

ISPLATIVOST FOTONAPONSKIH ELEKTRANA BEZ POTICAJA

Bralić, Josip

Graduate thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:569476>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-11**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

JOSIP BRALIĆ

ZAVRŠNI RAD

**ISPLATIVOST FOTONAPONSKIH ELEKTRANA BEZ
POTICAJA**

Split, kolovoz 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

Predmet: Upravljanje energetske sustavima

ZAVRŠNI RAD

Kandidat: Josip Bralić

Naslov rada: Isplativost fotonaponskih elektrana bez poticaja

Mentor: Mr. Sc. Zdravko Jadrijević, dipl. ing. el.

Split, kolovoz 2023.

SADRŽAJ

Sažetak.....	1
Summary.....	2
1. UVOD.....	3
2. FOTOELEKTRIČNI EFEKT.....	5
1.1. Povijesni pregled.....	5
1.2. Primjena fotoelektričnog efekta.....	9
3. FOTONAPONSKE ĆELIJE.....	10
3.1. Opći pregled.....	10
3.2. Princip rada.....	12
4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE.....	15
4.1. Mrežne fotonaponske elektrane.....	15
4.1.1. Izvedba s jednim izmjenjivačem.....	17
4.1.2. Izvedba s jednim izmjenjivačem za svaki niz.....	18
4.1.3. Izvedba s više izmjenjivača.....	19
4.2. Otočne fotonaponske elektrane.....	20
4.2.1. Hibridne otočne fotonaponske elektrane.....	21
5. TROŠKOVI I ISPLATIVOST FOTONAPONSKIH ELEKTRANA.....	22
5.1. Investicijski troškovi.....	22
5.1.1. Nulta stopa PDV-a na isporuku i ugradnju solarnih ploča.....	26
5.2. Troškovi za održavanje i pogon.....	28
5.3. Nivelirani trošak proizvodnje električne energije.....	28
5.4. Ispitivanje isplativosti fotonaponske elektrane.....	29
5.5. Razdoblje povrata investicije.....	30

5.6. Dobit za kupca s vlastitom fotonaponskom elektranom	31
6. ANALIZA ISPLATIVOSTI FOTONAPONSKIH ELEKTRANA BEZ POTICAJA.....	33
6.1. Opći pregled poticaja za fotonaponske elektrane	33
6.1.1. Kritične točke javnih poticaja	35
6.2. Povrat investicije bez poticaja	36
6.2.1. Primjeri povrata investicije bez poticaja	37
7. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA	42
POPIS SLIKA	45
POPIS TABLICA	47

Sažetak

Isplativost fotonaponskih elektrana bez poticaja

Ovaj rad ima za cilj prikazati isplativost fotonaponskih elektrana bez poticaja. U radu su prikazani osnovni pojmovi o fotoelektričnom efektu te opći pregled i principi rada fotonaponskih ćelija. Dan je opis fotonaponskih elektrana koje se mogu svrstati u dvije temeljne kategorije. Izvršena je analiza koji se troškovi fotonaponske elektrane mogu očekivati po pitanju investiranja, održavanja i ostalih troškova. Opisan je način ispitivanja isplativosti i razdoblja povrata investicije u samu elektranu. Također, dan je prikaz izraza uz pomoć kojih je moguće izračunati dobit za kupca u mreži s vlastitom fotonaponskom elektranom. U radu se daje analiza isplativosti fotonaponskih elektrana bez poticaja s naglaskom na primjere iz prakse. U navedenim primjerima pažnja je posvećena određivanju potrebnog razdoblja povrata investicije u fotonaponsku elektranu.

Ključne riječi: Fotonaponska elektrana, isplativost, poticaji

Summary

Profitability of photovoltaic power plants without incentives

This paper aims to show the profitability of photovoltaic power plants without incentives. This paper presents the basic concepts of the photoelectric effect, as well as a general overview and principles of operation of photovoltaic cells. Photovoltaic power plants are described, which can be classified into two basic categories. It is shown what costs of a photovoltaic power plant can be expected in terms of investment, maintenance and other costs. The method of examining the profitability and return period of the investment in the power plant itself is described. Also, a presentation of expressions with the help of which it is possible to calculate the profit for a customer of a network with its own photovoltaic power plant is given. The paper provides an analysis of the profitability of photovoltaic power plants without incentives with an emphasis on examples from practice. In the above examples, attention is paid to determining the required payback period for the investment in the photovoltaic power plant.

Key words: Photovoltaic power plant, profitability, incentives

1. UVOD

Tema ovoga rada je isplativost fotonaponskih elektrana bez poticaja te će u okviru sadržaja ovoga rada biti detaljno prikazana isplativost projekta u zadanim okvirima. Cilj rada je dati teorijski pregled o fotonaponskim elektranama, troškovima koje ona ima te njezinoj isplativosti bez poticajnih mjera.

Republika Hrvatska se nalazi na veoma povoljnoj geografskoj lokaciji po pitanju iskorištavanja energije sunca. U praksi je prisutno više načina pretvaranja energije sunaca u električnu energiju, a najjednostavniji izbor predstavljaju fotonaponske ćelije koje svoj princip rada temeljen na izravnom pretvaranju energije sunca u električnu energiju temeljem fotoelektričnoga efekta koji je opisan u narednom poglavlju.

Ovaj će rad dati odgovor o isplativosti fotonaponskih elektrana bez poticaja na temelju primjena iz prakse o fotonaponskim elektranama. Tijekom prošloga desetljeća je gradnja fotonaponskih u velikoj mjeri ovisila o poticajima države, te je ugrađivanje fotonaponskih modula na kuće bilo poprilično skupo, no u današnje vrijeme su se desile određene promjene koje će biti prikazane u ovom radu.

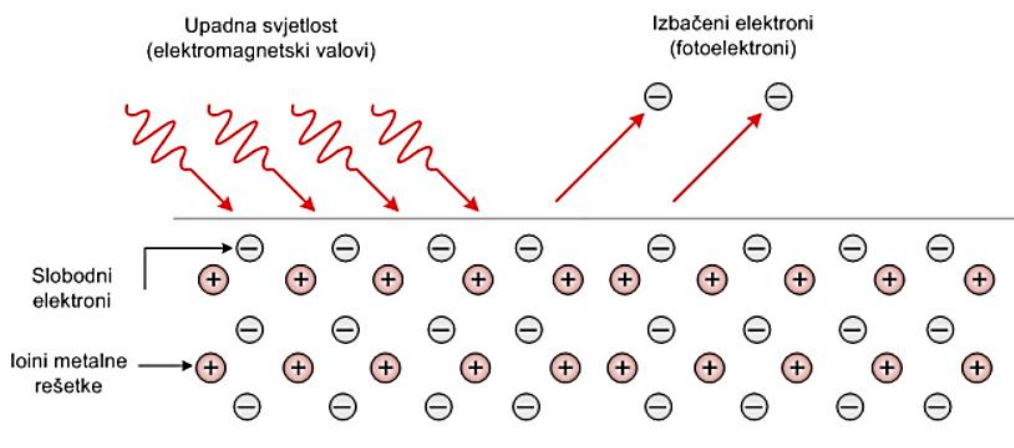
Ovaj rad je strukturiran u pet glavnih dijelova. Prvi dio rada govori o pojavi fotoelektričnog efekta i njegovoj primjeni u fotonaponskim ćelijama. U drugom dijelu rada da je opis fotonaponske ćelije predstavlja elektronički uređaj u kojem se uz pomoć fotoelektričnog efekta energija elektromagnetskog zračenja pretvara u električnu energiju. Općenito se opisuju fotonaponske ćelije te prikazuje princip rada. U trećem dijelu rada dan je opis fotonaponskih elektrana koje možemo svrstati u dvije temeljne skupine, a to su mrežne i otočne fotonaponske elektrane. Mrežne fotonaponske elektrane su priključene na javnu elektroenergetsku mrežu te imaju sposobnost davanja i oduzimanja električne energije iz mreže.

Otočne fotonaponske elektrane su elektrane koje ne predaju proizvedenu električnu energiju u distribucijsku elektroenergetsku mrežu već je upotrebljavaju za vlastitu potrošnju. U četvrtom dijelu rada dan je pregled troškova i isplativosti ulaganja u fotonaponske elektrane. Ulaganja u fotonaponsku elektrane se sastoje od investicijskih troškova, troškova održavanja i ostalih troškova. U petom dijelu rada dana je analiza isplativosti fotonaponskih elektrana bez poticaja. Dano je detaljno objašnjenje da li ima smisla realizirati projekt fotonaponske elektrane bez poticaja.

Na kraju rada se nalazi zaključak u kojem se sažimaju svi rezultati i daje osobni osvrt autora na temu i cjelokupni sadržaj ovog rada.

2. FOTOELEKTRIČNI EFEKT

Fotoelektrični efekt je pojava izbijanja elektrona s površine metala obasjanog elektromagnetskim zračenjem. Spomenuti materijal može biti na primjer cink, natrij ili bakar. Kada svjetlo padne na metalnu površinu s površine se emitiraju elektroni kao što je prikazano na slici 2.1. Emitirani elektroni se nazivaju foto-elektroni [2].



