

Optimalna veličina izgradnje fotonaponske elektrane s obzirom isplativost ulaganja

Čalušić, Alen

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:200:859697>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STOSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA

Sveučilišni diplomski studij

OPTIMALNA VELIČINA IZGRADNJE FOTONAPONSKE
ELEKTRANE S OBZIROM NA ISPLATIVOST ULAGANJA

Diplomski rad

Alen Čalušić

Osijek, 2020.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME	2
3. FOTONAPONSKI SUSTAVI	3
3.1. Uvod u FN sustave	3
3.1.1. Pretvorba električne energije i tehnologija FN modula	3
3.1.2. Izmjenjivač	6
4. PRORAČUN VRIJEDNOSTI POTREBNIH ZA MATEMATIČKI MODEL	10
4.1. Troškovi ulaganja	10
4.2. Troškovi opskrbe električne energije u RH	11
4.3. Dobit kupca s vlastitom proizvodnjom	14
4.4. Potencijal Sunčevog zračenja	16
5. MODEL OPTIMALNE VELIČINE FN SUSTAVA	18
5.1. Cilj matematičkog modela	18
5.2. Izrada matematičkog modela	21
5.3. Primjena modela na obiteljskoj kući	24
5.3.1. Mogućnost subvencije	30
ZAKLJUČAK	34
LITERATURA	36
SAŽETAK	37
ABSTRACT	38
ŽIVOTOPIS	39

1. UVOD

Potreba za „čistom“ energijom u današnje vrijeme sve je veća, a suvremene tehnologije dodatno pomažu u ostvarivanju te potrebe. Korištenje obnovljivih izvora potiču ekološki razlozi, održivost, jednostavnija integracija, mogućnost uključenja kupca u proces proizvodnje i potrošnje električne energije i sl. Fotonapon već 9. godinu zaredom prednjači u investicijama u obnovljivim izvorima električne energije, a složena godišnja stopa rasta u zadnji 15 godina iznosi čak 40%, što čini fotonapon jednu od najveće rastućih industrija današnjice. Fotonapon je jedan od vodećih tehnologija u smanjenju efekta staklenika, s jednostavnom integracijom bilo gdje na Zemlji te izvorom kojeg neće nestati niti se monopolizirati od strane jedne države, a pružaju stabilizaciju ili čak smanjenje troškova, bez obzira na moguće povećanje cijene električne energije u budućnosti. Upravo zbog jednostavne integracije i dostupnosti na cijelom svijetu, sve više kupaca električne energije odabiru fotonapon te postaju kupci s vlastitom potrošnjom, radi zarade i smanjenja osobnih troškova.

U diplomskom radu će biti sastavljen, objašnjen i primijenjen matematički model prema kojem se može odrediti optimalna veličina fotonaponske elektrane s obzirom na isplativost ulaganja. Opisani će biti proračuni svih vrijednosti potrebnih u sastavljanju matematičkog modela i navedene relacije i načini računanja pojedinih vrijednosti, u što spadaju cijene prodaje i kupnje električne energije, investicije za fotonaponske module, cijene održavanja i sl., svedenih na period od 20 sljedećih godina.

Naposljetku, prikazan će biti primjer potrošnje električne energije obiteljske kuće, a razrađeni matematički model će se primijeniti na to kućanstvo s ciljem određivanja optimalne veličine fotonaponske elektrane za to kućanstvo.

1.1. Zadatak

U diplomskom radu potrebno je proučiti trenutno važeći sustav otkupa električne energije proizvedene iz fotonaponske elektrane. Uz to, potrebno je izraditi model za određivanje optimalne veličine izgradnje fotonaponske elektrane s obzirom na isplativost ulaganja u trenutno važećim uvjetima prodaje električne energije iz fotonaponske elektrane. Nadalje, potrebno je primijeniti podloženi model na primjeru određivanja veličina izgradnje fotonaponske elektrane na tipičnoj obiteljskoj kući.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Autori literature [3] prikazali su broj primjera dobro projektiranih elektrana iz OIE. Neki od tih projekta su: 325 kW fotonaponski sustav na građevini Ricardo d.o.o. u općini Dardi, 10 kW fotonaponski sustav na građevini Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te 1,7 MW bioplinsko postrojenje u Orlovnjaku na farmi muznih krava, Žito d.d. Fotonaponski sustav instalirane snage 10 kW na FERIT građevini izgrađen je 2014. u svrhu istraživanja gdje se mjere podaci u realnom vremenu kao što su: snaga elektrane, struje, naponi na stezaljkama, temperature modula, korisnost i sl. (reslab.ferit.hr), kao i vlažnost zraka, brzina vjetra, Sunčevo zračenje i sl. preko vremenske stanice. Takvi podaci osiguravaju optimalno korištenje fotonaponskog sustava, a naknadno se planira proširenje ove 10 kW elektrane te će se koristiti mjereni podaci ovoga područja radi boljeg projektiranja proširenja elektrane.

Autor literature [4] svake godine izdaje status o tehnologiji fotonapona na temelju pojedinih država/regija u svijetu. Uspoređuje sadašnje učinkovitosti, cijene i tehnologije fotonapona s prijašnjim godinama te daje konkretne vrijednosti fotonaponskog tržišta za pojedine države suradnjom s brojnim institutima i odborima koji prikupljaju takve podatke.

Autori literature [6] prikupljaju meteorološke podatke kao temperaturu, brzinu i učestalost vjetra, vlažnost i tlak zraka i sl. s područja cijeloga svijeta u suradnji s brojim meteorološkim zavodima. Prikupljaju velike količine podataka koji služe pri analizi i izračunu potencijala fotonaponskih sustava za pojedina područja. Na taj način određuju optimalne kutove nagiba, odnosno, položaje fotonaponskih modula i proračunavaju potencijalnu proizvedenu električnu energiju na temelju sata, dana, mjeseca i godine za mrežne i off-grid fotonaponske sustave.

Autor literature [7] istražuje najbolje uvjete za projektiranje fotonaponskog sustava za potrebe kućanstva. Korištenjem programskog paketa PV SOL projektira i analizira fotonaponski sustav u više slučajeva gdje se u prvom slučaju koristi kompletna površina krova za postavljanje FN elektrane, u drugom slučaju se FN sustav skalira po potrošnji električne energije kućanstva, u trećem slučaju se FN sustav skalira prema potrošnji kućanstva ako postoji jedan sustav baterije (pohrane energije) te četvrti slučaj gdje je FN sustav skaliran prema potrošnji s dva sustava baterije. Na temelju analiziranih podataka uspoređuje troškove i određuje optimalnu veličinu FN elektrane i način postavljanja FN elektrane na obiteljsku kuću.

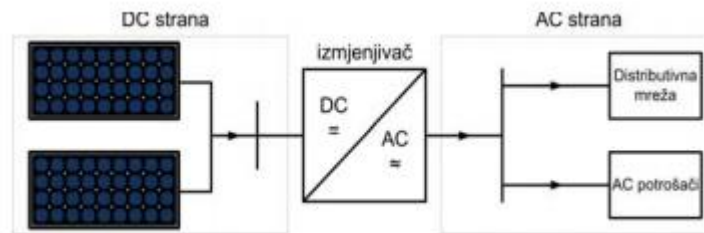
3. FOTONAPONSKI SUSTAVI

3.1. Uvod u FN sustave

U ovom poglavlju pojašnjen je rad fotonaponskih sustava, odnosno, od čega se sve sastoji i kako proizvodi električnu energiju te kako energiju prenosi u mrežu.

Prema autorima literature [1], definicija fotonaponskih sustava glasi: „Fotonaponski sustavi predstavljaju integriran skup fotonaponskih modula i ostalih komponenata koji je projektiran tako da primarnu Sunčevu energiju izravno pretvara u konačnu električnu energiju kojom se osigurava rad određenog broja istosmjernih i/ili izmjeničnih trošila, samostalno ili zajedno s pričuvnim izvorom.“

Na sljedećem iznimno pojednostavljenom modelu (slika 3.1.) prikazan je spoj dva fotonaponska modula s mrežom i potrošačima preko izmjenjivača.



Slika 3.1. Model jednostavnog fotonaponskog sustava. [1]

Fotonaponski niz proizvodi istosmjernu električnu energiju koju treba pretvoriti u izmjeničnu energiju kako bi se nadalje mogla slati prema trošilima/u mrežu. Zato je potreban izmjenjivač.

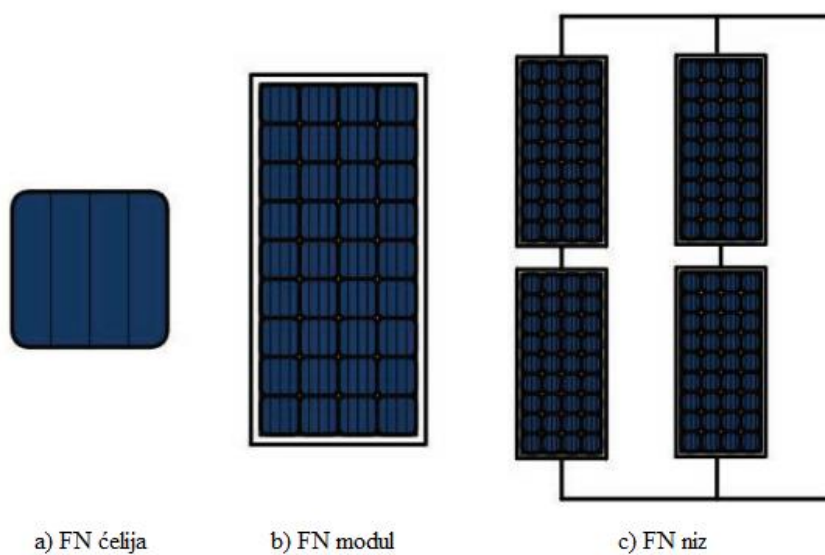
3.1.1. Pretvorba električne energije i tehnologija FN modula

Fotonaponska pretvorba je izravna pretvorba Sunčevog svjetla u električnu energiju. Fotoni koji se nalaze u Sunčevom svjetlu imaju energiju:

$$E = h \cdot \nu \quad (2-1)$$

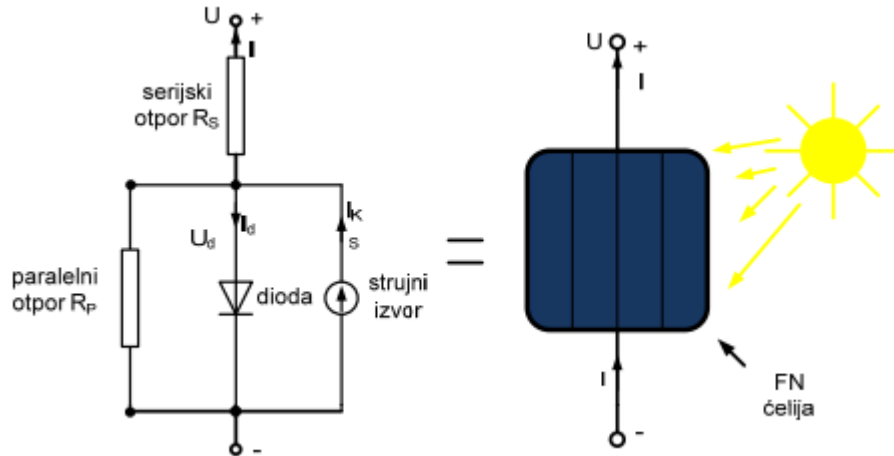
gdje je h Planckova konstanta ($h = 6.625 \cdot 10^{-34}$), a ν je frekvencija fotona.

Fotonaponska ćelija je poluvodička dioda koja se sastoji od poluvodičkih tipova p i n te najčešće napravljena od silicija (mono/polikristalni ili amorfni silicij), a nešto rjeđe i od drugih materijala kao npr. kadmij i telurij. Napon jedne ćelije obično iznosi oko 0,5 V, što nije dovoljno za praktično korištenje te se više ćelija međusobno povezuju u jedan modul. Nadalje, više modula se povezuju u jedan niz. Slika 3.2. prikazuje FN ćeliju, modul i niz.



Slika 3.2. Prikaz a) FN ćelije, b) FN modula i c) FN niza. [3]

Kada fotoni pogode fotonaponsku ćeliju, oni mogu biti apsorbirani, proći direktno kroz ćeliju i reflektirati se od nju. Oni fotoni koji budu apsorbirani daju energiju fotonaponskoj ćeliji za oslobađanje elektrona, a kako se može reći da je električna struja zapravo protjecanje elektrona u vodiču, znači da će ti oslobođeni elektroni zapravo uzrokovati električnu struju. Taj efekt se naziva fotonaponski efekt. Proizvedena električna energija prenosi se istosmjernom strujom, a shematski model prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Shematski prikaz FN ćelije. [1]

Stupanj djelovanja FN ćelije je iznimno ograničen termodinamički, a pojedini gubici prema literaturi [1] su:

- 1) Gubici zbog poluvodičkig svojstava ćelije – 23%
- 2) Gubici energije fotona većih od zabranjenog pojasa – 31%
- 3) Gubici zbog ograničenja napona na veličinu manju od E_g/e , gdje je E_g donja granična energija, a e jedinični naboj elektrona. Za silicij on vrijedi: $E_g/e = 0.8V$ – gubici 12%
- 4) Gubici iz dodatnih termodinamičkih razloga vezani uz omjer struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga, tj. praznog hoda. Za Silicij kod omjera 0.9 gubici su oko 3%.

