

Mogućnosti neto mjerenja i isplativost integriranih PV sustava u kućanstvima u Hrvatskoj

Čavar, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:509087>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

David Čavar

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Student:

David Čavar

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se docentu Goranu Krajačiću , te asistentu Nikoli Mataku na stručnoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

David Čavar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: David Čavar

Mat. br.: 0036466636

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Mogućnosti neto mjerenja i isplativost integriranih PV sustava u kućanstvima u Hrvatskoj

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Net metering possibilities and profitability of household integrated PV systems in Croatia

Opis zadatka:

Napretkom tehnologije izrade te značajnim padom cijena fotonaponskih (PV) modula postoji sve veća mogućnost za njihovo korištenje u proizvodnji električne energije. Prema podacima Eurostata iz 2013. godine u većini zemalja Europske unije postignut je paritet mreže, engl. *grid parity*. Ovo označava prekretnicu jer proizvodnja električne energije iz PV sustava u kućanstvima, na period od 20 godina, postaje jeftinija od kupnje električne energije iz mreže. Kako bi se detaljnije istražila profitabilnost takvih sustava u Hrvatskoj u skladu sa Zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 100/15) i mogućnost njihove instalacije u kućanstvima, u radu je potrebno:

1. Napraviti pregled literature vezan uz sustav neto mjerenja i opisati primjere korištenja takvih sustava u EU.
2. Napraviti jednostavan matematički model, koji će simulirati proizvodnju integriranog PV sustava i potrošnju kućanstva za Republiku Hrvatsku.
3. U razvijenom matematičkom modelu provesti proračun za nekoliko kućanstava iz nekoliko kategorija potrošnje (minimalno 3 kućanstva iz svake kategorije do 2500 kWh, do 5000 kWh i do 10000 kWh potrošnje električne energije godišnje).
4. S obzirom na rezultate iz točke 3. provesti proračun za 10, 1000, 100000 kućanstava te ispitati profitabilnost takvog sustava.

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

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.


Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.


Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zdao:


Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled poglavlja.....	3
2. SOLARNI SUSTAVI.....	4
2.1. Sunce kao izvor energije	4
2.2. Solarni fotonaponski sustavi	4
2.2.1. Fotonaponski članak	5
2.2.2. Izmjenjivač.....	10
3. POTICAJNI MODELI ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE.....	12
3.1. Feed-in tarife [12]	12
3.2. Neto mjerenje [13]	12
3.2.1. Neto mjerenje u EU	13
4. POTICAJI ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE U REPUBLICI HRVATSKOJ....	16
5. OPIS MODELA I METODA PRORAČUNA	18
5.1. Simulacija proizvodnje integriranog PV sustava i potrošnje prosječnog kućanstva..	18
5.2. Razvijeni proračun za različite razrede potrošnje kućanstava	19
6. REZULTATI PRORAČUNA.....	21
6.1. Rezultati za prosječno kućanstvo	21
6.1.1. Prihodi od električne energije	22
6.1.2. Investicijski i pogonski troškovi solarne elektrane	23
6.1.3. Isplativost projekta.....	24
6.2. Rezultati za različite kategorije potrošnje	25
6.2.1. Kućanstva s malom potrošnjom.....	25
6.2.2. Kućanstva sa srednjom potrošnjom	26
6.2.3. Kućanstva s velikom potrošnjom.....	27
6.3. Utjecaj promjene cijene električne energije na isplativost.....	29
6.4. Profitabilnost proširenog sustava	30
7. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34
PRILOZI.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prosječna ponderirana cijena PV sustava izravno spojenih na mrežu u svijetu [3]	1
Slika 2.	Paritet mreže u EU, 2013. [5].....	3
Slika 3.	Usporedba godišnjeg zračenja na površini Zemlje, zaliha fosilnih i nuklearnih goriva, te potrošnje energije u svijetu [7].....	4
Slika 4.	Kućna instalacija PV sustava na mrežu [7].....	5
Slika 5.	Fotonaponski članak [8].....	7
Slika 6.	I-U karakteristika PV članka.....	8
Slika 7.	Dijelovi PV modula [10].....	10
Slika 8.	Proizvodnja i potrošnja energije u jednom danu.....	17
Slika 9.	Usporedba dnevne potrošnje triju kućanstava iz jednog razreda potrošnje.....	20
Slika 10.	Ukupna mjesečna proizvedena energija u 2016. godini.....	21
Slika 11.	Ukupna potrošnja, proizvedena energija, samoopskrba i energija isporučena u mrežu kućanstva iz kategorije niske potrošnje.....	26
Slika 12.	Ukupna potrošnja, proizvedena energija, samoopskrba i energija isporučena u mrežu kućanstva iz kategorije srednje potrošnje.....	27
Slika 13.	Ukupna potrošnja, proizvedena energija, samoopskrba i energija isporučena u mrežu kućanstva iz kategorije visoke potrošnje.....	28
Slika 14.	Kretanje cijena električne energije za kućanstva u Hrvatskoj.....	29
Slika 15.	Unutrašnja stopa povrata kod različitih kategorija kućanstava.....	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razredi potrošnje kućanstava	19
Tablica 2. Pregled sustava različitih snaga instaliranih prosječnom kućanstvu	22
Tablica 3. Ponuda za sustav od 3kW	23
Tablica 4. Tok novca za investiciju u elektranu od 2 kW	24
Tablica 5. Potrošnje kućanstava u tri kategorije.....	25
Tablica 6. NPV i IRR kućanstava niske potrošnje	26
Tablica 7. NPV i IRR kućanstava srednje potrošnje	27
Tablica 8. NPV i IRR kućanstava visoke potrošnje	28
Tablica 9. Isplativost s popustom od 10 %	31
Tablica 10. Isplativost s popustom od 20 %	31
Tablica 11. Isplativost s popustom od 30 %	31
Tablica 12. Usporedba isplativosti za različite stope popusta u sustavu neto mjerenja	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
PV	-	fotonaponski
EU	-	Europska Unija
LCOE	[kn/kWh]	Nivelirana cijena proizvodnje električne energije
I_t	[kn]	Investicijski troškovi
M_t	[kn]	Operativni troškovi i troškovi održavanja
F_t	[kn]	Potrošnja goriva
E_t	[kWh]	Proizvodnja električne energije
r	[%]	Diskontna stopa
FiT	-	Feed-in tarifa
OiE	-	Obnovljivi izvori energije
I_f	[A]	Fotostruja
I_z	[A]	Struja zasićenja
q	[C]	Elementarni naboj
k	[J/K]	Boltzmannova konstanta
T	[K]	Termodinamička temperatura
FF	[%]	Faktor punjenja
AM	-	Zračna masa
STC	-	Standardni testni uvjeti
NOCT	-	Nominalna operativna temperatura članka
MPP	-	Točka maksimalne snage
E_{pi}	[kWh]	Ukupna električna energija preuzeta iz mreže unutar obračunskog razdoblja i
E_{ii}	[kWh]	Ukupna električna energija isporučena u mrežu unutar obračunskog razdoblja i
C_i	[kn/kWh]	Otkupna cijena proizvedene električne energije u obračunskom razdoblju i
PKCi	[kn/kWh]	Prosječna cijena električne energije preuzete iz mreže, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja i
HROTE	-	Hrvatski operater tržištem energije

PVGIS	-	<i>engl. Photovoltaic Geographical Information System</i>
HEP-ods	-	Hrvatska elektroprivreda – Operator distribucijskog sustava
NPV	[kn]	Neto sadašnja vrijednost
IRR	[%]	Unutrašnja stopa povrata
HERA	-	Hrvatska energetska regulatorna agencija

SAŽETAK

U ovom radu ispitana je isplativost proizvodnje električne energije u integriranim fotonaponskim (PV) sustavima. Napretkom tehnologije dolazi do značajnog pada cijena modula što dovodi do sve većih mogućnosti njihova korištenja. U početku se donosi pregled tehnologije fotonaponskih članaka. Kako bi se ubrzala primjena obnovljivih izvora energije potrebne su poticajne mjere. U nastavku se prikazuje pregled neto mjerenja kao jednog od modela poticanja, te primjeri neto mjerenja u EU. U radu je napravljen matematički model koji simulira proizvodnju integriranog PV sustava i potrošnju kućanstva u Republici Hrvatskoj. Lokacija simuliranog sustava je u Zagrebu. Napravljena je studija isplativosti takvog sustava u skladu sa Zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 100/15). Proračun je proširen na nekoliko kućanstava iz različitih razreda potrošnje. Proveden je i proračun za 10, 1000 i 100 000 kućanstava. Rezultati su pokazali da isplativost sustava snažno ovisi o potrošnji kućanstva, cijeni električne energije, veličini instaliranog sustava te njegovoj cijeni. Samoopskrba se pokazala neisplativom za kućanstva svih kategorija potrošnje. Tek se u slučaju smanjenja iznosa početne investicije ili porastom cijena električne energije model samoopskrbe pokazao isplativim, ali samo za kućanstva s visokom potrošnjom. Povećanjem cijene električne energije za 2,4 % godišnje, IRR kućanstva K8 postaje 4,3 %, a kućanstva K9 5,2 %. Smanjenjem cijene početne investicije za 30 % IRR za kućanstva K7 postaje 4,2 %, za kućanstva K8 6,3 %, a za kućanstva K9 7,4 %.

Ključne riječi: fotonaponski sustavi, neto mjerenje, paritet mreže, samoopskrba

SUMMARY

In this study, economic feasibility of integrated solar photovoltaic (PV) systems has been made. With the advancement of technology prices of modules keep falling which has led to increasing possibilities of application of these systems. In the beginning of the study overview of the technology of photovoltaic cells is given. To accelerate adoption of renewable energy sources support mechanisms are needed. In the continuation overview of net metering, as one of support mechanisms, is given as well as examples of its use in EU. In this study, mathematical model was made that simulates production of electricity of integrated PV system and household consumption of electricity in Croatia. Location of the simulated system is in Zagreb. Economic feasibility study of such system according to Act on renewable energy sources and high-efficiency cogeneration (NN 100/15) was made. Model was expanded to several households from different consumption brackets. Furthermore, calculation was made for 10, 1000 and 100 000 households. Results have shown that feasibility is strongly influenced by household consumption, electricity price, size of installed system and its price. Self was shown economically unfeasible for households from all consumption categories. Only in the case of reduced price of initial investment or increased prices of electricity has the self-consumption model been proven feasible, but only for households with high consumption. By increasing the price of electricity by 2,4 % yearly, IRR of households K8 and K9 become 4,3 % and 5,2 % respectively. By reducing the price of investment by 30 % IRR of household K7 becomes 4,2 %, of household K8 6,3 % and household K9 7,4 %.

Key words: photovoltaic systems, net metering, grid parity, self-consumption

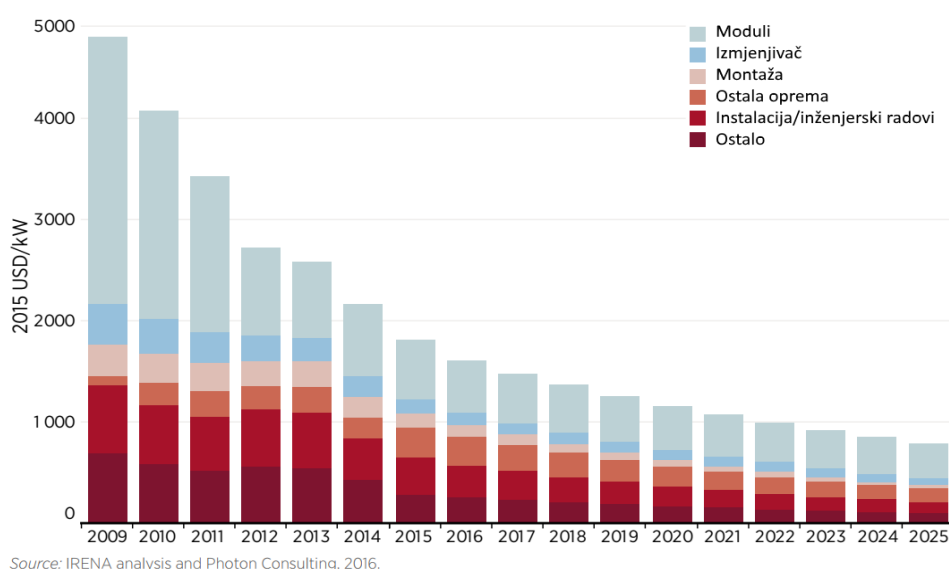
1. UVOD

Europska Unija je 2007. godine donijela obvezujuću direktivu kako bi do 2020. dostigla zacrtane ciljeve vezane uz energetiku i okoliš. Ti ciljevi su [1]:

1. 20 % potrošnje energije iz obnovljivih izvora
2. smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20 % u odnosu na 1990.
3. povećanje energetske učinkovitosti za 20 %

Kako bi se dostigli ti ciljevi članice Europske Unije koriste različite poticajne mjere za povećanje energije iz obnovljivih izvora. U početku, dok još nije bilo razvijeno tržište i cijene PV sustava su bile visoke, najčešći model bile su Feed-in tarife. Kako su cijene PV sustava padale, padali su i iznosi Feed-in tarifa pa su države počele prelaziti na ostale modele kao što su: neto mjerenje, model tržišnih premija, sustav obvezujućih kvota (zeleni certifikati), itd.

