

# Ekonomska ocjena mjera energetske učinkovitosti

---

Šerman, Bojan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:888623>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-20**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

**Ekonomska ocjena mjera energetske učinkovitosti**

**Diplomski rad**

**Bojan Šerman**

**Osijek, 2017.**

1. UVOD .....	1
2. ENERGIJA SUNČEVA ZRAČENJA.....	2
2.1. Ekstraterestričko Sunčevo zračenje.....	4
2.2. Zračenje na plohu pod kutom.....	5
3. SOLARNI FOTONAPONSKI SUSTAVI .....	8
3.1. Opis materijala za izradu ćelija .....	9
3.2. Parametri FN ćelija.....	11
3.2.1. Napon praznog hoda.....	11
3.2.2. Struja kratkog spoja.....	12
3.2.3. Otpor i snaga FN ćelije.....	15
3.2.4. Stupanj korisnog djelovanja .....	17
3.3. Vrste FN sustava .....	17
3.3.1. Samostalni (autonomni) FN sustav .....	18
3.3.2. Pasivni i aktivni FN sustav .....	18
3.3.3. Hibridni sustav .....	19
4. FOTONAPONSKI GEOGRAFSKI INFORMACIJSKI SUSTAVI.....	21
4.1. Intenzitet sunčevog zračenja na području Republike Hrvatske.....	21
4.2. Intenzitet sunčevog zračenja na području Osijeka .....	22
4. FN SUSTAV PRIKLJUČEN NA MREŽU.....	23
5.1. FN sustav sa serijskim spojenim modulima .....	24
5.2. FN sustav sa paralelnim spojenim modulima.....	24
6. TEHNIČKI OPIS FN SUSTAVA $FNE \leq 10kW$ .....	25
6.1. Solarni toplinski sustav .....	31
6.2. Troškovi i jednostavni povratni period.....	33
7. TEHNIČKI OPIS FN SUSTAVA $FNE \geq 30kW$ .....	35
7.1. Troškovi i jednostavni povratni period.....	38
8. STUDIJA IZVODLJIVOSTI .....	40
8.1. Tehnička izvodljivost .....	41
8.2. Ekonomska izvodljivost .....	41
8.3. Ekonomski pokazatelji .....	44
8.4. Pravna izvodljivost .....	47
8.5. Operativna i vremenska studija izvodljivosti .....	47
8.6. Ekonomska izvodljivost FN sustava $FNE \leq 10kW$ .....	49
8.7. Ekonomska izvodljivost FN sustava $FNE \geq 30kW$ .....	52
9. ZAKLJUČAK .....	55
LITERATURA.....	56

[10] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).....	56
SAŽETAK.....	57
ŽIVOTOPIS .....	58
PRILOG .....	59

## 1. UVOD

Republika Hrvatska s aspekta iskorištenja solarnog potencijala ima povoljni geografski položaj, te bi trebala što više i bolje iskoristiti taj potencijal. Najmanja vrijednost sunčevog zračenja je oko  $1200 \text{ kWh/m}^2$ , što je puno više od maksimuma na području SR Njemačke, koja unatoč slabom zračenju Sunca predvodi u Europi po instaliranoj snazi fotonaponskih sustava.

Moguća su dva načina iskorištenja sunčeve energije. Prvi je putem solarnih kolektora, gdje se sunčeva energija koristi isključivo kao toplotna energija. Drugi način je uz pomoć fotonaponskih panela koji uz pomoć sunčevih čestica proizvode DC napon. Poslije se ovakvi sustavi mogu koristiti kao autonomni, kada su potrebne baterije za skladištenje energije i kao sustavi povezani na distributivnu mrežu.

Prednosti fotonaponskih sustava su besplatna i neiscrpna energija, nema zagađenja, te je moguće primjenom samostalnih sustava dovesti energiju na područja koja nisu pokrivena elektroenergetskim sustavom.

Rad se sastoji od teorijskog i praktičnog dijela. U uvodnom dijelu definirano je Sunčevo zračenje, objašnjena izvedba fotonaponskih ćelija, parametri ćelija, te se izvedba cjelokupnog fotonaponskog sustava. Praktični dio temelji se na dvije fotonaponske elektrane snage do 10 kW i više od 30 kW. Za koje je potrebno odraditi studiju izvodljivosti te procijeniti da li zadane elektrane zadovoljavaju tehnički, ekonomski i pravni aspekt studije izvodljivosti.

## 2. ENERGIJA SUNČEVA ZRAČENJA

Za proračun i projektiranje solarnih fotonaponskih sustava potrebno je znati koliko energije upada na plohu fotonaponskog modula.

„Sunčevo zračenje na gornjoj granici Zemljine atmosfere označava se kao ekstraterestičko zračenje. Prema najnovijim mjerenjima ekstraterestičko zračenje po spektru i ukupnoj količini energije odgovara otprilike zračenju crnog tijela s temperaturom od 5760 K. Primjenom Stefan-Boltzmannova zakona zračenja, Planckova zračenja i Wienova zakona pomaka može se proračunati energetski spektar Sunčeva zračenja.“[1]

„Planckov zakon zračenja kaže da izvor ne zrači sve valne duljine, nego ima vlastiti, ograničeni spektar. Granice spektra ovise o temperaturi izvora. Pri višoj temperaturi izvora njegov se spektar pomiče prema kraćim valnim duljinama, slika 2.1. Zračenja crnog tijela po spektru valnih duljina opisuje Planckov zakon prema formuli“:

$$E_C(\lambda, T) = E_C(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)} \frac{W}{m^3} \quad (2.1)$$

Gdje je:

$C_1$  - prva konstanta zračenja crnog tijela, ( $3,7413 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ )

$C_2$  - druga konstanta zračenja crnog tijela, ( $1,4388 \cdot 10^4 \mu\text{mK}$ )

$\lambda$  - valna duljina,  $\mu\text{m}$

$T$  - termodinamička temperatura crnog tijela, K.

„Stefan-Boltzmannov zakon zračenja kaže da je ukupno emitirana energija proporcionalna četvrtoj potenciji temperature izvora. Što znači, što je izvor topliji, to više energije trači. Cjelokupno se zračenje crnog tijela temperature  $T$  dobiva integriranjem jednadžbe (2.1) po cjelokupnome spektru valnih duljina“

$$E_C = \pi \int_0^\infty C_{1\lambda}^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda = \sigma T^4 \text{ W/m}^2 \quad (2.2)$$

Gdje je :

$\sigma$  – univerzalna konstanta zračenja crnog tijela ( $5,667 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

Jednostavniji prikaz je:

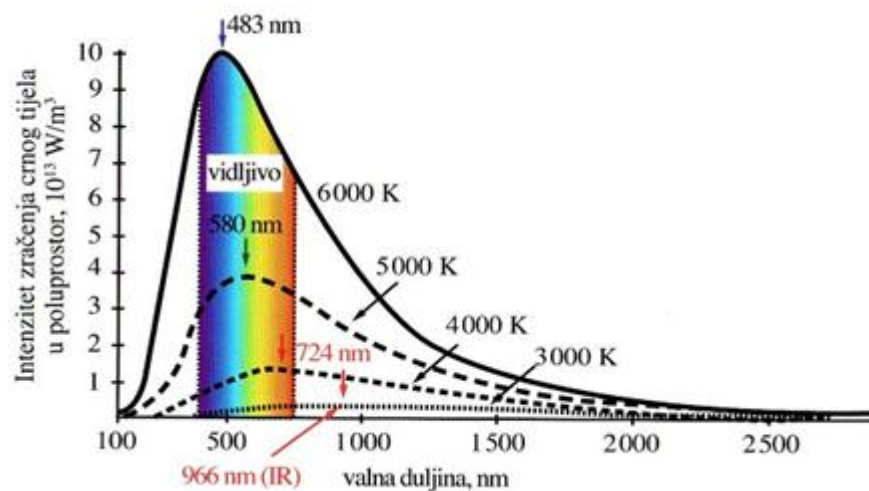
$$E_C = C_C \left( \frac{T}{100} \right)^4 \text{ W/m}^2 \quad (2.3)$$

Gdje je:

$$C_C = 10^8 \sigma = 5,667 \text{ W/m}^2\text{K}^4 \quad (2.4)$$

Što je površinska temperatura izvora veća, to je kraća valna duljina koja u spektru nosi najviše energije, pa Wienov zakon pomaka kaže da se porastom temperature crnog tijela maksimalni intenzitet zračenja pomiče u područje kraćih valnih duljina.

$$\lambda_m = \frac{2897,8}{T} \quad (2.5)$$



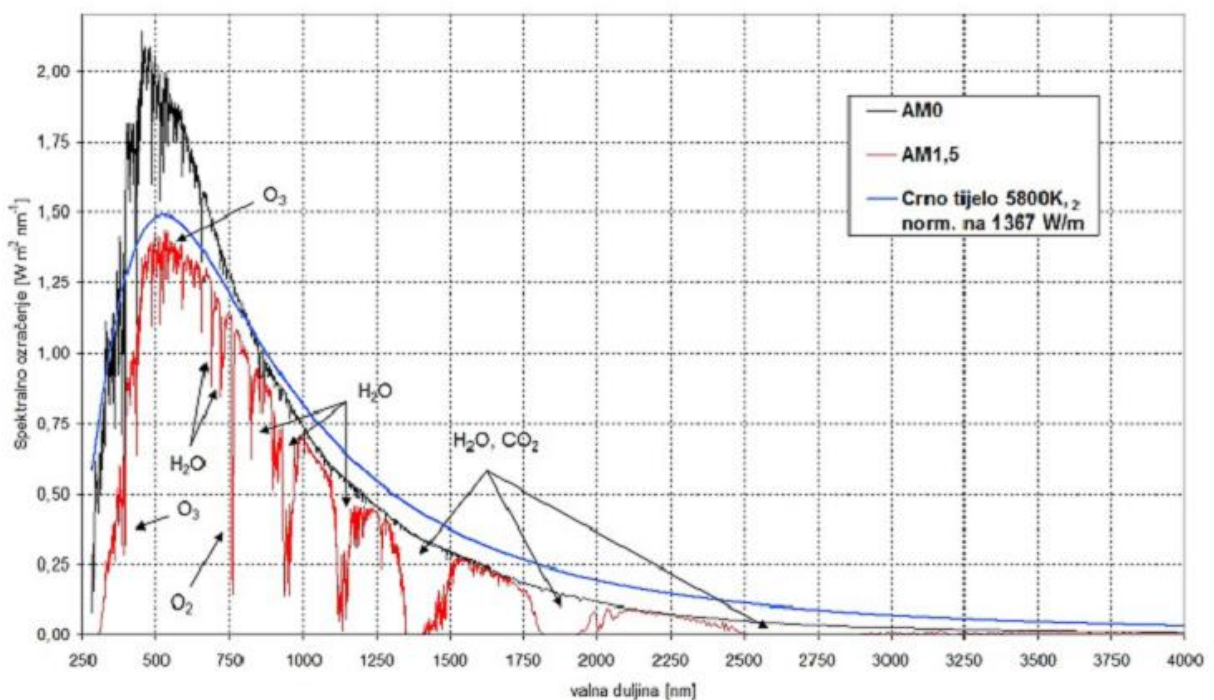
Slika 2.1. Spektralna raspodjela zračenja crnog tijela

Snaga Sunčevog zračenja iznosi oko  $3,8 \cdot 10^{23}$  kW, od čega Zemlja dobiva  $1,7 \cdot 10^{14}$  kW. Zemlja od Sunca godišnje dobiva oko  $4 \cdot 10^{21}$  kJ energije što je nekoliko tisuća puta više nego što iznosi ukupna godišnja potrošnja energije iz svih primarnih izvora. To znači da Zemlja u nekoliko sati od Sunca primi dovoljno energije za zadovoljenje svih svojih godišnjih energetske potrebe, [2].

## 2.1. Ekstraterestričko Sunčevo zračenje

„Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu naziva se ekstraterestičko zračenje. To zračenje opisujemo gustoćom energijskog toka koji upada na površinu okomitu na smjer upadnih Sunčevih zraka. Sunce zrači elektromagnetski spektar u području duljina  $\lambda$  od 0,25 do preko  $5\mu\text{m}$ , tj. Od rendgenskih preko ultraljubičastih zraka i vidljivog svjetla do infracrvenoga toplinskog zračenja. Sunčevo je zračenje kratkovalno zračenje, a 98,8% je ekstraterestičkog zračenja u području valnih duljina  $\lambda$  od 0,25 do  $3,5\mu\text{m}$ , od toga 47% otpada na vidljivo svjetlo s valnim duljinama  $\lambda$  od 0,38 do  $0,78\mu\text{m}$ . To zračenje oko zamjećuje kao dugine boje u rasponu od ljubičaste do crvene, koje zajedno izmješane, daju bijelu svjetlost, tj. Prirodno danje svjetlo“, [3].

Jakost zračenja postiže svoju najvišu vrijednost od  $2042,6\text{ W/m}^2\mu\text{m}$  kod valne duljine  $\lambda$  od  $0,46\mu\text{m}$ , koja se nalazu u području vidljivog svjetla. Solarna konstanta  $E_0$  integralna je vrijednost koja se proračunava za cijelo područje valnih duljina Sunčeva spektra i odgovara površini ispod krivulje, slika 2.3.



Slika 2.3. Spektar sunčeva zračenja od  $0,25\mu\text{m}$  do  $4,0\mu\text{m}$ [2]



## 2.2. Zračenje na plohu pod kutom

„Kod proračuna na učinkovitost i dimenzioniranje solarnog sustava, potrebno je poznavati snagu ukupnog Sunčevog zračenja koje upada na nagnutu plohu kolektora. Ako nema podataka mjerenja, potrebno je snagu zračenja proračunati iz aktinometrijskih podataka za to područje“, [3].

Ukupno Sunčevo zračenje koje dopire do nagnute plohe  $G_\beta$  sastoji se od triju komponenata. Prva je izravno Sunčevo zračenje koje upada na plohu, druga komponenta je raspršeno zračenje, te treća komponenta je zračenje odijeno od tla i okolnih objekata:

$$G_\beta = G_{b\beta} + G_{d\beta} + G_{r\beta} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.6)$$

Gdje je:

$G_{b\beta}$  – izravno zračenje nagnute plohe,  $\text{W/m}^2$

$G_{d\beta}$  – raspršeno zračenje nagnute plohe,  $\text{W/m}^2$

$G_{r\beta}$  – odbijeno zračenje nagnute plohe,  $\text{W/m}^2$

Sunčevo zračenje nagnute plohe povezano je sa izravnim Sunčevim zračenjem vodoravne plohe s izrazom:

$$G_{b\beta} = G_b \frac{\cos \vartheta_b}{\cos \vartheta_z} = G_b \frac{\cos \vartheta_\beta}{\sin \alpha} = G_b R'_b \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.7)$$

Gdje je:

$\vartheta_\beta$  – kut upada Sunčevih zraka na nagnutu plohu,  $^\circ$

$\alpha$  – visina Sunca,  $^\circ$

$\vartheta_z$  – kut upada Sunčevih zraka na vodoravnu plohu,  $^\circ$

$G_b$  – izravno zračenje vodoravne plohe,  $\text{W/m}^2$

Omjer izravnog zračenja na plohu nagnutu pod kutom  $\beta$  prema horizontali  $G_{b\beta}$  i izravnog zračenja vodoravne plohe  $G_b$  naziva se faktorom  $R_b$ , koji ovisi o položaju Sunca i kutu nagiba plohe:

$$R_b = \frac{\cos \vartheta_b}{\sin \alpha} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.8)$$

Gdje je:

$\varphi$  - zemljopisna širina,  $^\circ$

$\delta$  - deklinacija Sunca,  $^\circ$

$\omega$  - satni kut Sunca, °

$\beta$  - kut nagiba plohe prema horizontali

Integriranjem i izračunavanjem dobivamo srednju vrijednost dnevne izravne ozračenosti nagnute plohe.

$$H_{b\beta} = R_b H_b \quad \text{J/m}^2 \quad (2.9)$$

Gdje je:

$R_b$  - omjer srednje dnevne izravne ozračenosti nagnute i vodoravne plohe za pojedini mjesec

$H_b$  – srednja dnevna izravna ozračenost vodoravne plohe,  $\text{J/m}^2$ .