Dakle, ukupni gubici iznose 67%, što znači da je maksimalni teorijski stupanj djelovanja fotonaponske ćelije 33%. U praksi, stupanj djelovanja ćelije ovisi o njenoj tehnologiji. Danas postoje četiri tehnološka pravca fotonaponskih ćelija, a oni su:

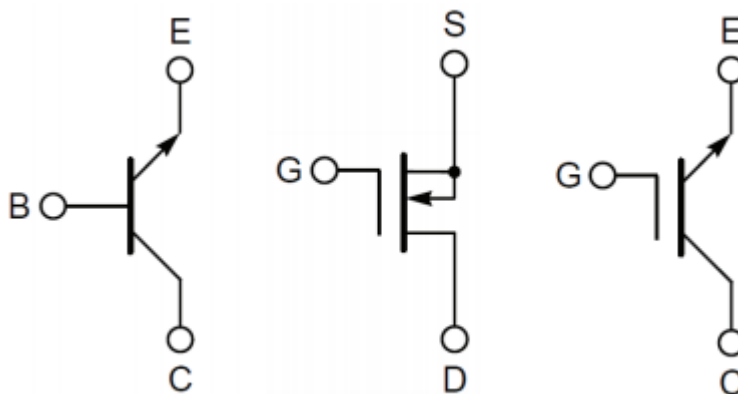
- 1) Monokristalni i polikristalni silicij
- 2) Tanki filmovi
- 3) Višeslojne ćelije
- 4) Novi koncepti

3.1.2. Izmjenjivač

Izmjenjivač je uređaj energetske elektronike kojim se povezuju istosmjerni i izmjenični električki sustavi. Kako FN moduli generiraju energiju koja se prenosi preko istosmjerne struje, potrebna je pretvaračka komponenta koja će tu istosmjernu struju pretvoriti u izmjeničnu, kako bi tu energiju mogla koristiti pretežno izmjenična trošila kućanstva. Izmjenjivač preko sklopki regulira put struje, a poluvodičke sklopke otvara i zatvara u određenim vremenskim razdobljima kako bi na izlazu dao potreban valni oblik struje, odnosno, u ovom slučaju izmjeničnu struju. Tri najčešće poluvodičke sklopke od kojih se izmjenjivač sastoji su:

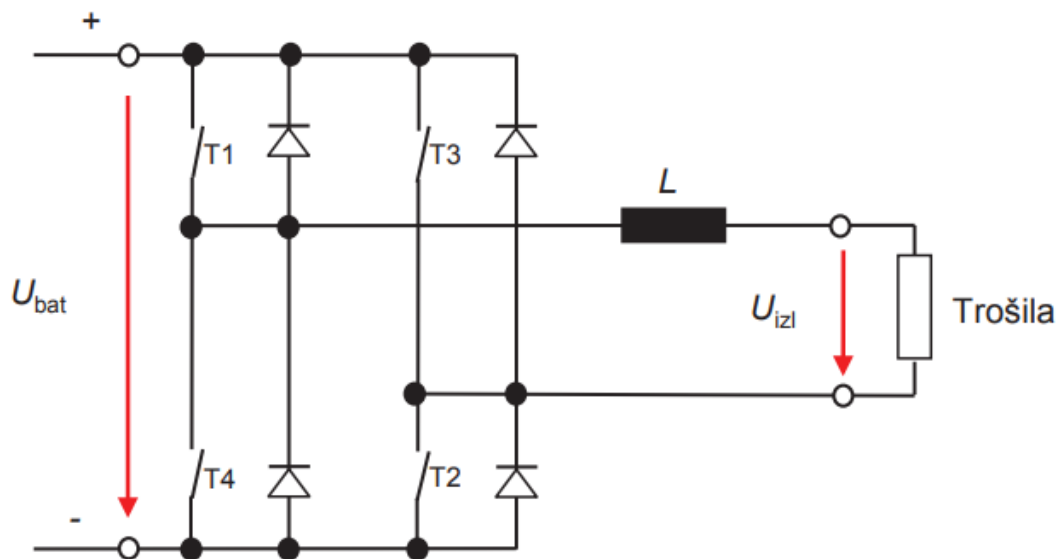
- Bipolarni tranzistor
- MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)
- IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

Shematski prikaz poluvodičkih sklopki prikazan je na slici 3.4.



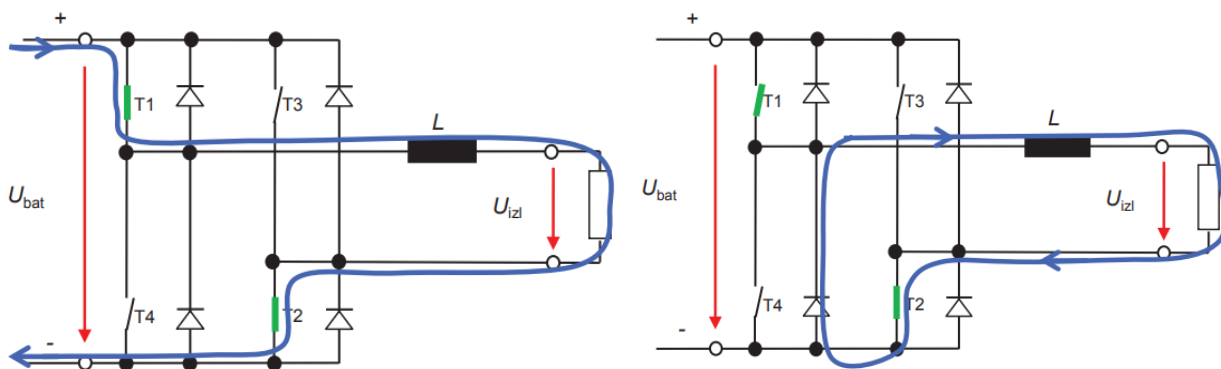
Slika 3.4. Bipolarni tranzistor, MOSFET i IGBT [2]

Na pitanje kako dobiti sinusni (izmjenični) valni oblik struje iz istosmjernog odgovara sljedeći dio rada. Na slici 3.5. prikazana je struktura izmjenjivača sa četiri sklopke.



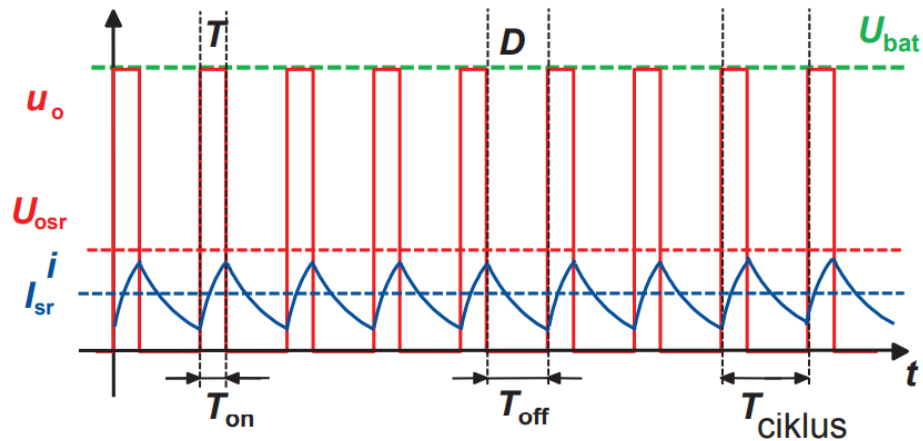
Slika 3.5. Struktura izmjenjivača [2]

U_{bat} predstavlja naponski istosmjerni izvor, odnosno, predstavlja fotonapon. Svako sklopki u izmjenjivaču pridružena je i povratna dioda. Kako bi dobili izmjeničnu struju, potrebna je pulsno-širinska modulacija (*Pulse Width Modulation*). Zatvaraju se sklopke T2 i T1 kako bi struja potekla/rasla od pozitivnog dijela napona U_{bat} kroz sklopku T1 te sklopku T2 prema negativnom dijelu napona U_{bat} (slika 3.6. lijevo). Tada se otvaranjem sklopke T1 zatvara dolaz struje iz izvora U_{bat} , a struja nastavlja teći u krugu zbog induktiviteta, kroz zatvorenu sklopku T2 i diodu uz sklopku T4 (pošto su ostale sklopke otvorene), s tim da struja opada jer više nema aktivnog izvora u krugu (slika 3.6. desno).



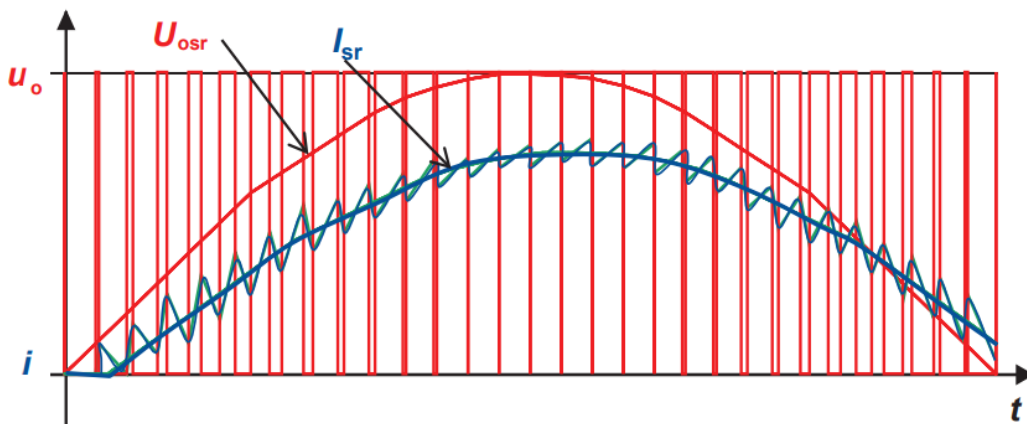
Slika 3.6. Protjecanje struje prilikom djelovanja sklopki T1 i T2 [2]

Prilikom djelovanja tih sklopki, naponi i struje se mijenjaju na sljedeći način (slika 3.7.):



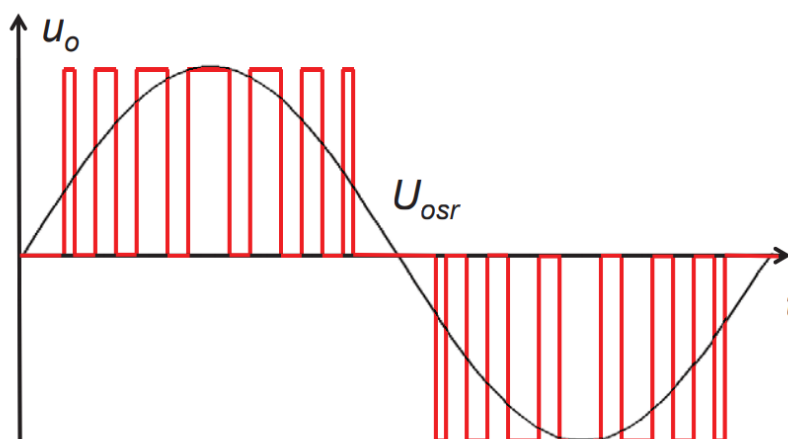
Slika 3.7. Naponi i struje na izlazu i srednje vrijednosti prilikom uklopa i isklopa sklopke T1 [2]

Dok je sklopka T1 zatvorena, napon na izlazu će biti napon U_{bat} (U_o na slici 3.7.), a struja raste. Kada se sklopka T1 otvori, tada nema dolaska struje iz aktivnog izvora pa struja unutar zatvorenog kruga teče kroz diodu D uz sklopku T4 i s vremenom opada, a napon na izlazu je tada zapravo jednak naponu na diodi D, što znači da iznosi 0V. Važnost srednjeg napona U_{osr} je što se njime može upravljati trajanje uključenosti sklopke T1. Na slici 3.7. on je uvijek konstantan i vremenski ciklus T_{ciklus} je jednak u svim dijelovima. Pulsno-širinskom modulacijom moguće je sada dobiti sinusni oblik tako da se mijenja srednja vrijednost U_{osr} , odnosno, mijenja se trajanje vođenja sklopke T1 za pojedine periode (cikluse). Novonastali oblik napona i struje na izlazu izgleda kao na slici 3.8.



Slika 3.8. Novo dobiveni valni oblik napona i struje pulsno-širinskom modulacijom. [2]

Sada na izlazu postoji sinusni valni oblik s pozitivnom poluperiodom. Negativnu poluperiodu moguće je dobiti na isti način zamjenom sklopke T1 za T3, te sklopke T2 za T4. Sada se zatvaranjem sklopke T3 i T4 na izlazu dobiva negativni napon koji je vrijednošću jednak naponu U_{bat} . Otvaranjem sklopke T3, struja će teći kroz diodu D uz T2. Nadalje, pulsno-širinskom modulacijom dobiva se krajnji (izmjenični) valni oblik kao na slici 3.9.