Obnovljivi izvor energije s najvećim instaliranim kapacitetom je hidroenergija s 1096 GW, što čini 54,3 % ukupnog kapaciteta svih obnovljivih izvora (2017 GW). Hidroenergija se u EU približava svom maksimalnom kapacitetu što znači da će rast morati doći iz drugih oblika. Iako ima relativno mali udio solarni fotonaponski sustavi imaju najbrži rast među obnovljivim tehnologijama Instalirani kapacitet iznosi 303 GW od čega je 74 GW bilo instalirano u 2016. godini [2]. Takav rast posljedica je velikog pada cijena fotonaponskih modula koji je u nekim državama doveo do pariteta mreže (*engl. grid parity*). Na sljedećem dijagramu može se vidjeti pad cijena PV sustava izravno spojenih na mrežu (ne preko kućne instalacije).



Slika 1. Prosječna ponderirana cijena PV sustava izravno spojenih na mrežu u svijetu [3]

Paritet mreže se postiže kada je nivelirana cijena električne energije (LCOE) proizvedene u fotonaponskim sustavima niža ili jednaka cijeni po kojoj se ona kupuje iz mreže. LCOE je ekonomski pokazatelj cijene proizvodnje električne energije koji uključuje sve troškove u životnom vijeku elektrane. Troškovi obuhvaćaju početnu investiciju, operativne troškove, održavanje, cijenu kapitala i cijenu goriva koja je kod PV-a jednaka nuli [4].

LCOE se može izračunati pomoću sljedeće formule (1):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

I_t - investicijski troškovi

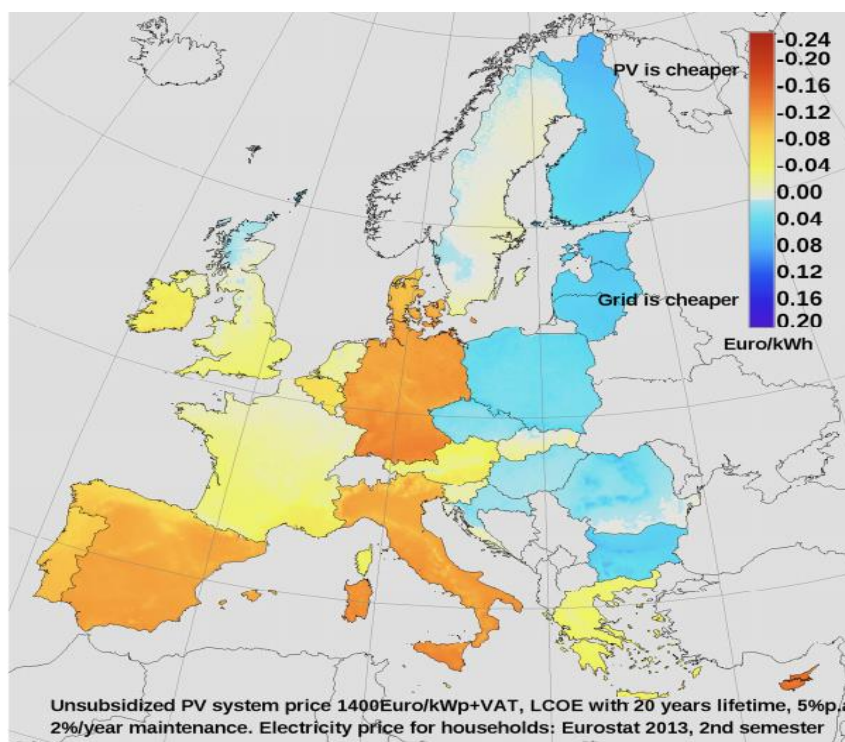
M_t - operativni troškovi i troškovi održavanja

F_t - potrošnja goriva

E_t - proizvodnja električne energije

r - diskontna stopa

Na sljedećoj karti mogu se vidjeti zemlje u Europi u kojima je do 2013. godine postignut paritet mreže za PV sustave do 25 kW:



Slika 2. Paritet mreže u EU, 2013. [5]

Kod proračuna LCOE-a za ovu sliku koristio se model neto mjerenja, diskontna stopa od 5 %, cijena investicije 1400 €/kW+PDV, godišnje održavanje u iznosu od 2 % početne investicije. LCOE pokazuje potencijal neke tehnologije, ali stvarna financijska isplativost ovisi o nizu različitih faktora poput udjela samoopskrbe i načina naplate isporučenih viškova u mrežu.

1.1. Pregled poglavlja

U 2. poglavlju (Solarni sustavi) napravljen je pregled fotonaponskih solarnih sustava. Opisane su fizikalne osnove pretvorbe sunčeva zračenja u električnu energiju u PV člancima. U 3. poglavlju (Poticajni modeli za OiE) napravljen je pregled Feed-in tarifa i neto mjerenja. Prikazani su i primjeri korištenja neto mjerenja u EU. U 4. je poglavlju napravljen pregled poticaja za OiE u Hrvatskoj temeljem Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji. U 5. poglavlju opisane su metode proračuna i model koji simulira proizvodnju integriranog PV sustava i potrošnju kućanstva. Matematički model je proširen na nekoliko kućanstava iz različitih kategorija potrošnje. U 6. su poglavlju prikazani dobiveni rezultati. Prikazana je isplativost PV sustava za kategorije kućanstava. Ispitan je utjecaj rasta cijene električne energije i pada cijena opreme PV sustava.

2. SOLARNI SUSTAVI

Solarni sustavi su sustavi koji sunčevo zračenje pretvaraju u korisnu električnu energiju ili toplinu. U nastavku će se opisati rad fotonaponske elektrane spojene na mrežu kao i njene najvažnije komponente – PV module i izmjenjivač.

2.1. Sunce kao izvor energije

Sunce predstavlja ogroman potencijal kao izvor energije. Godišnje na Zemlju doznači oko $1,07 \cdot 10^{18}$ kWh energije. Ako se uzme u obzir da je potrošnja primarne energije na Zemlji u 2016. godini iznosila $1,54 \cdot 10^{14}$ kWh vidi se da je sunčeva energija nekoliko tisuća puta veća od potrošnje [6]. Većina izvora energije nastaje upravo pretvorbom sunčeve energije u ostale oblike energije.

Sunčeva energija može se iskoristavati pomoću sunčanih kolektora i fotonaponskih modula. Kolektori koriste zračenje za zagrijavanje radnog medija koji se zatim može koristiti za proizvodnju električne energije, za grijanje ili za hlađenje. Fotonaponski moduli s druge strane izravno pretvaraju zračenje u električnu energiju.



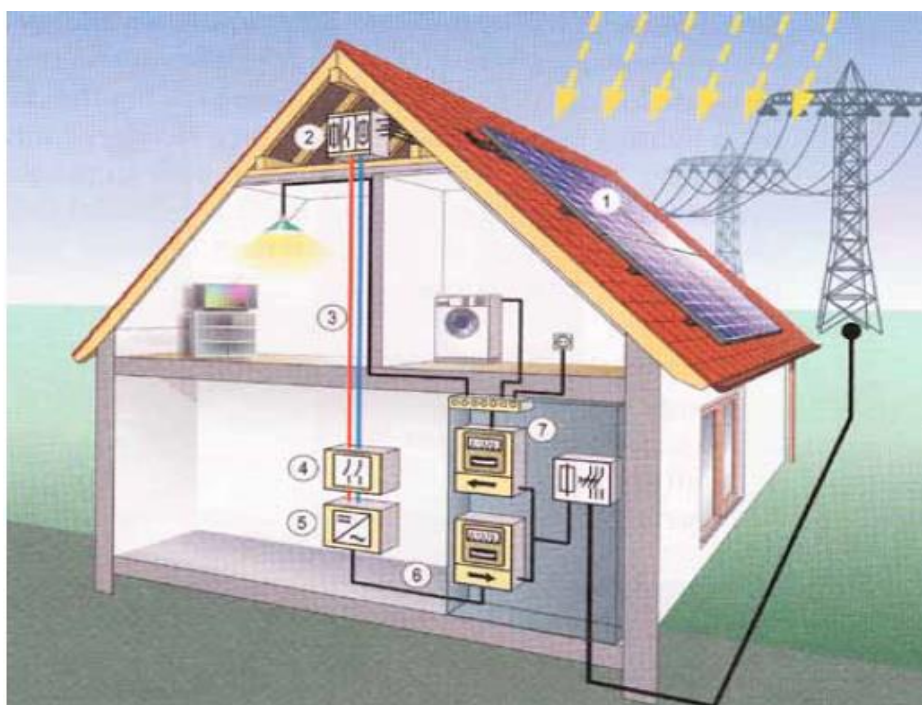
Slika 3. Usporedba godišnjeg zračenja na površini Zemlje, zaliha fosilnih i nuklearnih goriva, te potrošnje energije u svijetu [7]

2.2. Solarni fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustavi mogu se podijeliti na: sustave spojene na mrežu (*engl. on-grid*) i na otočne sustave koji nisu spojeni na mrežu (*engl. off-grid*).

Osnovni dijelovi fotonaponskog sustava su:

- a) PV moduli
- b) izmjenjivač
- c) brojila predane i preuzete električne energije
- d) uređaji prednaponske zaštite
- e) sklopka za odvajanje od mreže
- f) kablovi za istosmjernu i izmjeničnu struju
- g) baterije s regulatorima punjenja (kod otočnih sustava)



Slika 4. Kućna instalacija PV sustava na mrežu [7]

2.2.1. Fotonaponski članak

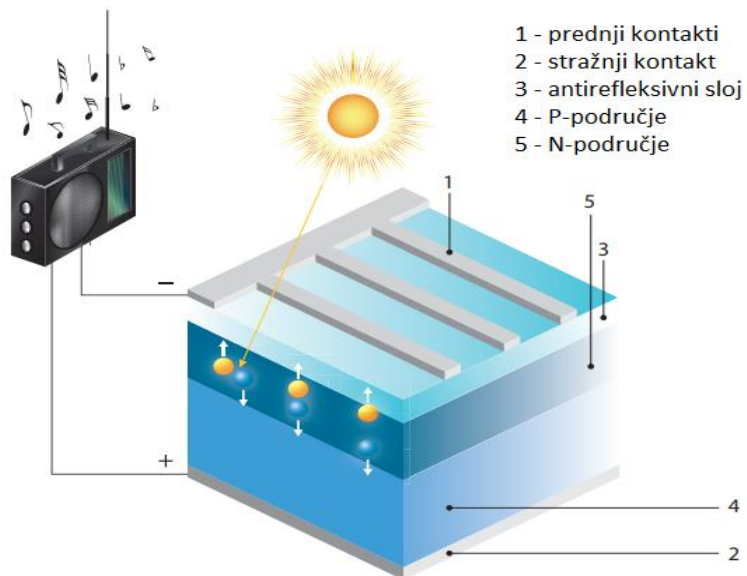
Glavna komponenta sustava je fotonaponski modul koji se sastoji od više fotonaponskih članaka. Fotonaponski članak je poluvodička dioda na čijim se krajevima javlja napon kada je obasjamo svjetlosnim zračenjem. Ako se na članak spoji trošilo poteći će istosmjerna struja i članak time postaje izvorom energije. Ta pojava naziva se fotonaponski efekt i otkrio ju je E. Becquerel 1868. godine. Da bi se ovaj proces mogao odvijati potreban je materijal u kojem će se apsorpcijom svjetlosti elektron moći dovesti u više energetske stanje. Taj elektron zatim predaje energiju u strujnom krugu i vraća se u solarni članak. Materijali od kojih se rade

fotonaponski članci gotovo su uvijek poluvodiči koji se mogu podijeliti u tri osnovne skupine: monokristalni, polikristalni i amorfni.