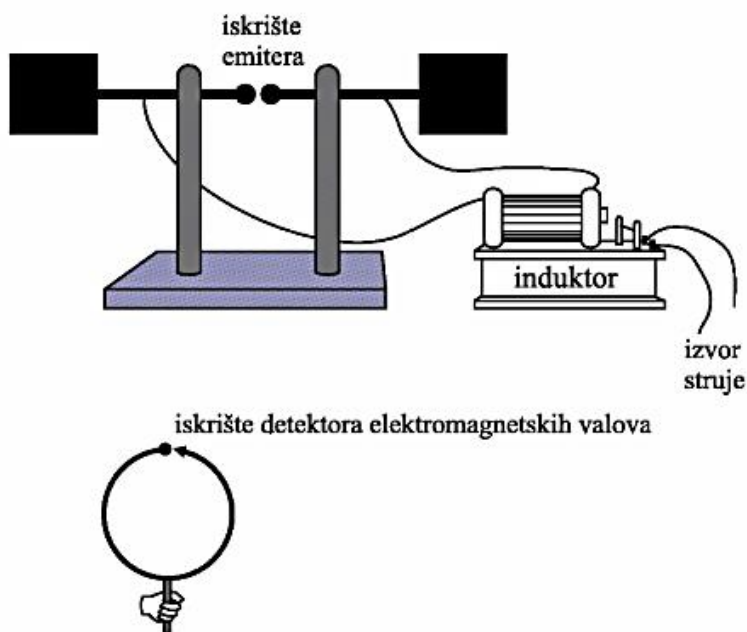
Slika 2.1. Fotoelektrični efekt [1]

U metalu je svaki pojedini elektron vezan i posjeduje određenu energiju. Unutar metala slobodni elektroni ponašaju se kao slobodni, ali samo unutar metala. Slobodni elektron može apsorbirati dovoljno energije iz elektromagnetskog zračenja ili svjetlosti da mu kinetička energija bude veća od energije vezivanja kada dođe u kontakt s metalnom površinom. Nakon toga je uspio nadvladati električnu privlačnost metalnih iona koji su ga privlačili i odletjeti s metalne površine [3].

1.1. Povijesni pregled

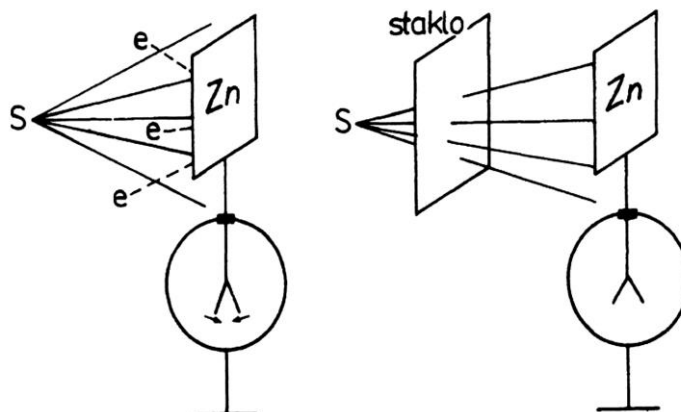
Njemački fizičar Heinrich Hertz je 1887. godine otkrio da kad na površinu metala padne ultraljubičasto zračenje iz metala izbijaju elektroni [5]. Za vrijeme slanja i primanja elektromagnetskih valova zamijetio je fotoelektrični efekt. Njegov je emiter imao zavojnicu s

razmakom za iskrenje (Slika 2.2). Spremanjem emitera u kutiju primijetio je da se iskrenje smanjilo, a istovremeno se svjetlost pojačala [5]. On je opazio da je fotoelektrični efekt vidljiviji ukoliko su elektrode obasjane ultraljubičastim zračenjem zbog bolje vidljivosti iskre. Hertzovi eksperimenti su istovremeno otkrili fotoelektrični efekt i pokazali postojanje elektromagnetskih valova.



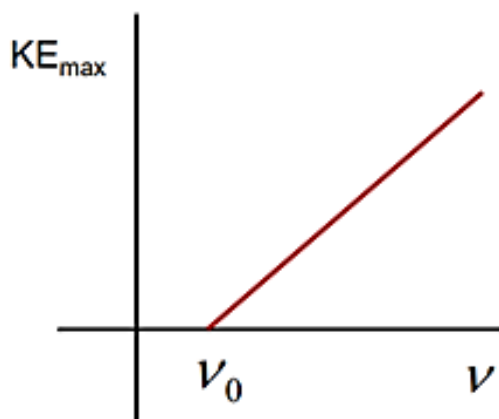
Slika 2.2. Herzov emiter s detektorom elektromagnetskih valova [6].

Njemački fizičar Wilhelm Halwachs je 1888. godine napravio pokus tako da je izoliranu pločicu od cinka priključio na elektroskop i promatrao što će se dogoditi kad je obasja svjetlost različitih valnih duljina i intenziteta. Nakon ovog pokusa bilo je jasno da se kod fotoelektričnog efekta pod utjecajem ultraljubičaste svjetlosti dešava izbacivanje negativnog elektriciteta iz metala [7]. Na slici 2.3. prikazana je ilustracija Halwachsova pokusa.



Slika 2.3. Ilustracija Halwachsova pokusa [10]

Phillipp Lenard je 1899. godine pokusima s katodnim cijevima pokazao da su negativno nabijene čestice koje izbijaju pri fotoelektričnom efektu zapravo elektroni. Ustanovio je da elektroni koji su emitirani s metala po utjecajem ultraljubičastog zračenja imaju nejednake brzine. Iz pokusa je također zaključio da za svaku tvar postoji određena granična frekvencija svjetlosti, koja je u stanju proizvesti fotoelektrični učinak samo ako je njezina frekvencija viša od granične frekvencije. Na temelju pokusa je utvrđeno da kinetička energija koji posjeduju izbijeni elektroni ne zavisi o svjetlosnoj jakosti kojom je osvijetljen metla već o njoj frekvenciji. Na slici 2.4. prikazan je graf ovisnosti kinetičke energije o frekvenciji svjetlosti.



Slika 2.4. Graf ovisnosti kinetičke energije o frekvenciji svjetlosti [2].

Albert Einstein je teorijski objasnio fotoelektrični efekt 1905. godine. Prema njegovoj predloženoj teoriji svjetlost je sačinjena od malih paketića energije koji se zovu kvanti ili fotoni. Energija kvanta svjetlosti izražava se Planckovom relacijom [10]:

$$E = h\nu \quad (1.1.)$$

gdje h predstavlja Planckovu konstantu, a ν frekvenciju svjetlosti. Kada slobodni elektron na obasjanom metalu apsorbira foton preuzima njegovu energiju. Segment energije od fotona elektron troši na savladavanje potencijalne energije kojom je vezan za metal (W_i – izlazni rad), dok ostatak prelazi u kinetičku energiju elektrona [10]:

$$E_k = h\nu - W_i \quad (1.2.)$$

$$h\nu = W_i + \frac{1}{2} m_e v_{max}^2 \quad (1.3.)$$

gdje je m_e masa elektrona, a v_{max} maksimalna brzina izbačenih elektrona. Izlazni rad W_i predstavlja minimalnu energiju koju je potrebno dati elektronu da ga izbacimo iz metala, a zapravo se radi o minimalnoj energiji kojom je elektron vezan u metal [8]. U slučaju da je frekvencija upadne svjetlosti takva da vrijedi: $h\nu < W_i$ nije prisutan fotoelektrični efekt jer elektron nema mogućnost izlaska iz metala. Na slici 2.5. dan je prikaz izlaznog rada određenih metala kao što su bakar, željezo, aluminij itd.

Metal	W_i (eV)
Na	2.46
Al	4.08
Cu	4.70
Zn	4.31
Ag	4.73
Pt	6.35
Pb	4.14
Fe	4.50

Slika 2.5. Izlazni rad određenih metala [8]

Einsteinovim objašnjenjem fotoelektričnog efekta dana je sasvim nova predodžba o svjetlosti. Prema njemu svjetlost je sastavljena od čestica ili fotona.

Količina gibanja čestica/fotona je jednaka:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (1.4.)$$

gdje je c brzina gibanje fotona, a E energija fotona [9].

Robert Andrew Milikan je potvrdio Einstenovo objašnjenje fotoelektričnog efekta 1916. godine jer je radio niz kvantitativnih istraživanja ovog efekta s ciljem da dokaže da Einstein nije bio u pravu [2].