Slika 3.9. Izlazni napon kao rezultat pulsno-širinske modulacije tokom jedne periode. [2]

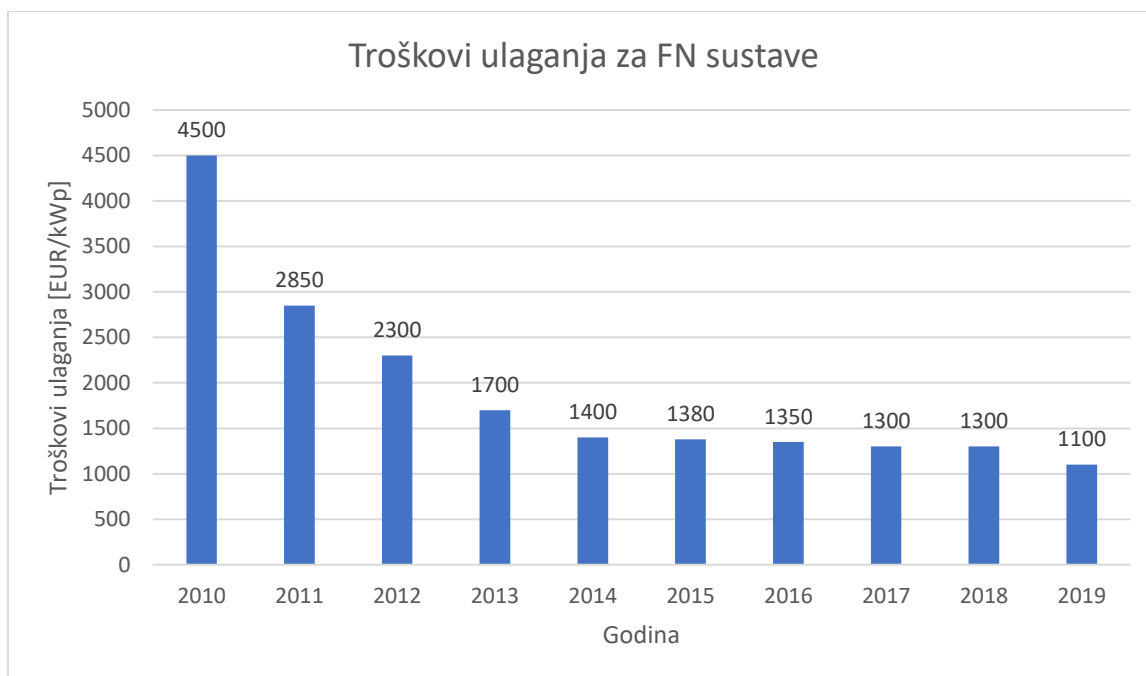
4. PRORAČUN VRIJEDNOSTI POTREBNIH ZA MATEMATIČKI MODEL

4.1. Troškovi ulaganja

Najznačajniji troškovi fotonaponskih sustava su troškovi ulaganja koji se uglavnom sastoje od:

- Troškova opreme (FN moduli, pretvarači (izmjenjivači), oprema za spajanje i instalaciju...)
- Troškova instalacije
- Troškova kapitala (kamate i sl.)
- Ostalih troškova (osiguranje, licenca, itd.)

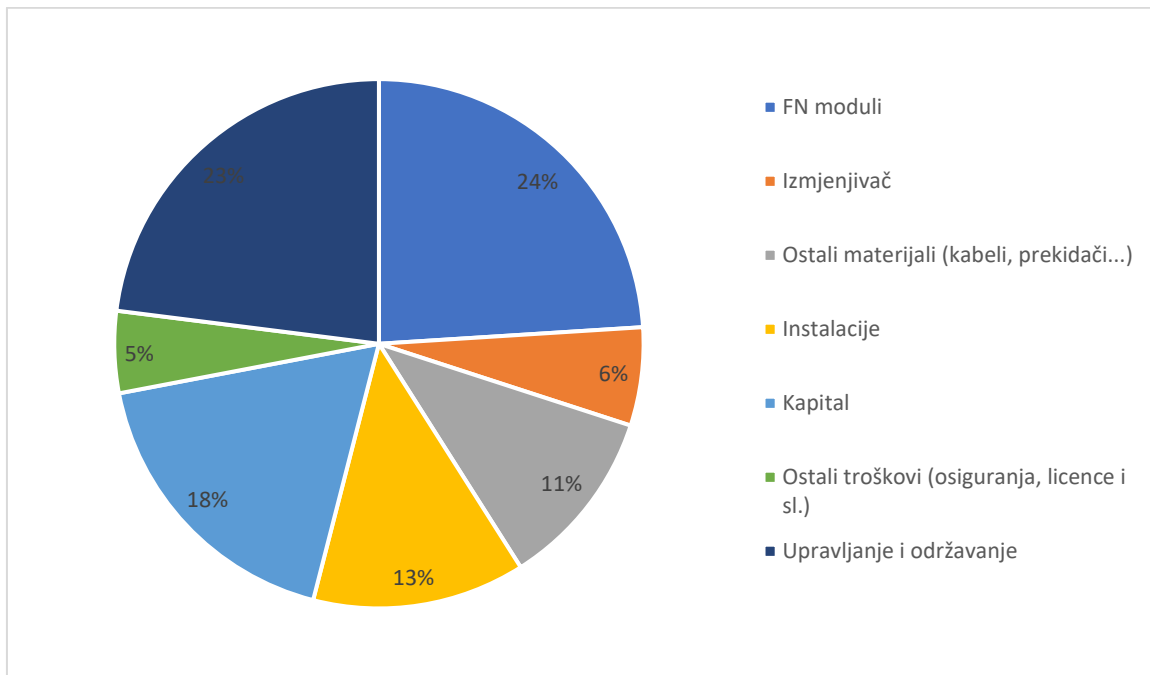
Investicijski troškovi zabilježili su značajan pad u posljednjih par godina, što se može vidjeti iz slike 4.1. Vrijednosti su uzete iz godišnjih statističkih izvješća „PV Status Report“ (A. Jäger-Waldau), od godine 2010. do 2019. [4]



Slika 4.1. Troškovi ulaganja za kućne FN sustave u razdoblju od 2010. do 2019. godine.

Investicijski troškovi su značajniji jer FN postrojenja ne koriste gorivo za rad pa nema troškova goriva. Također, njihov rad je potpuno automatiziran, što ne zahtjeva korištenje osoblja pa tako i troškove plaća. Razmatraju se jedino troškovi održavanja, no oni iznose svega oko 1,2 – 1,5% ukupnih

investicijskih troškove godišnje te troškovi mogućih zamjena pretvarača. Troškovi pojedinih elemenata prikazani su na slici 4.2.



Slika 4.2. Raspodjela troškova FN postrojenja

Prema slici 4.1., odnosno literaturi [4], troškovi investicije za FN sustave u 2019. godini iznose 1.100 EUR/kWp. Prilikom izračuna modela optimalne veličine FN sustava, koristit će se ovaj iznos za troškove u zbroju s troškovima godišnjih održavanja, koji su uzeti u iznosu od 1,2% od početnih troškova ulaganja.

4.2. Troškovi opskrbe električne energije u RH

U Republici Hrvatskoj, opskrbljivač električnom energijom s najvećim tržišnim udjelom je Hrvatska elektroprivreda (HEP), na čijem modelu će se računati svi troškovi vezani za opskrbu električne energije. Sljedeća tablica preuzeta je iz literature [5].

Tablica 4.1. Tarifni modeli u RH – energija i naknada za korištenje mreže (HEP)

Kategorija		Tarifni model	Tarifni element					
			Radna energija			Radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za obračunsko mjesto i Naknada za opskrbu
			JT	VT	NT			
			[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/kvarh]	[kn/mj]
Tarifne stavke								
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,77 (0,87)	-	-	-	-	17,40 (19,66)
		Bijeli	-	0,84 (0,95)	0,41 (0,46)	-	-	17,40 (19,66)
		Crveni	-	0,70 (0,79)	0,34 (0,38)	38,50 (43,51)	-	48,70 (55,03)
		Crni	0,37 (0,42)	-	-	-	-	6,20 (7,01)

Prema tablici 4.1., vidljive su cijene HEP-a za određene tarifne modele. Standardni modeli za kućanstva u RH su plavi i bijeli. Na primjeru bijelog tarifnog modela: ukupna cijena energije i naknade za korištenje mreže iznosi 0,84 kn/kWh tokom dana (08:00h – 22:00h) te 0,41 kn/kWh tokom noći (22:00h – 08:00h), bez uračunatog PDV-a. Uz tarifne stavke objavljene u tablici 4.1., svi kupci plaćaju i posebnu „Naknadu za obnovljive izvore i visokoučinkovitu kogeneraciju“ u iznosu od 0,105 kn/kWh, sukladno „Odluci Vlade RH (NN 87/2017)“. PDV na stavke iznosi 13%. Dakle, krajnji račun bio bi:

$$C_{B,DP} = (0,84 + 0,105) \cdot 1,13 = 1,07 \text{ kn/kWh} \quad (4-1)$$

za dnevnu potrošnju, te

$$C_{B,NP} = (0,41 + 0,105) \cdot 1,13 = 0,58 \text{ kn/kWh} \quad (4-2)$$

za noćnu potrošnju. Što se tiče plavog tarifnog modela, on ima jedinstvenu cijenu tokom cijelog dana koja iznosi 0,77 kn/kWh bez PDV-a. Da bi se bolje pojasnio taj iznos, preuzete su sljedeće tablice iz literature [5].

Tablica 4.2. Tarifni modeli u RH – iznosi troškova korištene energije (HEP)

Kategorija		Tarifni model	Tarifni element					
			Radna energija			Radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za ospkrbu
			JT	VT	NT			
			[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/kvarh]	[kn/mj]
Tarifne stavke								
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,46 (0,52)	-	-	-	-	7,40 (8,36)
		Bijeli	-	0,49 (0,55)	0,24 (0,27)	-	-	7,40 (8,36)
		Crveni	-	0,49 (0,55)	0,24 (0,27)	-	-	7,40 (8,36)
		Crni	0,19 (0,21)	-	-	-	-	0,40 (0,45)

Tablica 4.3. Tarifni modeli u RH – iznosi troškova distribucije el. energije (HEP)

Kategorija kupca		Tarifni model	Radna energija			Obračunska vršna radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za obračunsko mjerno mjesto
			JT	VT	NT			
			[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/kvarh]	[kn/mj]
			Tarifne stavke					
			1	2	3	4	5	6
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,22	-	-	-	-	10,00
		Bijeli	-	0,24	0,12	-	-	10,00
		Crveni	-	0,16	0,08	24,00	-	41,30
		Crni	0,13	-	-	-	-	5,80

Tablica 4.4. Tarifni modeli u RH – iznosi troškova prijenosa el. energije (HEP)

Kategorija kupca	Tarifni model	Radna energija			Obračunska vršna radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za obračunsko mjesto
		JT	VT	NT			
		[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/kvarh]	[kn/mj]
Tarifne stavke							
		1	2	3	4	5	6
Kućanstvo	Plavi	0,09	-	-	-	-	-
	Bijeli	-	0,11	0,05	-	-	-
	Crveni	-	0,05	0,02	14,50	-	-
	Crni	0,05	-	-	-	-	-

Dakle, iz tablica je vidljivo da u ukupnu cijenu ulaze troškovi prijenosa, distribucije te korištenja električne energije. Do iznosa plavog tarifnog modela koji iznosi 0,77 kn/kWh (bez PDV-a) prema tablici 4.1. dolazi se zbrajanjem prethodno navedenih troškova,

$$C_P = 0,46 + 0,22 + 0,09 = 0,77 \text{ kn/kWh (bez PDV-a)}, \quad (4-3)$$

gdje je trošak korištenja energije 0,46 kn/kWh, distribucije energije 0,22 kn/kWh te prijenosa energije 0,09 kn/kWh. Zbrajanjem danog iznosa s naknadom za obnovljive iznose od 0,105 kn/kWh te dodavanjem iznosa PDV-a od 13%, ukupna cijena koju će kućanstvo plaćati je:

$$C_P = (0,77 + 0,105) \cdot 1,13 = 0,99 \text{ kn/kWh} \quad (4-4)$$

Ovaj iznos plavog tarifnog modela korist će se kao trošak električne energije u kunama po kilovatsatu [kn/kWh] prilikom izračuna modela optimalne veličine FN sustava.

4.3. Dobit kupca s vlastitom proizvodnjom

Ugradnjom FN sustava u kućanstvo treba obratiti pozornost da u slučaju kada je proizvodnja električne energije veća od potrošnje u određenom trenutku (ako sustav ne koristi bateriju), korisnik predaje višak proizvedene energije u mrežu. Za takvu električnu energiju, HEP nudi cjenik za otkup električne energije od pojedinca. Prema literaturi [5], cijena se obračunava prema sljedećim izrazima:

$$C_i = 0,9 \cdot PKC_i, \quad (4-5)$$

ako za obračunsko razdoblje vrijedi $E_{pi} \geq E_{ii}$,

$$C_i = 0,9 \cdot PKC_i \cdot \frac{E_{pi}}{E_{ii}}, \quad (4-6)$$

ako za obračunsko razdoblje vrijedi $E_{pi} < E_{ii}$,

pri čemu je:

E_{pi} – ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja i , izražena u kn/kWh;

E_{ii} – ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja i , izražena u kn/kWh;

PKC_i – prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja i , izražena u kn/kWh.