Članci se sastoje od dva različita tipa poluvodiča: P-tipa i N-tipa, koji zajedno čine PN spoj. Ako se kao materijal čistog poluvodiča uzme silicij (najčešće korišteni materijal za izradu PV članaka) koji ima četiri valentna elektrona njemu se dodaju primjese s tri i s pet valentnih elektrona. Kada se atom silicija u kristalnoj rešetci zamijeni s peterovalentnim atomom (npr. fosforom) on će sa svojih četiri elektrona s okolnim silicijem tvoriti kovalentne veze dok će preostali elektron ostati nevezan kemijskim vezama. Taj se elektron lagano može odvojiti od fosfora termičkom uzbuđom čime fosfor postaje pozitivno nabijeni ion. Silicij s takvom primjesom fosfora naziva se N-tip silicija. Dodavanjem trovalentnog atoma (npr. bora) siliciju dolazi do pojave tzv. šupljine u rešetci silicija. Šupljina je zapravo samo nedostatak elektrona koji promatramo kao kvazi-česticu. Slično kao i kod fosfora ako se šupljina odvoji od atoma bora on postaje negativno nabijen. Takav tip silicija nazivamo P-tip.

Spajanjem dva tipa nastaje PN-spoj. Na granici dva sloja dolazi do difuzije elektrona i šupljina. Elektroni teže ka prelasku s N-područja gdje im je koncentracija veća u P-područje. Difuzija šupljina odvija se u suprotnom smjeru. Odlaskom elektrona i šupljina dolazi do ionizacije atoma koji su fiksni u kristalnoj rešetci. Kao posljedica, između pozitivnih i negativnih iona dolazi do stvaranja električnog polja koje djeluje u suprotnom smjeru od difuzije elektrona. To granično područje naziva se osiromašena zona.

Kada se na PN spoj dovede zračenje, pod uvjetom da je energija zračenja veća od energijskog procjepa, zračenje će se apsorbirati i doći će do stvaranja para elektron-šupljina. Ako je par dovoljno blizu osiromašenoj zoni dolazi do odvajanja naboja zbog vlastitog električnog polja PN spoja. Elektron se tako giba prema N-području, a šupljina prema P-području. Sakupljanjem elektrona i šupljina javlja se razlika potencijala na krajevima članka. Kako bi se sakupio naboj na krajevima se postavljaju metalni kontakti kojima se članak spaja na vanjski električni krug. Jako je bitno da prednji kontakt prekriva što manju površinu kako ne bi reflektirao previše zračenja.



Slika 5. Fotonaponski članak [8]

I-U karakteristika solarnog članka

Strujno naponska karakteristika PV članka u mraku jednaka je karakteristici diode s promijenjenim predznakom struje. Kada se na članak dovede svjetlosno zračenje karakteristika se pomiče prema gore, tj. povećava se struja.

Jednadžba koja opisuje I-U karakteristiku glasi (2):

$$I = I_F - I_Z \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

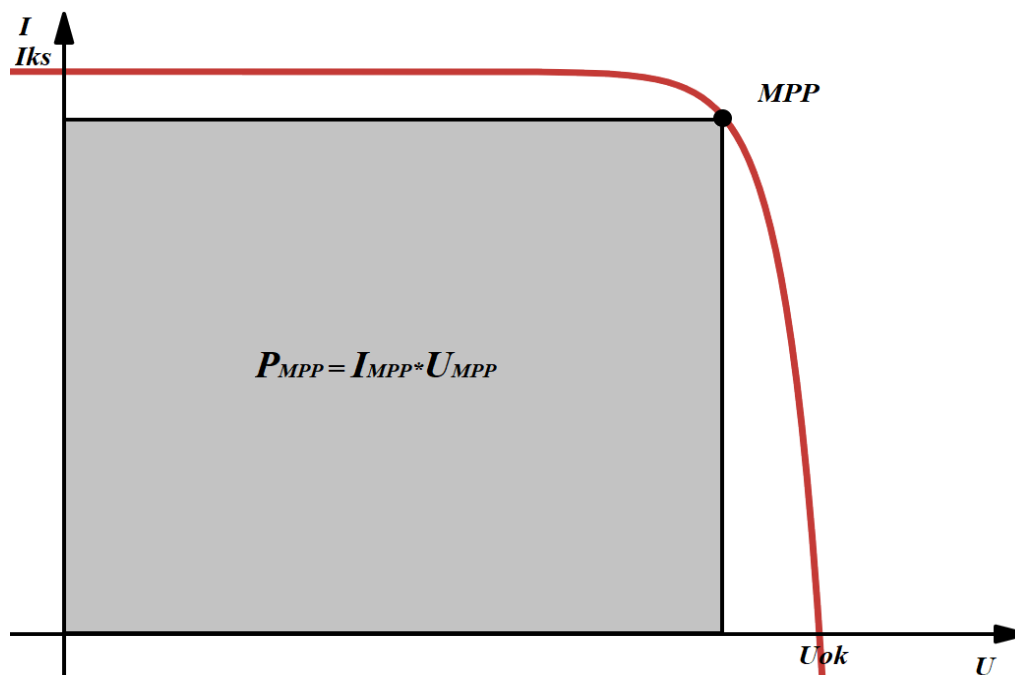
I_F - foto-struja

I_Z - struja zasićenja

q - elementarni naboj ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

k - Boltzmannova konstanta ($2,381 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T - termodinamička temperatura



Slika 6. I-U karakteristika PV članka

Za karakteristiku solarnog članka postoji točka gdje je snaga najveća (MPP) kojoj odgovaraju pripadajući napon i struja maksimalne snage. Za optimizaciju rada PV sustava bitno je da se radna točka nalazi u MPP-u.

Na karakteristici se mogu očitati struja kratkog spoja i napon otvorenog kruga. Uz pomoć očitanih vrijednosti s karakteristike možemo izračunati faktor punjenja (FF). On pokazuje omjer maksimalne snage realnog članka i snage idealnog članka koji u isto vrijeme ima struju kratkog spoja i napon otvorenog kruga.

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{ok} \cdot I_{ks}} \quad (3)$$

Uz poznati faktor punjenja, struju kratkog spoja, napon otvorenog kruga i ulazno zračenje (Φ) može se izračunati stupanj djelovanja PV članka.

$$\eta = \frac{FF \cdot U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{\Phi} \quad (4)$$

Članci na bazi silicija imaju FF oko 0,8. Za sada maksimalni FF silicijskih članaka iznosi 0,849 s pripadajućom efikasnošću od $26.7 \pm 0.5 \%$ [9].

Spajanje članaka u module

Članci se mogu spajati serijski i paralelno. Serijskim spajanjem u niz zbrajaju se naponi svih članaka, dok je struja koja prolazi kroz sve članke jednaka. Ukupna struja niza jednaka je

najmanjoj struji koju generira pojedini članak. Članci se serijski spajaju tako da se stražnji kontakt spoji s prednjim sljedećeg članka.

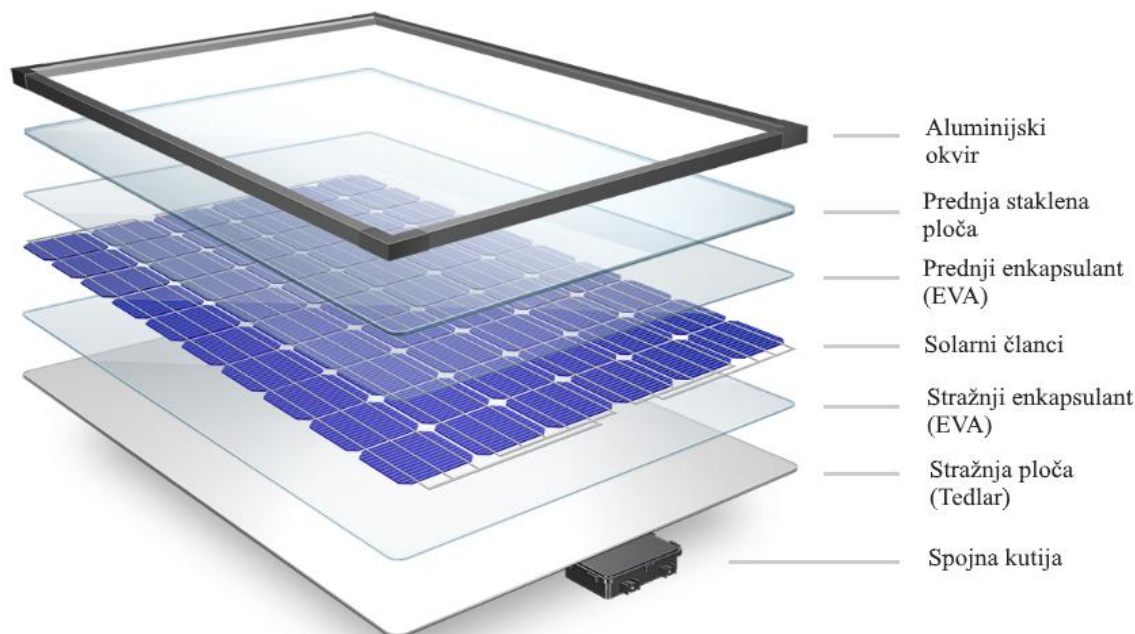
Spajanjem članaka u paralelu zbrajaju im se struje, a napon je jednak naponu jednog članka. Moduli se mogu sastojati od jednog niza članaka ili nekoliko nizova spojenih u paralelu ovisno o naponu i struji modula koja se želi postići. Općenito se izbjegava spajanje previše nizova ili članaka u paralelu kako bi se minimizirali omski gubitci zbog visoke struje.

Zbog toga što struja, a samim time i snaga, u serijskom spoju ovisi o najgorem članku učinkovitost modula je manja od pojedinog članka. Različite učinkovitosti članaka posljedica su različitih nehomogenosti nastalih u proizvodnji.

U serijskom nizu javlja se problem zasjenjenja pojedinih članaka. Osim što zasjenjenje jednog članka u nizu drastično smanjuje dobivenu snagu ono uzrokuje brzo trošenje zasjenjenog članka koji postaje trošilo. Energija proizvedena u ostalim člancima u zasjenjenom se članku troši na zagrijavanje i dolazi do uništavanja članka. Kako bi se izbjegao taj efekt moduli imaju zaobilazne diode za grupe od nekoliko članaka. Dioda omogućavaju struji obilaženje niza u kojem se nalazi zasjenjeni članak.

Nakon što se PV članci povežu postave se između dva sloja enkapsulanta. Kao enkapsulant najčešće se koristi etilen vinil acetat (EVA). EVA je termoplast koji se zagrijavanjem na 150°C tali i popunjava sve šupljine između modula. Proces se odvija u vakuumu kako bi se izbjeglo zarobljavanje vlage ili mjehurića zraka među slojevima. Nakon što se ohladi ponovno se stvrdne.

Na prednju površinu stavlja se kaljeno staklo s niskim udjelom željeza jer željezo dobro apsorbira svjetlost. Staklo se kali kako bi bilo otpornije na udarce. Za stražnji sloj koristi se kompozitna polimerna ploča. Kao slojevi ploče često se koriste poliester koji služi za elektroizolaciju modula i polivinil-fluorid (Tedlar) koji pruža zaštitu od vremenskih uvjeta. Kako bi se osigurala krutost modula koristi se okvir od anodiziranog aluminijskog. Na poleđini modula nalazi se još i spojna kutija u kojoj su smještene zaobilazne diode. Iz spojne kutije izlaze dvije žice preko kojih se modul spaja s ostalim komponentama sustava.



Slika 7. Dijelovi PV modula [10]

Testiranje modula

Snaga PV modula mjerena u laboratoriju mjeri se pod standardnim testnim uvjetima (STC). Standardni uvjeti određeni su normom IEC-60904-3. Intenzitet zračenja na modul iznosi 1000 W/m^2 , temperatura modula iznosi $25 \text{ }^\circ\text{C}$, a spektar zračenja jednak onome za masu zraka 1,5 (AM 1,5). Spektar zračenja AM 1,5 jednak je onom spektru kada je Sunce pod takvim kutom da sunčeve zrake prođu put duljine 1,5 atmosfere na putu od ruba atmosfere do tla. Snaga izmjerena pod ovim uvjetima naziva se vršna snaga.