1.2. Primjena fotoelektričnog efekta

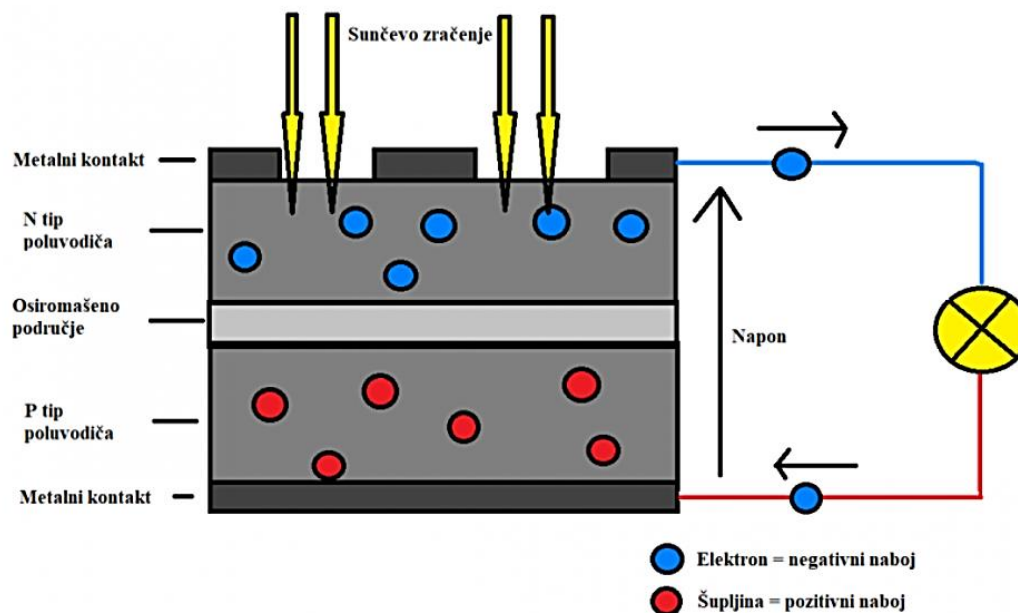
U današnje vrijeme primjena fotoelektričnog efekta je široko rasprostranjena u svakodnevnom životu i u industriji. Primjena fotoelektričnog efekta najčešće se provodi uz pomoć fotonaponskih ćelija. Fotoelektrični efekt je moguće vršiti kao vanjski i unutarnji fotoelektrični efekt te fotoelektrični efekt sloja barijere. Vanjski fotoelektrični efekt predstavlja pojavu gdje elektroni određenog objekta izlete s plohe pod utjecajem svjetla. Unutarnji fotoelektrični efekt predstavlja pojavu uz pomoć koje se može izmijeniti rezistentnost objekta pod utjecajem svjetla. U skupini foto-ćelija s unutarnjim foto-električnim efektom razlikujemo dvije vrste, a to su foto-elementi i foto-otpornici. Fotoelektrični efekt sloja barijere predstavlja pojavu gdje je objekt u stanju proizvesti napon određenog smjera pod utjecajem svjetla, a primjer toga su foto-naponske ćelije. Fotonaponske ćelije su vrsta foto-ćelija koja su u današnje vrijeme pronašla najširu primjenu u ljudskim životima. To su elementi strujnog kruga preko kojih se vrši pretvaranje energije sunca u električnu energiju.

3. FOTONAPONSKE ČELIJE

3.1. Opći pregled

Fotonaponska ćelija predstavlja elektronički uređaj u kojem se uz pomoć fotoelektričnog efekta energija elektromagnetskog zračenja pretvara u električnu energiju. Po svojoj strukturi ona je poluvodička dioda, odnosno PN spoj [4].

U današnje vrijeme fotonaponske ćelije se uglavnom izrađuju od poluvodiča silicija. Nastaju spojem dva tanka nanosa poluvodiča koji su na slici ispod označeni kao P i N tip poluvodiča. P tip poluvodiča dobije se dodavanjem određene manje količine primjese fosfora u kristalnu rešetku silicija. Dodavanjem određene manje količine uglavnom bora u kristalnu strukturu materijala dobije se N tip poluvodiča. U slučaju da se spoj promatra pri normalnoj temperaturi koja iznosi 26.85 °C na P strani je prisutna velika koncentracija šupljina, a na N strani velika koncentracija elektrona [11].



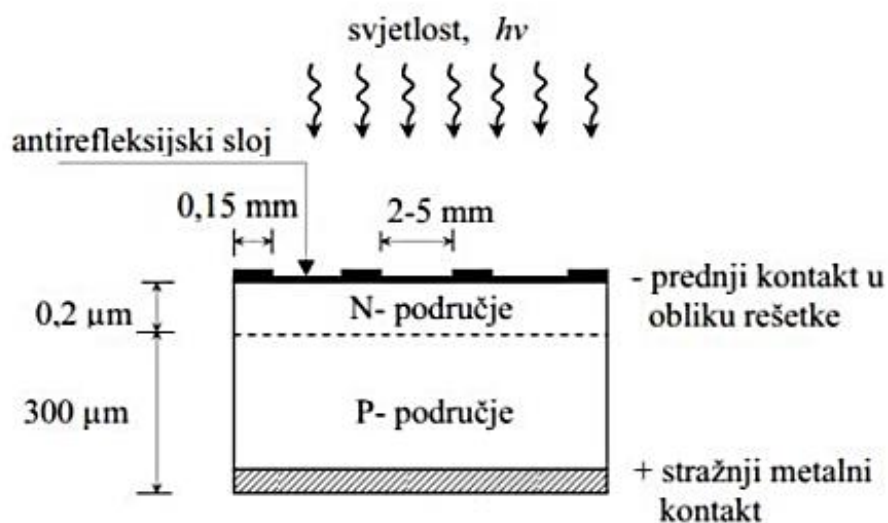
Slika 3.1. Fizikalne pojave unutar ćelije [12].

Na slici 3.1. prikazane su fizikalne pojave unutar fotonaponske ćelije. Kada se osvjetli fotonaponska ćelija, u nju se apsorbira zračenje sunca te se pojavljuje fotonaponski efekt. Zbog pojave fotonaponskog efekta dolazi do pojavljivanja napona (elektromotorne sile) na završetcima ćelije. Ukoliko postavimo trošilo na završetcima ćelije poteče struja i dobije se električna energija. Za vrijeme praćenja apsorpcije i emisije zračenja sunca, zračenje promatramo kao snop čestica, a te čestice nazivamo fotonima. Navedeni fotoni nemaju masu i imaju gibanje koje je jednako brzini svjetlosti. Kako bi se napravio izračun foto-struje ćelije nužno je poznavati tok fotona koji ulijeću u ćelije [13].

Energiju fotona moguće je izračunati prema sljedećoj Einsteinovoj jednadžbi:

$$E = h\nu = h \frac{c_0}{\lambda} \quad (3.1.)$$

U prethodno navedenoj jednadžbi Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Js) označena je slovom h , frekvencija fotona slovom ν , a brzina svjetlosti od $3 \cdot 10^8$ m/s označena je c_0 .



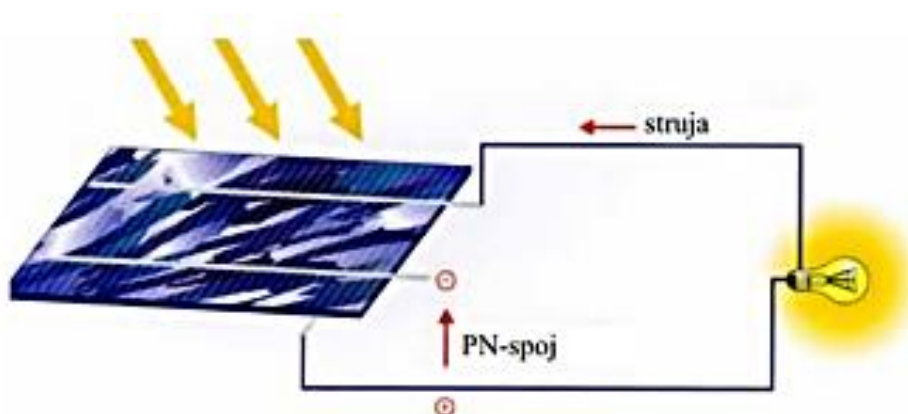
Slika 3.2. Fotonaponska ćelija silicija [14].

Na slici 3.2. nalazi se prikaz fotonaponske ćelije silicija. Poluvodičko područje N-tipa stvara se na tankom površinskom sloju ploče P-tipa kao rezultat nečistoća, poput fosfora, koje difundiraju na njezinu površinu. S donje strane nalaze se metalni kontakti, a kako bi se prikupili naboji koji

su nastali apsorpcijom fotona s prednje strane je metalna rešetka (rešetkasti kontakt) koja pokriva do 5% plohe i ne utječe na proces apsorpcije. U svrhu povećanja djelotvornosti ćelije prednja ploha može biti obložena providnim antirefleksijskim slojem kojim se umanjuje refleksija sunčevog svjetla [13].