Dnevna vrijednost faktora  $R_b$  za nagnute plohe okrenute prema jugu može se izračunati s pomoću izraza:

$$R_b = \frac{\cos(\alpha - \beta) \cos \delta \sin \omega_{s\beta} + \frac{\pi}{180} \omega_{s\beta} \sin[(\varphi - \beta) \sin \delta]}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.10)$$

$$\omega_{s\beta} = \min\{\omega_s \arccos[-\text{tg}(\varphi - \beta) \text{tg} \delta]\} \quad (2.11)$$

Gdje je:

$\omega_s$  - vremenski kut izlaska (zalaska) Sunca za vodoravnu plohu, °

$\omega_{s\beta}$  - vremenski kut izlaska (zalaska) Sunca na nagnutu plohu, °

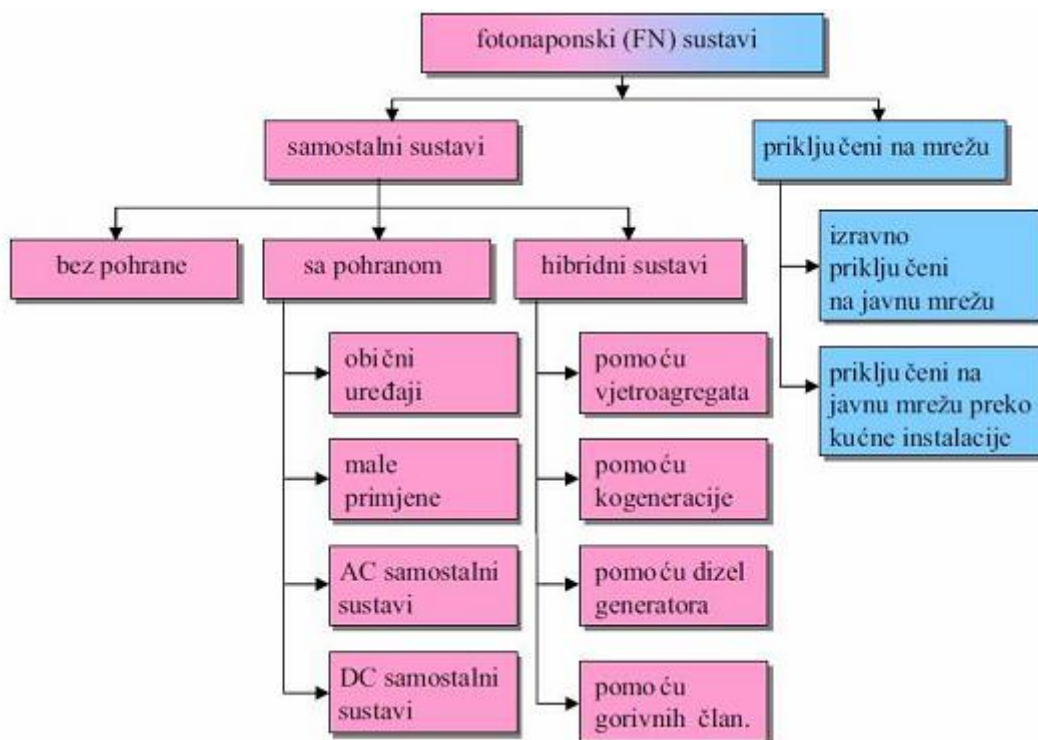
Srednja vrijednost dobiva se kao aritmetička sredina faktora  $R_b$  izvedena s pomoću jednadžbe (2.10) za svaki dan u mjesecu. Faktori  $R_b$  računaju se za razdoblje od jednog sata od izlaska do zalaska sunca i nazivaju se satni, dok se za dnevni faktor  $R_b$  podaci dobiju integriranjem po cijelom Sunčevu danu.

Tablica 2.1. Srednja dnevna ozračenost nagnutog kolektora, MJ/m<sup>2</sup>, [4]

Nagib ploče	Osijek			Zagreb		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Siječanj	4,0	6,5	6,2	3,7	5,4	5,0
Veljača	6,8	10,0	8,7	6,5	9,1	7,9
Ožujak	12,7	16,3	12,5	9,7	11,3	8,5
Travanj	17,6	19,3	12,3	14,8	15,0	9,7
Svibanj	20,9	20,1	10,7	19,3	17,4	10,0
Lipanj	22,6	20,8	9,9	20,6	17,8	9,7
Srpanj	23,3	21,7	10,7	21,3	18,7	10,3
Kolovoz	20,4	21,6	12,5	18,7	18,3	11,0
Rujan	14,2	17,5	12,6	14,0	16,2	11,4
Listopad	9,8	14,5	12,4	8,3	11,3	9,5
Studeni	5,2	8,6	8,1	3,6	4,6	4,0
Prosinac	3,2	5,2	4,9	2,7	3,5	3,1

### 3. SOLARNI FOTONAPONSKI SUSTAVI

Solarni fotonaponski sustavi (dalje FN) mogu se podijeliti u dvije skupine. Prva skupina je samostalni FN, koji nisu priključeni na mrežu elektroenergetskog sustava (engl. Off-grid). Takvi sustavi nazivaju se i samostalnim sustavima (engl. Stand-alone systems). Druga skupina FN sustava je sustav priključen na mrežu elektroenergetskog sustava. Takav sustav može biti priključen na mrežu preko kućne instalacije ili izravno priključen. Detaljna podjela FN sustava prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1. Podjela FN sustava [3]

FN sustavi koji nisu priključeni na mrežu (samostalni) mogu se izvesti sa ili bez pohrane energije, što ovisi o vrsti primjene i načinu korištenja električne energije. Hibridni sustav nastaje kada uz izvor energije iz FN kolektora, dodamo dodatni izvor, kao što je vjetroagregat, dizelagregat ili gorivi članci.

### 3.1. Opis materijala za izradu ćelija

„Kristali su čvrsta tijela sastavljena od atoma, iona ili molekula u kojima se ponavlja trodimenzionalni raspored s pravilnom međusobnom udaljenošću tvoreći kristalnu rešetku. Promjena strukture utječe na mehanička, toplinska, električna i magnetska svojstva kristala. Materijali važni za izradu fotonaponskih solarnih ćelija mogu doći u obliku monokristala, polikristala ili kao amorfne tvari. Ako je čitav sastav ćelija od samo jednog kristala, onda se takva ćelija naziva monokristalnom. Ako se u procesu rasta kristala većih dimenzija formira više kristala, i iz takva kristalnog bloka izreže pločica za izradu solarne ćelije, onda takve ćelije nazivamo polikristalnim ili multikristalnim. Amorfne tvari ne posjeduju pravilan raspored atoma duljeg doseg kao kristali. Obično nastaju ako se rastaljeni materijal vrlo brzo hladi, tako da se molekule ne stignu organizirati u termodinamički stabilnija kristalna stanja. Drugi je način da se pravilna kristalna rešetka nekog materijala ošteti vanjskim utjecajem, npr. usađivanjem (implantacijom) ubrzanih iona koji ih, zbog sudara s atomima, izbacuju iz čvorova rešetke. Pritom će površinski slojevi mete postati amorfni samo ako je temperatura mete previše niska da bi izbačeni atomi kasnije mogli difundirati natrag na svoje početne položaje.“ [2]

Vrste FN ćelija:

„**Monokristalne Si ploče** mogu pretvoriti  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $0.14 \text{ W}$  električne energije s površinom ploče od  $1 \text{ m}^2$ . Za proizvodnju monokristalnih Si ćelija potreban je apsolutno čisti poluvodički materijal. Monokristalni štapići se izvade iz rastaljenog silicija i režu na tanke pločice. Takav način izrade omogućuje relativno visoki stupanj iskorištenja.“

„**Polikristalna Si ploča** može pretvoriti  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $0.13 \text{ W}$  električne energije s površinom ploče od  $1 \text{ m}^2$ . Proizvodnja ovih ploča je ekonomski efikasnija u odnosu na monokristalne. Tekući silicij se ulijeva u blokove koji se zatim režu u ploče. Tijekom skrućivanja materijala stvaraju se kristalne strukture različitih veličina, na čijim granicama se pojavljuju greške, pa zbog tog razloga sunčeva fotonaponska ćelija ima manji stupanj iskorištenja.“

„**Amorfne Si ploče** mogu pretvoriti  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $0.05 \text{ W}$  električne energije s površinom ćelija od  $1 \text{ m}^2$ . Ukoliko se tanki film silicija stavi na staklo ili neku drugu podlogu, to se naziva amorfna ili tankoslojna ćelija. Debljina sloja iznosi manje od  $1 \mu\text{m}$ , stoga su troškovi proizvodnje manji u skladu sa niskom cijenom materijala. Međutim stupanj

iskorištenja amorfnih ćelija je puno niži u usporedbi s drugim tipovima ćelija. Prvenstveno se koristi u opremi gdje je potrebna mala snaga (satovi, džepna računala) ili kao element fasade na zgradama.“

„**Galij arsenid** je poluvodič napravljen iz mješavine galija (Ga) i arsena (As). Pogodan je za upotrebu u višeslojnim i visoko učinkovitim pločama. Širina zabranjene vrpce (engl. *band gap*) je pogodna za jednoslojne sunčeve ćelije. Ima visoku apsorpciju, pa je potrebna debljina od samo nekoliko mikrometara da bi apsorbirao sunčeve zrake. Relativno je neosjetljiv na toplinu u usporedbi sa silicijevim pločama, te na zračenja. Zbog visoke cijene koristi se u svemirskim programima i u sustavima s koncentriranim zračenjem, gdje se štedi na ćelijama. Projekti koncentriranog zračenja su još u razdoblju istraživanja. Galij indijum fosfidna/galij arsenid (GaInP)/GaAs dvoslojna ćelija ima stupanj iskorištenja od 30% i koristi se u komercijalne svrhe za svemirske aplikacije. Ovaj tip ploče može pretvoriti 1000 W/m<sup>2</sup> sunčevog zračenja u 0.30 W električne energije sa površinom ćelija od 1 m<sup>2</sup>.“

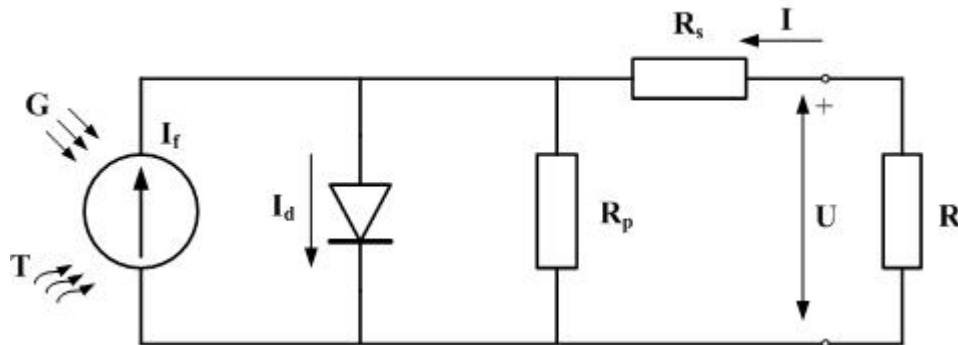
„**Kadmij telurijev** (CdTe) ploče mogu pretvoriti 1000 W/m<sup>2</sup> sunčevog zračenja u 0.16 W električne energije sa površinom ploče od 1 m<sup>2</sup> u laboratorijskim uvjetima. Kadmij telurid je spoj elementa: metala kadmija i polumetala telurija. Pogodan za upotrebu u tankim fotonaponskim modulima zbog fizikalnih svojstava i jeftinih tehnologija izrade. Usprkos navedenim prednostima zbog kadmijeve otrovnosti i sumnje na kancerogenost nije u širokoj upotrebi.“

Tablica 3.1. Usporedba parametara solarnih ćelija [2]

Tip ćelije	U [V]	J <sub>ks</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	Učinkovitost (η)
Monokristalna-Si	0,65	30	0,17
Polikristalna –Si	0,60	26	0,15
Amorfna –Si	0,85	15	0,09
CdS/Cu <sub>2</sub> S	0,5	20	0,10
CdS/CdTe	0,7	15	0,12
GaAlAs	1	30	0,24
GaAs	1	20	0,27

## 3.2. Parametri FN ćelija

Za ispravan odabir fotonaponskih modula i područja upotrebe potrebno je poznavati parametre FN ćelija od kojih je napravljen modul. Osnovni parametri su napon praznog hoda ćelije, struja kratkog spoja, otpor FN ćelije, snaga FN ćelije, te stupanj djelovanja FN ćelije. Za lakše razumijevanje parametara, FN ćelija se može prikazati pomoću nadomjesne sheme strujnog kruga, gdje se ćelija predstavlja kao strujni izvor,[5].



Slika 3.2. Nadomjesna shema fotonaponske ćelije

### 3.2.1. Napon praznog hoda

Elektromotorna sila ćelije (napon praznog hoda) javlja se na stezaljkama ćelije kada je strujni krug otvoren, struja  $I=0$  A. Maksimalna vrijednost napona dobija se u praznom hodu pod punim osvjetljenjem ćelije, ignorirajući gubitke.

$$U_{PH} = \frac{kT}{Q} \cdot \ln \left( \frac{I_f}{I_D} + 1 \right) \quad [V] \quad (3.1)$$

Gdje je:

$kT/Q$  – apsolutna temperatura izražena u voltima ( $300 \text{ K} = 0,026 \text{ V}$ )

$I_f$  – fotogenerirana struja, A

$I_D$  – struja zasićenja diode, A

$Q$  – naboj, C

$k$  - Boltzmannova konstanta =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$T$  – temperatura, K

### 3.2.2. Struja kratkog spoja

Struja kratkog spoja je ona struja koja će poteći kada su stezaljke ćelije kratko spojene, napon između stezaljki  $U=0$  V. Ukupna izlazna struja ( $I_{ks}$ ) računa se prema izrazu:

$$I = I_f - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{qU_{PH}}{kT}} - 1 \right] \quad [A] \quad (3.2)$$

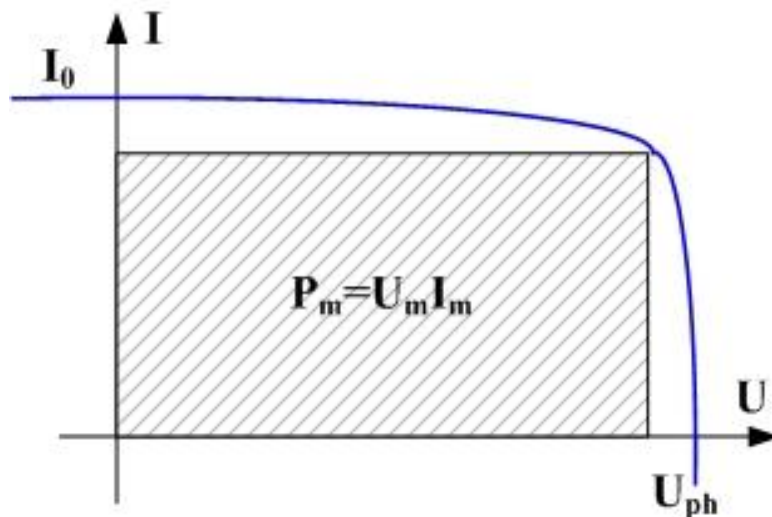
Gdje je:

$I_0$ - inverzna struja zasićenja diode

$I_f$ - generirana struja

Posljednji član iz izraza (3.2) predstavlja struju rasipanja u zemlju, koja je znatno manja u odnosu na struje  $I_L$  i  $I_D$ , te se može zanemariti. Struja zasićenja diode može se eksperimentalno odrediti primjenjujući napon  $U_{PH}$  i u mraku, tako što se mjeri struja koja odlazi iz ćelije.

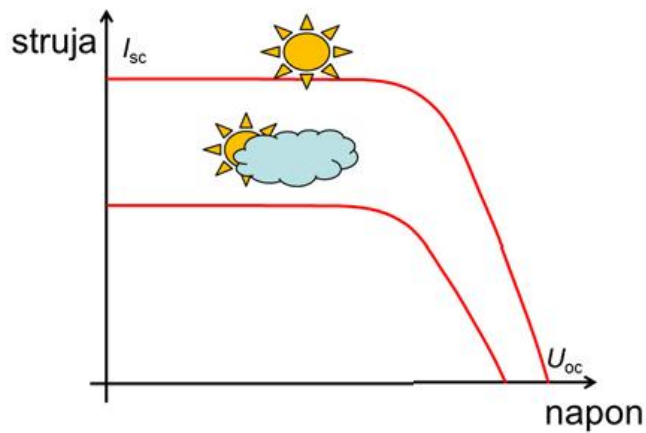
Pomoću dobivenih vrijednosti zan napon praznog hoda i struje kratkog spoja, dobiju se dvije granične točke u strujno naponskoj karakteristici ćelije. Ostale vrijednosti dobiju se mjerenjem.[7]



Slika 3.3 Strujno-naponska karakteristika FN ćelije,[6].