Zbog velikog utjecaja temperature na učinkovitost modula podatci izmjereni pod standardnim uvjetima ne odgovaraju realnim uvjetima. Povećanjem temperature smanjuje se učinkovitost modula. Iz tog razloga proizvođači prilažu i podatke za nominalnu operativnu temperaturu članka (NOCT). Uvjeti pod kojima se postiže NOCT su: zračenje od 800 W/m^2 , temperatura zraka od 20°C , brzina vjetrova od 1 m/s i zračna masa AM 1,5. Budući da se NOCT uvjetima nastoje simulirati realni uvjeti vrijednosti mjerene snage bit će manje od onih mjenih pod standardnim uvjetima. [11]

2.2.2. Izmjenjivač

Izmjenjivač je elektronički uređaj koji prvenstveno služi za pretvorbu istosmjerne struje iz PV modula u izmjeničnu kako bi se onda mogla slati u mrežu ili koristiti u potrošačima koji rade na izmjeničnu struju. Napon i frekvencija na izlazu moraju odgovarati mreži ($U=230 \text{ V}$ i $f=50$

Hz). Izmjenjivači često imaju mogućnost praćenja maksimalne snage PV modula (MPPT). U inverteru se namješta otpor takav da PV moduli mogu raditi u MPP-u neovisno o stupnju osunčanosti.

Izmjenjivači mogu biti centralni, mikro i izmjenjivači za niz modula (*engl. string*). Kod centralnih, moduli su spojeni u nizove koji se zatim spajaju u paralelu prije priključenja na izmjenjivač. Mikro izmjenjivači spojeni su na jedan ili nekoliko modula, dok su string izmjenjivači spojeni na jedan niz.

Iskoristivost modernih izmjenjivača kreće se oko 98 % za nazivnu izlaznu snagu. Izmjenjivači imaju kraći životni vijek, a samim time i kraće garancijsko razdoblje od PV modula tako da je u proračunu financijske isplativosti potrebno uzeti u obzir potencijalnu zamjenu izmjenjivača.

3. POTICAJNI MODELI ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE

Glavni motivatori za povećanje udjela obnovljivih izvora energije u opskrbi energijom su ekološke prirode, ali i smanjenje ovisnosti o uvozu različitih energenata kojima su cijene jako nestabilne.

Kako bi potaknule integraciju sustava obnovljivih izvora energije države koriste različite poticajne modele. Najčešći modeli su Feed-in tarife i neto mjerenje [2].

3.1. Feed-in tarife [12]

Model feed-in tarifa (FiT) je mehanizam kojim se opskrbljivači energijom obvezuju otkupiti svu proizvedenu električnu energiju od proizvođača po cijeni koju određuje regulatorna agencija. Ugovori se obično sklapaju na duže periode – od 15 do 20 godina. U ovom sustavu postoji podjela po tehnologiji proizvodnje energije pa tako države višim cijenama mogu poticati tehnologije koje imaju veći potencijal.

Modeli FiT mogu se razlikovati u strukturi osnovnog tarifnog mehanizma. Električna energija može se naplaćivati po fiksnoj cijeni ili kao feed-in premija (maloprodajna cijena električne energije uvećana za fiksnu ili promjenjivu premiju). Tarife se određuju u odnosu na cijenu proizvodnje električne energije (LCOE). Modeli se razlikuju još i po učestalosti promjena iznosa FiT te načinu na koji se prikuplja novac za isplatu poticaja (npr. uvođenje naknade za obnovljive izvore korisnicima mreže).

Ovaj model smatra se niskorizičnim zahvaljujući dugogodišnjoj stabilnosti te je široko prihvaćen u mnogim državama među kojima je najbolji primjer Njemačka. Zahvaljujući ranom uvođenju FiT za fotonaponske sunčeve elektrane Njemačka je danas među vodećim zemljama po instaliranoj snazi.

Zbog toga što je cijena poticaja veća od maloprodajne cijene energije dolazi u pitanje održivost ovog modela s porastom instaliranih kapaciteta. Razvojem i padom cijene solarnih modula smanjuju se i FiT tako da je potrebno naći drugi model poticanja.

3.2. Neto mjerenje [13]

Kako je u mnogim državama Europske Unije postignut paritet mreže za PV sustave vlastita proizvodnja postaje isplativija od kupovine iz mreže. Iz tog razloga sve se više govori o neto mjerenju kao važnom modelu poticanja za obnovljive izvore energije.

Neto mjerenje je regulatorni okvir unutar kojeg potrošač-proizvođač može višak proizvedene električne energije poslati u mrežu i iskoristiti je u kasnijem razdoblju kad mu je potrošnja veća od proizvodnje. Drugim riječima korisnici koriste mrežu kao sredstvo za pohranu energije (bateriju). U tu svrhu koristi se dvosmjerno brojilo koje ima mogućnost mjerenja potrošnje u oba smjera. Kada je proizvodnja veća i kad korisnik šalje energiju u mrežu brojilo se „vrtilo“ u nazad. Na kraju naplatnog razdoblja (koje je najčešće jedan mjesec, ali može biti od jednog sata pa do jedne godine) korisnik plaća neto potrošenu električnu energiju po maloprodajnoj cijeni. Ako je unutar naplatnog razdoblja korisnik proizveo više nego je potrošio može dobiti kredite koje prenosi u sljedeće razdoblje ili mu se može isplatiti naknada po dogovorenoj cijeni.

Sa strane potrošača neto mjerenje je atraktivan model zato što je jednostavan za razumijevanje i provođenje. Kada proizvode električnu energiju korisnici izbjegavaju plaćanje energije iz mreže, ali i troškove vezane uz izgradnju i održavanje mreže. Zbog toga se na model neto mjerenje često stavljaju restrikcije kao što su maksimalna dozvoljena instalirana snaga, dodatne naknade za korištenje mreže, itd.

Neto mjerenje se često koristi zajedno s nekim od ostalih modela poticaja poput FiT-a ili aukcija. Neto mjerenje služi za poticanje manjih elektrana za samoopskrbu, a neki od ostalih modela za veće sustave.

Neto mjerenje je prvo uvedeno u SAD-u gdje je danas jedan od najčešćih modela, a koristi se i u Australiji, Brazilu, te mnogim europskim zemljama.

3.2.1. Neto mjerenje u EU

Belgija

U Belgiji je dostupno neto mjerenje za instalacije do 10 kW za sve tehnologije obnovljivih izvora energije. Potrošač plaća razliku između potrošene i proizvedene električne energije. U slučaju da korisnik proizvede više energije u naplatnom periodu nego što potroši ta mu se razlika neće novčano nadoknaditi.

U regiji glavnog grada Bruxellesa maksimalna snaga instalacije je 5 kW i to samo do 2018. godine kada se u Bruxellesu ukida neto mjerenje. [14]

Cipar

Cipar je 2016. godine uveo novi model neto mjerenja za PV solarne sustave „Solar for all“. Za instalacije do 5 kW postavljeni su ukupni dozvoljeni kapaciteti svih instaliranih elektrana.

Za kućanstva je namijenjeno 8,8 MW, a za ugrožene socijalne kategorije 1,2 MW, kao i dodatna potpora od 900 €/kW (do 2 700€ po sustavu). Za korisnike koji ne spadaju u kategoriju kućanstava (npr. škole, vrtići, poljoprivredna gospodarstva) namijenjeno je 13 MW.

Za komercijalne i industrijske korisnike s instalacijama do 10 MW ukupni kapacitet iznosi 40 MW. [15]

Grčka

Neto mjerenje u Grčkoj moguće je od 2015. godine. Maksimalna instalirana snaga za kućanstva iznosi 20 kWp, osim na Kreti gdje iznosi 50 kWp. U slučaju da snaga potrošnje prelazi 20 kW neto mjerenje je moguće za pola potrošnje korisnika, sve do 500 kW. Neprofitne organizacije i javna tijela (npr. škole, bolnice) mogu u potpunosti pokriti vlastitu potrošnju, također do 500 kW. Naplatni period neto mjerenja je jedna godina.

Od 2016. godine omogućeno je i virtualno neto mjerenje. Kod virtualnog neto mjerenja elektrana se ne nalazi na mjestu potrošnje energije nego na nekoj udaljenoj lokaciji. Takav sustav omogućava većem broju korisnika udruživanje i zajedničku izgradnju veće elektrane. Svakom se korisniku zatim račun umanjuje za njegov udio u proizvedenoj energiji. Maksimalna snaga za sustave s virtualnim neto mjerenjem iznosi 500 kWp. [16]

Latvija

Neto mjerenje moguće je u Latviji za solarne PV sustave. Ograničenje za kućanstva iznosi 10 kW. U slučaju da korisnik u jednom mjesecu proizvede više energije nego što potroši višak se prenosi u sljedeći mjesec. U slučaju da nakon godine dana postoji višak on se briše i ne isplaćuje korisniku. Državna elektroenergetska tvrtka Latvenergo omogućava nabavku solarnih panela na *leasing* s nultom kamatnom stopom na razdoblje do 5 godina. [17]

Italija

U Italiji je od 2013. godine, kada su ukinute Feed-in tarife, neto mjerenje (*tal. „Scambio Sul Posto”*) trenutno jedini mogući poticajni model za PV solarne sustave. Ograničenje snage za solarne elektrane izgrađene nakon 2014 godine iznosi 500 kWp. Na isplativost ovakvog modela pozitivno utječu visoke cijene električne energije koje su među najvećima u EU. [18]

Mađarska

U Mađarskoj je neto mjerenje moguće za sve obnovljive tehnologije. Maksimalna dozvoljena snaga elektrana u sustavu neto mjerenja iznosi 50 kW. 2017. godine pokrenut je program gdje

se sustavima do 50 kW nude poticajni krediti s 0 % kamata. Program provodi Mađarska banka za razvoj (MFB), a osigurano je 35 milijuna eura. [19]

Slovenija

U Sloveniji je vlastita opskrba s neto mjerenjem uvedena 2015. godine. Maksimalna snaga elektrane iznosi 11 kWp i ne smije prelaziti iznos priključne snage korisnika.

Kako bi dodatno potaknula instalaciju novih sustava za vlastitu opskrbu (do 11 kWp) Slovenija je 2017. godine otvorila natječaj za 3 milijuna eura bespovratnih sredstava. Visina poticaja iznosi do 20 % cijene sustava, ali ne više od 180 eura po instaliranom kWp. [20]

Neto mjerenje trenutno je dostupno i u Danskoj, Nizozemskoj te Litvi.

4. POTICAJI ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE U REPUBLICI HRVATSKOJ

Republika Hrvatska je 10. rujna 2015. godine donijela Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 100/15) kojim se na jednom mjestu zakonski uređuje područje obnovljivih izvora energije. Tim zakonom Hrvatska nastoji: ostvariti nacionalni cilj o udjelu korištenja energije iz obnovljivih izvora, proširiti korištenje vlastitih prirodnih energetske resursa, smanjiti ovisnost o uvozu energenata, smanjiti utjecaj fosilnih goriva na okoliš, otvoriti nova radna mjesta, potaknuti razvoj lokalnih zajednica i potaknuti razvoj novih tehnologija.

Ovim zakonom određeni su modeli poticanja za obnovljive izvore: poticanje zajamčenom otkupnom cijenom (Feed-in tarife) i poticanje tržišnom premijom. Zakonom je određena maksimalna instalirana snaga za FiT od 30 kW. Zajamčena otkupna cijena definirana je ugovorom povlaštenog proizvođača s operatorom tržišta električne energije (HROTE). Cijena se svake godine korigira primjenom Prosječnog godišnjeg indeksa potrošačkih cijena kojeg svake godine objavljuje Državni zavod za statistiku. Povlašteni proizvođači odabiru se putem javne nabave koju provodi HROTE.

Pravo sklapanja ugovora o tržišnoj premiji također se ostvaruje s najpovoljnijim ponuđačima na javnom natječaju. Tržišna premija u obračunskom razdoblju (jedan mjesec) jednaka je razlici vrijednosti električne energije određene ugovorom i tržišne cijene električne energije u obračunskom razdoblju. U slučaju da je tržišna cijena veća od ugovorene iznos premija jednak je nuli.