Dakle, ako opskrbljivač (kućanstvo) u obračunskom razdoblju (mjesečno) proizvodi manje električne energije nego što preuzima od strane HEP-a, cijena proizvedene električne energije E_{pi} koja je isporučena u mrežu koju će HEP isplatiti opskrbljivaču je $C_i = 0,9 \cdot PKC_i$, gdje je PKC_i zapravo iznos troška korištene električne energije s tablice 4.2. Prema plavom tarifnom modelu, ona iznosi 0,46 kn/kWh s PDV-om, što znači da je C_i :

$$C_i = 0,9 \cdot PKC_i = 0,9 \cdot 0,46 = 0,414 \text{ kn/kWh} \quad (4-7)$$

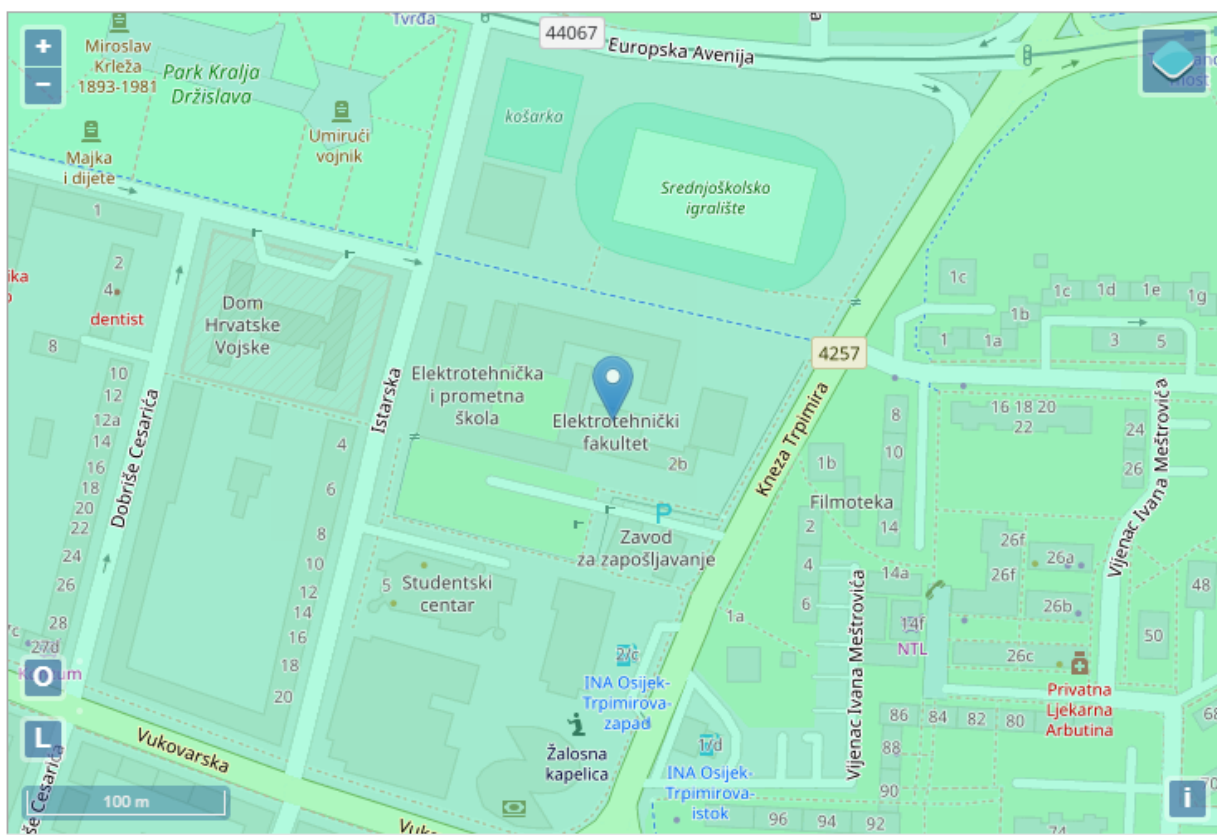
Dakle, ako opskrbljivač (kućanstvo) u obračunskom razdoblju (mjesečno) proizvodi više električne energije nego što preuzima od strane HEP-a, također se u izraz ubacuje i omjer $\frac{E_{pi}}{E_{ii}}$, a kako u tom slučaju vrijedi $E_{pi} < E_{ii}$, to znači da se radi o koeficijentu manjem od 1 te će cijena isplate biti još manja.

Jasno je vidljivo da s većom proizvodnjom opada profit, što znači da nema razloga postavljati što veći FN sustav, nego odrediti prema vlastitoj potrošnji kućanstva, kako bi se postigao optimum.

4.4. Potencijal Sunčevog zračenja

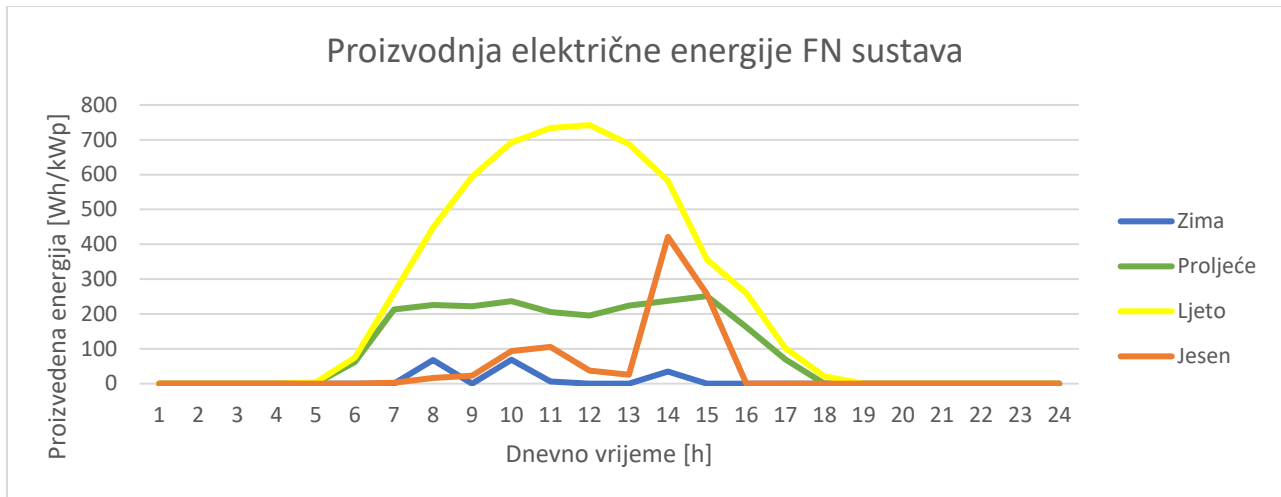
Prema literaturi [6], moguće je odrediti potencijal FN sustava na bilo kojoj lokaciji na Zemlji. PVGIS to čini na način da uzima u obzir geografsku širinu i dužinu dane lokacije te prema njoj određuje Sunčevo zračenje i temperaturu na tom području, padaline, naoblake i slične meteorološke pojave prema lokalnim meteorološkim bazama podataka i ostale bitne podatke pri godišnjem, mjesečnim i dnevnim izračunima, sve kako bi se što točnije prikazalo izvješće potencijala FN sustava u obliku količine proizvedene energije po jednom instaliranom kilovatu FN sustava [Wh/kWp].

Kao primjer, uzeta je lokacija Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku (Slika 4.3.).



Slika 4.3. Odabrana lokacija FERIT-a na stranici PVGIS-a

Koordinate su 45.557, 18.695. Lokacija je bitna kako bi se točno mogao odrediti kut prilikom postavljanja FN ploča, kako bi se dobio maksimalni mogući učinak. Nakon što se unesu podaci, dobije se tablica s podacima proizvedene energije svakoga sata tokom jedne cijele godine. Pa tako je moguće i napraviti sljedeći graf na slici 4.4.



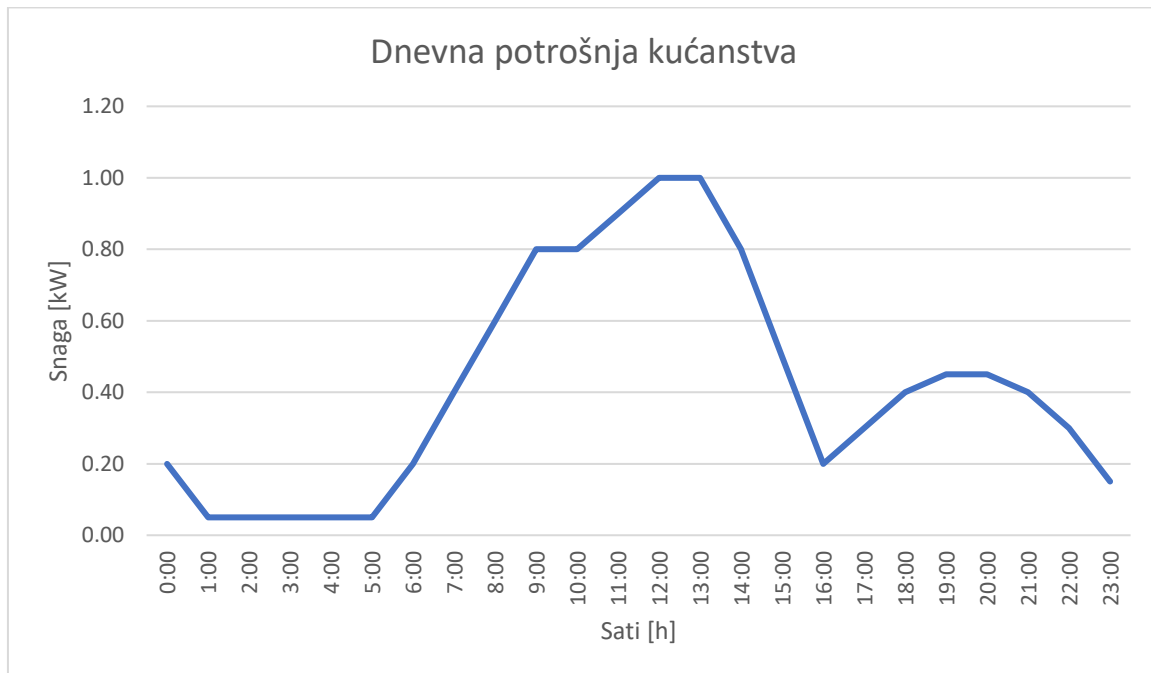
Slika 4.4. Proizvedena energija na primjeru jednoga dana tokom pojedinog godišnjeg doba

Krivulja prikazuje koliku će energiju u vatsatima [Wh] sustav proizvesti u određenom trenutku dana po instaliranom kilovatu [kW] FN sustava. Na primjer, tokom ljeta u podne, proizvedena energija tokom jednoga sata iznosi oko 0,73 kWh za 1 kW instalirane snage FN sustava, što znači ako bi koristio FN sustav s instaliranom snagom od 10 kW, tada bi u tom vremenu proizveo 7,4 kWh energije. Logično je da je najveća proizvedena energija tokom ljeta, gdje krivulja opisuje prosječan ljetni sunčani dan. Zimi se krivulja često spušta na nulu zbog raznih padalina i naoblačenja koji su česti zimi. Ovako dobiveni podaci preko PVGIS-a će biti korišteni kao iznosi proizvedene električne energije u izradi modela za optimalnu veličinu FN sustava.

5. MODEL OPTIMALNE VELIČINE FN SUSTAVA

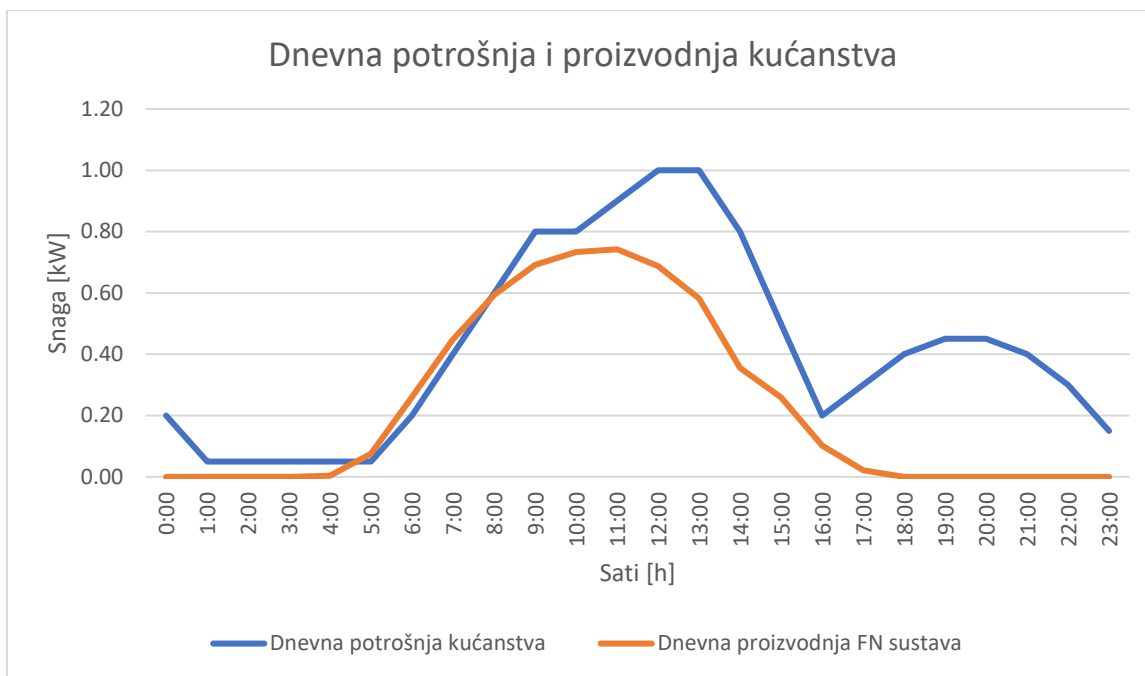
5.1. Cilj matematičkog modela

Na slici 5.1. dan je primjer dnevne potrošnje jednoga kućanstva.