3.2. Princip rada

Fotonaponske ćelije je moguće spajati paralelno i serijski za slučaj da se želi dobiti određeni napon tj. snaga. Tim načinom se dobije modul fotonaponske ćelije koja je u obliku panela ili ploče te su na nju ćelije pričvršćene i izolirane od vanjskih utjecaja. Modul se slaže jedan pokraj drugoga u fotonaponski kolektor. Fotonaponski kolektor skupa s ostalim nužnim elementima kao što je regulator, pretvarač, akumulator čini sustav fotonapona [13].



Slika 3.3. Fotonaponska ćelija koja služi kao izvor električne energije [15]

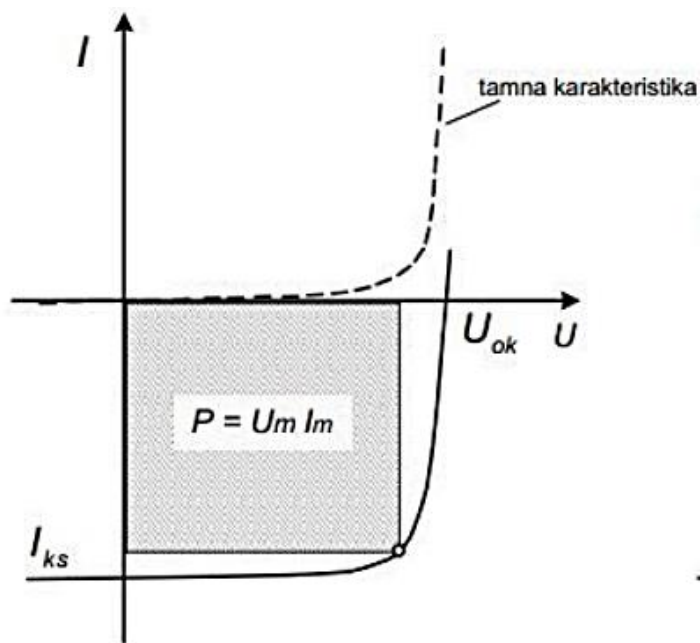
Na slici 3.3. prikazana je fotonaponska ćelija koja služi kao izvor električne struje. Kao što je vidljivo na slici kontakt koji se nalazi na P području zbog gibanja šupljina i elektrona postane pozitivan, a na N području postane negativan. Trošilo se spaja između metalne rešetke koja se nalazi s gornje strane i metalnih kontakata s donje strane ploče te uz pomoć njega dolazi do stvaranja napona za vrijeme apsorpcije sunčevog svjetla. S obzirom da solarne ćelije rade kao poluvodičke diode imaju mogućnost propuštanja struje samo jednosmjerno. Ukoliko želimo

povećati napon ćelije ćemo spojiti serijski. Na taj način struja će ostati ista, a ako nam je potrebna jača struja tada ćemo ćelije spojiti u paralelu.

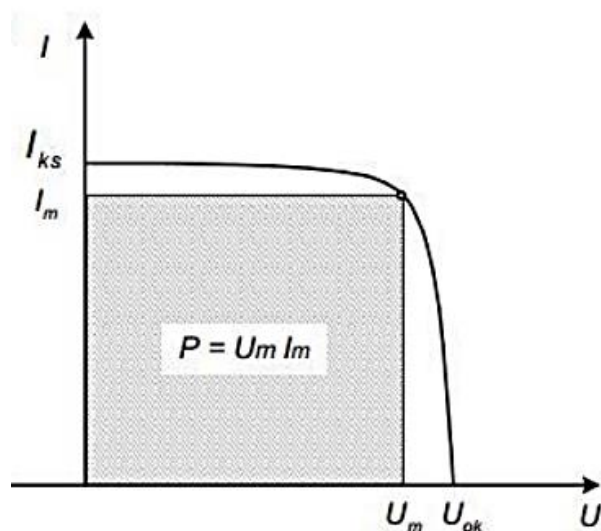
Na slici 3.4. i slici 3.5., u svrhu opisa fotonaponske ćelije, dan je prikaz strujno-naponske karakteristike osvjetljenje i ne osvjetljene fotonaponske ćelije. Uspoređivanjem tamne karakteristike solarne ćelije (ne osvjetljena fotonaponska ćelija) može se zamijetiti da identična kao karakteristika diode. U slučaju kad je osvjetljena fotonaponska ćelija strujno-naponska karakteristika se pomiče u VI. kvadrant. Jednadžba za struju koja protječe kroz potrošač u izlaznom krugu, nakon što obasjana solarna ćelija generira foto-struju I_l , je:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q*U}{n*k*T}} - 1 \right) - I_l \quad (3.2.)$$

U prethodno navedenoj jednadžbi T je oznaka za temperaturu, k za Boltzmanovu konstantu, I_0 za struju mraka, U za napon ćelije, q za naboj elektrona, n za diodni faktor idealnosti.



Slika 3.4. Strujno-naponska karakteristika osvjetljenje i ne osvjetljene fotonaponske ćelije [16]



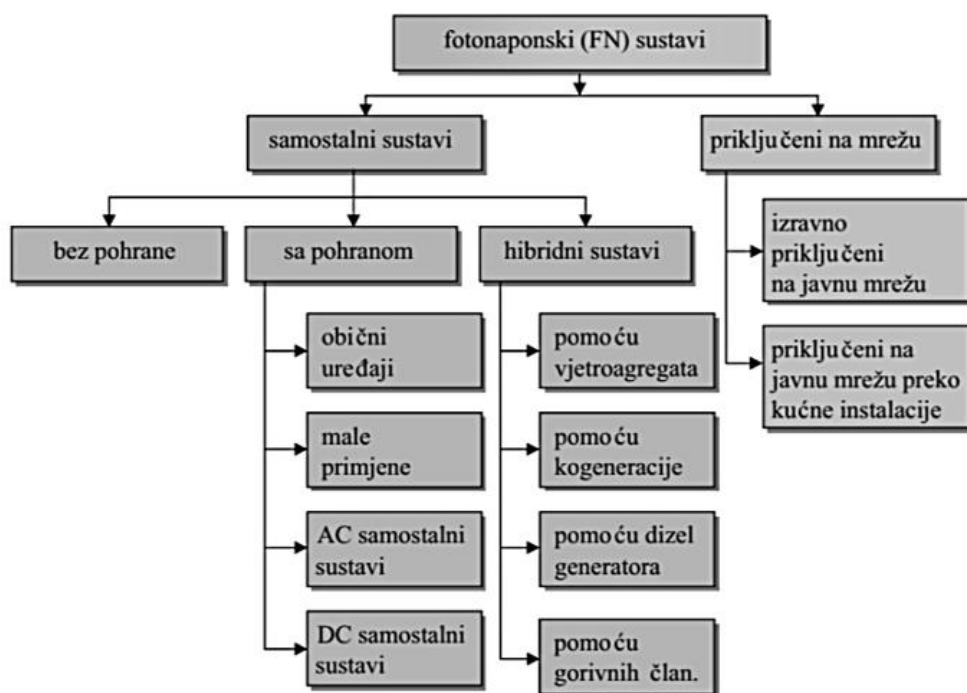
Slika 3.5. Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije [16]

Na prethodnoj slici prikazani su osnovni parametri i strujno naponska karakteristike fotonaponske ćelije. Strujno naponska karakteristika prolazi trima značajnim točkama koje su označene kao glavni faktori solarnih ćelija kao što je vidljivo na prethodnoj slici. Tri glavne točke su [13]:

- I_{ks} – struja koja poteče u slučaju da je napon stezaljki jednak nuli (struja kratkog spoja),
- U_{ok} – napon na kontaktima solarne ćelije za vrijeme kada je strujni krug otvoren i struja jednaka nuli (napon otvorenog kruga/praznog hoda),
- P_m – točka maksimalne snage solarne ćelije koja odgovara maksimalnoj mogućoj površini koju zauzima pravokutnik. U točki gdje je snaga maksimalna, napon kao što je prikazano na slici je U_m , a struja I_m .

4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Fotonaponske elektrane mogu biti elektrane do 1kW (sastoje se od manjeg broja fotonaponskih modula) ili elektrane s milijunima fotonaponskih modula čija je nazivna snaga reda veličine nekoliko MW. Dijele se na fotonaponske elektrane koje su priključene preko distributivne mreže te autonomne fotonaponske elektrane kod kojih ne postoji priključak na distributivnu mrežu nego korisnik upotrebljava generiranu električnu energiju za vlastitu potrošnju. Na slici 4.1. prema [17] prikazana je podjela fotonaponskih sustava.