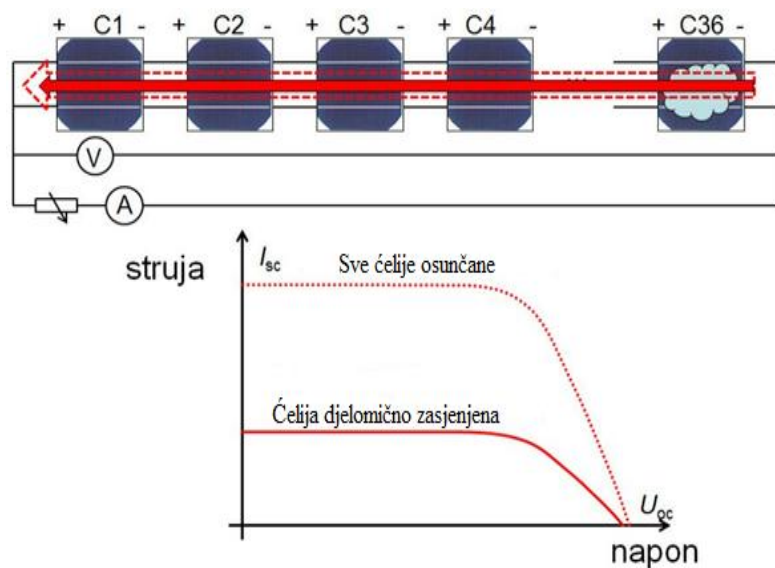


Na strujno-naponsku karakteristiku može utjecati i jakost Sunčeva zračenja, što se može vidjeti na slici (3.4).

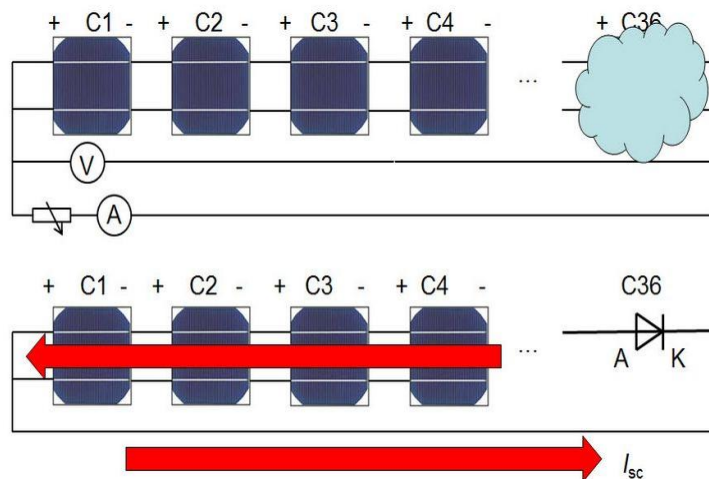


Slika 3.4. Utjecaj razine osunčanja na strujno naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije. [7]

Na slici 3.4. je vidljivo smanjenje struje fotonaponske ćelije i smanjenje napona fotonaponske ćelije pri manjim razinama osunčanja. Niz fotonaponskih ćelija spaja se u seriju i tako nastaje fotonaponski modul. To je realna i česta situacija uzrokovana prisustvom snijega ili lišća na površini modula. U slučaju da je jedna ćelija unutar stringa zasjenjena, ta ćelija će proizvoditi nižu struju od ostalih. Te će ta ćelija predstavljati „usko grlo“ za struju svih ostalih, trenutno nezasjenjenih ćelija. Takvo lokalno zasjenjenje na jednoj fotonaponskoj ćeliji ograničiti će struju cijelog fotonaponskog modula.

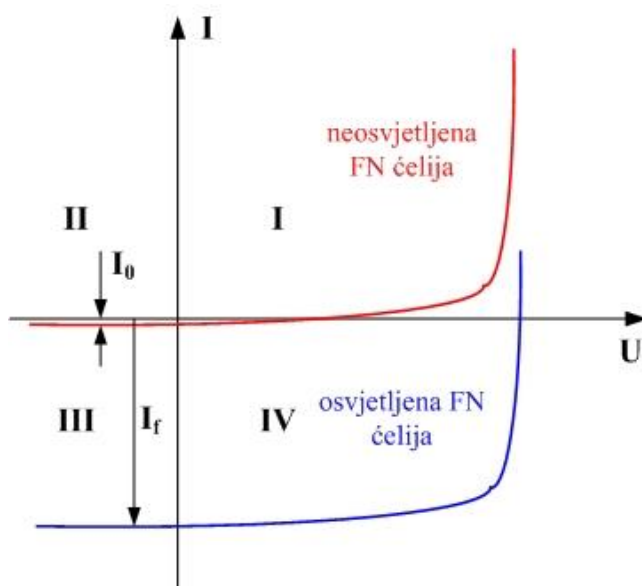


Slika 3.5. Strujno naponska karakteristika nezasjenjenog modula i modula sa sjenom [7]



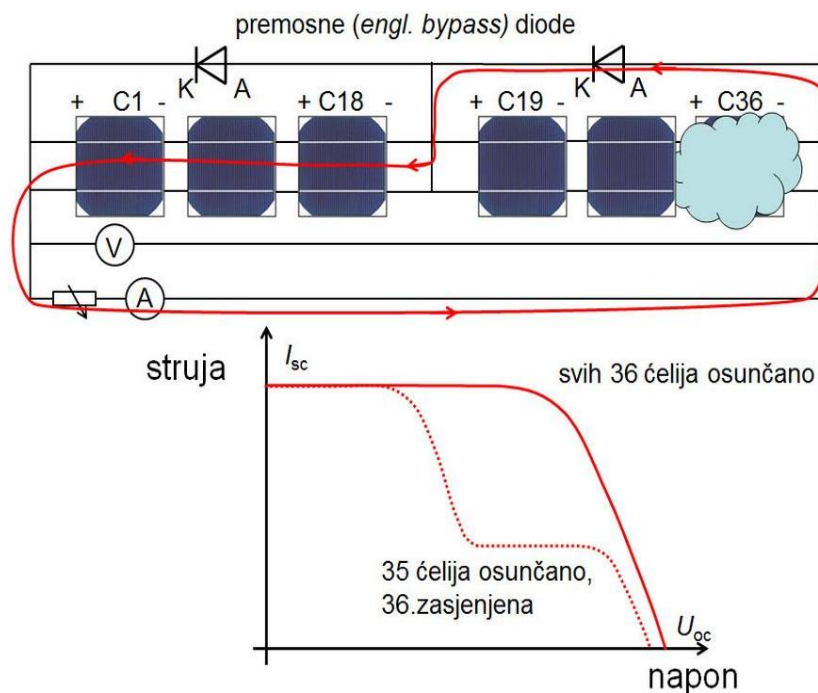
Slika 3.6. potpuno zasjenjenje jedne od ćelija fotonaponskog modula [7]

Na slici (3.6.) je prikazan slučaj kratko spojenih stezaljki modula, a što je vrlo dobro približenje stanja rada regulatora punjenja baterija priključenih na modul jer se iz modula želi izvući što viša struja. Reverzni napon na potpuno zasjenjenoj fotonaponskoj ćeliji može biti dovoljan da dioda probije, a prema karakteristikici na slici (3.7) naponski prag proboja kod diode je 21 V. Probijanje fotonaponske ćelije dogodit će se točkasto. Kroz tu točku će prolaziti sva struja modula i ta će se točka sigurno grijati, taliti i širiti. Jasno da jednom probijena fotonaponska ćelija više nije u funkciji proizvodnje fotoelektrične struje već predstavlja nepoželjno mjesto zagrijavanja. Svako potpuno zasjenjenje jedne od u serijski niz spojenih fotonaponskih ćelija dovodi gotovo sigurno do uništenja iste ako zasjenjenjem stvoren napon pređe prag proboja diode. Proizvedena energija u ne zasjenjenim ćelijama pretvara se u toplinsku energiju u zasjenjenoj ćeliji, trošilu. Upravo opisani efekt naziva se „hot spot“ efekt.



Slika 3.7. Stvarna karakteristika diode [7]

Da bi se izbjegle posljedice djelomičnog i potpunog zasjenjenja ćelija, trebalo bi se uz svaku ćeliju postaviti premosna dioda (engl. Bypass). No taj postupak se ne radi, nego se na svakih 15-20 FN ćelija paralelno spaja premosna dioda. Premosna dioda na slici 3.8. kroz koju teče struja je propusno polarizirana, dakle anoda je pozitivnija od katoda preko napona koji generira ispravni dio fotonaponskog modula. Premosnom diodom kroz koju teče struja i koja u stanju vođenja ima na sebi tek oko 0,6 V spriječen je razarajući reverzni napon na zasjenjenoj ćeliji. Na taj način kroz zasjenjenu ćeliju praktički ne teče struja, ona se ne zagrijava i nema opasnosti od proboja i oštećenja. Naravno da je zasjenjenjem došlo do smanjenja proizvodnje energije.



Slika 3.8. Premosna dioda [7]

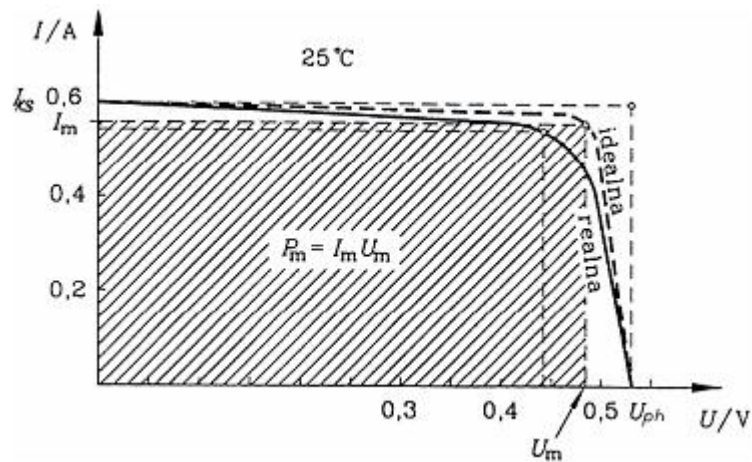
### 3.2.3. Otpor i snaga FN ćelije

Pomoću napona praznog hoda i struje kratkog spoja, moguće je odrediti karakteristični otpor:

$$R_k = \frac{U_{PH}}{I_{KS}} \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

Umnoškom napona i struje dobije se snaga FN ćelije:

$$P = U \cdot I = U \cdot \left[ I_L - I_D e^{\frac{QU}{kT}} + I_D \right] \quad [W] \quad (3.4)$$



Slika 3.9. Maksimalna snaga idealne i realne FN ćelije [6]

Maksimalna (vršna) snaga  $P_m$  koju FN ćelija može dati može se prikazati i pomoću napona praznog hoda i struje kratkog spoja:

$$P_m = I_{KS} \cdot U_{PH} = I_{KS} \cdot U_{PH} \cdot FF \quad [Wp] \quad (3.5)$$

Gdje je:

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{PH} I_{KS}} \quad (3.6)$$

„Faktor punjenja (eng. *Fill Factor* - *FF*) definiran je omjerom površina pravokutnika  $U_m$  i  $I_m$ , te površine pravokutnika  $U_{PH}$  i  $I_{KS}$ . Faktor punjenja pokazuje koliko je stvarna ćelija blizu idealnoj te linearno opada s omjerom  $R_s / R_k$  i  $R_K / R_P$ , gdje je  $R_S$  serijski,  $R_P$  paralelni i  $R_K$  karakteristični otpor FN ćelije i obično iznosi  $0,7 < FF < 0,9$  [2]. Serijski otpor ćelije  $R_S$  je rezultatni otpor unutrašnjeg omskog otpora ćelije i otpora kontakata ćelije. Produkt serijskog otpora i površine ćelije  $R_S A$  reda je veličine  $0,0025 \Omega/m^2$  za uobičajene FN ćelije. Paralelni otpor ćelije  $R_P$  uzrokovan je lokalnim defektima u PN spoju. Za idealnu ćeliju on bi bio beskonačno velik, ali u stvarnoj ćeliji struje gubitaka proporcionalne su naponu na ćeliji.“ [7]

### 3.2.4. Stupanj korisnog djelovanja

Stupanj djelovanja FN ćelije  $\eta$  definira se kao omjer maksimalne snage koju ćelija može dati  $P_m$  i snage Sunčeva zračenja koje upada na ćeliju  $P_u$ .

$$H = \frac{P_m}{P_u} = \frac{P_m}{E \cdot A} = \frac{U_m \cdot I_m}{E \cdot A} \quad (3.7)$$

Gdje je:

$E$  – ozračenje površine

$A$  – površina FN ćelije

Ako u uvrstimo izraz (3.5) dobijemo izraz:

$$\eta = FF \cdot \frac{U_{ph} \cdot I_{ks}}{E \cdot A} \quad (3.8)$$

Djelotvornost fotonaponske ćelije je veća što je faktor punjenja bliži jedinici i što je veća struja kratkog spoja. Najveća djelotvornost fotonaponske ćelije pri određenom ozračenju i temperaturi postiže se ukoliko je na sunčanu ćeliju spojen optimalni iznos potrošača.

### 3.3. Vrste FN sustava

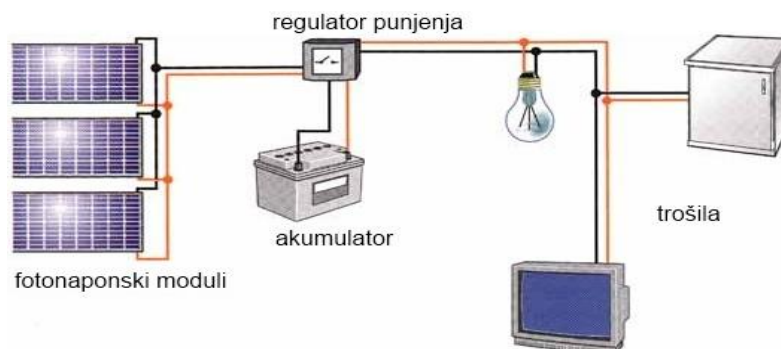
„Fotonaponski sustavi predstavljaju skup FN modula i ostalih komponenata. Sustav je projektiran tako da dolaznu Sunčevu energiju prima i izravno je pretvara u električnu energiju kojom se osigurava rad trošila za koje je taj sustav napravljen. Ovisno o načinu rada, postoje dvije vrste fotonaponskih sustava“ [3]:

1. samostalni (autonomni), za čiji rad mreža nije potrebna
2. mrežni, spojeni na električnu mrežu:
  - pasivni, kod kojih mreža služi (samo) kao pričuvni izvor
  - aktivni (interaktivni), kod kojih mreža može pokrivati manjkove, ali i preuzimati viškove električne energije iz fotonaponskih modula
3. hibridni, koji su zapravo samostalni povezani s drugim (obnovljivim) izvorima.

### 3.3.1. Samostalni (autonomni) FN sustav

Kod samostalnih (autonomnih) sustava spoj na električnu mrežu nije nužan uvjet za njihov rad. Kada kod njihove primjene električnu energiju treba isporučivati tijekom noći ili u razdobljima s malim intenzitetom Sunčevog zračenja potrebno je imati spremnik električne energije, za što se u tom slučaju koriste akumulatori (baterije). Tom sklopu potrebno je dodati regulator za kontrolirano punjenje i pražnjenje baterije, a dodavanjem istosmjerno-izmjeničnog pretvornika ( $12\text{ V}_{\text{DC}} / (230\text{ V}_{\text{AC}})$ ) autonomni sustavi mogu zadovoljiti i sve vrste tipičnih mrežnih potrošača, primjerice perilice, hladnjaci, crpke, hidrofori, motori, televizori, radioaparati, računala, usisavači, mali kućni aparati i druga trošila, [8].

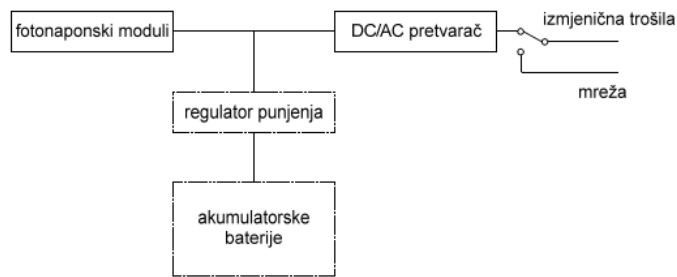
Prednost ovakvih, samostalnih sustava, je pogodnost za osiguravanje potrebnih količina električne energije za udaljene (izolirane) potrošače kao što su ruralna (izolirana) ili primorska vikend-naselja ili za neke pojedinačne objekte, primjerice razne vrste signalizacija i upozorenja, rasvjetu, telekomunikacijske releje, svjetionike, sustave nadgledanja i slično.