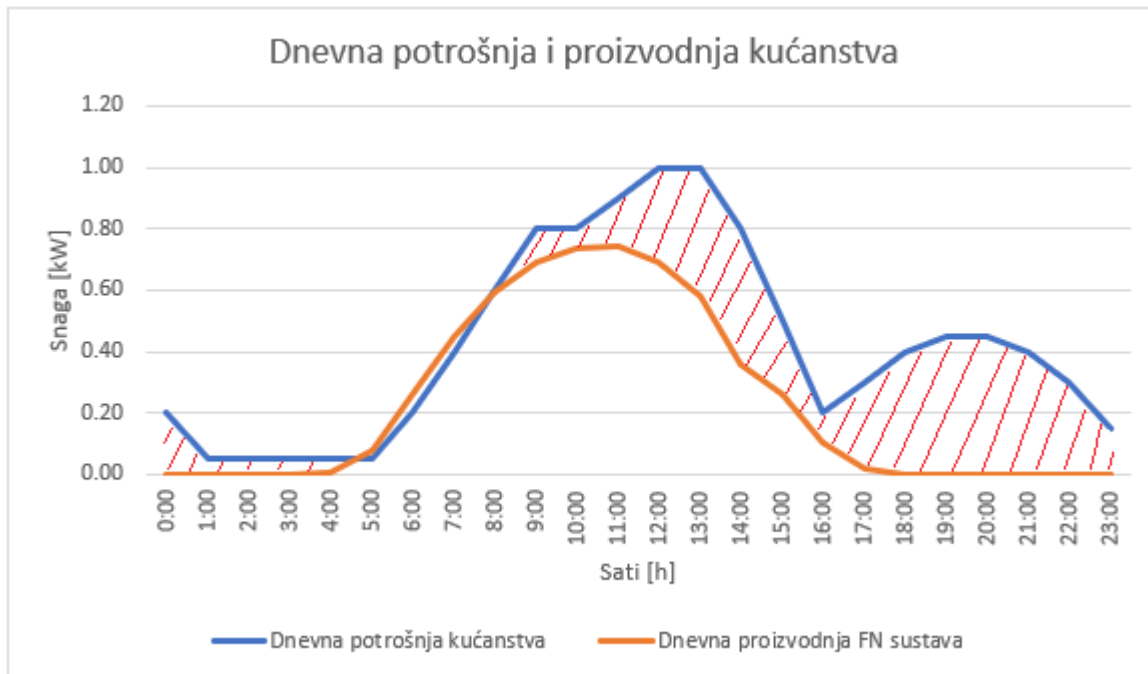
Slika 5.1. Dnevna potrošnja na primjeru jednoga kućanstva

Površina ispod krivulje prikazuje dnevni utrošak električne energije za to kućanstvo u kilovatsatima [kWh]. Iz grafa je lako moguće očitati vršnu snagu toga dana koja iznosi 1 kW. Kada bi se instalirana snaga FN sustava određivala prema vršnoj snazi, tada bi krivulja proizvodnje (tokom ljetnog, sunčanog dana) takve FN elektrane izgledala kao na slici 5.2.



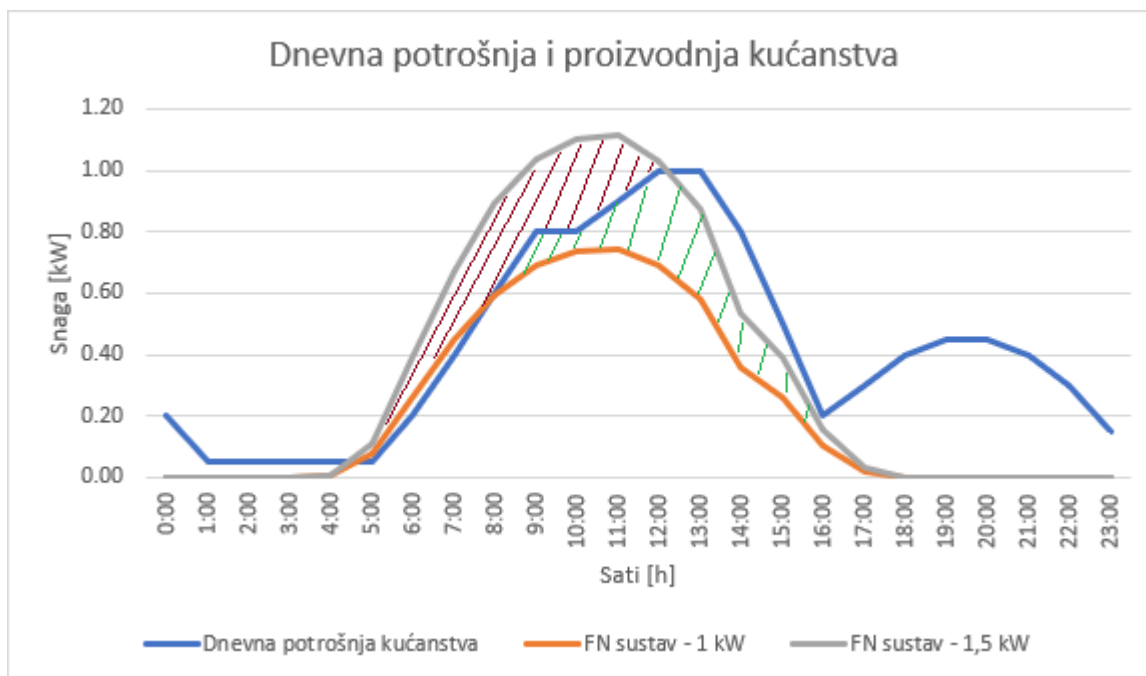
Slika 5.2. Dodana krivulja proizvodnje FN sustava s instaliranom snagom 1 kW.

Sve ispod krivulje proizvodnje FN sustava će biti proizvedena energija, što će zasigurno smanjiti trošak električne energije. Dio gdje je krivulja proizvodnje iznad krivulje potrošnje predstavlja dio električne energije koji je „višak“ te se isporučuje u mrežu, odnosno, prodaje HEP-u. To nije poželjno u velikoj mjeri, pošto je dobit za prodaju električne energije znatno manja od troška kupnje električne energije (relacije (4-4) i (4-7)). Isto tako, dosta je velik dio potrošnje ostao nepokriven, gdje je potrebno plaćati standardnu cijenu za električnu energiju (crveno osjenčani dio na slici 5.3.).



Slika 5.3. Crveno osjenčani dio gdje je traženu električnu energiju potrebno uzeti iz mreže.

Jasno je da bez skladištenja energije (npr. baterija) FN sustav ne može nadomjestiti energiju tokom noći, ali moguće je povećati instaliranu snagu FN sustava da se nadomjesti dio tokom podneva. Povećanjem instalirane snage FN sustava podiže se razina krivulje koja će sada zahvaćati veći dio prethodno „nepokrivene“ potrošnje električne energije, ali isto tako znači da će površina gdje je krivulja proizvodnje bila iznad krivulje potrošnje sada biti još veća. Na primjer, za ovaj slučaj, dodana je krivulja proizvodnje FN sustava s instaliranom snagom od 1,5 kW (slika 5.4.).



Slika 5.4. Dodana krivulja proizvodnje FN sustava s instaliranom snagom 1,5 kW.

Sa slike je vidljivo da na smeđe osjenčanoj površini proizvodnja električne energije prelazi potrošnju, što nije poželjno. Međutim, zeleni osjenčani dio je električna energija koju bi kućanstvo trebalo uzimati iz mreže sa FN sustavom instalirane snage 1 kW, a sada to FN sustav instalirane snage 1,5 kW proizvodi (nadomješta).

Postavlja se pitanje, je li takav način isplativiji i koliko, a ako je isplativiji, do koje vrijednosti vrijedi povećavati instaliranu snagu FN sustava? Cilj izrade sljedećeg matematičkog modela jest odrediti upravo tu potrebnu vrijednost instalirane snage FN sustava kako bi se postigao što manji trošak u odnosu na investiciju u FN sustav tokom sljedećih 20 godina.

5.2. Izrada matematičkog modela

U ovom poglavlju će se opisati sve vrijednosti o kojima ovisi veličina instalirane snage FN sustava i međusobno povezati kako bi se na temelju krivulja potrošnje određenog kućanstva mogla odrediti optimalna instalirana snaga FN sustava.

Bez FN sustava, prema cijeni plavog tarifnog modela (relacija (4-4)), cijena unutar obračunskog razdoblja koju kućanstvo treba isplatiti HEP-u iznosi:

$$C_{Dt} = D_t \cdot 0,99, \quad (5-1)$$

gdje je:

C_{Dt} – cijena koju je potrebno isplatiti na temelju ukupne električne energije preuzete iz mreže u određenom vremenu od strane HEP-a, izražena u kunama [kn];

D_t – ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar određenog vremena, izražena u kilovatsatima [kWh].

Sljedeće, dodavanjem FN sustava na kućanstvo, u izraz se dodaje i proizvodnja električne energije. Naime, prema relaciji (4-7) prikazano je da je prodajna cijena (prema plavom tarifnom modelu) električne energije 0,414 kn/kWh, što znači da se treba prikazati dvije relacije cijena; kupovnu i prodajnu. Dakle, cijene električne energije prikazane su na sljedeći način:

$$C_{kup,t} = (P_{v,t} \cdot P_{inst} - D_t) \cdot 0,99, \quad (5-2)$$

za slučaj kada vrijedi $P_{v,t} \cdot P_{inst} - D_t \leq 0$,

$$C_{prod,t} = (P_{v,t} \cdot P_{inst} - D_t) \cdot 0,414, \quad (5-3)$$

za slučaj kada vrijedi $P_{v,t} \cdot P_{inst} - D_t > 0$.

$C_{kup,t}$, $C_{prod,t}$ – ukupna kupovna, odnosno, prodajna cijena na temelju razlike zaprimljene i isporučene električne energije iz mreže u određenom razdoblju, izražena u kunama [kn];

$P_{v,t}$ – Vrijednost proizvedene električne energije u određenom razdoblju po jednom kilovatu instalirane snage FN sustava, izražena u kilovatsatu po kilovatpeak-u [kWh/kWp];

P_{inst} – Instalirana snaga FN sustava, izražena u kilovatpeak-u [kWp].

Investicija koja je uložena u FN sustave prikazana je kao:

$$C_{invest} = C_{capex} \cdot P_{inst}, \quad (5-4)$$

gdje je:

C_{capex} – cijena investicije za FN sustav po jednom kilovatu instalirane snage [kn/kWp];

P_{inst} – Instalirana snaga FN sustava, izražena u kilovatpeak-u [kWp].

Troškovi održavanja FN sustava koji iznose 1,2% godišnje od početne investicije (poglavlje 4.1.) iznose:

$$C_{o\&m, god} = (C_{capex} \cdot P_{inst}) \cdot 1,2\%, \quad (5-5)$$

Pošto se model svodi na trajanje od 20 godina, potrebno je dodati novu cijenu izmjenjivača, pošto treba uzeti u obzir da tipični izmjenjivač koji se koristi u FN sustavima ima rok trajanja od oko 10 godina. Prema slici 4.2., prikazano je da takav izmjenjivač iznosi oko 6% početne investicije, stoga njegov trošak nakon 10 godina iznosi:

$$C_{inverter} = C_{invest} \cdot 6\% \quad (5-6)$$

Ako sve prethodne troškove FN sustava prikažemo kao jedinstvene ukupne troškove FN sustava unutar sljedećih 20 godina, tada bi izraz glasio:

$$C_{FN} = C_{invest} + C_{o\&m, 20} + C_{inverter}$$

$$C_{FN} = C_{capex} \cdot P_{inst} + C_{capex} \cdot P_{inst} \cdot 1,2\% \cdot 20 + C_{capex} \cdot P_{inst} \cdot 6\% \quad (5-7)$$

Prema poglavlju 4.1., ulaganja u sredstva (CAPEX) za FN sustave za 2019. godinu iznose 1.100 EUR/kWp, što iznosi 8.320 kn/kWp. Ta vrijednost će se koristiti kao jedinična cijena po jednom instaliranom kilovatu [kn/kWp] FN sustava, odnosno, C_{capex} . Relacija (5-7) za ukupne troškove FN sustava svedena je da ovisi o budućoj veličini instalirane snage FN sustava.

Ako je poznata potrošnja i proizvodnja električne energije svakoga sata tokom određenog perioda, moguće je prema količini danih podataka odrediti razliku između isporučene i zaprimljene električne energije. Tada se prema relacijama (5-2) i (5-3) određuje trošak ili dobit svakoga sata te na temelju tih podataka može se izračunati godišnji trošak, odnosno, godišnja dobit ovisno o razlici isporučene i zaprimljene električne energije korištenjem sljedeće relacije:

$$C_{en, god} = \sum_{t=1}^{8760} (C_{prod, t} - C_{kup, t}), \quad (5-8)$$

gdje je:

$C_{en, god}$ – Ukupan iznos dobiti ili troška na temelju mjerenja isporučene i zaprimljene električne energije svakoga sata tokom razdoblja od jedne godine, izražen u kunama [kn].

Ako je poznat godišnji iznos za dobit ili trošak korištenja električne energije tokom tog razdoblja, dodavanjem troška investicije u FN sustav iz relacije (5-7) i proračunom relacije (5-8) na 20 godina, sveukupni troškovi tokom 20 godina određuju se prema relaciji:

$$C_{uk} = 20 \cdot C_{en,god} - C_{FN} \quad (5-9)$$

U sljedećem poglavlju koristit će se prethodno navedene relacije na stvarnom primjeru obiteljske kuće. Cilj je povećavati (odrediti) instaliranu snagu FN sustava kako bi iznos C_{uk} bio što manji, odnosno, kako bi isplativost ulaganja bila optimalna.

5.3. Primjena modela na obiteljskoj kući

Razrađeni model u prethodnom potpoglavlju potrebno je prikazati u primjeni na obiteljskoj kući. Radi se o kući koja se nalazi u Osijeku. Većina podataka obrađena je tablično u programskom alatu Excelu na temelju svakoga sata u jednoj godini (8760 redova podataka). Zbog prevelike količine podatka prikazan će biti primjer proračuna na temelju jednoga dana, datuma 23.9.