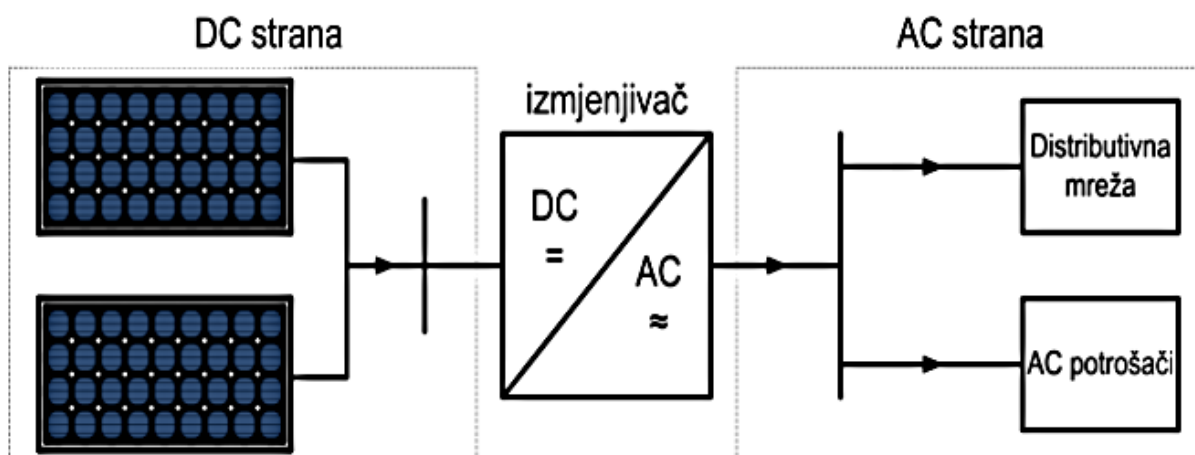


Slika 4.1. Klasifikacija fotonaponskih sustava [17]

4.1. Mrežne fotonaponske elektrane

Mrežne fotonaponske elektrane (engl. On Grid) elektrane su priključene na javnu elektroenergetsku mrežu te imaju sposobnost davanja i oduzimanja električne energije iz mreže. Iz razloga što je elektrana priključena na elektroenergetsku mrežu ne postoji potreba za

baterijama i punjačima zbog toga što se viškovi energije daju u mrežu. Generirana električna energija koristi se za potrošnju tamo gdje se proizvodi, a u određenim slučajevima koji se rijetko događaju cjelokupna energija se daje u elektroenergetsku mrežu. Baterije se mogu koristiti za smanjena opterećenja poput računala ili kontrolnih jedinica. Najvažniji element fotonaponskih elektrana koje su priključene na mrežu je izmjenjivač (engl. Inverter) koji služi za pretvaranje istosmjernih u izmjenične struje te filtraciju valnih oblika u svrhu puštanja električne struje u mrežu. Na slici 4.2. dan je shematski prikaz fotonaponske mrežne elektrane sa dvije strane, AC (engl. Alternating current) i DC (engl. Direct current) strane odnosno strane s izmjeničnom i istosmjernom strujom [18].



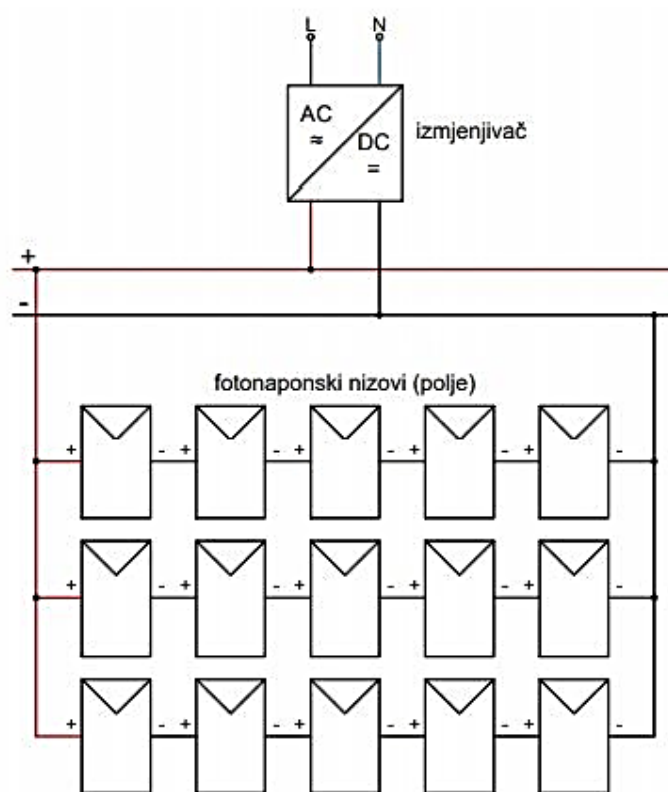
Slika 4.2. Shematski prikaz fotonaponske mrežne elektrane [18]

Izvedbe fotonaponskih mrežnih elektrana, prema principu priključenja fotonaponskih nizova (stringova), mogu biti [19]:

- izvedba koja ima jedan izmjenjivač,
- izvedba koja ima jedan izmjenjivač po svakom fotonaponskom nizu,
- izvedba koja ima više izmjenjivača.

4.1.1. Izvedba s jednim izmjenjivačem

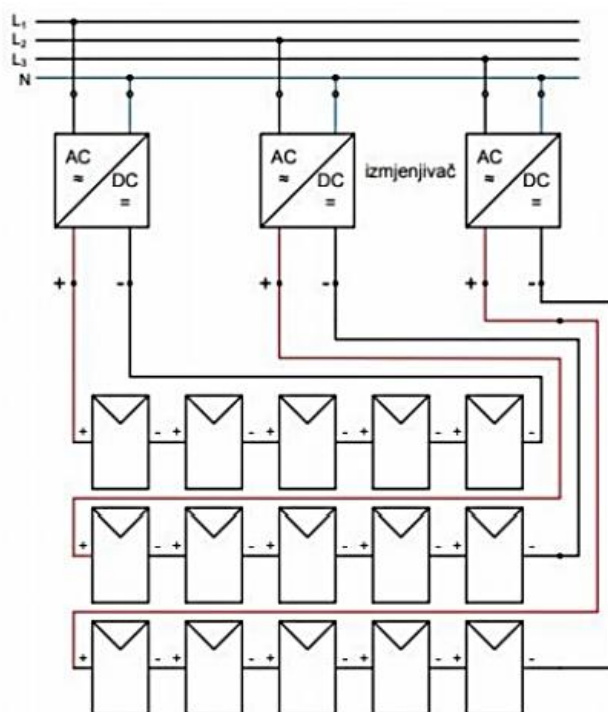
Izvedba fotonaponske mrežne elektrane koja ima jedan izmjenjivač se većinom upotrebljava kod elektrana koje imaju manje snage. Kod ovakve izvedbe postoji jedan izmjenjivač na kojega su spojeni fotonaponski nizovi ili stringovi kao što je vidljivo po slici 4.3. Kako bi se ispravno dimenzionirala ovakva izvedba nužno je u stringove smjestiti isti broj fotonaponskih modula koji imaju identične karakteristike. Ovaj je izvedba povoljna, jer su kod nje prisutni smanjeni troškovi investicije. Izmjenjivač predstavlja jedan od skupljih elemenata fotonaponske elektrane. Ova izvedba ima veliku manu za slučaj da se desi kvar na izmjenjivaču jer dolazi do prekida proizvodnje električne energije. Također, ukoliko se zasjeni jedan segment fotonaponskog modula ili jedan segment fotonaponskog stringa doći će do značajnog snižavanja snage.



Slika 4.3. Izvedba fotonaponske mrežne elektrane koja ima jedan izmjenjivač [20]