Slika 3.10. Samostalni FN sustav, [8]

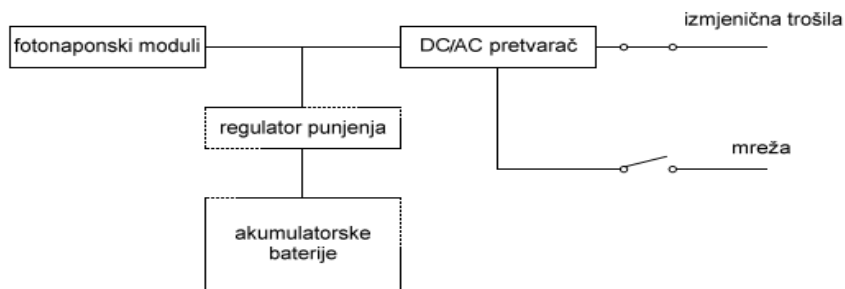
### 3.3.2. Pasivni i aktivni FN sustav

„Pasivni FN sustavi električnu mrežu koriste samo uvjetno, u razdobljima kada FN moduli ne mogu proizvesti dovoljne količine električne energije, primjerice noću kada su istodobno akumulatori električne energije prazni,“ [3].



Slika 3.11. Pasivni mrežni FN sustav

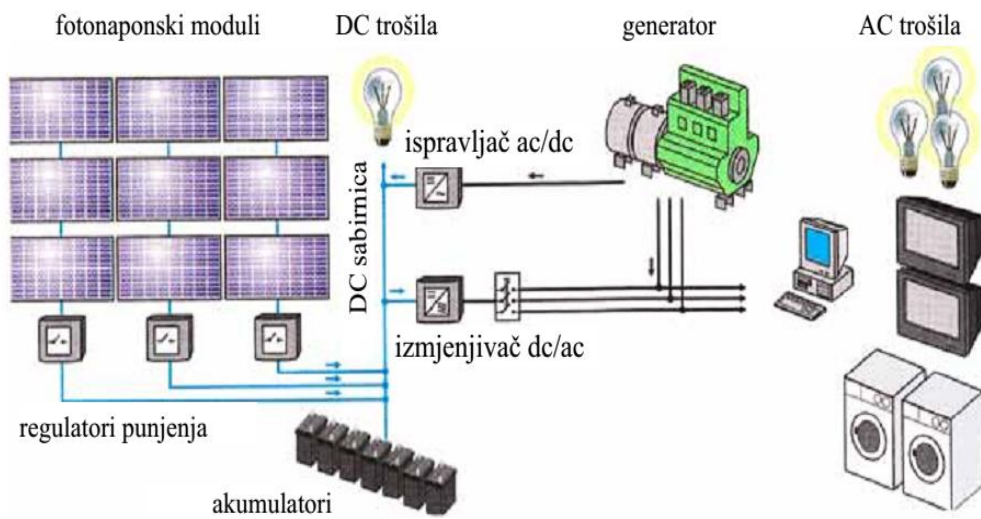
„Aktivni mrežni FN sustavi mrežu koriste interaktivno, uzimajući je u slučaju većih potreba ili vraćajući je u slučaju viškova električne energije proizvedene u FN modulima. Solarna energija nije samo najrašireniji i najveći izvor energije nego je i realno za pretpostaviti da će solarna fotonaponska tehnologija srednjoročno i dugoročno gledano postati ključno rješenje za globalne energetske probleme.“



Slika 3.12. Aktivni mrežni FN sustav

### 3.3.3. Hibridni sustav

„Hibridni FN sustavi nastaju povezivanjem samostalnih izvora s drugim alternativnim pričuvnim izvorima električne energije, kao što su vjetroturbine, hidrogeneratori, pomoćni plinski ili dizelski agregati. U današnje vrijeme vjetroturbine i fotonaponski sustavi mogu se povezati preko zajedničkog izmjenjivača. Takva rješenja daju veću sigurnost i raspoloživost isporuke električne energije te omogućavaju korištenje manjeg akumulatora kao spremnika električne energije. U rješenjima koja upotrebljavaju plinske i dizelske agregate, sustavi se dimenzioniraju tako da se agregati koriste malo sati u godini, čime se štedi gorivo, smanjuju troškovi održavanja i produljuje vijek trajanja,“ [9].



Slika 3.13. Shema hibridnog Fn sustava,[3]



## **4.FOTONAPONSKI GEOGRAFSKI INFORMACIJSKI SUSTAVI**

Razvojem programa za izrada fotonaponskih sustava uspješno se spojiti geografski položaj lokacije sa sustavom mjerenja Sunčevog zračenja na zadanoj lokaciji. Skup takvih sustava naziva se Fotonaponski geografski informacijski sustava (engl. PVGIS). Pomoću kojeg se može dobiti približna vrijednost proizvodnje električne energije iz FN sustava. Sam sustav temeljen je na geografskoj karti Europe, jugozapadne Azije i Afrike. Pruža popis solarnih energetskih resursa i procjenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava temeljen na geografskoj karti u Europi, Africi i jugozapadnoj Aziji. Sustav je nastao kao dio „SOLAREC“ (Solar Electricity Action) akcije koja se zalaže za implementaciji obnovljivih izvora energije u Europskoj Uniji kao dugoročnog izvora energije[10].

Podaci u sustavu sadrže 3 grupe :

geografski podaci: digitalni model visine, administrativne granice, gradovi

prostorno neprekinuti klimatski podaci:

1. dnevna ozračenost horizontalne plohe
2. omjer difuznog i globalnog ozračenja
3. optimalni kut nagiba FN modula za maksimalizaciju iskorištenja energije

regionalni prosjeci za izgrađena područja:

1. godišnja suma ozračenosti (horizontalna, vertikalna i optimalno nagnuta ploha)
2. godišnja suma predviđene proizvodnje električne energije (horizontalna, vertikalna i optimalno nagnuta ploha)
3. optimalni kut nagiba FN modula za maksimalno iskorištenje energije kroz cijelu godinu

### **4.1. Intenzitet sunčevog zračenja na području Republike Hrvatske**

Republika Hrvatska ima veliki potencijal za iskorištenje Sunčevog zračenja za proizvodnju električne energije po svojem geološkom položaju. Količina zračenja za područje Republike Hrvatske iznosi od 1200 do 1500 kWh/m<sup>2</sup>, čiji je minimum puno veći od sjevernijih zemalja Europe, poput Njemčke, a ujedno je i manje iskorišten za razliku od tih zemalja.

Prema podacima iz tablice 4.1 i tablica 4.2, 4.3 i 4.4. koje se nalaze u prilogu 1. Prosječna količina Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu iznosi  $3860 \text{ Wh/m}^2$ , a prosječna količina zračenja na plohu pod optimalnim kutom od  $35^\circ$  iznosi  $4732 \text{ Wh/m}^2$ , dok za plohu pod kutem od  $90^\circ$  količina zračenja iznosi  $2935 \text{ kWh/m}^2$ .

## 4.2. Intenzitet sunčevog zračenja na području Osijeka

Zemljopisni položaj Osijeka nalazi se na području na kojem intenzitet zračenja ima vrijednosti oko  $1200 \text{ kWh/m}^2$ . Prema podacima iz tablice 4.1. i usporedbom sa prosječnim rezultatima za Republiku Hrvatsku može se zaključiti da se Osijek nalazi na području idealnom za iskorištene Sunčevog zračenja ugradnjom fotonaponskih modula.

Tablica 4.1. Sunčevo zračenje za područje Osijeka,[10]

Mjesec	$H_h$ ( $\text{Wh/m}^2$ )	$H_{opt}$ ( $\text{Wh/m}^2$ )	$H(90)$ ( $\text{Wh/m}^2$ )	$I_{opt}$ ( $^\circ$ )	$T_{24h}$ ( $^\circ\text{C}$ )
Siječanj	1100	1660	1650	61	0,5
Veljača	1850	2610	2370	55	1,4
Ožujak	3480	4390	3420	45	6,7
Travanj	4840	5410	3370	31	12,3
Svibanj	5740	5790	2930	18	17,2
Lipanj	6270	6040	2720	12	20,7
Srpanj	6440	6360	2960	16	22,9
Kolovoz	5650	6140	3450	27	22,6
Rujan	3900	4770	3460	41	17,1
Listopad	2700	3850	3410	54	12,2
Studeni	1420	2230	2220	62	7,1
Prosinac	868	1330	1330	62	1,3
Godišnji prosjek	3750	4220	2770	34	11,8

Gdje je:

$H_h$  – dnevno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu ( $\text{Wh/m}^2$ )

$H_{opt}$  – dnevno Sunčevo zračenje na optimalnu kosu plohu ( $\text{Wh/m}^2$ )

$H(90^\circ)$  – Sunčevo zračenje na plohu  $90^\circ$  ( $\text{Wh/m}^2$ )

$I_{opt}$  – mjesečni optimalni kut ( $^\circ$ )

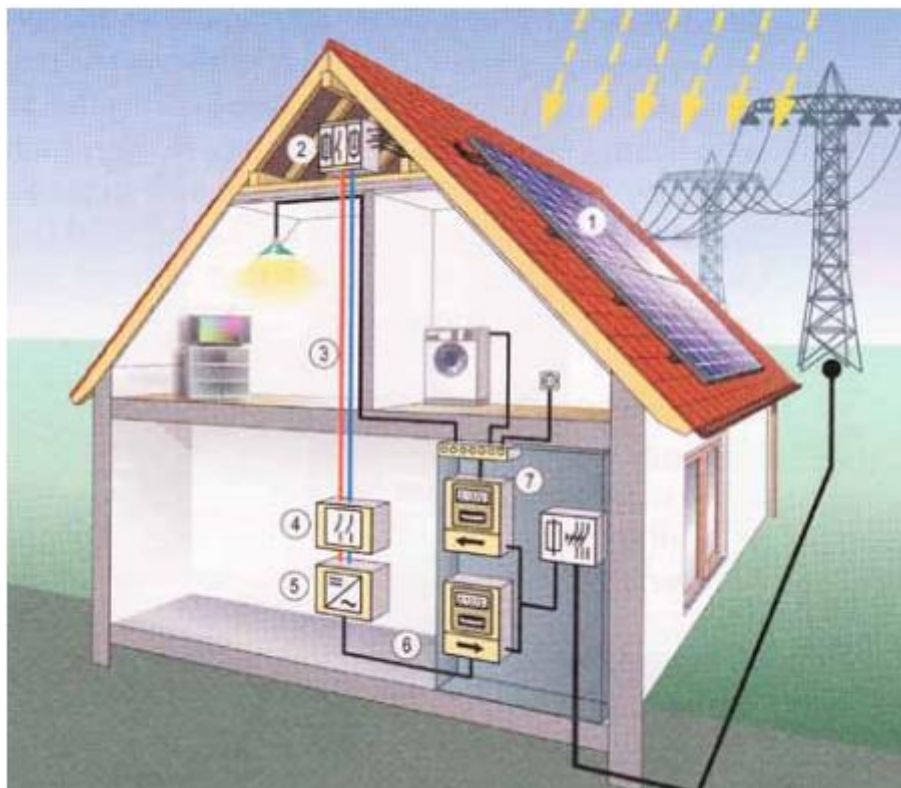
$T_{24h}$ : srednja mjesečna temperatura ( $^\circ\text{C}$ ).

## 4.FN SUSTAV PRIKLJUČEN NA MREŽU

„Fotonaponski sustavi priključeni na javnu mrežu elektroenergetskog sustava (engl. on-grid) mogu biti izravno priključeni na javnu mrežu (FN sustavi većih snaga), ili priključeni na mrežu preko kućne instalacije (FN sustavi manjih snaga).“[3]

Komponente Fn sustava,priključenog na mrežu preko kućne instalacije, prikazane na slici 5.1. su:

- FN moduli
- Spojna kutija sa zaštitnom opremom
- Kablovi istosmjernog razvoda
- Glavna sklopka za odvajanje
- Izmjenjivač dc/ac
- Kablovi izmjeničnog razvod
- Brojila preuzete i predate električne energije



Slika 5.1. Fn sustav priključen na mrežu preko kućne instalacije [3]

FN moduli, oznaka 1 na slici 5.1., spojeni serijski ili paralelno, proizvode istosmjernu struju, te se međusobno povezani kabelima u nizove. Kablovi se spajaju u razdjelni ormar modula, oznaka 2, u kojoj se nalazi i zaštitna oprema. Iz razdjelnog ormara se preko istosmjernog razvoda, oznaka 3, i preko glavne sklopke za odvajanje, oznaka 4, spaja sa izmjenjivačem, oznaka 5. Solarni izmjenjivač pretvara istosmjernu struju FN modula u izmjenični napon reguliranog iznosa i frekvencije, koji se sinkronizira sa naponom i frekvencijom mreže. Nastala izmjenična struja prenosi se kabelima izmjeničnog razvoda, oznaka 6., do kućnog priključnog mjernog ormarića. Brojila električne energije, oznaka 7, registriraju proizvedenu energiju koja je predana u mrežu i preuzetu energiju iz mreže.

### **5.1. FN sustav sa serijskim spojenim modulima**

„Kod tog je sustava solarni generator podijeljen na više serijski spojenih nizova. Svaki serijski spojeni niz FN modula dovodi se do pojedinačnog izmjenjivača svakog pojedinog niza. Izmjenjivač pretvara istosmjernu struju u izmjeničnu, koja je sinkronizirana sa naponom i frekvencijom mreže. Tim sustavom smanjeni su troškovi istosmjernog razvoda.“

### **5.2. FN sustav sa paralelnim spojenim modulima**

„Kod ovog sustava solarni generator je podijeljen na više paralelnih spojenih nizova, čime će se dobiti niži napon niza, ali nešto veća struja. Svaki paralelno spojen niz fotonaponskih modula dovodi se do pojedinačnog izmjenivača svakog niza. Takvim sustavom povećava se korisnost za slučaj djelomičnog zasjenjenja modula, ali se povećavaju troškovi kablova za istosmjerni razvod.“

## 6. TEHNIČKI OPIS FN SUSTAVA FNE $\leq$ 10kW

Površina mjesta instaliranja fotonaponskih modula iznosi 50 m<sup>2</sup> sa azimutom 22,2° pod kutom od 10 °. Razmjerno sa raspoloživom površinom upotrijebljeni su moduli tvrtke Bisol BIPV, monokristalni fotonaponski modul BSO-260 W. Ukupan broj modula BSP-260 je 20 komada, te će proizvesti maksimalnu snagu u iznosu od 5,2 kW<sub>p</sub>, [13].

Fotonaponski moduli su izgrađeni tehnologijom proizvodnje monokristalnog silicija. Proizvođač garantira učinkovitost do 90 % u prvih 10 godina, te najmanju iskoristivost u iznosu od 85 % izlazne snage u 25. Godini rada.

Kod serijskog spajanja modula napon između pozitivnog pola prvog modula i negativnog pola posljednjeg modula u nizu jednak je zbroju napona pojedinih modula. Ulaz u izmjenjivač zahtjeva da napon ne prijeđe 800 V. Spajanjem modula serijski, u 2 niza (stringa) 12 modula u prvi string, uz napon pojedinog modula 34.9 V dobivamo vrijednost napona 419V čime zadovoljavamo uvjet pri priključenju na izmjenjivač. Broj modula u drugom stringu je 8, uz napon pojedinog modula u iznosu 34.9 V, dobiva se vrijednost napona 280 V. Ukupna snaga modula kod serijskog spajanja približno je jednaka umnošku ukupnog broja modula s tim da se uzima snaga modula koji ima najmanju vrijednost. Nazivna snaga modula iznosi 260W sa masom 18,4 kg. Ukupan broj fotonaponskih modula iznosi 20.

Kablovi koji dolaze od nizova fotonaponskih modula uvode se u razdjelni ormarić modula. Razdjelni ormarić opremljen je odvodnicima prenapona i istosmjernim prekidačima. U razdjelnom ormariću se dovodi od grupe fotonaponskih modula razvođe prema solarnim izmjenjivačima. Specifične karakteristike fotonaponskih modula i izmjenjivača dane su u tablici 6.1. i 6.2.

Za odabir FN modula i izmjenjivača, te provjeru njihove kompatibilnosti korišten je program SMA Design 3,[13]. slike iz programa dane su u prilogu slika1.