Razradom kao u potpoglavlju 4.4., u PVGIS-u se određuje potencijalna proizvodnja električne energije preko FN sustava za lokaciju gdje se nalazi kuća. Rezultat PVGIS-a je proizvedena energija FN sustava svakoga sata, koja je prikazana tablično, tokom jedne cijele godine, a koristit će za proračune kupovne i prodajne cijene proizvedene električne energije svakoga sata, relacijama (5-2) i (5-3). Označavat će se s $P_{v,t}$, a instalirana snaga P_{inst} će biti regulirana do optimalne vrijednosti. Kao primjer, dana je sljedeća tablica 5.1. koja prikazuje potencijalnu proizvedenu električnu energiju za instalirane snage FN sustava 1, 2 i 5 kW.

Tablica 5.1. Prikaz potencijalne proizvedene električne energije u ovisnosti o instaliranoj snazi FN za primjere instalirane snage 1, 2 i 5 kW.

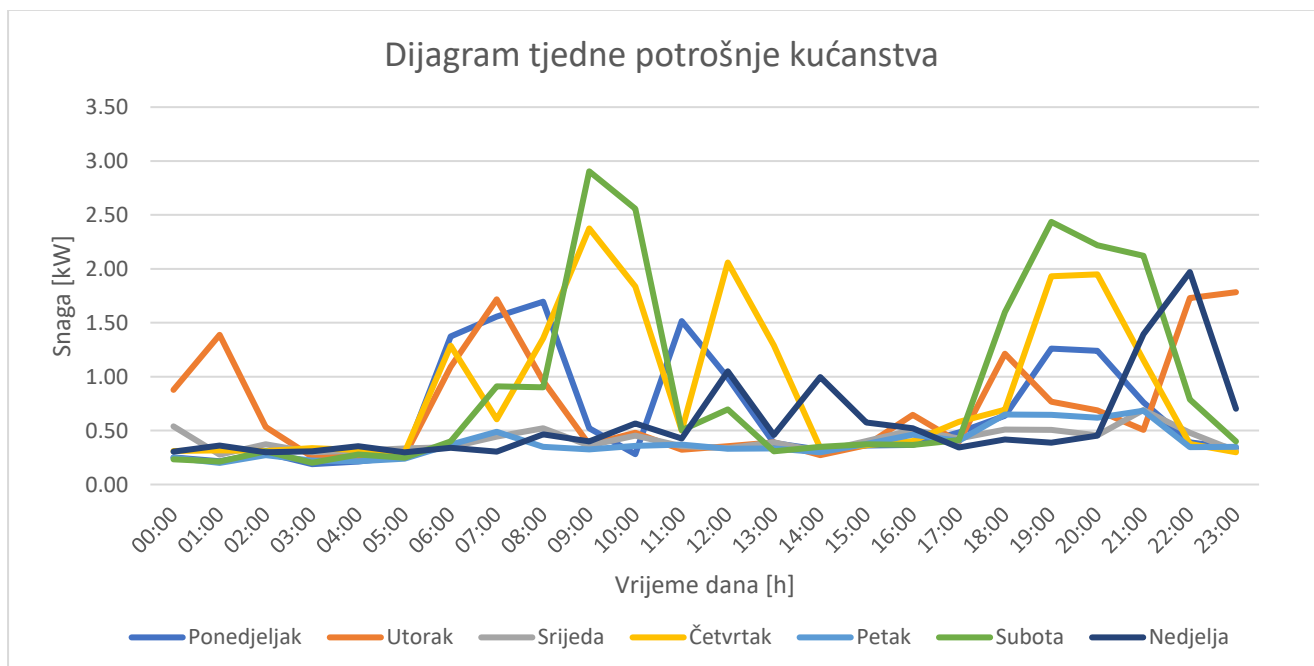
$P_{inst} =$	1	[kWp]	$P_{inst} =$	2	[kWp]	$P_{inst} =$	5	[kWp]
Vrijeme [y:m:d:h]	$P_{v,t}$ [Wh/kWp]	$P_{v,t} \cdot P_{inst}$ [kWh]	Vrijeme [y:m:d:h]	$P_{v,t}$ [Wh/kWp]	$P_{v,t} \cdot P_{inst}$ [kWh]	Vrijeme [y:m:d:h]	$P_{v,t}$ [Wh/kWp]	$P_{v,t} \cdot P_{inst}$ [kWh]
20190923:0010	0	0.00	20190923:0010	0	0.00	20190923:0010	0	0.00
20190923:0110	0	0.00	20190923:0110	0	0.00	20190923:0110	0	0.00
20190923:0210	0	0.00	20190923:0210	0	0.00	20190923:0210	0	0.00
20190923:0310	0	0.00	20190923:0310	0	0.00	20190923:0310	0	0.00
20190923:0410	0	0.00	20190923:0410	0	0.00	20190923:0410	0	0.00
20190923:0510	32.97	0.03	20190923:0510	32.97	0.07	20190923:0510	32.97	0.16
20190923:0610	243.04	0.24	20190923:0610	243.04	0.49	20190923:0610	243.04	1.22
20190923:0710	439.08	0.44	20190923:0710	439.08	0.88	20190923:0710	439.08	2.20
20190923:0810	586.06	0.59	20190923:0810	586.06	1.17	20190923:0810	586.06	2.93
20190923:0910	672.79	0.67	20190923:0910	672.79	1.35	20190923:0910	672.79	3.36
20190923:1010	702.33	0.70	20190923:1010	702.33	1.40	20190923:1010	702.33	3.51
20190923:1110	609.67	0.61	20190923:1110	609.67	1.22	20190923:1110	609.67	3.05
20190923:1210	389.2	0.39	20190923:1210	389.2	0.78	20190923:1210	389.2	1.95
20190923:1310	394.42	0.39	20190923:1310	394.42	0.79	20190923:1310	394.42	1.97
20190923:1410	316.31	0.32	20190923:1410	316.31	0.63	20190923:1410	316.31	1.58
20190923:1510	191.08	0.19	20190923:1510	191.08	0.38	20190923:1510	191.08	0.96
20190923:1610	14.5	0.01	20190923:1610	14.5	0.03	20190923:1610	14.5	0.07
20190923:1710	0	0.00	20190923:1710	0	0.00	20190923:1710	0	0.00
20190923:1810	0	0.00	20190923:1810	0	0.00	20190923:1810	0	0.00
20190923:1910	0	0.00	20190923:1910	0	0.00	20190923:1910	0	0.00
20190923:2010	0	0.00	20190923:2010	0	0.00	20190923:2010	0	0.00
20190923:2110	0	0.00	20190923:2110	0	0.00	20190923:2110	0	0.00
20190923:2210	0	0.00	20190923:2210	0	0.00	20190923:2210	0	0.00
20190923:2310	0	0.00	20190923:2310	0	0.00	20190923:2310	0	0.00

Relacije od (5-4) do (5-7) vezane za trošak investicije i održavanja FN sustava prikazane su u tablici u ovisnosti o veličini instalirane snage FN sustava, prikazane na sljedećoj tablici.

Tablica 5.2. Troškovi investicija i održavanja FN sustava u ovisnosti o instaliranoj snazi FN sustava.

P _{inst} =	0	[kWp]	C _{invest} =	0.00
			C _{o&m} =	0.00
			C _{FN} =	0.00
P _{inst} =	1	[kWp]	C _{invest} =	8,320.00
			C _{o&m} =	99.84
			C _{FN} =	10,816.00
P _{inst} =	2.5	[kWp]	C _{invest} =	20,800.00
			C _{o&m} =	249.60
			C _{FN} =	27,040.00

Daljnji potrebni podaci su potrošnja električne energije kućanstva. Svako kućanstvo ima drugačiji način života i potrošnju električne energije što utječe na proračun, a sljedeća slika prikazuje tjednu potrošnju odabranog kućanstva.



Slika 5.5. Tjedna potrošnja električne energije kućanstva

Na temelju tjedne potrošnje električne energije (slika 5.5.), potrebno je odrediti snagu koju kućanstvo uzima iz mreže tokom svakog sata toga tjedna. Podaci dobiveni mjerenjem uzeti su tablično u

razmacima od sat vremena u vremenskom razdoblju od tjedan dana, preslikanih kao takvih na period od jedne godine. U tablici 5.3. označeni su s D_t .

Za svaki sat moguće je odrediti razliku između snaga proizvodnje i potrošnje $P_{v,t} - D_t$, kako bi bilo poznato radi li se u tom trenutku o preuzimanju ili isporuci električne energije u mrežu, ovisno o predznaku razlike tih dvaju veličina.

Tablica 5.3. Prikaz preuzete (crveno) i isporučene (zeleno) električne energije u mrežu te troškovi/dobiti izraženi u kunama u ovisnosti o instaliranoj snazi FN sustava.

P _{inst} =	2	[kWp]	C _{invest} = 16,640.00				C _{prod} [kn]	P _{inst} =	4	[kWp]	C _{invest} = 33,280.00			
			C _{o&m} = 199.68								C _{o&m} = 399.36			
			C _{FN} = 21,632.00							C _{FN} = 43,264.00				
Vrijeme [y:m:d:h]	P _{v,t} [Wh/kWp]	P _{v,t} · P _{inst} [kWh]	D _t [kWh]	P _v - D _t [kWh]	C _{kup} [kn]	C _{prod} [kn]	Vrijeme [y:m:d:h]	P _{v,t} [Wh/kWp]	P _{v,t} · P _{inst} [kWh]	D _t [kWh]	P _v - D _t [kWh]	C _{kup} [kn]	C _{prod} [kn]	
20190923:0010	0	0.00	0.25	-0.25	0.25	0	20190923:0010	0	0.00	0.25	-0.25	0.25	0	
20190923:0110	0	0.00	0.22	-0.22	0.21	0	20190923:0110	0	0.00	0.22	-0.22	0.21	0	
20190923:0210	0	0.00	0.29	-0.29	0.29	0	20190923:0210	0	0.00	0.29	-0.29	0.29	0	
20190923:0310	0	0.00	0.19	-0.19	0.19	0	20190923:0310	0	0.00	0.19	-0.19	0.19	0	
20190923:0410	0	0.00	0.21	-0.21	0.21	0	20190923:0410	0	0.00	0.21	-0.21	0.21	0	
20190923:0510	32.97	0.07	0.26	-0.20	0.19	0	20190923:0510	32.97	0.13	0.26	-0.13	0.13	0	
20190923:0610	243.04	0.49	1.37	-0.89	0.88	0	20190923:0610	243.04	0.97	1.37	-0.40	0.40	0	
20190923:0710	439.08	0.88	1.56	-0.68	0.67	0	20190923:0710	439.08	1.76	1.56	0.20	0	0.08	
20190923:0810	586.06	1.17	1.70	-0.52	0.52	0	20190923:0810	586.06	2.34	1.70	0.65	0	0.27	
20190923:0910	672.79	1.35	0.52	0.82	0	0.34	20190923:0910	672.79	2.69	0.52	2.17	0	0.90	
20190923:1010	702.33	1.40	0.28	1.12	0	0.47	20190923:1010	702.33	2.81	0.28	2.53	0	1.05	
20190923:1110	609.67	1.22	1.52	-0.30	0.29	0	20190923:1110	609.67	2.44	1.52	0.92	0	0.38	
20190923:1210	389.2	0.78	0.99	-0.21	0.21	0	20190923:1210	389.2	1.56	0.99	0.56	0	0.23	
20190923:1310	394.42	0.79	0.38	0.41	0	0.17	20190923:1310	394.42	1.58	0.38	1.19	0	0.49	
20190923:1410	316.31	0.63	0.32	0.31	0	0.13	20190923:1410	316.31	1.27	0.32	0.94	0	0.39	
20190923:1510	191.08	0.38	0.36	0.02	0	0.01	20190923:1510	191.08	0.76	0.36	0.40	0	0.17	
20190923:1610	14.5	0.03	0.37	-0.34	0.34	0	20190923:1610	14.5	0.06	0.37	-0.31	0.31	0	
20190923:1710	0	0.00	0.48	-0.48	0.48	0	20190923:1710	0	0.00	0.48	-0.48	0.48	0	
20190923:1810	0	0.00	0.64	-0.64	0.63	0	20190923:1810	0	0.00	0.64	-0.64	0.63	0	
20190923:1910	0	0.00	1.26	-1.26	1.25	0	20190923:1910	0	0.00	1.26	-1.26	1.25	0	
20190923:2010	0	0.00	1.24	-1.24	1.23	0	20190923:2010	0	0.00	1.24	-1.24	1.23	0	
20190923:2110	0	0.00	0.76	-0.76	0.76	0	20190923:2110	0	0.00	0.76	-0.76	0.76	0	
20190923:2210	0	0.00	0.39	-0.39	0.39	0	20190923:2210	0	0.00	0.39	-0.39	0.39	0	
20190923:2310	0	0.00	0.34	-0.34	0.34	0	20190923:2310	0	0.00	0.34	-0.34	0.34	0	

Ako se radi o preuzimanju (razlika negativna), odnosno kupnji električne energije, koristi se relacija (5-2) i radi se o trošku. Ako se radi o isporuci (razlika pozitivna), odnosno prodaji električne energije, koristi se relacija (5-3) i radi se o dobiti. Ova razdioba je bitna jer cijena prodaje i kupnje električne energije nije ista.