4.1.2. Izvedba s jednim izmjenjivačem za svaki niz

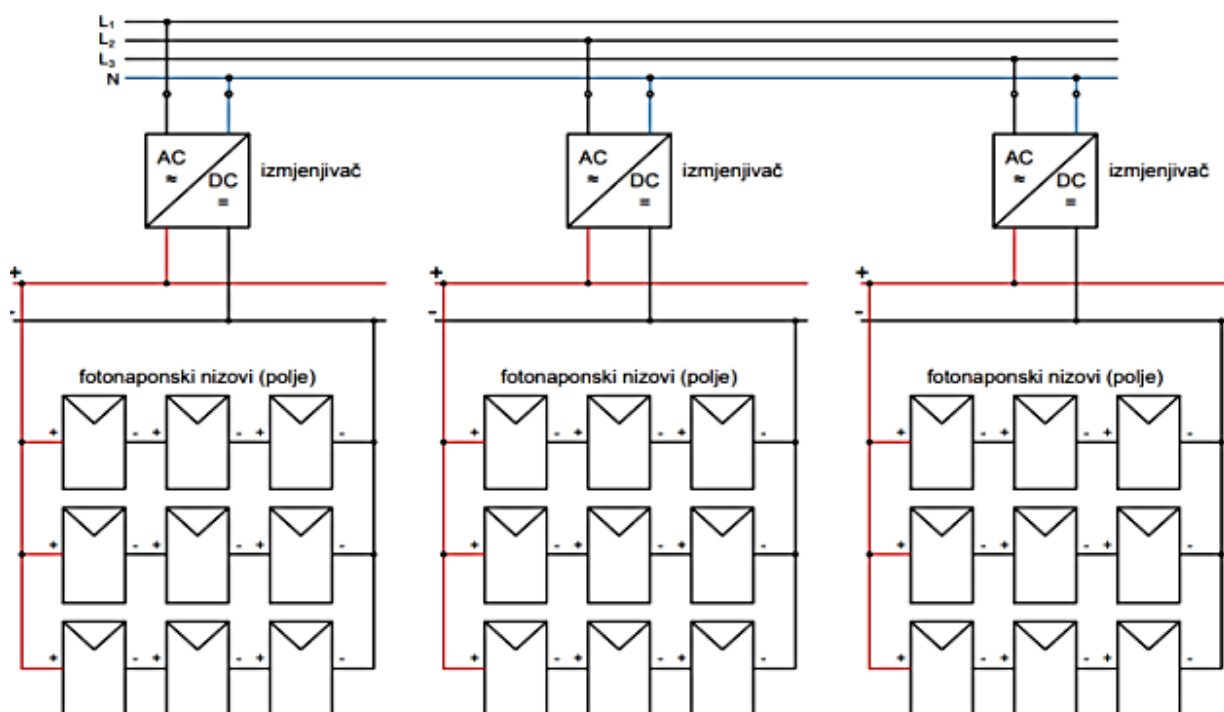
Izvedba fotonaponskih mrežnih elektrana koja ima jedan izmjenjivač za svaki niz je u primjeni kod elektrana srednje snage. Slika 4.4. daje shematski prikaz ove izvedbe gdje su svi nizovi posebno spojeni na svoje izmjenjivače. Na ovaj način se osigurava napajanje ukoliko se pokvari pojedini od izmjenjivača. Za razliku od izvedbe fotonaponske mrežne elektrane s jednim izmjenjivačem kod ove izvedbe ne postoji potreba da broj fotonaponskih modula bude jednak i identične karakteristike. Međutim, kod ovakve izvedbe elektrane potrebni su veći troškovi ulaganja. S ovom izvedbom je poboljšana efikasnost i pouzdanost elektrane iz razloga što je svaki string priključen na posebni izmjenjivač koji vrši praćenje snage do točke maksimuma. Potrebno je naglasiti da ukoliko dođe do kvara jednog stringa ili izmjenjivača cjelokupna elektrana neće ispasti iz pogona i proizvodnja električne energije će se nastaviti normalno odvijati zbog drugih stringova koji će biti u funkciji.



Slika 4.4. Izvedba fotonaponske mrežne elektrane koja ima jedan izmjenjivač po svakom nizu
[20]

4.1.3. Izvedba s više izmjenjivača

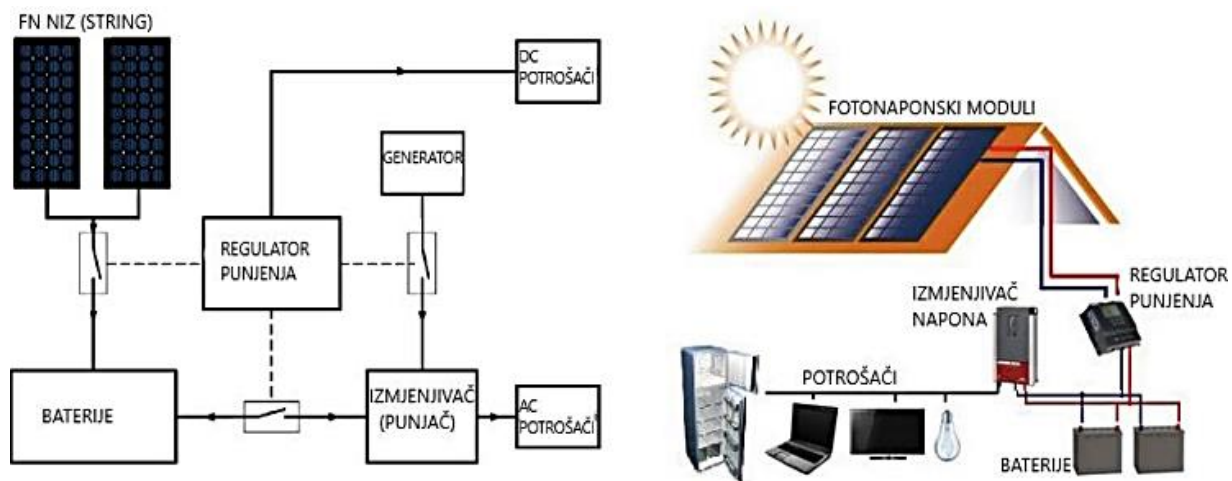
Ova izvedba mrežnih fotonaponskih elektrana se upotrebljava u elektranama koje imaju veću snagu. Kao što je vidljivo na slici 4.5. elektrana je podijeljena na veći broj pod-polja te svako od njih ima vlastiti izmjenjivač kojem je priključeno veći broj fotonaponskih nizova. Kao što je bio slučaj s izvedbom koja ima jedan izmjenjivač po svakom nizu, kod ovakve elektrane ako se desi kvar pod-polja ili izmjenjivača elektrana će ostati u pogonu i nastaviti s proizvodnjom. Navedene karakteristike ovu izvedbu čine skupljom za investiranje [22].



Slika 4.5. Izvedba fotonaponske elektrane koja ima više izmjenjivača [20]

4.2. Otočne fotonaponske elektrane

Otočne fotonaponske elektrane (engl. Off grid) su elektrane koje ne predaju proizvedenu električnu energiju u distribucijsku elektroenergetsku mrežu već je upotrebljavaju za vlastitu potrošnju. S obzirom da je tok zračenja sunca varijabilan tijekom dana, ovakva vrsta fotonaponskih elektrana nije u stanju pratiti kretanje potrošnje potrošača pa se u tu svrhu ugrađuju regulatori punjenja i baterije. Baterije skladište električnu energiju za slučaj kada ne postoji potreba za njenim iskorištavanjem. Viškovi energije se akumuliraju u baterije te se mogu koristiti u intervalima kada nema sunčevog zračenja odnosno kada se ne odvija proces proizvodnje električne energije. U praksi su također prisutne otočne fotonaponske elektrane koje nemaju baterije, pa se u tom slučaju sva sakupljena energija treba momentalno koristiti za napajanje na primjer određenih strojeva ili uređaja. Slika 4.6. daje prikaz osnovnih dijelova otočne fotonaponske elektrane.

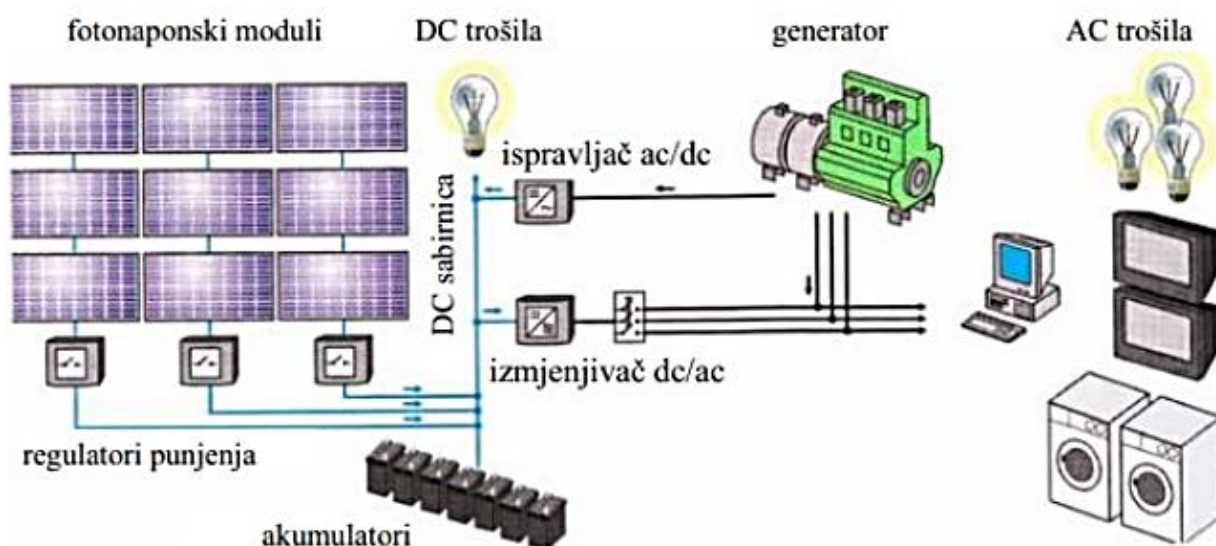


Slika 4.6. Osnovni dijelovi otočne fotonaponske elektrane [21]

4.2.1. Hibridne otočne fotonaponske elektrane

Hibridne otočne fotonaponske elektrane se stvaraju spajanjem autonomnih sustava s alternativnim izvorima poput hidroagregata, vjetroturbina, plinskih ili dizelskih agregata. Fotonaponska elektrana i vjetroagregati mogu se spojiti uz pomoć jedinственоg izmjenjivača. Na taj je način povećana raspoloživost i sigurnost električne energije.