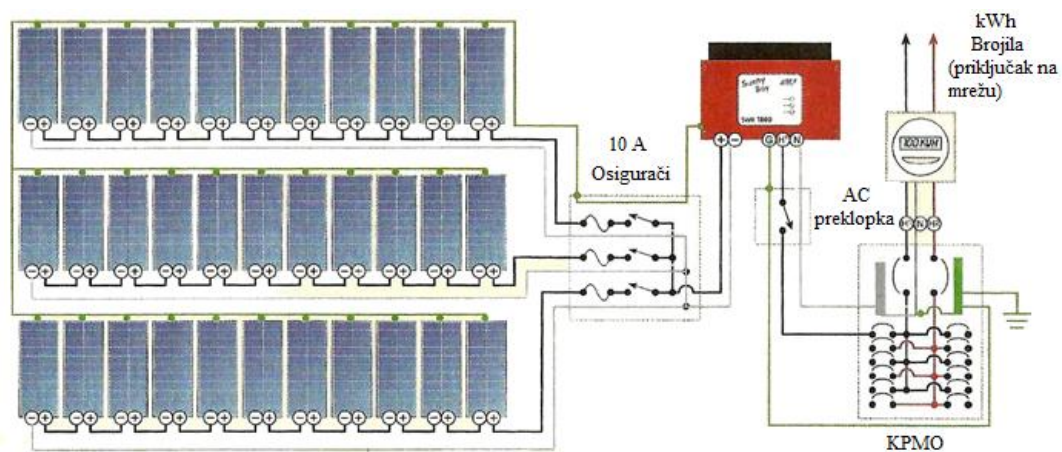
Tablica 6.1. Specifične karakteristike fotonaponskog modula BSO-260 BIPV, [11].

<b>ELEKTRIČNI PODACI</b>			
<b>MODEL BSO- 260 BIPV</b>			
Vršna snaga	$P_{MPP}$	260	W
Struja kratkog spoja	$I_{SC}$	9	A
Napon praznog hoda	$V_{OC}$	34,9	V
Nazivna struja	$I_{MPP}$	8,40	A
Nazivni napon	$V_{MPP}$	31	V
Maksimalni napon sustava		1000	V
Temperaturni koeficijenti			
Snaga	$P_{MPP}$	-0,39	%/°C
Struja	$I_{SC}$	4,5	mA/°C
Napon	$V_{OC}$	-132	mV/°C
<b>MEHANIČKI PODACI</b>			
Broj sunčanih ćelija u seriji		60, monokristalni Si	
Staklo	3,2 mm kaljeno sunčano staklo		
Priključna kutija	Tri by-pass diode / kompatibilni s MC4 / IP 67		
Priključni kablovi	Dužina kabela 1000mm/Tyco SOLARLOK, 4mm <sup>2</sup>		
Okvir	Eloksirani aluminij		
Dužina, širina, debljina		1692x1016x29	mm
Masa		18,4	kg
<b>RADNI UVJETI</b>			
Temperatura		-40°C do + 85°C	
Maksimalno opterećenje	2400 Pa (opterećenje snijegom)		
Otpornost na udarce	Tuča 25 mm pri brzini od 83 m/s		

Tablica 6.2. Specifične karakteristike izmjenjivača Sunny Boy 5300TI –SMA,[12]

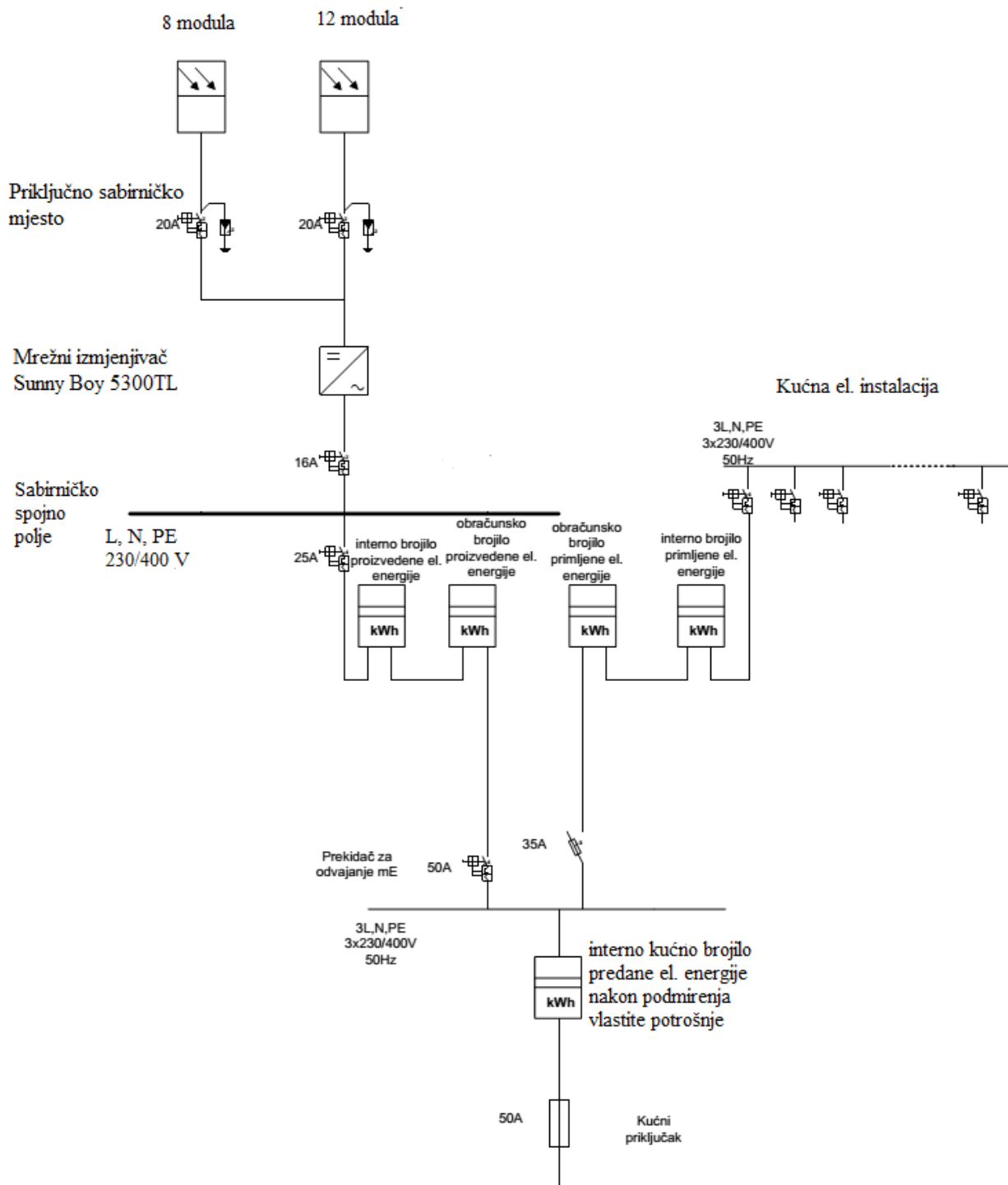
<b>TEHNIČKI PODACI</b>			
<b>Ulazne veličine</b>			
Maksimalna DC snaga	$P_{DC,MAX}$	5300	W
Maksimalni DC napon	$U_{DC,MAX}$	550	V
PV područje napon,MPP	$U_{PV}$	175-440	V
Maksimalna ulazna struja	$I_{DC,MAX}$	2 x 15A / 15 A	A
Maksimalni broj nizova(paralelno)		33, 12.5	
DC strana odspajanja		utični spoj	
Prenaponska zaštita		da	
Nadziranje kvara uzemljenja		da	
Zaštita zamjene polova		da	
<b>Izlazne veličine</b>			
Maksimalna AC snaga	$P_{AC,max}$	5000	VA
AC nazivna snaga	$P_{AC,nom}$	4600	W
Maksimalna izlazna struja	$I_{AC,max}$	22	A
Radno područje,Napon mreže	$U_{AC}$	220/230/400	V
Moguće područje,Napon mreže		182-280	V
Frekvencija mreže	$f_{AC}$	50,60 ±5 Hz	Hz
Fazni pomak	$\cos \theta$	0.8	
Otporan na kratki spoj		da	
Mrežni priključak		utični spoj	
<b>Stupanj djelovanja</b>			
Maksimalni stupanj korisnosti	$\eta_{max}$	97	%
Europski stupanj korisnosti	$\eta_{euro}$	96,5	%
<b>Vlastita potrošnja</b>			
Snaga kod noćnog pogona		<0,5	W
<b>Vrsta zaštite</b>			
Prema DIN EN 60529		IP65/IP54	
Temperatura okoliša,dopuštena		-25 do +60	°C
<b>Mehaničke veličine</b>			
Dimenzije , Masa	25 kg	470x445x180	mm

Solarni izmjenjivača (slika 6.1.) pretvara istosmjernu struju solarnih modula u izmjenični napon reguliranog iznosa i frekvencije, sinkroniziran s naponom i frekvencijom mreže. Kabel je sa izmjenjivača doveden do postojećeg kućno priključno mjernog ormarića ugrađenog na građevini objekta.



Slika 6.1. Shema spoja izmjenjivača [13]





Slika 6.2. Jednopolna shema fotonaponskog sustava [14]

Dobivena energija iz fotonaponskih modula:

$$E_{FN} = E_Z \cdot \eta_m \cdot A_m$$

Gdje je:

$E_Z$  – upadna energija sunčeva zračenja na module, kWh/m<sup>2</sup>

$\eta_m$  – stupanj djelovanja modula,  $\eta_m=0,159$

$A_m$  – površina modula, m<sup>2</sup>

Fotonaponske module površine 34,54 m<sup>2</sup> predviđeno je postaviti na krov građevine pod kutom 10° i azimutom 22,2°.

Dobivena energija iz fotonaponskih modula:

$$E_{FN} = E_Z \cdot \eta_m \cdot A_m = 1320 \times 0,159 \times 34,54 = 7250,1 \text{ [kWh]}$$

Tablica 6.3. Dobivena električna energija ugradnjom Fn sustava.

Grad	$E_Z$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{FN}$ (kWh)	$E_{ST}$ (kWh)	$E_G$ (kWh/kW <sub>p</sub> )
Osijek	1320	7250,1	6525,1	1254,82

Gdje je:

$E_Z$  - Upadna energija Sunčeva zračenja nanagnute module,

$E_{FN}$  - Dobivena energija iz fotonaponskih modula,

$E_{ST}$  – Dobivena el. energija iz fotonaponskog sustava,

$E_G$  - Specifična godišnja proizvedena el. energija

## 6.1. Solarni toplinski sustav

Da bi se maksimalno iskoristio fotonapnski sustav u ekonomskom smislu, moguće je u projekt dodati i sustav solarnih kolektora (PTV), koji su jedna od idealnih mjera za pripremu potrošne tople vode. Cilj kod dizajniranja toplinskog sunčevog sustava je da se pomoću sunčeve energije pokrije najmanje 80 % potrebe za toplom vodom za vrijeme cijele sezone rada zgrade. Nagib i orijentacija krova utječu na količinu ozračene energije na plohu. Prema godišnjem prosjeku, optimalna ozračenost je na području Osijeka, zapadne orijentacije i nagiba površine od 30°.

Za potrebe analize isplativosti solarnih sustava grijanja i pripreme PTV odabran je aktivni sustav s prisilnom cirkulacijom ogrjevnog medija (vode). Aktivni sustavi sastoje se općenito od sljedećih komponenti:

sunčani kolektori

akumulacijski spremnik, zapremnine 500 l, s izmjenjivačem topline i pumpnom regulacijom  
cjevovod

ekspanzijski sustav

pripadajuća armatura

Tablica 6.4. Opis sustava

Tip sustava	Broj osoba	Potrošnja (litara/osobi)	Broj kolektora	A <sub>K</sub> (m <sup>2</sup> )	A <sub>A</sub> (m <sup>2</sup> )	V <sub>S</sub> (litra)	E <sub>TOP</sub> (kWh <sub>th</sub> )
PTV	6	75	3	5,39	5	500	4,2

Gdje je :

A<sub>K</sub> - Ukupna bruto površina kolektora

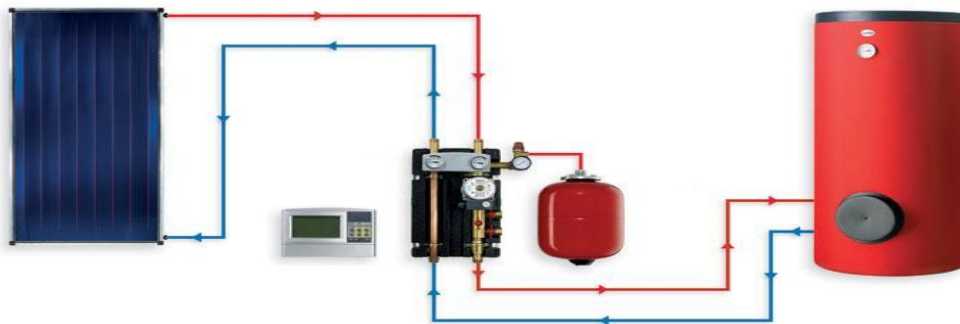
A<sub>A</sub> - Ukupna površina apsorbera

V<sub>S</sub> - Volumen akumulacijskog spremnika

E<sub>TOP</sub> - Količina toplinske energije

Pločasti solarni kolektori postavljaju se na kosi krov obiteljskog objekta, na jugoistočni dio pod kutem od 10°. Akumulacijski spremnik tople vode, dodatni izvor topline i druga pripadajuća oprema sustava postavljaju se unutar objekta.

Odabire se Solarni pločasti kolektor “Sole Ekoline”, te solarni spremnik topline „Double Coil“ (dvije spirale) Solar Box zapremnine 500 litara, te ugrađenom pumpnom regulacijom. Na spremnik tople vode moguće je ugraditi i dodatni izvor grijanja, poput električnog grijača, plinskog grijača ili peći na bio masu.



Slika 6.4. Shema solarnog toplinskog sustava [13]

Tablica 6.5. Pokrivanje potreba za toplom vodom preko solarnog toplinskog sustava

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God. prosjek
Stupanj Pokrivanja (%)	51	71	84	93	100	100	100	100	100	87	58	44	82

Ako se u obzir uzmu samo hladni period tijekom godine u dobijemo prosječno pokrivenost oko 60%. Uzevši u obzir i najmanji stupanj pokrivenosti od 44%, sam sustav donosi uštedu. Prosječna izdavanja za grijanje vode u periodu hladnih mjeseci ( od listopada do ožujka) su između 4500 i 5000 kuna. Ugradnjom sustava mogla bi se ostvariti ušteda u tom vremenskom periodu u iznosu do 2000 kuna. Investicija za solarni sustav grijanja iznosi oko 20000 kuna uzevši u obzir postavljanje sustava na krov te spajanje cijelog sustava.

## 6.2. Troškovi i jednostavni povratni period

Da bi se izračunao jednostavni povratni period potrebno je izračunati ukupne troškove fotonaponskog sustava, te pomoću tablice 6.5. izračunati koeficijent cijene el. energije. Za slučaj FN sustava bez dodanog sustava solarnog zagrijavanje vode koriste se faktori C i  $k_1$ , a za slučaj kada postojećem FN sustavu dodamo PTV sustav potrebno je faktorima C i  $k_1$  dodati faktor  $k_2$ .

Tablica 6.5. Poticajne cijene za integrirane FNE $\leq$ 10kW za 2016. godinu [15]

Tip integrirane solarne elektrane	C	$k_1$	$C \times k_1$	$k_2$	$C \cdot k_1 \cdot k_2$
Sunčane elektrane instalirane snage do uključivo 10 kW	1,10	2,39	2,63	1,2	3,16

Gdje je:

C - Fiksna tarifna stavka

$k_1$  - Korektivni koeficijent za integrirane SE

$k_2$  - Korektivni koeficijent za korištenje toplinskog sustava

### Godišnja naknada za isporučenu električnu energiju u elektroenergetsku mrežu bez solarnog toplinskog sustava:

6525,1 kWh x 2,63 kn/kWh -20% poreza na dobit = 13728,81 kn

### Procjena ukupne investicije:

Paneli: 20 x 1490 kn = 29800 kn

Inverter: 19190,40 kn

Priključni mjerni ormarić, brojila i oprema: 7000 kn

Kablovi: 2000kn

Montažna konstrukcija: 10 000kn

Zamjena pretvarača FNE nakon 10 godina: 19190,40 kn

Ukupni troškovi: 87180,80 kn + PDV =108976 kn

### Vrijeme otplate fotonaponskog sustava:

$$t_p = \frac{108976}{13728,81} = 7,94 \text{ god.}$$

Projekt fotonaponskog sustava bi se isplatio za 8 godine.