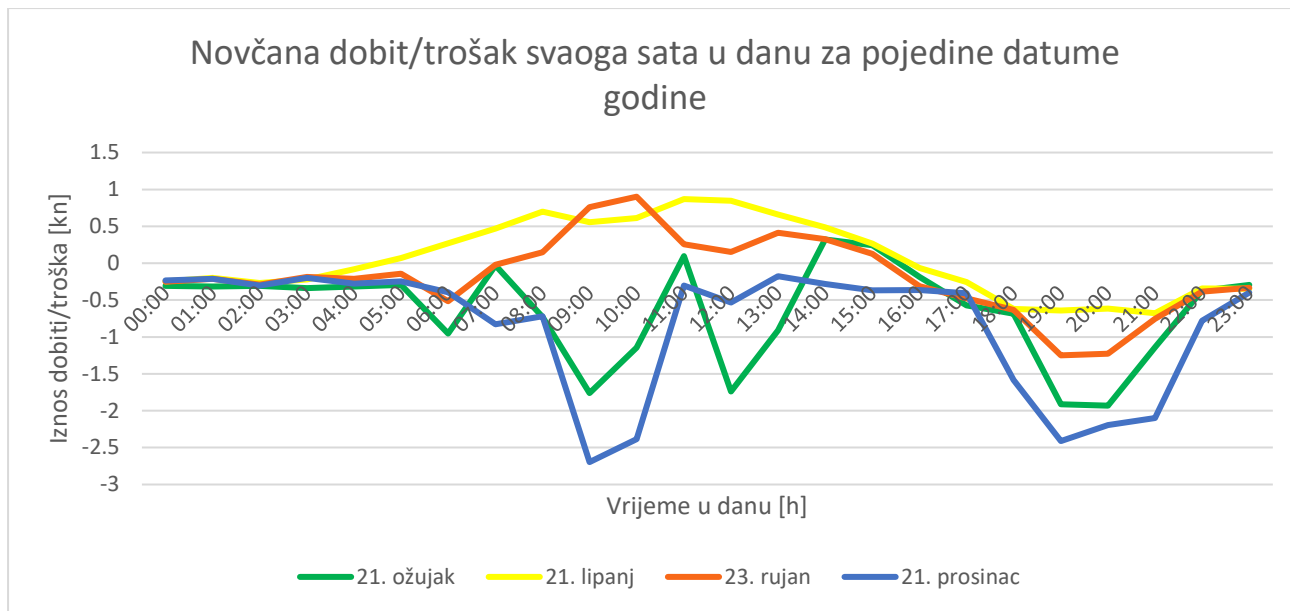
Sumom satnih razlika troškova i dobiti za preuzimanje/isporuku električne energije na temelju jedne godine dobiva se ukupni godišnji trošak električne energije. To zapravo predstavlja relacija (5-8). Podijelom godine na mjesečna razdoblja može se dobiti bolja slika o mjesečnim obračunima, stoga je dana sljedeća Excel tablica.

Tablica 5.4. Mjesečni obračun za preuzetu/isporučenu električnu energiju, bez instaliranog FN sustava (gore) te s instaliranim FN sustavom snage 3,5 kW (dolje).

Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac	Godišnje
Preuzeta el. en. (Epi) [kWh]	481.13	458.92	482.23	471.18	478.04	473.06	481.13	489.82	467.24	486.51	468.53	483.15	5,720.96
Isporučena el. en. (Eii) [kWh]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Epi/Eii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Pv - Dt [kWh]	-481.13	-458.92	-482.23	-471.18	-478.04	-473.06	-481.13	-489.82	-467.24	-486.51	-468.53	-483.15	-5,720.96
Obračun [kn]	-476.32	-454.33	-477.41	-466.47	-473.26	-468.33	-476.32	-484.92	-462.57	-481.65	-463.84	-478.32	-5,663.75

Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac	Godišnje
Preuzeta el. en. (Epi) [kWh]	393.62	358.17	321.42	283.21	269.11	265.05	267.45	279.82	277.20	337.49	331.53	371.43	3,755.49
Isporučena el. en. (Eii) [kWh]	114.95	99.03	178.99	254.04	257.64	264.01	270.81	294.83	243.14	136.32	116.67	116.89	2,347.33
Epi/Eii	3.42	3.62	1.80	1.11	1.04	1.00	0.99	0.95	1.14	2.48	2.84	3.18	-
Pv - Dt [kWh]	-278.67	-259.14	-142.43	-29.17	-11.47	-1.04	3.36	15.01	-34.06	-201.16	-214.86	-254.54	-1,408.16
Obračun [kn]	-342.09	-313.59	-244.10	-175.21	-159.76	-153.10	-154.05	-161.17	-173.77	-277.67	-279.91	-319.32	-2,753.75

S tablice 5.4. je vidljivo da je nakon instalacije FN sustava veličine 3,5 kW godišnji obračun za električnu energiju pao s oko 5.660 kn na 2.750 kn, što predstavlja godišnju uštedu od gotovo 3.000 kn. Koeficijent Epi/Eii predstavlja isti koeficijent relacije (4-6), čiji je cilj destimulirati preveliku isporuku električne energije u mrežu, stoga nije optimalno postaviti što veću FN elektranu jer bi upravo taj koeficijent dodatno snizio dobit za isporučenu električnu energiju u mrežu, kao na primjer u srpnju i kolovozu za slučaj FN sustava instalirane snage 3,5 kW (Tablica 5.4). Dnevna dobit/trošak prikazana je za datume početka godišnjih doba unutar jedne godine na sljedećoj slici.



Slika 5.6. Novčana dobit/trošak svakoga sata pojedinih datuma u godini za FN sustav instalirane snage 3,5 kW.

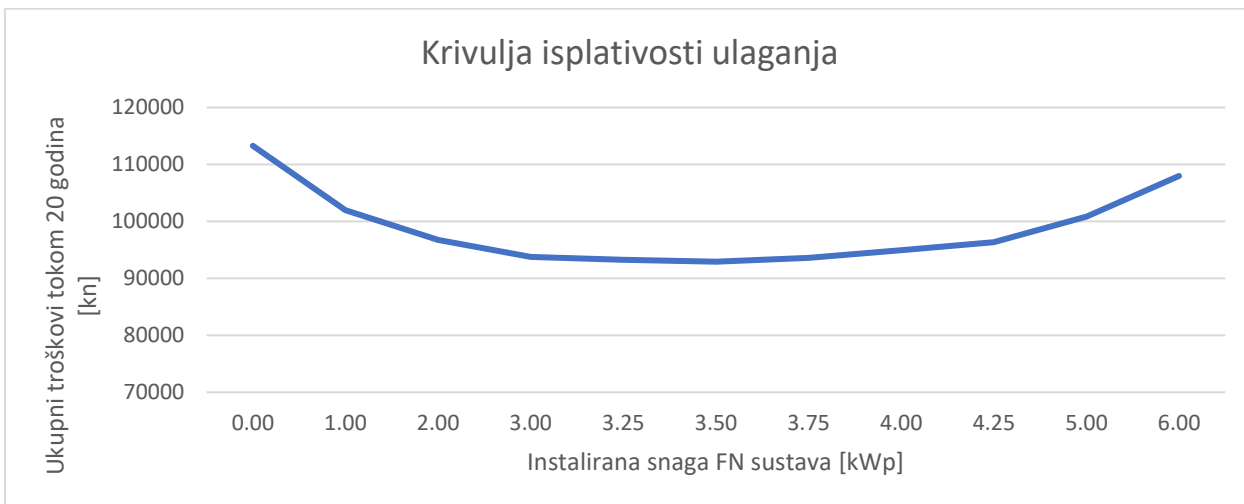
Sa slike je vidljivo da je puno veća dobit od FN elektrane tokom lipnja i rujna naspram ožujka i prosinca, što je logično za fotonapone.

Pošto su svi potrebni podaci poznati i uneseni, sada je moguće izvršiti proračune za pojedine veličine instalirane snage FN elektrane na temelju sljedećih 20 godina, kako bi se uspostavila optimalna veličina FN elektrane za ovu obiteljsku kuću. Sljedeća tablica prikazuje pojedine troškove ovisne o veličini instalirane snage FN sustava.

Tablica 5.5. Prikaz pojedinačnih i ukupnih troškova u ovisnosti o veličini instalirane snage FN sustava.

Instalirana snaga P_{FN} [kWp]	Troškovi računa el. energije [kn]	Troškovi FN sustava [kn]	Ukupno [kn]
0	113,274.94	0.00	113,274.94
1	91,141.95	10,816.00	101,957.95
2	75,110.50	21,632.00	96,742.50
3	61,319.48	32,448.00	93,767.48
3.25	58,089.92	35,152.00	93,241.92
3.5	55,074.98	37,856.00	92,930.98
3.75	53,050.66	40,560.00	93,610.66
4	51,667.17	43,264.00	94,931.17
4.25	50,372.47	45,968.00	96,340.47
5	46,760.08	54,080.00	100,840.08
6	43,101.72	64,896.00	107,997.72

Na temelju prethodnih podataka iscrtan je graf radi lakšeg pregleda podataka na sljedećoj slici.



Slika 5.7. Ovisnost ukupnih troškova unutar sljedećih 20 godina o instaliranoj snazi FN sustava.

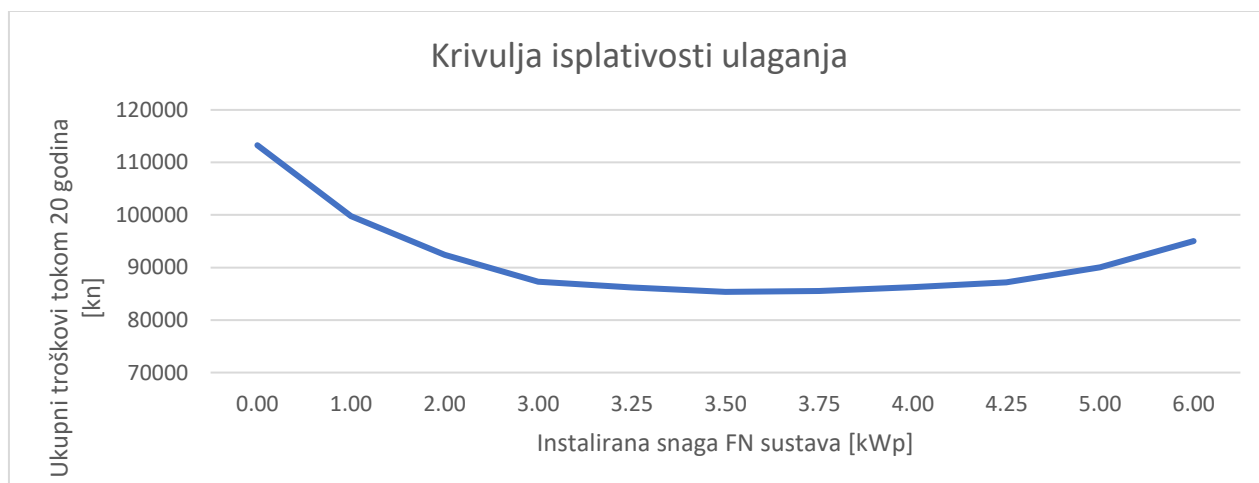
Moguće je vidjeti iz grafa (slika 5.7.), kao i iz tablice (tablica 5.5.) da je najviše isplativo ulaganje u FN elektranu instalirane snage 3,5 kW. Račun električne energije za kuću bez FN sustava koji iznosi 113.275 kn u sljedećih 20 godina, ugradnjom FN elektrane snage 3,5 kW spušta se na 92.930 kn, što je ušteda novca od više no 20.000 kn.

5.3.1. Mogućnost subvencije

Prethodni proračuni nisu uzimali u obzir bilo kakve subvencije prilikom investicije u FN sustav. Moguće je ostvariti prava na subvencije iz Europskih fondova, što bi značilo dodatnu olakšicu prilikom početne investicije. Ta subvencija odnosila bi se na početni trošak investicije, odnosno, C_{capex} iz relacije (5-4). Primjer troškova prikazan će biti sa subvencijama iznosa 20% i 50% na početnu investiciju. Novim proračunom sa subvencijom iznosa 20% sada tablica sa slike 5.5. ima nove vrijednosti.

Tablica 5.6. Prikaz pojedinačnih i ukupnih troškova u ovisnosti o veličini instalirane snage FN sustava sa subvencijom u iznosu 20% početne investicije.