Sredstva za isplatu poticaja skupljaju se naknadom za OiE koju plaćaju svi kupci električne energije, te prodajom električne energije koju proizvode povlašteni proizvođači.

Ovim zakonom uvedena je i obaveza opskrbljivačima električne energije za preuzimanje viškova od kupaca s vlastitom proizvodnjom, a koji nisu u sustavu poticaja za obnovljive izvore. Da bi ostvarili to pravo kupci moraju imati status povlaštenog proizvođača. Priključena snaga svih proizvodnih postrojenja na jednom obračunskom mjestu ne smije prelaziti 500 kW i snaga elektrane ne smije prelaziti priključnu snagu u smjeru preuzimanja električne energije. Kupcu se u svakom obračunskom razdoblju (jedan mjesec) račun umanjuje za vrijednost energije poslana u mrežu. Da bi se mogla obračunavati naknada za preuzimanje viškova potrebno je jedno dvosmjerno ili dva jednosmjerna brojila.

Vrijednost energije preuzete od kupca (C_i) određuje se pomoću sljedećih formula:

- 1) u slučaju da za obračunsko razdoblje i vrijedi : $E_{p_i} \geq E_{i_i}$

$$C_i = 0,9 \cdot PKC_i \quad (5)$$

- 2) u slučaju da vrijedi: $E_{p_i} < E_{i_i}$

$$C_i = 0,9 \cdot PKC_i \cdot \frac{E_{p_i}}{E_{i_i}} \quad (6)$$

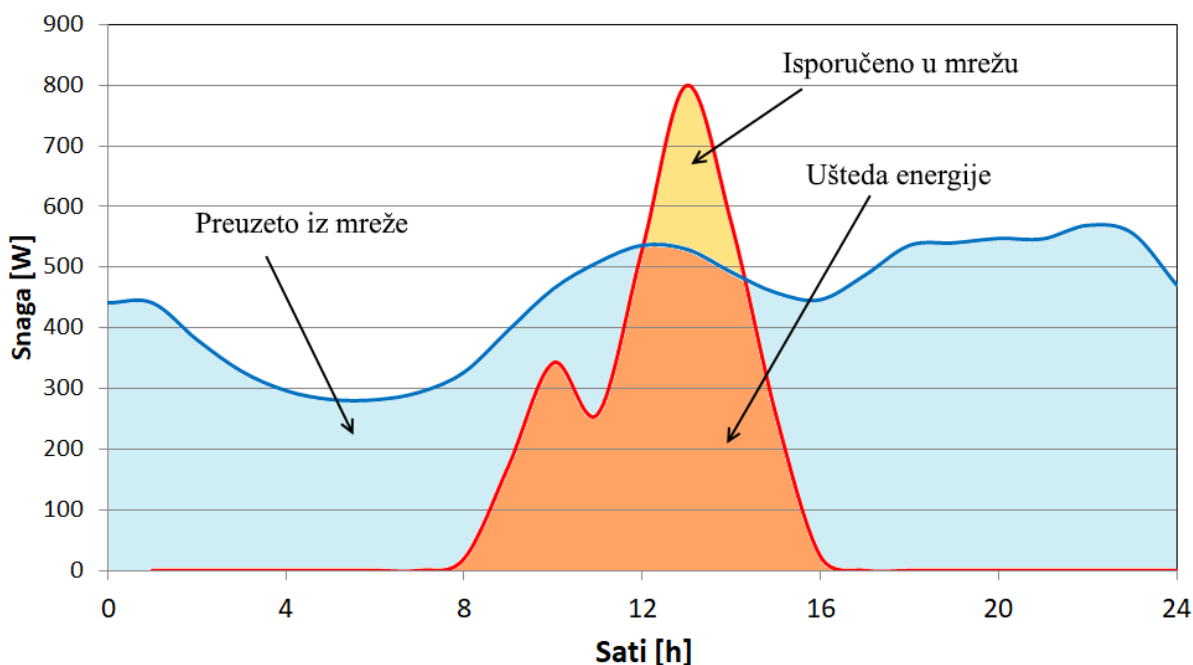
E_{p_i} - ukupna energija preuzeta iz mreže u obračunskom razdoblju i

E_{i_i} - ukupna energija isporučena u mrežu u obračunskom razdoblju i

PKC_i - prosječna cijena električne energije koju plaća kupac, bez poreza, mrežarine i drugih naknada

Na kraju svakog obračunskog perioda opskrbljivač umanjuje iznos računa za vrijednost energije preuzete od kupca (C_i).

Na sljedećoj slici može se vidjeti energija isporučena u mrežu koja se obračunava prema prethodnim pravilima:



Slika 8. Proizvodnja i potrošnja energije u jednom danu

5. OPIS MODELA I METODA PRORAČUNA

Proračun se sastoji od simulacije proizvodnje i potrošnje električne energije prosječnog kućanstva s integriranim PV sustavom koji se zatim proširuje na devet kućanstava iz tri različite kategorije potrošnje.

5.1. Simulacija proizvodnje integriranog PV sustava i potrošnje prosječnog kućanstva

U simulaciji integriranog PV sustava koristit će se model vlastite proizvodnje s isporukom viškova u mrežu prema Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji.

Proizvodnja električne energije simulirat će se uz pomoć PVGIS-a (*engl. Photovoltaic Geographical Information System*). PVGIS je alat koji procjenjuje stvarnu proizvodnju PV sustava za određenu lokaciju na temelju poznatog sunčevog zračenja koje dolazi na površinu modula. Upadno sunčevo zračenje određuje se pomoću slika geostacionarnih meteoroloških satelita na kojima se može vidjeti prekrivenost lokacije oblacima. Kod izračuna se u obzir uzimaju još i temperatura modula, koja ovisi o vanjskoj temperaturi i brzini vjetra, refleksija zbog upadnog kuta zračenja, sjene terena te promjene spektra zračenja u različitim dijelovima dana. Dobiveni su podaci u tabličnom obliku za svaki sat tijekom jedne godine.[21]

Potrošnja kućanstava aproksimirana je korištenjem nadomjesnih krivulja opterećenja koje svake godine objavljuje HEP-operator distribucijskog sustava (HEP-ods). Nadomjesne krivulje određuju se analitičkim postupkom pomoću izmjerenih i potvrđenih krivulja opterećenja kod kupaca koji imaju brojilo koje može mjeriti krivulje opterećenja. Iznosi opterećenja prikazani su u koracima od 15 minuta. Da bi se dobilo opterećenje na satnoj razini kao i kod podataka za proizvodnju izračunata je prosječna vrijednost četiri iznosa u svakom satu. Kako bi se dobila potrošnja prosječnog kućanstva (K0) krivulja opterećenja svih kućanstava podijeljena je s brojem kućanstava spojenih na mrežu – 2 169 826.

Iznosi električne energije poslana u mrežu i uštede nastale zbog vlastite proizvodnje dobiveni su oduzimanjem krivulja proizvodnje iz PV sustava i potrošnje kućanstva. Proizvedena energiju koja se koristi u kućanstvu (na mjestu proizvodnje) množi se s cijenom električne energije koju plaća kupac kako bi dobili dio uštede od samoopskrbe. Naknadu nastalu slanjem energije u mrežu izračunat ćemo pomoću formula (5) i (6) za vlastitu potrošnju opisanih u

prethodnom poglavlju. Ukupna godišnja ušteda zbroj je samoopskrbe i naknade za isporuku energije u mrežu.

S poznatom godišnjom uštedom možemo ispitati isplativost PV sustava. Za ispitivanje isplativost projekta koristit će se sljedeće metode: metoda roka otplate, sadašnje vrijednosti i unutrašnje stope povrata.

Metoda roka otplate pokazuje vrijeme koje je potrebno da se investicija otplati, ako je vrijeme otplate manje od maksimalnog prihvatljivog projekt je isplativ. Nedostatak ove metode je taj što se ne uzima u obzir tok novca nakon perioda otplate investicije, pa se ne prepoznaju investicije isplativije na duži period i ne uzima u obzir vremensku vrijednost novca.

Kod neto sadašnje vrijednosti (NPV) tok novca se diskontira na sadašnju vrijednost, ako je NPV veća od 0 projekt je isplativ.

Metoda unutrašnje stope povrata (IRR) nam pokazuje iznos diskontne stope kod koje je sadašnja vrijednost troškova jednaka sadašnjoj vrijednosti prihoda. U slučaju da je IRR veća od važeće diskontne stope projekt je isplativ.

5.2. Razvijeni proračun za različite razrede potrošnje kućanstava

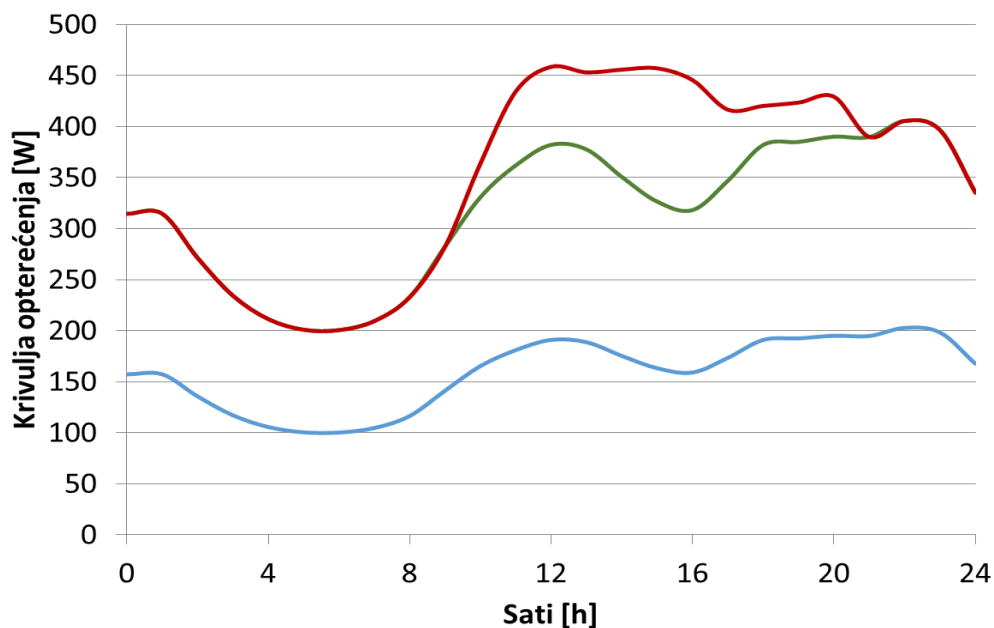
U razvijenom proračunu provjerit će se isplativost sustava s vlastitom potrošnjom u kućanstvima s različitim potrošnjama električne energije.

Kako bi se dobile potrošnje pojedinih razreda potrošnje u kućanstvima koristit će se podatci o udjelu pojedinog razreda u ukupnoj potrošnji koji je objavila HERA u godišnjem izvještaju za 2016. godinu [22]. Razredi potrošnje određeni su po uzoru na EUROSTAT-ove razrede. U ovom su radu, zbog jednostavnosti, spojeni razredi malih i vrlo malih, te velikih i vrlo velikih potrošača.