Električnom energijom koja je proizvedena uz pomoć ovakve fotonaponske elektrane ili vjetroagregata opskrbljuju je energijom najprije trošila, a zatim se viškovi energije skladište u baterije (akumulatore). Ovakva elektrana funkcionira na način da ukoliko postoje uvjeti kako bi se proizvela električna energija uz pomoć fotonaponskih modula ili vjetroagregata, baterije se pretvaraju u izvor koji opskrbljuje energijom izmjenična i istosmjerna trošila. Ukoliko akumulator nije u stanju to biti dolazi do uključivanja dizel generatora.



Slika 4.7. Hibridna otočna fotonaponska elektrana [23]

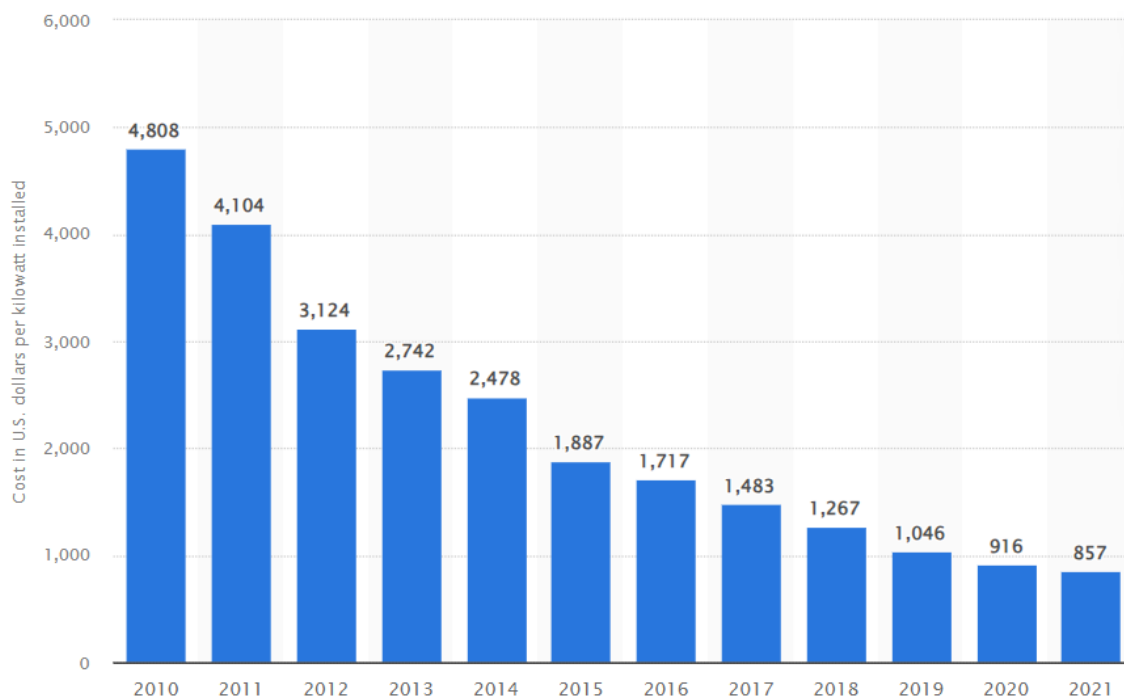
5. TROŠKOVI I ISPLATIVOST FOTONAPONSKIH ELEKTRANA

5.1. Investicijski troškovi

Investicijski troškovi prilikom izgradnje fotonaponske elektrane se sastoje od [24]:

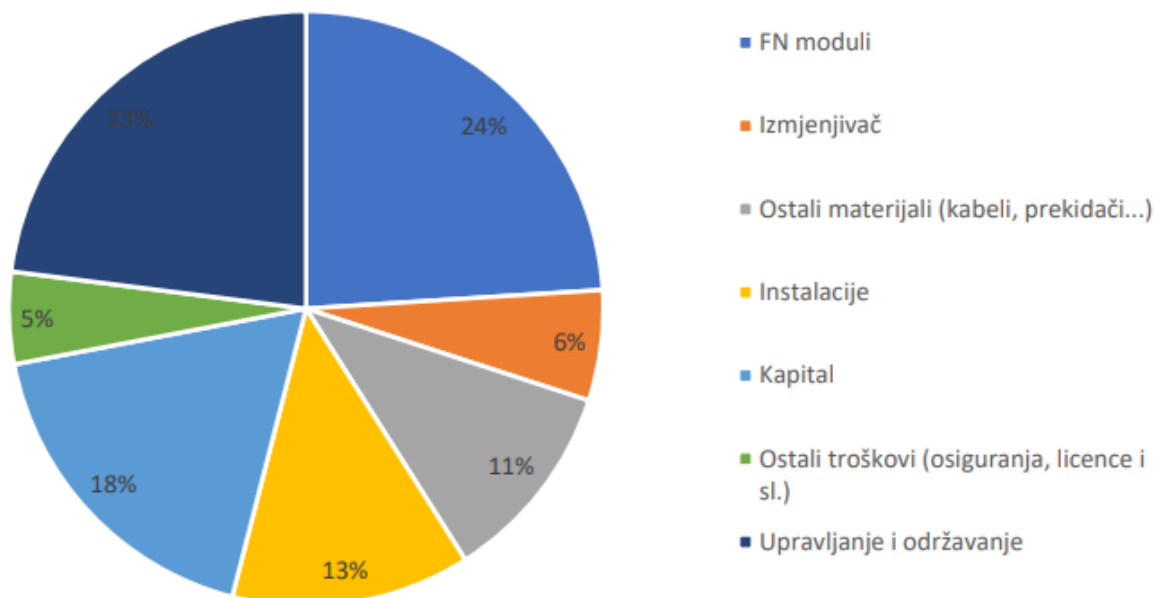
- troškova za opremu kao što su baterije, inverteri, fotonaponski moduli itd.,
- troškova za instaliranje fotonaponskoga sustava što se odnosi na montažu te puštanje u rad,
- troškove kapitala što se može odnositi na kamate,
- ostale troškove koje se odnose na projektantske usluge, razne suglasnosti itd.

Na Slici 5.1. prema [25] prikazana je prosječna cijena ulaganja u instalaciju fotonaponskih sustava u cijelom svijetu za razdoblje od 2010. do 2021. godine, u američkim dolarima po kilovatu.



Slika 5.1. Prosječna cijena ulaganja u instalaciju fotonaponskih sustava u cijelome svijetu za razdoblje od 2010. do 2021. godine [25]

Potrebno je naglasiti da fotonaponska elektrana za svoje funkcioniranje nema potrebe za gorivom ni ljudima nego je prisutna automatizacija kompletnog sustava. Troškovi za održavanje su na razini 1,5 do 2% troškova investiranja na godišnjoj razini [26]. Također, treba napomenuti da postoji potreba za zamjenom invertera nakon 10 godina, što je veća jednokratna investicija. Na Slici 5.2. prikazana je podjela troškova fotonaponske elektrane.



Slika 5.2. Podjela troškova fotonaponske elektrane

Kako bi se izračunali svi potencijalni troškovi za radove i opremu radi se proračun troškova. U sljedećoj tablici (Tablica 5.1.) dan je prikaz proračuna troškova za opremanje fotonaponskog sustava. U samom troškovniku nalaze se stavke kao što je izmjenjivač, fotonaponski moduli, istosmjerna i izmjenična ožičenja, montiranje modula na konstrukciju, ispitivanje i mjerenje instalacija, instaliranje uzemljenja te izjednačavanje potencijala. Unutar razvodnog ormara nalaze se oprema i elementi kao što su prenaponi odvodnici, razne sklopke, uvodnice kabela,

sabirnice itd. Izmjenjivači i fotonaponski moduli odabiru se na osnovu ukupne instalirane snage koji ima fotonaponska elektrana. Konstrukcija na koju će biti smješteni moduli se radi sukladno količini i površini koju zauzimaju određeni fotonaponski moduli. Montiranje energetskih kabela od izmjenjivača do razvodnog ormara pripada izmjeničnom ožičavanju. S druge strane, montaža energetskih kabela od fotonaponskog modula do izmjenjivača se odnosi na istosmjerno ožičavanje. Kako bi se instaliralo uzemljenje, izjednačili potencijali te instalirala zaštita od udara groma u proračun troškova uvrštava se traka koja uzemljuje metalnu konstrukciju, odvodi, vodiči koji uzemljuju kableske nosače, hvataljke itd.