Instalirana snaga P _{FN} [kWp]	Troškovi računa el. energije [kn]	Troškovi FN sustava [kn]	Ukupno [kn]
0	113,274.94	0.00	113,274.94
1	91,141.95	8,652.80	99,794.75
2	75,110.50	17,305.60	92,416.10
3	61,319.48	25,958.40	87,277.88
3.25	58,089.92	28,121.60	86,211.52
3.5	55,074.98	30,284.80	85,359.78
3.75	53,050.66	32,448.00	85,498.66
4	51,667.17	34,611.20	86,278.37
4.25	50,372.47	36,774.40	87,146.87
5	46,760.08	43,264.00	90,024.08
6	43,101.72	51,916.80	95,018.52

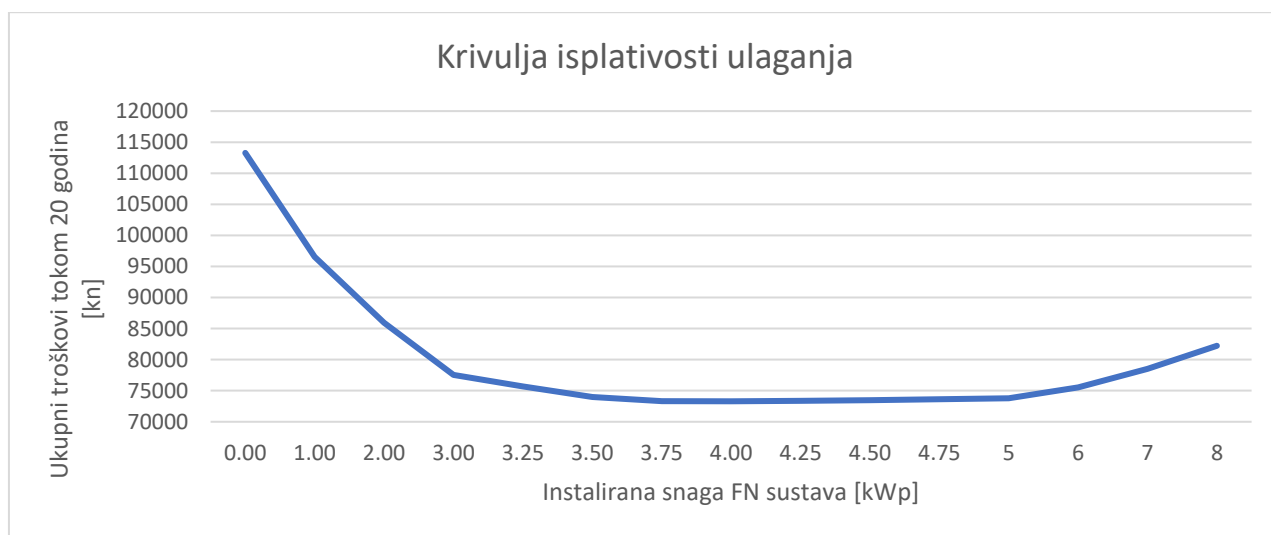


Slika 5.8. Ovisnost ukupnih troškova unutar sljedećih 20 godina o instaliranoj snazi FN sustava sa subvencijom u iznosu 20% početne investicije.

Sljedeća tablica prikazuje troškove prilikom subvencije u iznosu 50% početne investicije.

Tablica 5.7. Prikaz pojedinačnih i ukupnih troškova u ovisnosti o veličini instalirane snage FN sustava sa subvencijom u iznosu 50% početne investicije.

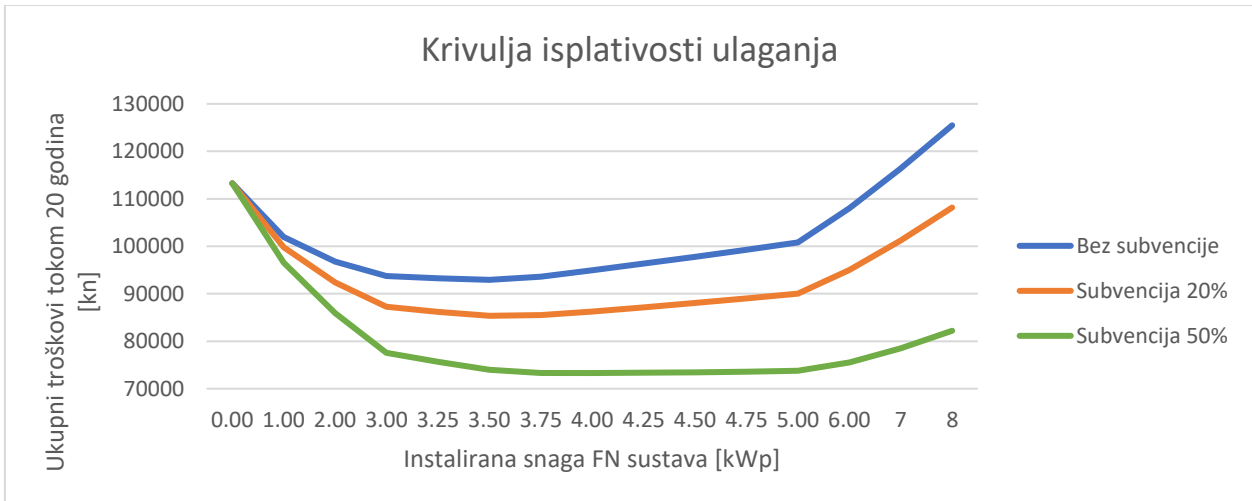
Instalirana snaga P _{FN} [kWp]	Troškovi računa el. energije [kn]	Troškovi FN sustava [kn]	Ukupno [kn]
0	113,274.94	0.00	113,274.94
1	91,141.95	5,408.00	96,549.95
2	75,110.50	10,816.00	85,926.50
3	61,319.48	16,224.00	77,543.48
3.25	58,089.92	17,576.00	75,665.92
3.5	55,074.98	18,928.00	74,002.98
3.75	53,050.66	20,280.00	73,330.66
4	51,667.17	21,632.00	73,299.17
4.25	50,372.47	22,984.00	73,356.47
4.5	49,126.34	24,336.00	73,462.34
4.75	47,913.98	25,688.00	73,601.98
5	46,760.08	27,040.00	73,800.08
6	43,101.72	32,448.00	75,549.72
7	40,653.67	37,856.00	78,509.67
8	38,955.34	43,264.00	82,219.34



Slika 5.9. Ovisnost ukupnih troškova unutar sljedećih 20 godina o instaliranoj snazi FN sustava sa subvencijom u iznosu 50% početne investicije.

Račun električne energije za kuću bez FN sustava koji iznosi 113.275 kn u sljedećih 20 godina te ugradnjom (bez subvencije) FN elektrane snage 3,5 kW spušta se na 92.930 kn, što je ušteda novca od više no 20.000 kn. Ako postoji mogućnost subvencije 20% početne investicije, optimalna veličina FN elektrane ostaje 3,5 kW, a ukupni iznos troškova se spušta na 85.360 kn, što je znači da je sada ušteda novca oko 28.000 kn. Ako pak postoji mogućnost subvencije od 50% početne investicije,

optimalna veličina FN elektrane sada iznosi 4 kW. Ukupni iznos troškova spušta se na 73.300 kn, što znači novu vrijednost uštede novca od čak 40.000 kn za ovo kućanstvo. Sljedeća slika 5.10. prikazuje prethodno određene krivulje isplativosti ulaganja na jednom grafu.



Slika 5.10. Ovisnost ukupnih troškova unutar sljedećih 20 godina o instaliranoj snazi FN sustava ovisno o iznosu subvencije.

ZAKLJUČAK

Kako potreba za energijom u cijelom svijetu raste, povećana učinkovitost, globalna povezanost sustava, integracija obnovljivih izvora energije i optimizacija samo su neki od rješenja. Prije samo desetak godina, fotonaponska tehnologija je bila još uvijek relativno skupa s obzirom na konvencionalne elektrane te se koristila u svrhu pružanja neprekidnog napajanja kod umreženih sustava i osiguravanjem napajanja u područjima gdje nema pristupa elektroenergetskoj mreži. Veliki napredak tehnologija obnovljivih izvora energije (ponajviše fotonapona) omogućio im je veću primjenu i konkurentnost na sadašnjem tržištu električne energije. U diplomskom radu su prikazani načini izračuna veličina koje utječu na optimizaciju fotonaponske elektrane u što spadaju: cijene troškova i dobiti električne energije u Republici Hrvatskoj, cijene investicije za fotonaposke module, pretvarače, instalacije te održavanje, potencijalne Sunčeve dobitke na temelju lokacije objekta i sl. Na temelju tih veličina te izmjerene potrošnje kućanstva (krivulje potrošnje) moguće je prema relacijama u potpoglavlju 5.2. odrediti optimalnu veličinu fotonaponske elektrane za tu obiteljsku kuću.

Prema tablici potrošnje, godišnja potrošena električna energija kućanstva iznosi 5.721 kWh. U slučaju bez fotonaponske elektrane, prema plavom tarifnom modelu Hrvatske elektroprivrede, godišnji račun za korištenje električne energije iznosi oko 5.664 kn, a račun za sljedećih 20 godina iznosi 113.275 kn. Iz tablica (tablica 5.5. – 5.7.) i grafova (slika 5.10.) iz prethodnog poglavlja vidljivo je da se i dodatkom manje fotonaponske elektrane već postiže profit u smislu odnosa troškova investicije i smanjenju iznosa računa električne energije. Ako subvencija nije moguća, optimalna veličina fotonaponske elektrane iznosi 3,5 kW s godišnjim računom za električnu energiju 2.754 kn, što je ušteda od 2.910 kn godišnje. Početna investicija u tom slučaju iznosi 29.120 kn, što znači da će se povrat investicije dogoditi nakon 10 godina. Ako subvencija iznosi 20% početne investicije, optimalna veličina fotonaponske elektrane također iznosi 3,5 kW s jednakom godišnjom uštedom od 2.910 kn te početna investicija u tom slučaju iznosi 23.296 kn, što znači da će se povrat investicije dogoditi nakon 8 godina. Ako subvencija iznosi pak 50% početne investicije, optimalna veličina fotonaponske elektrane iznosi 4 kW s godišnjim računom za električnu energiju 2.584 kn, što je ušteda od 3.080 kn godišnje. Početna investicija u tom slučaju iznosi 16.640 kn, što znači da će se povrat investicije dogoditi nakon 5,4 godine.

Ovaj diplomski rad potiče i pripomaže kupcu električne energije, odnosno, kućanstvu u pristupu proizvodnje „čiste“ energije za osobne potrebe te istovremeno sudjelovanje u isporuci

električne energije u elektroenergetskom sustavu. Dobivene relacije, odnosno, matematički model sluti kao pomoć za lakše i točnije određivanje veličine fotonaponske elektrane prema određenoj građevini.

LITERATURA

- [1] D. Šljivac, D. Topić, „*Obnovljivi izvori električne energije*“, Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2018.
- [2] J. Zdenković, Shrack Technik d.o.o, „*Fotonaponski otočni sustavi*“, Zagreb, Kolorklinika, 2019.
- [3] D. Bálint, A. Bodor, D. Došen, K. Fekete. Z. Hajdú. R. Horeczki, B. Horváthné Kovács, Z. Klaić, G. Knežević, S. Z. Kovács, C. Mezei, D. Pelin, M. Primorac, D. Šljivac, P. Póla, A. Titov, D. Topić, V. Varjú, M. Žnidarec, “*Renewable energy sources and energy efficiency for rural areas*”, Pečuh, MTA KRTK Institute for Regional Studies, 2018.
- [4] A. Jäger-Waldau, “*PV status report 2019: research, solar cell production and market implementation of photovoltaics*”, Office for Official Publications of the European Community, 2019.
- [5] Hrvatska elektroprivreda d.o.o., “*Tarifni modeli za kućanstva*”, “*Kupac s vlastitom proizvodnjom*”, dostupno na: <https://www.hep.hr/> [5.6.2020.]
- [6] The Joint Research Centre (JRC), European Union, “*Solar radiation tool for PV potential for different technologies and configurations of PV systems.*”, dostupno na: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> [5.6.2020.]
- [7] Ž. Jeršek, „*Projektiranje fotonaponskog sustava za potrebe kućanstva*“, Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2019.

SAŽETAK

Glavni cilj diplomskoga rada je odrediti optimalnu veličinu izgradnje fotonaponske elektrane prema isplativosti ulaganja za obiteljsku kuću.

Navedene su relacije i načini računanja pojedinih vrijednosti, potrebnih za izračun optimalne veličine preko matematičkog modela. Prikazan je postupak određivanja svih vrijednosti koje utječu na taj račun. Pod tim se podrazumijevaju cijene troškova i dobiti električne energije u Republici Hrvatskoj, cijene investicije za fotonaponske module, pretvarače, instalacije te održavanje, potencijalne Sunčeve dobitke na temelju lokacije objekta i sl.

Dan je primjer obiteljske kuće na kojoj je primijenjen matematički model te određena optimalna veličina izgradnje fotonaponske elektrane.

Dobivene relacije, odnosno, matematički model sluti kao pomoć za određivanje isplativosti ulaganja u fotonaponsku elektranu. Rad je namijenjen lakšem i točnijem određivanju veličine fotonaponske elektrane prema određenoj građevini.

Ključne riječi: fotonapon, fotonaponski sustav, isplativost, optimizacija, vlastita proizvodnja

ABSTRACT

The aim of this paper is to determine the optimal size of the photovoltaic power plant in consideration of the return on investment on the example of a family house.

The relations and methods used in the calculations of individual values which are necessary for the determination of the optimal size of the photovoltaic power plant are given in the paper. The process of determining these values is shown as well. This includes the following: the prices of costs/profits for buying/selling the electricity in the Republic of Croatia, investment prices for photovoltaic modules, converters, installations and maintenance, as well as potential solar gains based on the location of the building in question (e.g. family house).

In this paper, mathematical model was applied to a family house to determine the optimal size of the photovoltaic power plant based on household's consumption of electricity.

The given relations (i.e. mathematical model) serves as an aid for determining the profitability of the investments in a photovoltaic power plant. The intention of this paper is to make determining the size of the photovoltaic power plant easier and more accurate.

Keywords: photovoltaic, photovoltaic system, cost-effectiveness, optimization, household with photovoltaic production

ŽIVOTOPIS

Alen Čalušić je rođen 21. svibnja 1994. godine u gradu Waiblingen, Njemačka. U Novoj Gradiški je pohađao Osnovnu školu Mate Lovraka, nakon koje je upisao Gimnaziju Nova Gradiška, općeg smjera. Akademske godine 2013./14. upisuje se na Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku kao redovan student. Godine 2017. završio je preddiplomski studij te iste godine upisao diplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku u polju održive elektroenergetike.

potpis: _____