Tablica 1. Razredi potrošnje kućanstava

Kućanstva	Potrošnja [%]	Broj [%]	Ukupni broj
Mala i vrlo mala (<2500 kWh/god)	20,1	56,4	1 223 782
Srednja (<5000 kWh/god)	36,2	27,8	603 212
Velika i vrlo velika (>5000 kWh/god)	43,7	15,8	342 832

Ovako su dobivene potrošnje prosječnog kućanstva iz tri razreda. U razvijenom matematičkom modelu u svakoj kategoriji dodana su još dva kućanstva. Jedno kućanstvo s povećanom potrošnjom tijekom cijelog dana, te jedno s dodatnim povećanjem potrošnje podnevnim i večernjim satima (od 11 do 20 sati). Tako su dobivene tri krivulje opterećenja po razredu: prosječno kućanstvo razreda, te dva kućanstva koja se nalaze blizu gornje granice potrošnje razreda. Na sljedećem grafu prikazane su krivulje potrošnje triju kućanstava iz razreda niske potrošnje u jednom danu:



Slika 9. Usporedba dnevne potrošnje triju kućanstava iz jednog razreda potrošnje

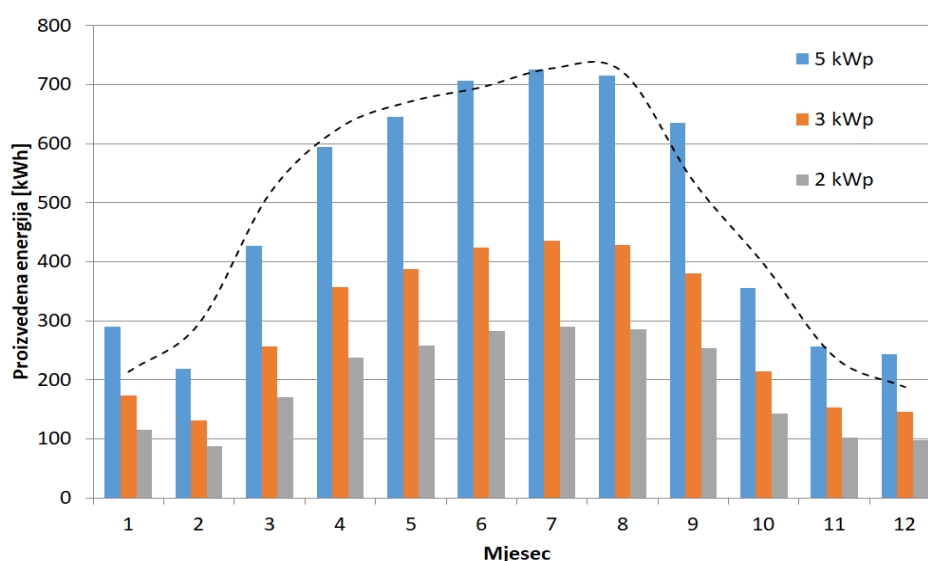
6. REZULTATI PRORAČUNA

U ovom poglavlju prikazani su podatci i pretpostavke korišteni u proračunu. Dobiveni su rezultati koji nam govore o isplativosti projekta - neto sadašnja vrijednost i unutrašnja stopa povrata. Rezultati su prikazani za prosječno kućanstvo te za kućanstava iz različitih kategorija potrošnje. Ispitani su i utjecaj promjene cijene električne energije, te cijene investicije na isplativost sustava.

6.1. Rezultati za prosječno kućanstvo

Podatci o potrošnji i proizvodnji električne energije uzeti su za 2016. godinu. U PVGIS-u je za lokaciju je odabran Zagreb. Kut nagiba solarnih modula iznosi optimalnih 34° , a orijentirani su izravno prema jugu. Za materijal modula odabran je kristalni silicij. Gubitci u sustavu procijenjeni su na 13 %. Gubitci se sastoje od: omskih gubitaka u vodičima, gubitaka zbog nesavršenosti modula, gubitaka u izmjenjivaču, gubitaka zbog naslaga prljavštine, snijega, itd. Odabrani su sustavi s vršnom snagom od 2, 3 i 5 kWp.

Pomoću PVGIS-a su dobiveni podatci za snagu PV sustava u svakom satu, mjesečna proizvedena energija i ukupna proizvedena energija u 2016. godini. Godišnja proizvedena energija za 5 kWp sustav iznosi 5840 kWh, za 3 kWp 3500 kWh, a za 2 kWp 2340 kWh. Podatci za mjesečnu proizvedenu energiju prikazani su na sljedećoj slici. Iscrtkanom linijom označena je prosječna proizvodnja za sustav od 5 kWp.



Slika 10. Ukupna mjesečna proizvedena energija u 2016. godini

6.1.1. Prihodi od električne energije

Za tarifni model uzet je dvotarifni Bijeli model za kućanstva s priključnom snagom do 20 kW. Kako je sva energija proizvedena u dnevnim satima potrebna nam je cijena visoke tarife. Tarifne stavke (cijene), koje su u primjeni od 1. siječnja 2016. iznose 0,49 kn/kWh za potrošnju električne energije, 0,35 kn/kWh za korištenje mreže i 0,105 kn/kWh kao naknada za obnovljive izvore energije koja je u primjeni od 1. rujna 2017. Uz porez od 13 % ukupna cijena iznosi 1,068 kn/kWh. Potrebno je naglasiti da se za izračun naknade za isporučenu energiju u mrežu uzima u obzir samo cijena za energiju (0,49 kn/kWh) bez poreza i naknada. [23]

U sljedećoj tablici mogu se vidjeti godišnji iznosi dobivenih podataka za tri sustava različitih snaga:

Tablica 2. Pregled sustava različitih snaga instaliranih prosječnom kućanstvu

Snaga sustava	5 kWp	3 kWp	2 kWp
Proizvodnja iz PV-a [kWh]	5816	3490	2326
Potrošnja kućanstva [kWh]	2777	2777	2777
Isporučeno u mrežu [kWh]	4584	2476	1397
Preuzeto iz mreže [kWh]	1679	1763	1848
Vlastita potrošnja [kWh]	1172	1013	929
Ušteda [kn]	1857	1639	1431

Može se primijetiti da povećanjem instalirane snage potrošnja vlastite proizvedene energije raste puno manje od energije isporučene u mrežu. Razlog tome leži u samom obliku krivulje proizvodnje iz PV sustava. Povećanjem snage, baza ispod krivulje proizvodnje se malo poveća, a najveće je povećanje upravo u amplitudi krivulje proizvodnje. Kako je navedena potrošnja kućanstva jako mala ona se glavnim dijelom preklapa s donjim dijelom krivulje

proizvodnje. U tablici (Tablica 2) je prikazana i godišnja ušteda u kunama izračunata prema odredbama u zakonu.

6.1.2. Investicijski i pogonski troškovi solarne elektrane

U investiciju solarne elektrane spadaju komponente same elektrane, troškovi montaže i troškovi priključenja na mrežu. Ponuda je dobivena od Solar Shop-a za sustav od 3 kWp.

Pregled cijena komponenti sustava od 3 kWp:

Tablica 3. Ponuda za sustav od 3kW

Artikl	Količina	Cijena	Iznos
Solarni modul SL260, 260W	12	1000	12 000
Mrežni izmjenjivač	1	2664	4880
Montažni sustav	1	3400	3400
Kabel, 6 mm, MC4	50	11,6	580
Prednaponska zaštita	1	2500	2500
Usluga dostave i montaže			5800
		Iznos:	29 160
		PDV:	7290
		Ukupno:	36 450 kn

Kako bi se elektrana mogla priključiti na mrežu potrebno je platiti naknadu za priključenje proizvođača na mrežu. Naknadu određuje HEP-ods prethodnom elektroenergetskom suglasnošću (PEES). Naknada za priključenje građevine proizvođača obuhvaća:

- troškove izgradnje priključka na mrežu (novo dvosmjerno brojilo i ormarić)
- troškove stvaranja tehničkih uvjeta u mreži za preuzimanje proizvedene električne energije, uključujući troškove ugradnje zaštitne opreme koja štiti mrežu od povratnih utjecaja
- pokusni rad elektrane i mjerenje struje

Visina naknade ovisi od kućanstva do kućanstva. Kreće se u rasponu od 5000 do 10 000 kuna, ali može biti i skuplja. U ovom radu odabrana je visina od 8000 kuna što dovodi do ukupne investicije u elektranu od 3 kWp zaokružene na 45 000 kuna. Cijena 2 kW elektrane iznosi 39 000 kn, a cijena 5 kW 58 000 kn.

U 15. godini uračunat je trošak kupnje novog izmjenjivača zbog njegovog kraćeg životnog vijeka.

U održavanje spada godišnji pregled elektrane. Pregled obuhvaća vizualni pregled dijelova sustava, pregled s termografskom kamerom i analizu djelovanja. Moguće pogreške koje se mogu javiti su: ubrzano starenje modula (požućivanje EVA folije), lomovi, delaminacija,

oštećenja kablova, „hot spots“, slabi kontakti u elektronskom ormariću, pregrijanje izmjenjivača, itd. Troškovi održavanja procijenjeni su na 300 kn godišnje s povećanjem od 2 % godišnje zbog pretpostavke da će starija elektrana zahtijevati više održavanja. Osiguranje je procijenjeno prema oglednom primjeru osiguranja za fotonaponske elektrane Allianz-a [24]. Elektrana se osigurava na novonabavnu vrijednost opreme pa je godišnja premija za elektranu od 2 kW 118 kn, za 3 kW 183 kn, a za 5 kW 210 kn.

6.1.3. Isplativost projekta

U proračunu će se koristiti sve tri metode kako bi se dobila što kompletnija slika o isplativosti projekta. Elektrana će se financirati vlastitim sredstvima. Proračun će se provesti za radni vijek elektrane od 20 godina za koji većina proizvođača solarnih modula daje garanciju linearnog pada učinkovitosti. Prihodi od proizvedene električne energije smanjuju se za 0,5 % godišnje zbog pada iskoristivosti modula. Diskontna stopa koju je odredila Hrvatska narodna banka od 2015. godine iznosi 3 % [25].

U proračunu prosječnog kućanstva odabrana je elektrana snage 2 kWp zbog male vlastite potrošnje. Tok novca kroz 20 godina prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 4. Tok novca za investiciju u elektranu od 2 kW

Godina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prihodi od uštede energije [kn]	1431	1424	1417	1410	1403	1396	1389	1382	1375	1368
Trošak održavanja [kn]	300	306	312	318	325	331	338	345	351	359
Osiguranje [kn]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Investicijski troškovi [kn]	39000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Neto primitci	-38019	968	955	941	928	914	901	887	873	859
Ukupno	-38019	-37051	-36097	-35155	-34227	-33313	-32412	-31525	-30652	-29793
Godina	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Prihodi od uštede energije [kn]	1361	1354	1347	1341	1334	1327	1321	1314	1308	1301
Trošak održavanja [kn]	366	373	380	388	396	404	412	420	428	437
Osiguranje [kn]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Investicijski troškovi [kn]	-	-	-	-	3990	-	-	-	-	-
Neto primitci	845	831	817	803	-3202	774	759	744	729	714
Ukupno	-28947	-28116	-27299	-26496	-29698	-28925	-28166	-27422	-26693	-25979

Iz tablice (Tablica 4) se može vidjeti da ni nakon 20 godina ne dolazi do povrata investicije. Neto sadašnja vrijednost iznosi -28 400,63 kn, a IRR -12,18 %. Jasno se vidi da je s tako niskim prihodima od proizvodnje uz visoku početnu investiciju projekt financijski neisplativ. Razlog tome je niska potrošnja prosječnog kućanstva što uzrokuje male uštede, a velike količine energije poslane u mrežu koja se naplaćuje po nižoj cijeni od maloprodajne cijene.

Za slučaj da je moguće neto mjerenje gdje se energija poslana u mrežu obračunava po maloprodajnoj cijeni godišnja ušteda za prosječno kućanstvo sa sustavom od 2 kW iznosila bi 2514 kn. Projekt niti u slučaju neto mjerenja ne bi bio isplativ s IRR-om od -1,8 % za sustav od 2 kW i IRR-om od -0,94 % za sustav od 3 kW. Također, PV sustav se ne isplati povećavati jer je već za sustav od 3 kW godišnja proizvodnja energije veća od godišnje potrošnje tog kućanstva. U većini primjera neto mjerenja se godišnji višak ne prenosi u sljedeću godinu niti se isplaćuje naknada proizvođaču za taj višak.

6.2. Rezultati za različite kategorije potrošnje

Zbog različitih potrošnji razredima su dodijeljene različite snage instaliranih sustava. Razredu male potrošnje dodijeljen je sustav od 2 kWp, srednjem razredu 3 kWp, a razredu velike potrošnje sustav od 5 kWp. Time se je ostvarila dovoljna vlastita potrošnja, a isporuka električne energije u mrežu kod manjih potrošača se smanjila.

