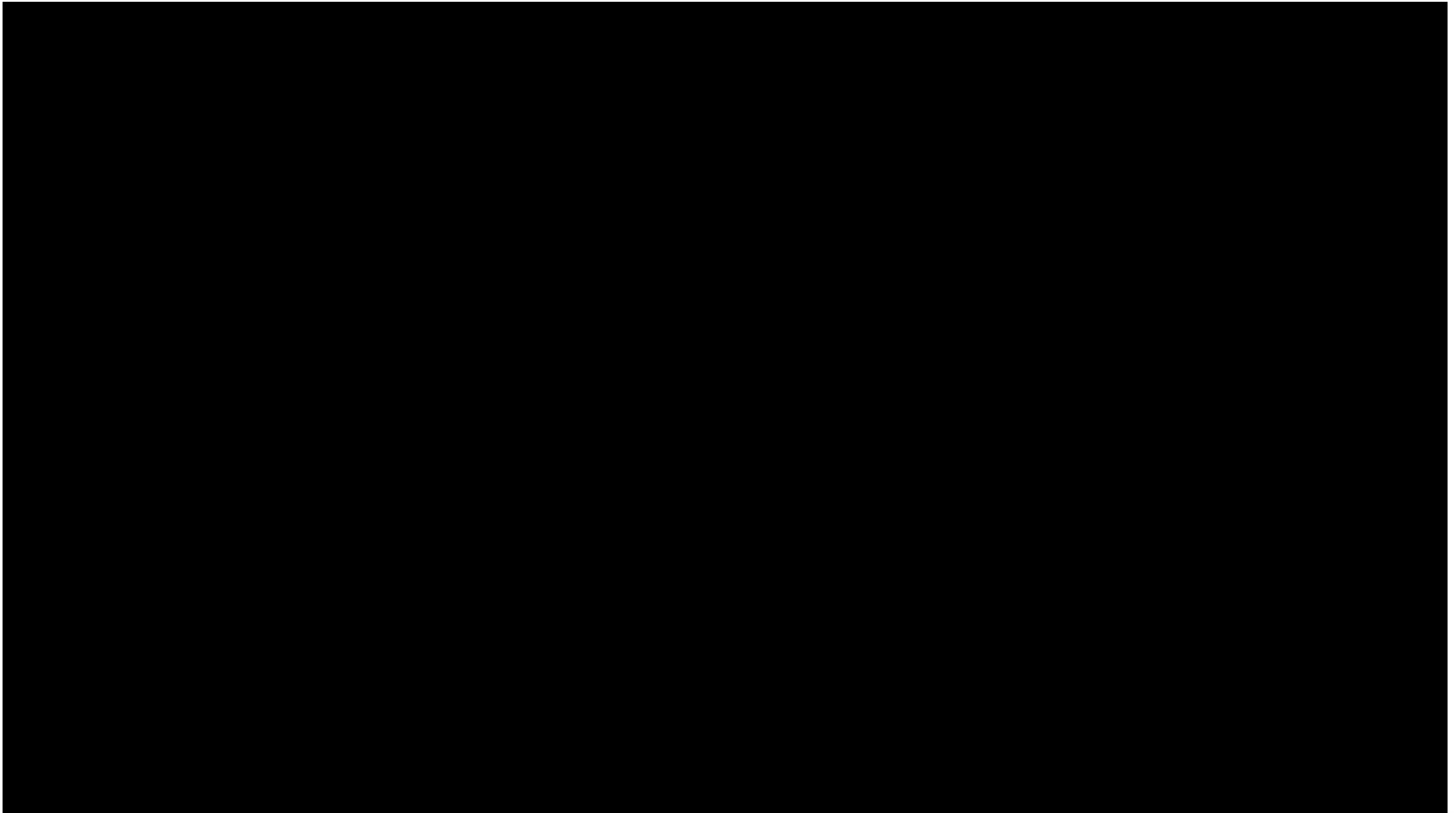
Salt cycle

Salt tank
(cold)

Condense



Fototermička konverzija solarne energije



Drain



Fototermička konverzija solarne energije