**Godišnja naknada za isporučenu električnu energiju u elektroenergetsku mrežu sa solarnim toplinskim sustavom:**

6525,1 kWh x 3,16 kn/kWh -20% poreza na dobit = 16495,45 kn

**Procjena ukupne investicije:**

Paneli: 20 x 1490 kn = 29800 kn

Inverter: 19190,40 kn

Priključni mjerni ormarić, brojila i oprema: 7000 kn

Kablovi: 2000kn

Montažna konstrukcija: 10 000kn

Zamjena pretvarača FNE nakon 10 godina: 19190,40 kn

Solarni set: 20000 kn

Ukupni troškovi: 107180,80 + PDV =133976 kn

$$t_p = \frac{133976}{16495,45} = 8,12 \text{ god.}$$

Projekt fotonaponskog sustava, uz dodatni sustav za zagrijavanje potrošne tople vode, bi se isplatio za 8 godina i 2 mjeseca.

## 7. TEHNIČKI OPIS FN SUSTAVA FNE $\geq 30\text{kW}$

Industrijsko postrojenje ima godišnju potrošnju električne energije u iznosu od 21120 kWh. Površina mjesta instaliranja fotonaponskih modula iznosi  $327\text{ m}^2$  sa azimutom  $12^\circ$  pod kutem od  $25^\circ$ . Razmjerno sa raspoloživom površinom upotrebljeni su monokristalni moduli Yingli Panda 280W. Ukupan broj modula je 140 komada, te će proizvesti maksimalnu snagu u iznosu od  $39,1\text{ kW}_p$ . [13].

Kod serijskog spajanja modula napon između pozitivnog pola prvog modula i negativnog pola posljednjeg modula u nizu jednak je zbroju napona pojedinih modula. Ulaz u izmjenjivač zahtjeva da napon ne prijeđe 1000 V. Spajanjem modula serijski u 8 nizova, po 18 modula u sedam stringova i 14 modula u jedan string uz napon pojedinog modula 31,3 V dobivamo vrijednost napona 563,4V čime zadovoljavamo uvjet pri priključenju na izmjenjivač. Broj modula u stringu sa 14, uz napon pojedinog modula u iznosu 31,3 V, dobiva se vrijednost napona 438,2 V.

Specifične karakteristike fotonaponskih modula i izmjenjivača dane su u tablici 6.8. i 6.9. Slika kompaktilnosti modula i izmjenjivača za sustav  $FNE \geq 30\text{kW}$ , dana je u prilogu (slika 2).

Tablica 6.8. Specifične karakteristike fotonaponskog modula [16]

<b>ELEKTRIČNI PODACI</b>			
<b>Yingli Panda 280W Serija 2 Mono (60 cells)</b>			
Vršna snaga	$P_{MPP}$	280	W
Struja kratkog spoja	$I_{SC}$	9,50	A
Napon praznog hoda	$V_{OC}$	39,1	V
Nazivna struja	$I_{MPP}$	8,93	A
Nazivni napon	$V_{MPP}$	31,3	V
Maksimalni napon sustava		1000	V
Temperaturni koeficijenti	NOCT	46 +/- 2	°C
Snaga	$P_{MPP}$	-0,31	%/°C
Struja	$I_{SC}$	0,04	mA/°C
Napon	$V_{OC}$	-0,41	mV/°C
<b>MEHANIČKI PODACI</b>			
Broj sunčanih ćelija u seriji		60, monokristalni Si	
Staklo		3,2 mm kaljeno sunčano staklo	
Priključna kutija		≥IP65	
Priključni kablovi		PV Kabel / 43.31 in (1100 mm) / 12 AWG / 0.244 in (6.2 mm)	
Okvir		Eloksirani aluminij	
Dužina, širina, debljina		1650x990x40	mm
Masa		18,4	kg
<b>RADNI UVJETI</b>			
Temperatura		-40°C do + 90°C	
Maksimalno opterećenje		5400 Pa (opterećenje snijegom)	
Otpornost na udarce		Tuča 25 mm pri brzini od 23 m/s	



Tablica 6.9. Specifične karakteristike izmjenjivača Growatt 40000-TL3,[17]

<b>TEHNIČKI PODACI</b>			
<b>Ulazne veličine</b>			
Maksimalna DC snaga	$P_{DC,MAX}$	44000	W
Maksimalni DC napon	$U_{DC,MAX}$	1000	V
PV područje napon,MPP	$U_{PV}$	700	V
Maksimalna ulazna struja	$I_{DC,MAX}$	36	A
Maksimalni broj nizova(paralelno)		2/4	
Prenaponska zaštita		Varistor	
<b>Izlazne veličine</b>			
Maksimalna AC snaga	$P_{AC,max}$	40000	VA
AC nazivna snaga	$P_{AC,nom}$	40000	W
Maksimalna izlazna struja	$I_{AC,max}$	50	A
Radno područje, napon mreže	$U_{AC}$	277V / 480V / 3W+PE	V
Frekvencija mreže	$f_{AC}$	50/60Hz   ±5Hz	Hz
Fazni pomak	$\cos \theta$	0.8	
Otporan na kratki spoj		da	
Mrežni priključak		utični spoj	
<b>Stupanj djelovanja</b>			
Maksimalni stupanj korisnosti	$\eta_{max}$	98,2	%
Europski stupanj korisnosti	$\eta_{euro}$	97,8	%
<b>Vlastita potrošnja</b>			
Snaga kod noćnog pogona		<0,5	W
<b>Vrsta zaštite</b>			
Prema DIN EN 60529		IP65 / NEMA 3R	
Dopuštena temperatura okoliša		-25 do +60	°C
<b>Mehaničke veličine</b>			
Dimenzije, masa	61,6kg	551x740x276	mm

Tablica 6.10. Dobivena električna energija ugradnjom Fn sustava.

Grad	$E_Z$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{FN}$ (kWh)	$E_{ST}$ (kWh)	$E_G$ (kWh/kW <sub>p</sub> )
Osijek	1320	51924,05	50885,57	1298,1

Gdje je:

$E_Z$  - Upadna energija Sunčeva zračenja nanagnute module,

$E_{FN}$  - Dobivena energija iz fotonaponskih modula,

$E_{ST}$  – Dobivena el. energija iz fotonaponskog sustava,

$E_G$  - Specifična godišnja proizvedena el. energija

## 7.1. Troškovi i jednostavni povratni period

Tablica 6.11. Poticajne cijene za FNE<sub>≥</sub>30kW za 2016. godinu, [15]

Tip integrirane solarne elektrane	C	k1	C×k1	k2	C·k1·k2
Sunčane elektrane instalirane snage veće od 30 KW	1,10	1,50	1,65	1,03	1,70

### Godišnja naknada za isporučenu električnu energiju u elektroenergetsku mrežu bez solarnog toplinskog sustava, sa vlastitom investicijom:

Nakon namirenja industrijskog postrojenja u iznosu od 21120 kWh godišnje, preostaje višak električne energije koji se predaje u mrežu.

Višak el. energije: 29765,57 kWh

29765,57 kWh x 1,50 kn/kWh poreza na dobit = 44648,35 kn (+PDV)

### Procjena ukupne investicije:

Paneli: 140 x 1850 kn = 259000 kn

Inverter: 31573,03 kn (4170,81 €)

Priključni mjerni ormarić, brojila i oprema: 35000 kn

Kablovi: 40000 kn

Montažna konstrukcija: 25000 kn

Zamjena pretvarača FNE nakon 10 godina: 31573,03 kn

Ukupni troškovi: 422146,06 kn

**Vrijeme povratnog perioda fotonaponskog sustava:**

$$t_p = \frac{422146}{35718,68} = 10,24 \text{ god.}$$

Projekt fotonaponskog sustava bi se isplatio za 10 godina i 3 mjeseca.

## 8. STUDIJA IZVODLJIVOSTI

Studija izvodljivosti procjenjuje prednosti tehničke, ekonomske, pravne, operacijske izvodljivosti i izvodljivosti po rasporedu predloženog projekta. Ona je preliminarni pregled za preporuku treba li prekinuti predloženi projekt ili nastaviti na slijedeću fazu projekta. Kako bi se mogla napraviti lista prioriteta energetske učinkovitosti, potrebno je izraditi studiju izvodljivosti za svaku mjeru zasebno. [18]

TELOS analiza:

Tehnološka izvodljivost – opisuje da li je tehnički moguće izvesti zadani projekt.

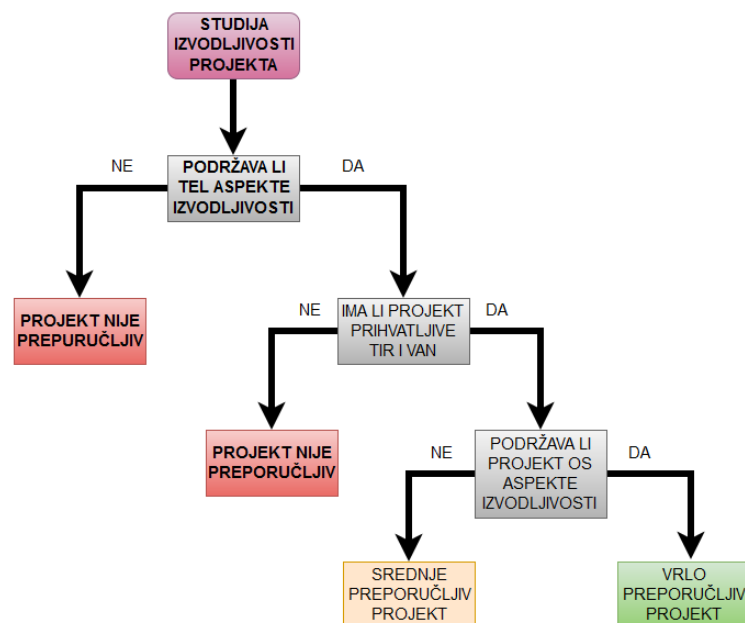
Ekonomska izvodljivost – dokaz da se zadani projekt zadovoljava ekonomsku profitabilnost.

Pravna izvodljivost – dokaz da je projekt u skladu sa zakonima.

Operativna izvodljivost – pokazuje koliko je projekt dobro prilagođen potrebama investitora.

Izvodljivost po rasporedu – pokazuje da li je projekt izvediv u zadanom roku.

Stupanj izvodljivosti navedenih pet aspekata određuje uspješnost projekta energetske učinkovitosti. Potrebno je shvatiti da su najvažniji aspekti izvodljivosti tehnički, ekonomski i pravni aspekt. Te ako neki od ovih aspekata nije zadovoljen, projekt će biti ne isplativ i neće biti izveden. Međutim, potrebno je uzeti u obzir ostala dva faktora.



Slika 8.1. Dijagram izvodljivosti

## **8.1. Tehnička izvodljivost**

Odgovara na pitanje da li je tehnički moguće. Proučavana je tehnička sposobnost organizacije da izvrši zadani projekt. Da bi sam projekt bio tehnički izvodljiv, tehnička podrška mora biti što više kvalificiranija prema zahtjevima projekta.

Energetski pregled je sistematski, neovisan i dokumentiran proces za dobivanje dokaza i objektivne procjene u svrhu:

- Dobivanja pouzdanih saznanja energetske potrošnje i povezanih troškova
- Identifikacije i opisa glavnih faktora koji utječu na potrošnju energije
- Otkrivanje i procjene različitih mogućnosti uštede i raspodjele energije te njegov utjecaj na troškove održavanja i energije

Za izradu pojedinog energetske učinkovitog projekta, trebalo bi biti definirano:

- Trenutno stanje
- Koncept energetske učinkovitog projekta
- Situacija u budućnosti
- Procjena godišnje uštede energije
- Ekološki faktor
- Ekonomski faktor

## **8.2. Ekonomska izvodljivost**

Odgovara na pitanje da li je priuštivo ili pruža li dobit. Kada se razmišlja o implementaciji projekta energetske učinkovitosti, jedan od ograničavajućih aspekata je ekonomska izvodljivost projekta. Ekonomski resursi investitora su količinski ograničeni te je zato važno odrediti najpogodnije projekte za investiciju. Transformacija prvobitne investicije u budući povrat je rezultat pozitivne ekonomske održivosti i određuje treba li poduzeti projekt. Projekt će biti što više isplativ, ako je odnos dobiti naspram troškova veći.

Ekonomska izvodljivost je metoda za donošenje odluka koristeći mjerila financijskog povrata kao pokazatelj vrijednosti projekta.

Ciljevi ekonomske izvodljivosti su:

- Određivanje koje od relevantne investicije će donijeti najveći povra
- Smanjenje bilo kakvog rizika koji preuzima investitor
- Da ponudi bazu za aposteriornu analizu povrat od ulaganja svakog projekta

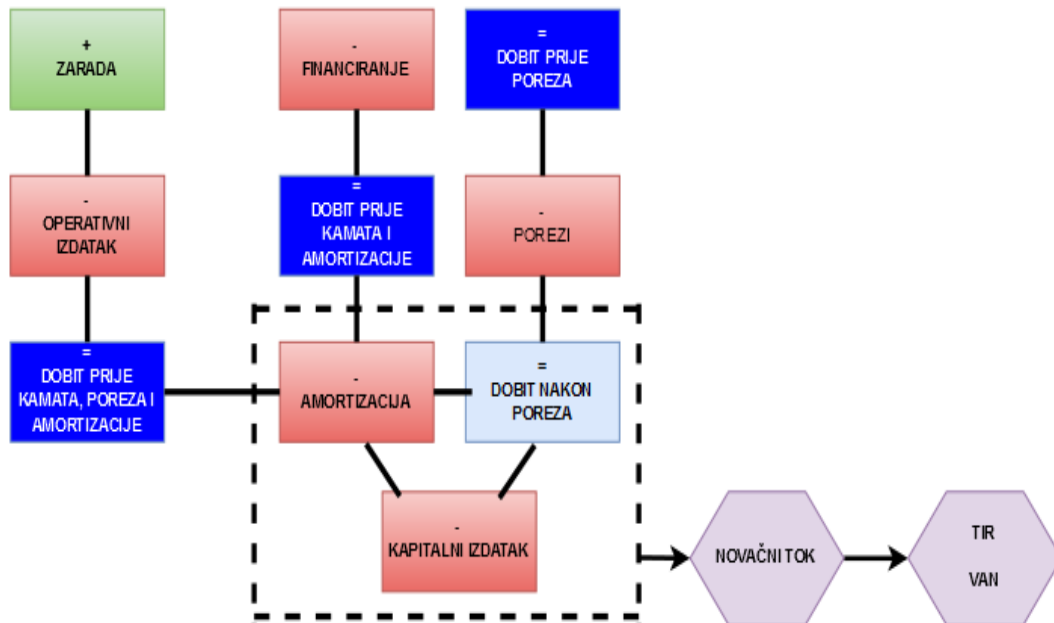
Proces ekonomske procijene:

- Izdanci financijskog napretka koji bi svaki investitor mogao postići
- Identifikacija rizika i nesigurnosti svakog projekta kojeg investitor preuzima
- Određivanje očekivanih troškova i dobiti projekta

Kada se analizira investicijski projekt, potrebno je uzeti sljedeće varijable u obzir:

- Veličina projekta – može biti određena količinom potrebnih fondova ili drugih neophodnih resursa
- Stupanj ovisnosti – Investicijski projekti mogu biti neovisni, međusobno isključivi, komplementarni ili zamjenski
- Efekt ekonomskog rizika – ovaj projekt može biti više ili manje rizičan od ostalih projekata poduzetih od strane investitora. Ovaj projekt može povećati ili smanjiti prosječan rizik, tako da je vrlo bitno odrediti da li ga poduzeti ili ne
- 

Nakon procjene ovih varijabli, procjena izvodljivosti ovog projekta će biti znatno lakša. Kako bi se olakšala primjena ekonomskih pokazatelja za određivanje procjene izvodljivosti investicije, u nastavku će biti pojašnjeni osnovni koncepti.



Slika 9.1. Dijagram zarada-troškovi

Operativni izdatak (eng. *OPEX*) su troškovi koji nastaju kao rezultat obavljanja normalnog poslovanja. Kapitalni izdatak (eng. *CAPEX*) su izdaci za kupnju ili nadogradnju fizičke imovine kao oprema ili građevine u cilju stvaranja buduće koristi. Amortizacija je otplata stečenog duga s fiksnim rasporedom otplate u redovnim naknadama u određenom vremenskom razdoblju.