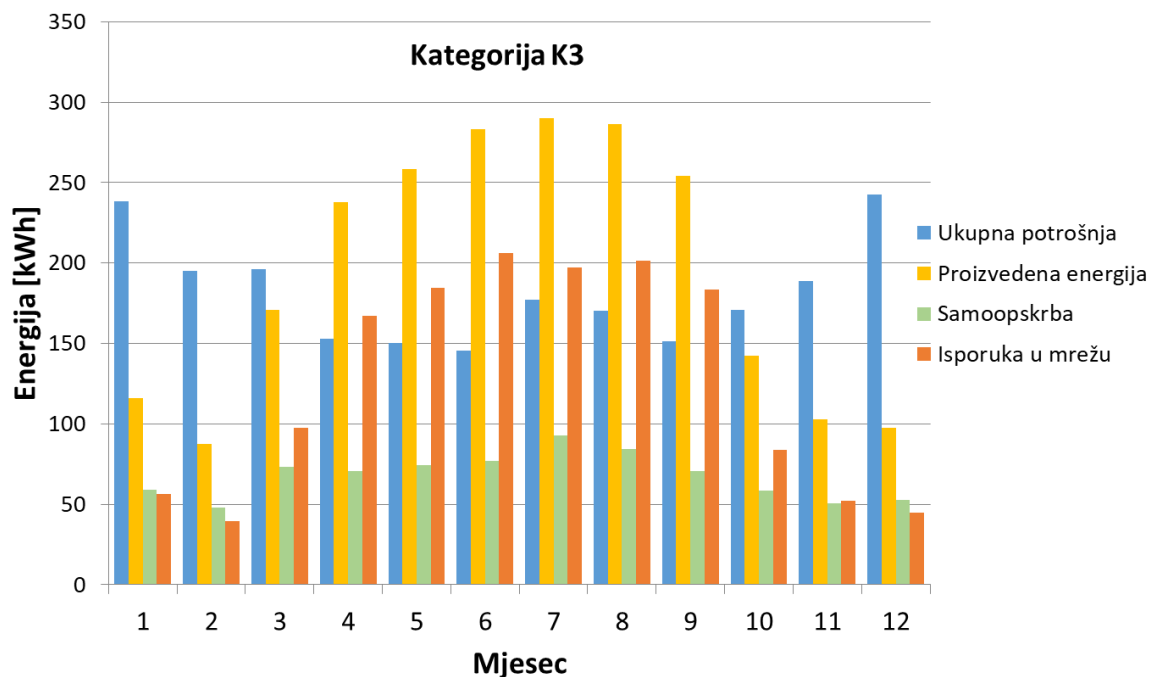
Tablica 5. Potrošnje kućanstava u tri kategorije

Kategorija kućanstva	Godišnja potrošnja [kWh]	Godišnja proizvodnja [kWh]
K1	989	2326
K2	1979	
K3	2179	
K4	3635	3490
K5	4544	
K6	5000	
K7	7679	5816
K8	9215	
K9	10 147	

6.2.1. Kućanstva s malom potrošnjom

Na sljedećem dijagramu prikazani su dobiveni mjesečni rezultati za kategoriju kućanstva K3 o potrošnji, proizvodnji, samoopskrbe i energiji isporučenoj u mrežu. Proizvedena energija je zapravo zbroj energije poslane u mrežu i energije za samoopskrbu. Na dijagramu se može vidjeti da je šest mjeseci u godini mjesečna proizvodnja znatno veća od potrošnje što znači da

je čak i ovako mali sustav predimenzioniran kod kućanstva s tako malom potrošnjom. Također se može vidjeti da je količina isporučene energije u mrežu puno veća od samoopskrbe, a u ljetnim mjesecima skoro dva puta veća.



Slika 11. Ukupna potrošnja, proizvedena energija, samoopskrba i energija isporučena u mrežu kućanstva iz kategorije niske potrošnje

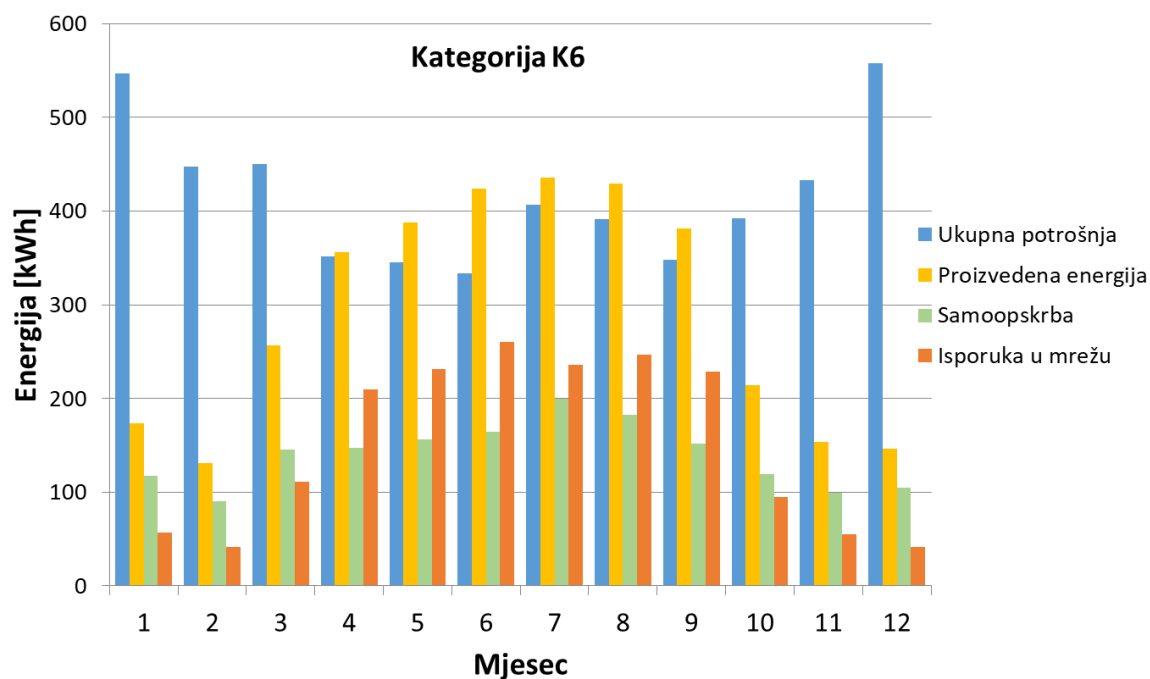
Nakon provedene financijske analize utvrđeno je da su PV sustavi za kategorije male potrošnje još manje isplative od onog za prosječno kućanstvo, što je bilo i za očekivati budući da je njihova potrošnja energije manja.

Tablica 6. NPV i IRR kućanstava niske potrošnje

	K1	K2	K3
NPV [kn]	-37 796	-31 205	-30 246
IRR [%]	-47	-15	-14

6.2.2. Kućanstva sa srednjom potrošnjom

Na dijagramu za kategoriju kućanstva K6 može se vidjeti da je isporuka energije u mrežu još uvijek veća od samoopskrbe od svibnja do rujna, ali ne toliko izraženo kao u kategoriji K3.



Slika 12. Ukupna potrošnja, proizvedena energija, samoopskrba i energija isporučena u mrežu kućanstva iz kategorije srednje potrošnje

Kategorija kućanstava srednje potrošnje, u koju spada i prosječno kućanstvo, također nije isplativa po ovom modelu.

Tablica 7. NPV i IRR kućanstava srednje potrošnje

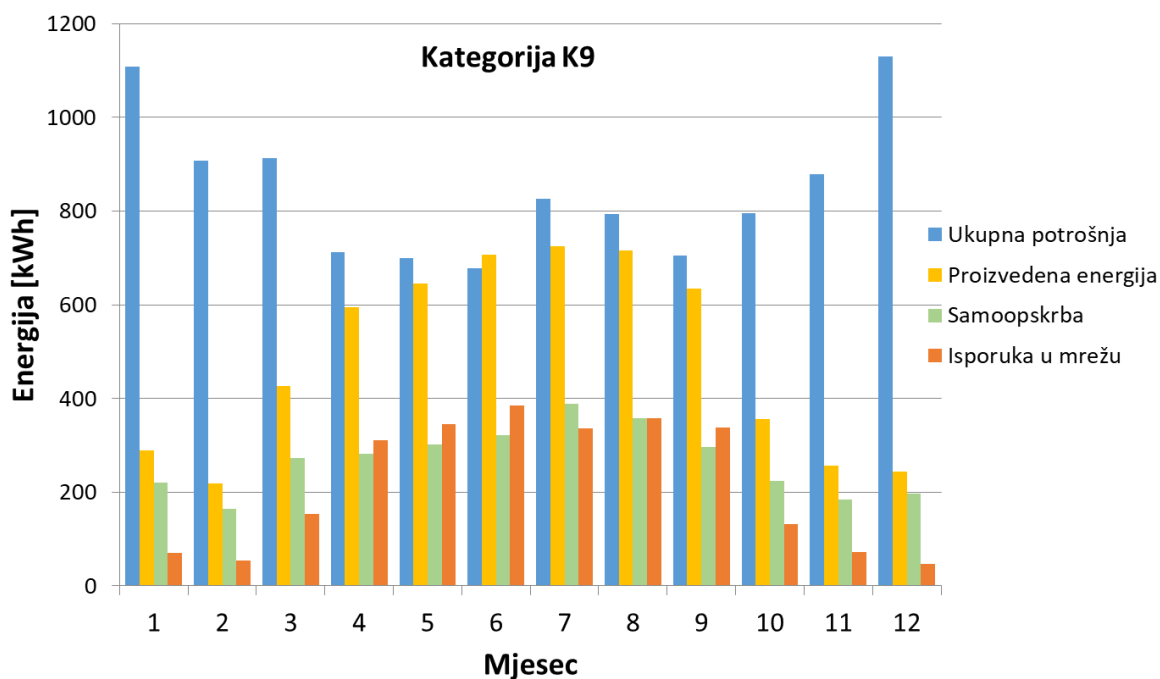
	K4	K5	K6
NPV [kn]	-26 933	-22 377	-18 921
IRR [%]	-8	-5	-3,6

Sve su tri kategorije kućanstva opremljene istim PV sustavom pa na isplativost utječe samo potrošnja električne energije. U tablici (Tablica 7) se može vidjeti porast isplativosti sustava porastom potrošnje.

Neto mjerenje kod sustava srednje potrošnje približava se isplativosti s godišnjom uštedom od 3726 kn i IRR-om od 2,63%.

6.2.3. Kućanstva s velikom potrošnjom

Kod kategorije K9 može se vidjeti da su samoopskrba i isporuka u mrežu približno jednake od svibnja do rujna, a u ostalim mjesecima samoopskrba čini većinu proizvedene energije.



Slika 13. Ukupna potrošnja, proizvedena energija, samoopskrba i energija isporučena u mrežu kućanstva iz kategorije visoke potrošnje

Niti promatrana kućanstva s potrošnjom do 10 000 kWh/god nisu se pokazala isplativim. Potrebno je naglasiti da fotonaponske solarne elektrane nastavljaju proizvoditi električnu energiju i nakon deklariranih 20 godina tako da je ukupni prinos veći ako se gleda duže razdoblje. U slučaju da se produži prihvatljivo razdoblje u kojem se očekuje povrat investicije iznad 20 godina kućanstva iz kategorije K9 postaju isplativa u 22., a iz K8 u 25. godini.

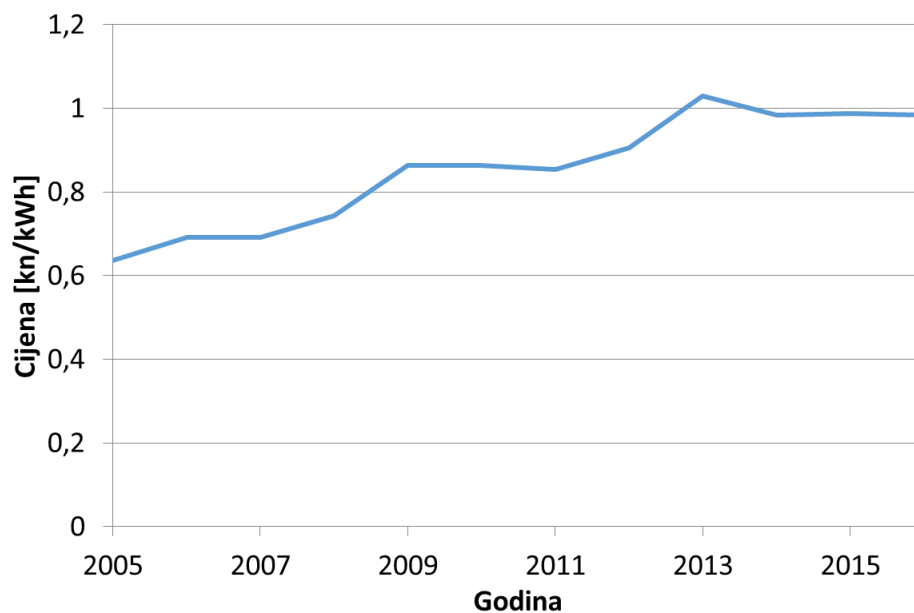
Tablica 8. NPV i IRR kućanstava visoke potrošnje

	K7	K8	K9
NPV [kn]	-14 586	-7720	-4150
IRR [%]	-0,7	1,1	2

Instalacija PV sustava na kućanstva K7, K8 i K9 postaje isplativa ako postoji mogućnost čistog neto mjerenja (s naknadom za isporučenu energiju u mrežu jednakom cijeni energije koju plaća kupac). U tom slučaju godišnja ušteda za sustav od 5 kW iznosi 6211 kn, neto sadašnja vrijednost iznosi 20 222 kn, a IRR 7,41%. Rok otplate investicije tada iznosi 11 godina.

6.3. Utjecaj promjene cijene električne energije na isplativost

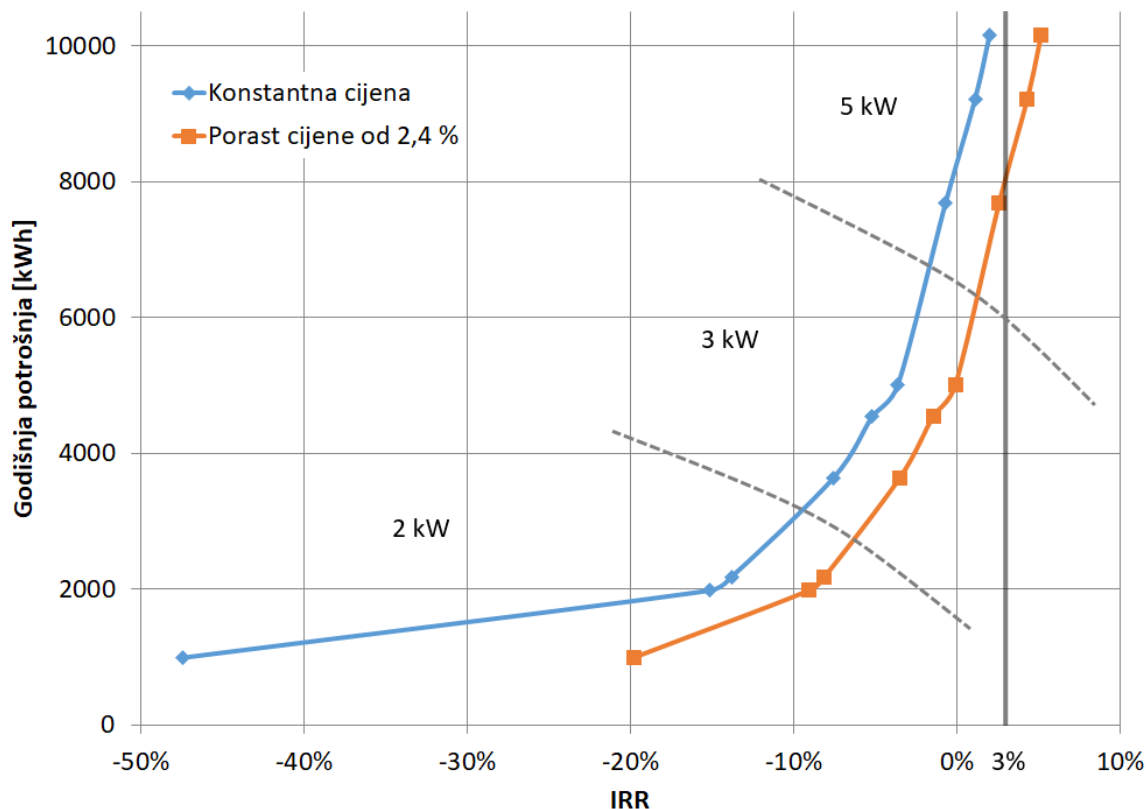
Buduće promjene električne energije je jako teško predvidjeti, ali se može vidjeti po vrijednostima prethodnih godina da cijena za kućanstva raste. Na sljedećem dijagramu može se vidjeti kretanje cijena za kućanstvo srednje veličine za Hrvatsku prema podacima Eurostata[26].



Slika 14. Kretanje cijena električne energije za kućanstva u Hrvatskoj

U proračunu je uzeto godišnje povećanje cijena od 2,4 % što odgovara porastu cijena za kućanstva u EU od 2014. do 2015. godine [27]. Rezultati su pokazali da s takvim povećanjem cijena PV sustavi postaju isplativi u kućanstvima K8 i K9. IRR kućanstva K8 iznosi 4,3 %, a kućanstva K9 5,2 %.

Na sljedećem dijagramu prikazani su IRR-ovi svih promatranih kategorija kućanstava i to za konstantnu cijenu električne energije i za godišnji porast od 2,4 %. Može se primijetiti da su dvije kategorije prešle granicu od 3 % što je zadana diskontna stopa, a još jedno kućanstvo se nalazi jako blizu praga isplativosti.



Slika 15. Unutrašnja stopa povrata kod različitih kategorija kućanstava

6.4. Profitabilnost proširenog sustava

U ovom dijelu rada ispitat će se isplativost fotonaponskih sustava u svrhu samoopskrbe za veći broj kućanstava i to za: 10, 1000 i 100 000. U slučaju kada se kupuje veća količina opreme prodavatelj može kupcu ponuditi popust na količinu. Iz tog razloga dolazi do sve većeg stvaranja energetske zadruga. Energetske zadruge razvijaju projekte obnovljivih izvora energije, koji su u vlasništvu zajednice koja živi na području gdje se projekt gradi. Zajednica zajedno investira u projekte, kojim iskorištava lokalno prisutne energetske potencijale kao što su šumska biomasa, stajsko gnojivo, vjetar ili krovove kuća za izgradnju solarnih sustava. Članovi zadruge dijele financijske i materijalne resurse te mogu djelovati na tržištu kao veći kupac, što im omogućuje jeftiniju nabavu opreme. Osim toga dobivaju i međusobnu potporu u projektiranju sustava te ishođenju dozvola.

Kako je visina popusta na količinu ovisna o dogovoru kupca i prodavatelja u ovom će se radu aproksimirati. Popust za 10 kućanstava odabran je na 10 %, za 1000 kućanstava 20 %, a za 100000 kućanstava 30 %.

Kada se uzme popust za 10 kućanstava projekt postaje isplativ za kategoriju K9.

Tablica 9. Isplativost s popustom od 10 %

	K9
Vrijeme otplate [god]	14
NPV [kn]	1930
IRR [%]	3,5

Uz popust za 1000 kućanstava projekt postaje isplativ za kategorije K8 i K9.

Tablica 10. Isplativost s popustom od 20 %

	K8	K9
Vrijeme otplate [god]	13	12
NPV [kn]	4441	8010
IRR [%]	4,3	5,3

Za 100 000 kućanstava projekt je isplativ za kategorije K7, K8 i K9.

Tablica 11. Isplativost s popustom od 30 %

	K7	K8	K9
Vrijeme otplate [god]	13	12	11
NPV [kn]	3655	10 521	14 090
IRR [%]	4,2	6,3	7,4

Iz navedenog se može zaključiti da je isplativost sustava za samoopskrbu potrebna kombinacija visoke potrošnje kao i dovoljno niske početne investicije.

U slučaju da je moguć model čistog neto mjerenja za prošireni sustav PV sustav bi, osim kod kućanstva visoke potrošnje, postao isplativ i kod srednjih potrošača. Godišnja ušteda za sustave velikih potrošača iznosi 6211 kn, a za srednje 3726 kn.

Iznosi NPV-a i IRR-a prikazani su u sljedećoj tablici:

Tablica 12. Usporedba isplativosti za različite stope popusta u sustavu neto mjerenja

	Popust	10%	20%	30%
Srednja potrošnja	NPV [kn]	3448	8130	12 812
	IRR [%]	4,13	5,92	8,12
Velika potrošnja	NPV [kn]	26 303	32 383	38 464
	IRR [%]	9,25	11,48	14,3

7. ZAKLJUČAK

Kako bi se smanjio čovjekov utjecaj na okoliš potrebno je smanjiti potrošnju fosilnih goriva u proizvodnji električne energije i povećati udio obnovljivih izvora energije. Fotonaponski se sustavi, zbog padajućih cijena modula, nameću kao sve povoljniji način proizvodnje električne energije.

U radu je ispitana isplativost ugradnje PV sustava za vlastitu potrošnju u kućanstvima u Hrvatskoj. Prema provedenoj ekonomskoj analizi zaključeno je da je samoopskrba bez poticaja neisplativa za kućanstva u Republici Hrvatskoj. Razlozi za to leže u niskoj cijeni električne energije, niskoj potrošnji kućanstava i visokoj početnoj investiciji. Zbog male potrošnje velik dio električne energije šalje se u mrežu, a naknada za nju je mala.

U slučaju pretpostavljenog rasta cijena električne energije od 2,4 % godišnje samoopskrba postaje isplativa kod kućanstava s najvećom potrošnjom.

Ovakav projekt također postaje isplativ kod kupnje opreme na veliko uz mogućnost rabata i to u kućanstvima s visokom potrošnjom električne energije (>5000 kWh/god). Novčani tok za ta kućanstva daje vrijednosti unutrašnje stope povrata koje su veće od važeće diskontne stope što čini investiciju u tim slučajevima opravdanom.

Jedna od mogućih primjena modela samoopskrbe bila bi u stambenim zgradama ili za kategorije poduzetništva koje u pravilu imaju veću potrošnju električne energije od kućanstava, kao i veća financijska sredstva za ulaganje.

Model samoopskrbe bez državnih poticaja u Hrvatskoj pokazao se je nepovoljan s trenutnom cijenom električne energije i visinom početne investicije. Za kućanstva bi povoljniji bio model neto mjerenja kakav su uvele države poput Slovenije i Mađarske. S takvim modelom ugradnja PV sustava bila bi opravdana za kućanstva visoke potrošnje sa sustavom od 5 ili više kW, a uz dodatan pad cijena opreme ili povećanje cijena električne energije isplativa bi bila i ugradnja kućanstvima srednje potrošnje.

LITERATURA

- [1] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0029>
- [2] http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf
- [3] http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf
- [4] <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC103426/Idna28159enn.pdf>
- [5] <https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/Cost-Maps-for-Unsubsidised-Photovoltaic-Electricity.pdf>
- [6] <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- [7] Lj. Majdandžić, „Solarni sustavi“, 2010.
- [8] http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2009_report-solar-energy.pdf
- [9] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2909/full>
- [10] Dupont: “What makes up a solar panel”, www.dupont.com
- [11] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. van Swaaij, M. Zeman, „Solar energy“, 2015.
- [12] https://www.researchgate.net/publication/263664081_An_analysis_of_feed%27in_tariffs_for_solar_PV_in_six_representative_countries_of_the_European_Union
- [13] http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/01_ELAAE%202017%20-%20Camara_Ramalho_Pereira_Silva_Dantas.pdf
- [14] <http://www.res-legal.eu/search-by-country/belgium/single/s/res-e/t/promotion/aid/brussels-net-metering-mecanisme-de-compensation/lastp/107/>
- [15] <http://www.res-legal.eu/search-by-country/cyprus/single/s/res-e/t/promotion/aid/net-metering-for-households-local-administration-buildings-and-commercial-industrial-units/lastp/115/>
- [16] <http://helapco.gr/en/the-greek-pv-market/>
- [17] <https://www.pv-magazine.com/2017/08/07/latvia-launches-net-metering-scheme-for-solar/>
- [18] <http://www.res-legal.eu/search-by-country/italy/single/s/res-e/t/promotion/aid/net-metering-scambio-sul-posto/lastp/151/>

-
- [19] <https://www.pv-magazine.com/2017/05/09/hungary-supports-net-metering-pv-projects-up-to-50-kw-with-0-loans/>
- [20] <https://www.pv-magazine.com/2017/04/19/slovenia-launches-solar-rebate-scheme/>
- [21] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/methods.html
- [22] https://www.hera.hr/hr/docs/HERA_izvjesce_2016.pdf
- [23] <http://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>
- [24] https://www.allianz.hr/media/96578/Osiguranje_solarnih_elektrana.pdf
- [25] http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_10_115_2203.html
- [26] <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=ten00117>
- [27] <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7405554/8-27052016-AP-EN.pdf/b5652235-2df1-47ed-84c6-701614849b3a>

PRILOZI

- I. CD-R disc