Dobit prije kamata, poreza i amortizacije (eng. *EBITDA*) je približna mjera operativnih novčanih tokova na temelju podataka iz investitorskog računa dobiti i gubitaka. Izračunato od dobiti prije kamata, poreza, deprecijacije i amortizacije. Trošak za proračun je bez kamata, poreza, deprecijacije i amortizacija.

$$EBITDA = \text{Prihodi} - \text{Troškovi}$$

Dobit prije kamata i poreza (eng. *EBIT*) je pokazatelj ekonomske profitabilnosti, izračunato od dobiti prije troškova, kamata i poreza. Dobit prije poreza (eng. *EBT*) je indikator ekonomske profitabilnosti, izračunato prije poreza. Dobit poslije poreza (eng. *EAT*) je indikator ekonomske profitabilnosti, izračunato dobitima poslije poreza.

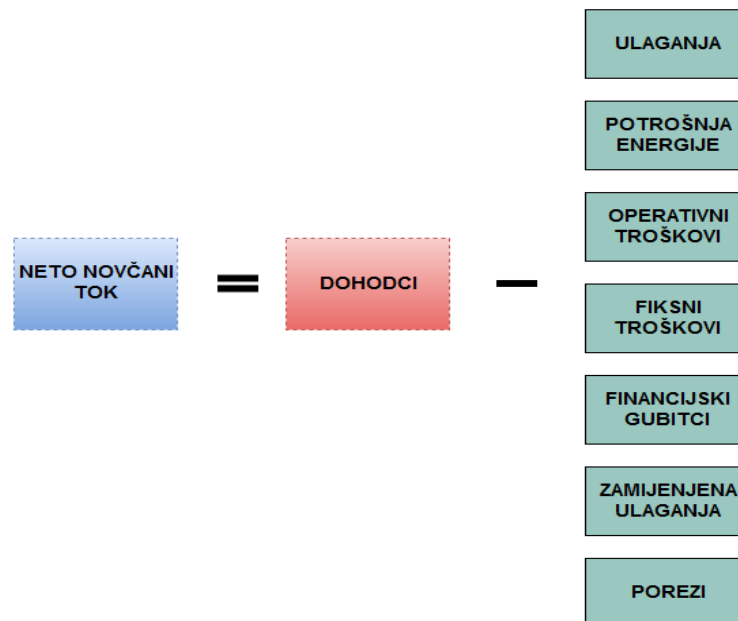
### 8.3. Ekonomski pokazatelji

Novčani tok (eng. *Cash flow* - CF) je razlika između priljeva i odljeva novca u određenom vremenskom periodu.[19]

Pozitivan novčani tok se postiže:

- Smanjivanjem troška uloga projekta
- Brzima prikupljanjem zbog uštede energije
- Sporom otplatom
- Primanjem kredita ili subvencije

Treba uzeti u obzir da razina novčanih tokova nije dobar indikator izvodljivosti projekta, jer visoka razina novčanih tokova nije znak većih profita ili obrnuto.



Slika 9.2 Novčani tok

Jednostavni period povrata (skraćeno JPP) je vremensko razdoblje da se oporavi trošak ulaganja u projekt. Itračunava se iz ukupne investicije i ostvarenih ušteda nakon provedbe mjera. Većina projekata energetske učinkovitosti imaju relativno kratko razdoblje povrata i dobro povratno ulaganje. Jednostavni period povrata je važan pokazatelj toga bi li se trebao poduzeti projekt.



$$JPP = \frac{Ulaganja (kn)}{Godišnja ušteda (kn)}$$

Gdje su:

Ulaganja: trošak opreme „na lokaciji“ + radna snaga

Godišnja ušteda: ekonomska ušteda na računima ili zbog promjene opreme

Prednost jednostavnog perioda povrata je jednostavno razumjevanje. Iz tog razloga nije primjeren za veće projekte, jer se ne uzima u obzir vremenska vrijednost novca, analiza je ograničena na trajanje otplate, te se u obzir ne uzimaju naknadna izdavanja za popravke koji mogu produžiti rok otplate ili dodatna ušte za slučaj da se poveća otkupna cijena električne energije koja bi utjecala na smanjenje roka otplate.

Neto sadašnja vrijednost (NPV) je razlika sadašnje vrijednosti novčanih odljeva i sadašnje vrijednosti novčanih priljeva. To znači da bilo koja novčana jedinica (npr. euro), zarađena u budućnosti neće biti vrijedna koliko jedan zarađeni danas zbog vremenske vrijednosti novca. Neto sadašnja vrijednost je jedan od najboljih indikatora za analizu profitabilnosti uloga ili projekta.

$$NPV = \sum_{n=0}^t INV_{base} - \frac{(SAVING_t - INV_t)}{(1 + k)^t}$$

Gdje su:

$INV_{base}$  : Prvobitni ulog (Trošak opreme „na lokaciji“ + radna snaga – preostala vrijednost opreme)

$SAVING_t$  : Uštede za godinu „t“ (ekonomska ušteda na računima)

$INV_t$  : Dodatna investicija za godinu „t“

n: Vrijeme razmatranja u godinama

k: Diskontna (eskontna) stopa

Prednosti NPV-a u odnosu na jedinstveni povratni period su uzimanje u obzir vremensku vrijednost novca i novčanih tokova, te se riziku i profitabilnosti daje veliki prioritet.

Ograničenja neto sadašnje vrijednosti su ne uzimanje prvobitnih investicija u obzir te ne uzimanje vremenskog trajanja projekta.

Interna stopa povrata (IRR) je diskontna stopa koju treba primijeniti na buduće uštede kako bi se izjednačili investicijski troškovi. To čini NPV ulaganje iz određenog projekta jednak nuli. Što je interna stopa profitabilnosti viša, to je poželjnije provesti projekt. Vrijednosti IRR-a su dane u postotcima.

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{(SAVING_t - INV_t)}{(1 + IRR)^t} - INV_{base}$$

Gdje su:

$INV_{base}$  : Prvobitni ulog (Trošak opreme „na lokaciji“ + radna snaga – preostala vrijednost opreme)

$SAVING_t$  : Uštede za godinu „t“ (ekonomska ušteda na računima)

$INV_t$  : Dodatna ulaganja „t“

n: Broj godina u periodu promatranja

Prednosti su jednostavan način prikazivanja vrijednosti projekta, te ako je dovoljno visoka, nema potrebe procjenjivati traženi povrat, što je veoma težak zadatak.

Nedostatci su jer se ne mogu međusobno primjenjivati isključujući projekti koji imaju drugačija trajanja i različitu raspodjelu naknada. Isti projekt može imati različitu internu stopu povrata jer matematički mogu postojati drugačija rješenja za jednadžbu  $NPV=0$

Povrat od ulaganja (ROI), ocjenjuje učinkovitost ulaganja. Za izračun ROI, koristi od ulaganja dijele se troškom ulaganja. Ako investicija nema pozitivan ROI, ili postoje druge mjere s višim ROI, onda ulaganje ne bi trebalo poduzeti.

$$ROI (\%) = \frac{(SAVING - INV)}{SAVING}$$

Gdje je:

SAVING : Dobitci od ulaganja

INV : Trošak ulaganja

Prednost je vrlo jednostavan i čest kriterij pri analizi ulagačkih odluka. Nedostaci za izračun ROI se može lako mijenjati na temelju cilja analize. Ovisno o tome što je uključeno u dobitcima i troškovima

#### **8.4. Pravna izvodljivost**

Ova studija odgovara na pitanje: je li predloženi projekt legalan? Pravna izvodljivost je jedan od limitirajućih aspekata projekta energetske učinkovitosti, tako da je detaljna studija legalnih aspekata projekt izrazito nužna.

Svaki postojeći zakon koji može utjecati na projekt mora biti pažljivo i detaljno pregledan kako bi se razumio utjecaj koji zakonodavstvo može imati na uspjeh ispunjenja projekta. Važno je prvobitno proučiti zakonodavstvo i regulative vezano uz javnu nabavu te potom zakonodavstvo vezano uz specifične sektore, koje može imati utjecaj na projekt, kako bi se mogao složiti popis suglasnosti koje opcije mjeriti.

Neki od važnijih pravnih aspekata koje je potrebno zadovoljiti:

- Energetska regulativa

- Regulativa vezana uz ekologiju

- Financijska regulativa

- Porezna regulativa

- Zakon o radu

- Administracijska regulativa

- Posebna regulativa po sektorima

Pravnu izvodljivost projekta potrebno je potvrditi kod nadležnih institucija. Nakon njenog ovjeravanja, svi pravni zahtjevi su zadovoljeni.

#### **8.5. Operativna i vremenska studija izvodljivosti**

Operativna studija odgovara na pitanje: Koliko se projekt uklapa u potrebe investitora? Analiza operativne izvodljivosti prikazati će koliko će projekt povećati uštedu ili ispuniti postavljene ciljeve. Ovaj odjeljak će različite dodatne potrebe i različita odjeljenja koja moraju biti uključena u projekt. Ovaj Aspekt nije najvažniji u cjelokupnoj izvodljivosti projekta, ali ga treba uzeti u obzir.

Ove studije su izvođene kako bi se otkrilo mogu li predložene mjere biti provedena bez potrebe za dodatnim ulaganjima. Ako postoji potreba za dodatnom opremom, tj. ulaganja, potrebno je proučiti kako to utječe na ostale aspekte projekta.

To omogućuje prikaz kako bi dodatni troškovi utjecali na povećanje cjelokupni prihod projekta. Ukoliko predložene mjere povisuju troškove i nisu isplative vlasnicima, projekt nije smatran izvodljivim.

Potrebno je razmotriti hoće li biti potrebno dodatno ulagati sredstva u projekt te hoće li zadani vremenski period biti dovoljan za provedbu projekta, ako su potrebna dodatna sredstva i dodatno vrijeme koliko će je potrebno. Također je potrebno razmotriti da li se projekt može implementirati na postojeću konstrukciji ili se moraju napraviti preinake, te ako se moraju napraviti preinake, kakve su preinake potrebne.

Izvodljivost po rasporedu postavlja pitanje: Je li izvedivo u danom vremenu? To je zadnji stupanj u analizi izvodljivosti energetski učinkovitog projekta. Analizira se realan vremenski okvir za izradu projekta i također pomaže pri procjeni održivosti ideje. Ako se raspored ne čini održivim ili jer je previše vremenski zahtjevan, treba ga razraditi tako da bude u skladu s ciljevima.

## 8.6. Ekonomska izvodljivost FN sustava FNE $\leq$ 10kW

U tablicama 8.1. i 8.2. su prikazane vrijednosti početne investicije, prihoda i toka novca kroz period od 14 godina.

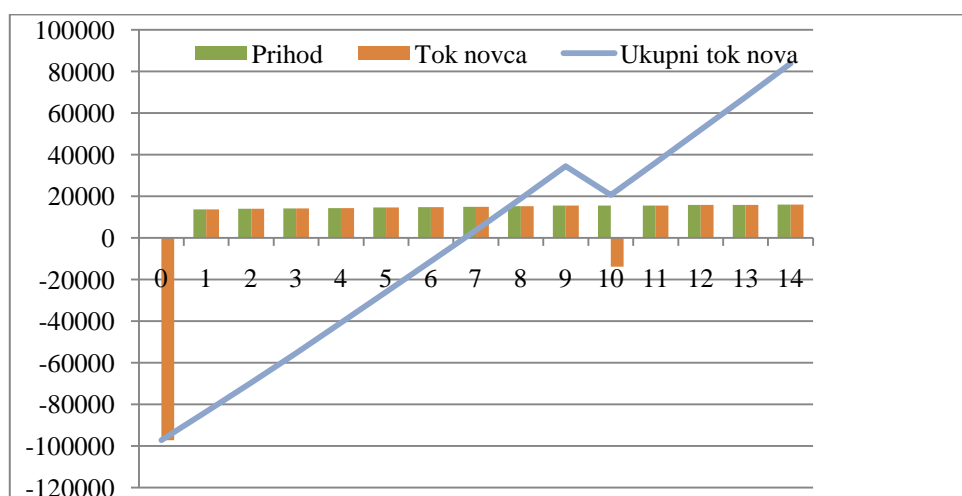
Tablica 8.1. Troškovi i prihodu FN sustava izraženi u HRK za prvih 6 godina

Godina	0	1	2	3	4	5	6
Investicija	-97287						
Prihod	0	13728	14003	14213	14355	14642	14789
Operativni prihodi	0	13728	14003	14213	14355	14642	14789
Tok novca	-97287	13728	14003	14213	14355	14642	14789
Ukupni tok novca	-97287	-83558	-69555	-55342	-40699	-26056	-11267

Tablica 8.2. Troškovi i prihodu FN sustava izraženi u HRK za preostali period

Godina	7	8	9	10	11	12	13	14
Investicija				-29367				
Prihod	14981	15206	15510	15518	15602	15773	15792	16025
Operativni prihodi	14981	15206	15510	15518	15602	15773	15792	16025
Tok novca	14981	15206	15510	-13848	15602	15773	15792	16025
Ukupni tok novca	3714	18920	34431	20583	36185	51959	67751	83777

Za desetu godinu predviđena je zamjena pretvarača, jer nakon tog perioda prestaje vrijediti garancija.



Graf 8.1. Grafički prikaz povratnog perioda za FNE  $\leq$ 10kW

Tablica 8.3. Proračun neto sadašnje vrijednosti za FNE<=10kW

Godina	Ulaz novca	Početna investicija /Izlaz novca	Neto tok novca	Diskontni novčani tok
0	0	97287	-97282	-97287
1	13728	0	13728	13074,29
2	14003	0	14003	12701,13
3	14213	0	14213	12277,72
4	14355	0	14355	11809,89
5	14642	0	14642	11472,39
6	14789	0	14789	11035,78
7	14981	0	14981	10646,72
8	15206	0	15206	10292,02
9	15510	0	15510	9997,88
10	0	13848	-13848	-8501,47
11	15602	0	15602	9122,17
12	15773	0	15773	8783
13	15792	0	15792	8374,83
14	16025	0	16025	8093,71
	Ukupni ulaz novca	Ukupni izlaz novca	Ukupni neto tok	
Ukupno	194619	111135	83484	
<b>Rezultati</b>				
Neto sadašnja vrijednost (NPV)	31893,06			
Index profitabilnosti (PI)	1,3278			

Tablica 8.4. Proračun interne stope povrata (IRR)

Godina	Ulaz novca	Početna investicija /Izlaz novca	Neto tok novca
0	0	97287	-97282
1	13728	0	13728
2	14003	0	14003
3	14213	0	14213
4	14355	0	14355
5	14642	0	14642
6	14789	0	14789
7	14981	0	14981
8	15206	0	15206
9	15510	0	15510
10	0	13848	-13848
11	15602	0	15602
12	15773	0	15773
13	15792	0	15792
14	16025	0	16025
	Ukupni ulaz novca	Ukupni izlaz novca	Ukupni neto tok
Ukupno	194619	111135	83484
Rezultati			
Interna stopa Povrata (IRR)	9,99%		

## 8.7. Ekonomska izvodljivost FN sustava FNE $\geq$ 30kW

U tablicama 8.5. i 8.6. su prikazane vrijednosti početne investicije, prihoda i toka novca kroz period od 14 godina.

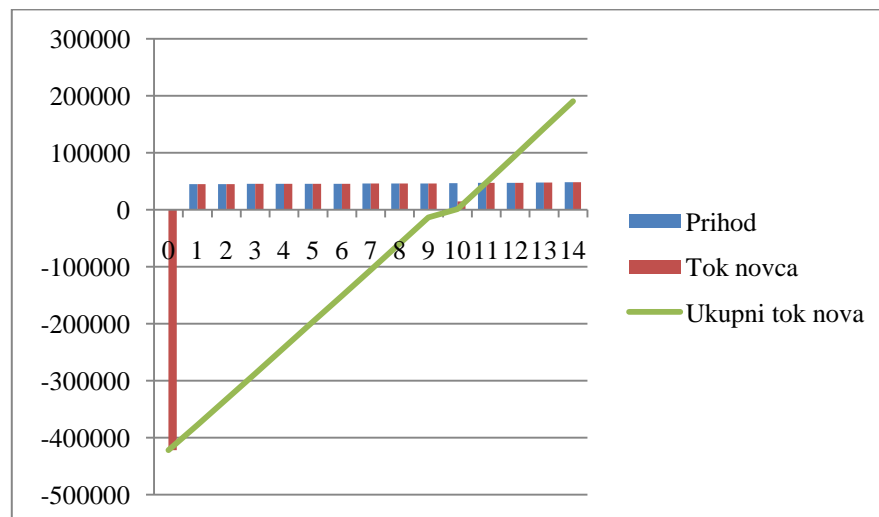
Tablica 8.5. Troškovi i prihodu FN sustava izraženi u HRK za prvih 6 godina

Godina	0	1	2	3	4	5	6
Investicija	-422146						
Prihod	0	44648	44852	45057	45357	45421	45591
Operativni prihodi	0	44648	44852	45057	45357	45421	45591
Tok novca	-422146	44648	44852	45057	45357	45421	45591
Ukupni tok novca	-422146	-377498	-332646	-287589	-242232	-196811	-151220

Tablica 8.6. Troškovi i prihodu FN sustava izraženi u HRK za preostali period

Godina	7	8	9	10	11	12	13	14
Investicija				-32000				
Prihod	45665	45820	46150	46450	46782	47121	47534	48038
Operativni prihodi	45665	45820	46150	46450	46782	47121	47534	48038
Tok novca	45665	45820	46150	14450	46782	47121	47534	48038
Ukupni tok novca	-105555	-59735	-13585	865	47647	94768	142302	190340

Za desetu godinu predviđena je zamjena pretvarača, jer nakon tog perioda prestaje vrijediti garancija.



Graf 8.2. Grafički prikaz povratnog perioda za FNE  $\geq$ 30kW



Tablica 8.7. Proračun neto sadašnje vrijednosti za FNE $\geq$ 30kW

Godina	Ulaz novca	Početna investicija /Izlaz novca	Neto tok novca	Diskontni novčani tok
0	0	422146	-422146	-422146
1	44648	0	44648	42930,77
2	44852	0	44852	41468,8
3	45057	0	45057	40055,51
4	45357	0	45357	38771,35
5	45421	0	45421	37332,75
6	45591	0	45591	36031,23
7	45665	0	45665	34701,6
8	45820	0	45820	33480,23
9	46150	0	45150	32424,38
10	0	32000	-32000	-21618,05
11	46782	0	46782	30388,7
12	47121	0	47121	29431,64
13	47534	0	47534	28547,69
14	48038	0	48038	27740,75
	Ukupni ulaz novca	Ukupni izlaz novca	Ukupni neto tok	
Ukupno	598034	454146	143890	
<b>Rezultati</b>				
Neto sadašnja vrijednost (NPV)	9540,8			
Index profitabilnosti (PI)	1,0226			

Tablica 8.8. Proračun interne stope povrata (IRR) za FNE $\geq$ 30kW

Godina	Ulaz novca	Početna investicija /Izlaz novca	Neto tok novca
0	0	422146	-422146
1	44648	0	44648
2	44852	0	44852
3	45057	0	45057
4	45357	0	45357
5	45421	0	45421
6	45591	0	45591
7	45665	0	45665
8	45820	0	45820
9	46150	0	45150
10	0	32000	-32000
11	46782	0	46782
12	47121	0	47121
13	47534	0	47534
14	48038	0	48038
	Ukupni ulaz novca	Ukupni izlaz novca	Ukupni neto tok
Ukupno	598034	454146	143890
Rezultati			
Interna stopa povrata (IRR)	4,35%		

## 9. ZAKLJUČAK

Energija Sunčeva zračenja u ukupnoj bilanci može biti ishodište svih energetske oblika. Dotok ukupnog sunčevog zračenja koje dopre do Zemljine površine iznosi  $920 \text{ W/m}^2$  te ako je projekcija površine Zemlje  $127.106 \text{ km}^2$ , dotok energije iznosi  $117.400 \text{ TW}$ .

Zbog rotacije Zemlje ta se energija raspoređuje po cijeloj njezinoj površini te je prosječni dotok energije  $230 \text{ W/m}^2$ , odnosno  $5.52 \text{ kWh/m}^2$  dnevno. To su prosječne vrijednosti, a stvarne zavise o zemljopisnoj širini, dijelu dana, pojavi oblaka, zagađenju itd.

Za odabrane FN module i izmjenjivače napravljen je proračun dobivene električne energije iz FN sustava. Investitor za svoju FNE sklapa ugovor sa operaterom tržišta električne energije na period od 14 godina. Pomoću dobivenih vrijednosti, prvo je napravljen jednostavni povratni period koji je pokazao da  $FNE \leq 10 \text{ kW}$  postaje isplativa nakon osme godine, a u preostalom periodu sva dobit ostaje investitoru. Za slučaj  $FNE \geq 30 \text{ kW}$  jednostavni povratni period pokazao je da se elektrana isplati tek u desetoj godini i to uz vrlo malu dobit, a da od preostale četiri godine do isteka ugovora sva dobit ostaje investitoru.

Provedbom ekonomske analize za slučaj  $FNE \leq 10 \text{ kW}$  dobivena neto sadašnja vrijednost iznosi  $31893.06$  kuna uz indeks profitabilnosti u iznosu od  $1.32$ . Sama vrijednost neto sadašnje vrijednosti je vrlo malena no ona pokazuje da je projekt isplativ. Ekonomska analiza za  $FNE \geq 30 \text{ kW}$  je za neto sadašnju vrijednost dala iznos od  $9540.8$  kuna uz indeks profitabilnosti od  $1.022$ . Dobivena vrijednost je ispod očekivanih vrijednosti što upućuje da je projekt isplativ ali uz veliki rizik, jer bi dodatnim ulaganjima neto sadašnja vrijednost otišla u negativnu vrijednost.

Projekt je moguće izvesti samo uz zadovoljenje već spomenuta tri uvjeta (tehnički, ekonomski i pravni), no također u obzir treba uzeti i preostala dva aspekta studije izvodljivosti jer oni mogu sadržavati dodatne ili neplanirane troškove. Dodatni troškovi mogu biti dodatna radna snaga ili produljenje vremenskog roka što je posljedica novih troškova koji mogu povećati rok otplate projekta, tj. smanjiti ukupnu dobit investitora, koji na temelju zadnja dva aspekta može odlučiti želi li nastaviti ili prekinuti provedbu projekta.

## LITERATURA

- [1] Alfirević, I., dr.: Inženjerski priručnik: Temelji inženjerskih znanja, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [2] P.Kulišić, „Sunčane ćelije“, Školska knjiga, Zagreb 1994
- [3] Lj. Majdandžić, Solarni sustavi, Graphis d.o.o., 2010.
- [4] M. Perić, Računalna simulacija rada fotonaponskog sustava, magistarski rad, Zagreb 2002.
- [5] Stojkoi, M., Provči, I.,Brandalo, J.: Pregled parametara fotonaponskih ćelija i snimanje promjena karakteristika tijekom dana, Šibenik 2008.
- [6] N. Jovančić, Pretvaranje energije Sunčevog zračenja u električnu – Fotonaponski sistemi, diplomski rad, Sarajevo 2009.
- [7] <http://www.schrack.hr/alternativni-izvori/photovoltaik/osnove-o-fn-cliji-i-modulu/>, pristupljeno 4.6.2016.
- [8] Flamtron d.o.o., obnovljivi izvori energije
- [9] <http://www.zelenaenergija.org/clanak/hibridni-solarni-sustavi/3651>
- [10] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)
- [11] <http://www.bisol.com/hr/>
- [12] <http://www.sma.de/en/products/overview.html> , pristupljeno 20.7.2016.
- [13] Šerman, Bojan, „Projektiranje FN sustava“, seminarski rad, srpanj,2015.
- [14] Tihomir Pehar, Smjernice za izradu projektne dokumentacije fotonaponskog sustava spjenog na elektroenergetsku mrežu, str. 38.
- [15] HROTE, Sustav poticanja obnovljivih izvora energije i kogeneracije u RH – godišnji izvještaj za 2016. godinu
- [16] <http://www.yinglisolar.com/en/products/solar-modules/>
- [17] <http://pvshop.eu/Growatt-40000-TL3-40kW-3phase-PV-Solar-Inverter.html>.
- [18] Feasibility Study, University of Toronto, godina 2006.
- [19] Business case guide, Kanada 2009.

## SAŽETAK

Cilj rada je napraviti studiju izvodljivosti za fotonaponsku elektranu  $FNE \leq 10$  kW i fotonaponsku elektranu  $FNE \geq 30$  kW. Prednost fotonaponskih sustava je besplatna i čista energija, koju je moguće dovesti u područja koja nisu pokrivena elektroenergetskom infrastrukturom. Napravljena je studija izvodljivosti, pomoću koje je izrađen tehnički opis fotonaponskih elektrana te izrađena ekonomska analiza. Iz provedene analize dobiva se vremenski period da bi se investicija isplatila.

Ključne riječi: sunčevo zračenje, fotonaponski moduli, energetska učinkovitost, studija izvodljivosti, neto sadašnja vrijednost, novčani tok

## ABSTRACT

The goal is to make feasibility analysis for a photovoltaic powerplant  $FNE \leq 10$  kW and photovoltaic powerplant  $FNE \geq 30$  kW. The advantage of photovoltaic systems is free and clean energy, that can be installed in areas that are not covered with power infrastructure. Feasibility study is done, which helps with making of technical description of photovoltaic plants. Also, economic analysis is made, which provides a time period when the investment is profitable.

Key words: solar radiation, photovoltaic modules, energy efficiency, feasibility analysis, neto present value, cash flow.

## ŽIVOTOPIS

Bojan Šerman rođen je 23.1.1990. u Osijeku u Hrvatskoj. Osnovnu školu završio je u Osijeku. Pohađao je Elektrotehničku i prometnu srednju školu u Osijeku, smjer tehničar za mehatroniku, koju je završio 2008. godine, čime je stekao srednju stručnu spremu. Obrazovanje je nastavio na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku upisom na sveučilišni preddiplomski studij 2008. godine. Godine 2014. završio je preddiplomski studij smjera elektroenergetike, te upisao diplomski studij smjera elektroenergetika.

## PRILOG

Tablica 4.2. Sunčevo zračenje za područje Zagreba,[10]

Mjesec	$H_h$ (Wh/m <sup>2</sup> )	$H_{opt}$ (Wh/m <sup>2</sup> )	$H(90)$ (Wh/m <sup>2</sup> )	$I_{opt}$ (°)	$T_{24h}$ (°C)
Siječanj	1090	1680	1690	62	1.5
Veljača	1960	2850	2640	57	1.2
Ožujak	3390	4290	3360	45	7.0
Travanj	4660	5200	3260	31	12.1
Svibanj	5670	5730	2910	18	16.0
Lipanj	6210	6010	2740	13	20.4
Srpanj	6290	6250	2950	16	23.4
Kolovoz	5510	5990	3380	27	22.8
Rujan	3830	4680	3400	41	17.4
Listopad	2500	3470	3030	53	11.7
Studeni	1250	1860	1790	59	7.3
Prosinac	860	1340	1370	63	2.1
Godišnji prosjek	3610	4120	2710	34	11.9

Tablica 4.3. Sunčevo zračenje za područje Zadra

Mjesec	$H_h$ (Wh/m <sup>2</sup> )	$H_{opt}$ (Wh/m <sup>2</sup> )	H(90) (Wh/m <sup>2</sup> )	$I_{opt}$ (°)	$T_{24h}$ (°C)
Siječanj	1650	2880	2970	65	7.7
Veljača	2640	4100	3800	58	7.7
Ožujak	4340	5670	4380	46	10.7
Travanj	5500	6170	3720	31	14.1
Svibanj	6740	6720	3170	17	17.8
Lipanj	7340	6910	2830	11	22.6
Srpanj	7630	7380	3110	14	25.8
Kolovoz	6580	7070	3760	26	25.5
Rujan	4860	6080	4310	41	21.2
Listopad	3270	4770	4150	54	16.7
Studeni	1840	3030	3000	62	13.6
Prosinac	1410	2590	2750	67	8.9
Godišnji prosjek	4490	5290	3500	36	16.0

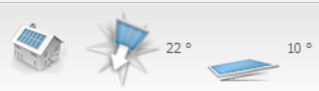
Tablica 4.4. Sunčevo zračenje za područje Rijeke

Mjesec	$H_h$ (Wh/m <sup>2</sup> )	$H_{opt}$ (Wh/m <sup>2</sup> )	H(90) (Wh/m <sup>2</sup> )	$I_{opt}$ (°)	$T_{24h}$ (°C)
Siječanj	1220	2080	2140	65	6.4
Veljača	2150	3330	3120	59	6.1
Ožujak	3510	4520	3520	46	9.8
Travanj	4740	5300	3290	31	13.6
Svibanj	5820	5840	2920	20	17.2
Lipanj	6550	6240	2770	12	21.9
Srpanj	6760	6620	3030	16	24.9
Kolovoz	5780	6270	3480	27	24.6
Rujan	4100	50880	3670	41	20.2
Listopad	2630	3750	3270	54	15.5
Studeni	1370	2190	2140	62	12.3
Prosinac	1040	1900	2040	68	7.9
Godišnji prosjek	3820	4430	2950	36	15.0



Slika 1. Kompatibilnosti FN modula i izmjenjivača za  $FNE \leq 10\text{kW}$

▼ PV arrays

Name	Manufacturers/PV module	Number of PV modules/Peak power	Orientation/Mounting type
1 PV array 1	Bisol d.o.o. BSO-260 BIPV (05/2014) <span style="float: right;">i Q</span>	20 PV modules 5.20 kWp	


[+ Add PV array](#)

▼ Inverter design

Here you can adjust the specifications for automatic design and suggested designs.

[Inverter filter](#)
[Manual design](#)
[Design suggestions](#)
[Automatic design](#)

▼ Inverter

Type	1. PV array 1	2.	3.	Displacement power factor cos φ	Limitation of AC active power
 1 x SB 3600SE-10 PV/Inverter compatible <span style="float: right;">i</span>	20 / 20			1.00	3.68 kW


► Information and solution proposals (1 note)

▼ Details


Peak power: 5.20 kWp
Nominal power ratio: 100 %
Energy usability factor: 99.5 %

**Performance**

Nominal power ratio: 100 %



Inverter efficiency: 94.9 %



Annual energy yield: 5,444.70 kWh

Spec. energy yield: 1047 kWh/kWp

Performance ratio: 81 %

Line losses (in % of PV energy): --- %

✔ PV/Inverter compatible

Parameter	Inverter	Input A	Input B	Input C
Max. DC power	5.20 kW	2.86 kWp	2.34 kWp	
Min. DC voltage	125 V	280 V	229 V	
Typical PV voltage		✔ 342 V	✔ 280 V	
Max. DC voltage (Inverter)	750 V	✔ 480 V	✔ 393 V	
Max. DC current (A/B)	15/15 A	✔ 8.4 A	✔ 8.4 A	

Slika 2. Kompatibilnosti FN modula i izmjenjivača za  $FNE \geq 30kW$

▼ PV arrays

Name	Manufacturers/PV module	Number of PV modules/Peak power	Orientation/Mounting type
1 PV array 1	Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. Panda YL 280C-30b (09/2013) <span style="float: right;">i Q</span>	140 PV modules 39.20 kWp	15° 20° <span style="float: right;">🗑️</span>

+ Add PV array

▼ Inverter design

Here you can adjust the specifications for automatic design and suggested designs.

Inverter filter
Manual design
Design suggestions
Automatic design

▼ Inverter

Type	1. PV array 1	2.	3.	Displacement power factor $\cos \varphi$	Limitation of AC active power
<span style="font-size: 0.8em;">2 x STP 20000TL-30 PV system section 1</span> <span style="float: right;">i</span>	140 / 140			1.00	20.00 kW <span style="float: right;">🗑️</span>

▼ Details
Peak power: 39.20 kWp
Nominal power ratio: 104 %
Energy usability factor: 100 %

**Performance**

Nominal power ratio: 104 %

500 % 88 %

Inverter efficiency: 97.6 %

90 % 100 %

Annual energy yield: 45,206.70 kWh

Spec. energy yield: 1153 kWh/kWp

Performance ratio: 85.8 %

Line losses (in % of PV energy): --- %

✔️ PV/Inverter compatible

Parameter	Inverter	Input A	Input B	Input C
Max. DC power	20.44 kW	15.96 kWp	3.64 kWp	
Min. DC voltage	150 V	498 V	341 V	
Typical PV voltage		✔️ 597 V	✔️ 408 V	
Max. DC voltage (PV)	1000 V	✔️ 836 V	✔️ 572 V	
Max. DC current (A/B)	33/33 A	✔️ 26.9 A	✔️ 9.0 A	