Tablica 5.1. Prikaz troškova za opremanje fotonaponskog sustava [27]

Kategorija	količina	jed. mjera	Opis opreme i radova	ukupno
Module	130	kom	MPE 240 PG 04	€ 23.400,00
				€ 23.400,00
pretvarači	1	kom	SGI 30K 02 HOME	€ 5.760,00
				€ 5.760,00
Monitoring	1	kom	SUNALYZER WEB PR	€ 522,24
				€ 522,24
Montaža	44	kom	Bazni profil 130	€ 1.247,40
	210	VE	OT-KH TYP 43-2	€ 450,90
	100	VE	OT-KH TYP 43-1	€ 166,32
	400	VE	DA PFANNE 10.1/PV2	€ 2.916,00
	400	VE	ONETURN 18 / 100ERVE	€ 438,48
	40	VE	KOPPLUNGSSTUECK-4	€ 135,00
	104	VE	ABRU.SICHERUNG / 100	€ 151,20
			€ 5.505,30	
DC-ožičenje	10	kom	SOLARLEITUNG6 SW/100	€ 561,60
	10	VE	MC-T4 BUCHSEN 10/20	€ 28,08
	10	VE	MC-T4 STECKER 10/20	€ 23,40
	30	kom	GAK 5-1	€ 465,66
			ugradba	
			troškovi AC strana	
			trafostanica	
			papirologija	
			priključak Hep	
				€ 1.078,74
			€ 36.266,28	

SVEUKUPNO (bez PDV-a):

$36.266,28 * 7,51 = 272.359,76 \text{ kn}$

PDV 25%:

$= 68.089,75 \text{ kn}$

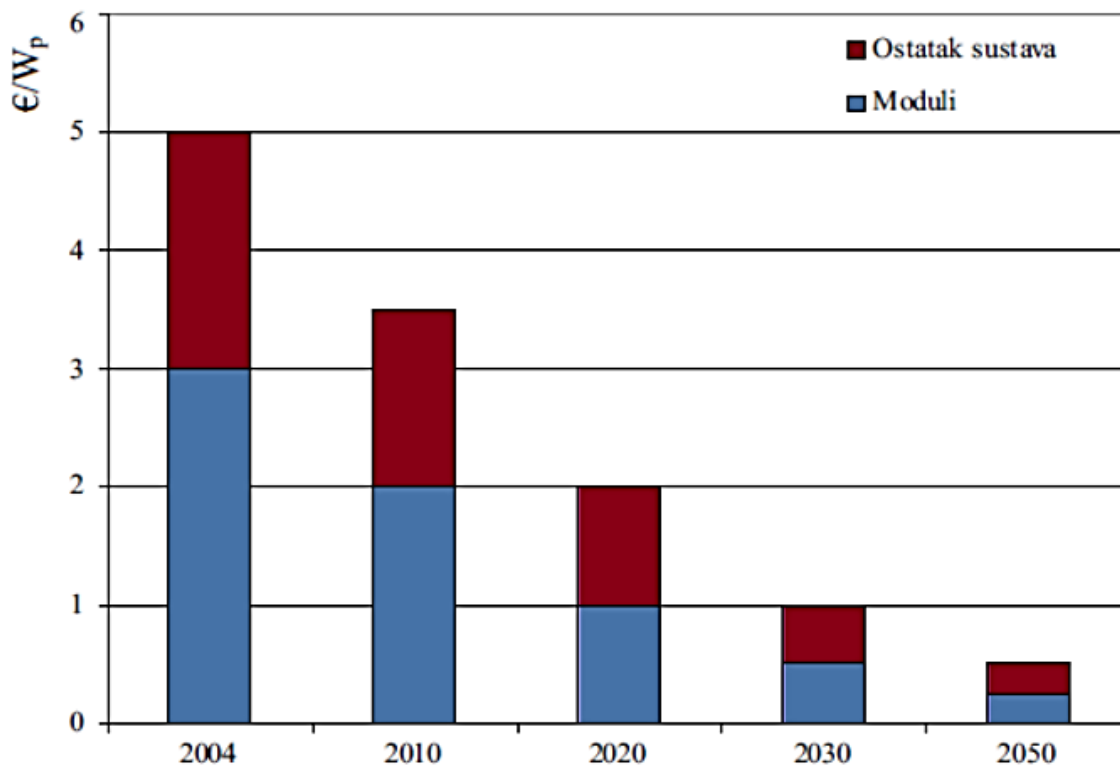
Troškovi investicije za instaliranje fotonaponske elektrane procjenjuju se na 1.100 eura po kilovatu. U današnje vrijeme oni iznose u rasponu od 600 do 1.500 eura po kilovatu. Kao što je prethodno prikazano na slici 5.1. na svjetskoj razini zbog razvoja tržišta i opreme opada cijena fotonaponskih modula. S obzirom da je u Hrvatskoj uvedena nulta stopa PDV, o čemu će biti riječi u sljedećem pod poglavlju, dolazi do dodatnih smanjenja.

Kao što je vidljivo na slici 5.2. ukupan trošak se odnosi na izrađivanje projekta, troškove priključenja to jest ugrađivanja brojila s dva smjera, troškove za fotonaponske module, troškove izmjenjivača, kablskih razvoda, troškove za nosivu konstrukciju te troškove finalnih radova. Potrebno je naglasiti da se uporabom baterija u sustavu, u velikoj mjeri povećavaju troškovi te prema procjenama iznose 1.500 eura po kilovatu. Ti se troškovi odnose na pretvarače, baterijske članke, nadzorne sustave, upravljačke sustave i troškove koji se odnose na testiranja i izradu dokumentacije [28].

Na prethodno prikazanoj slici 5.1. vidljiv je značajni pad cijene instalacije fotonaponskih modula tijekom zadnjih deset godina. U 2010. godini prosječna cijena ulaganja u instalaciju fotonaponskih sustava u cijelome svijetu iznosila je 4.808 dolara po kilovatu, da bi u 2021. godini pala na 857 dolara po kilovatu.

Na slici 5.3. vidljivo je da se fotonaponski sustavi nalaze ispod 50% ukupnih investicijskih troškova. Također je na ovoj slici vidljiv udjel iznosa cijene fotonaponskog modula u ukupnom iznosu cijene fotonaponskog sustava te objektivna predviđanja sve do 2050. godine. Predviđa se da će cijena do 2030. godine pasti ispod 50% u usporedbi s 2020. godinom, što bi značilo da će cijena iznositi $0,5 \text{ €/W}_p$ jednako kao i drugi elementi unutar fotonaponskog sustava [15].

Dugoročna predviđanja govore da će ukupni iznos cijene fotonaponskog sustava, a to se prvenstveno odnosi na fotonaponske module i ostalu pripadajuću opremu biti oko $0,5 \text{ €/W}_p$ što bi značilo značajno povoljniju cijenu proizvodnje električne energije u usporedbi s bilo kojim drugim izvorom energije (neobnovljivim ili obnovljivim) [15].



Slika 5.3. Udjel iznosa cijene fotonaponskog modula u ukupnom iznosu fotonaponskoga sustava (€/Wp) [15]

5.1.1. Nulta stopa PDV-a na isporuku i ugradnju solarnih ploča

S Zakonom o izmjenama i dopunama Zakona o porezu na dodanu vrijednost koji je u primjeni od 1. listopada 2022. godine stupila je na snagu nulta stopa poreza na dodanu vrijednost (PDV-a) na isporučivanje i ugrađivanje solarnih ploča za privatne objekte za stanovanje i zgrade javnog karaktera te druge prostore koji se upotrebljavaju za aktivnosti koje su od javnoga interesa. To se također odnosi na isporučivanje i ugradnju solarnih ploča blizu navedenih zgrada, objekata i prostora [29].

Za primjenu nulte stope PDV-a nužno je da su prethodno spomenuti privatni stambeni objekti prostori koji se većinskim dijelom upotrebljavaju za stanovanja (više od 50% takvih prostora) te zgrade javne namjene i druge zgrade koje se većinskim dijelom upotrebljavaju za aktivnost javnoga interesa, odnosno više od 50%. Pod aktivnostima koje su od javnoga interesa se smatraju aktivnosti koje su pod nadležnosti tijela državne uprave, tijela regionalne i lokalne samouprave, aktivnosti HNB-a i neprofitnih društava. Pod definicijom „isporuka i ugradnja solarnih ploča“ misli se na realiziranje projekata izvođenja građevina koje nisu kompleksne [29].

Nultom stopom PDV-a, za slučaj fotonaponskih elektrana, se oporezuju radovi i oprema kao što su [29]:

- fotonaponski paneli,
- izmjenjivači,
- baterije (ovisno od opcije),
- razvodi kabela,
- konstrukcije građevine,
- izvođenje montažnih radova,
- radovi projektiranja,
- ishodačenja potrebnih dozvola,
- radovi priključivanja na mrežu.

I dalje se stopom poreza na dodanu vrijednost od 25% oporezuje isporučivanje solarnih ploča bez građenja i druga oprema koja ima veze s gradnjom poput trgovačkih roba te isporučivanja i instalacije solarnih ploča kod projekata kompleksnije izvedbe. Osoba koja je porezni obveznik i podrazumijeva se da je izvođač radova koji vrši isporučivanje i instalaciju solarnih panela ostvaruje pravo na odbijanje pretporeza. Što znači da se prilikom kupovine solarnih panela, druge opreme i potrebnih usluga za njihovu instalaciju prema ulaznom računu uplaćuje porez na dodanu vrijednost u iznosi stope od 25%, čiji je iznos u cijelosti moguće odbiti na način da ga se prikaže kao pretporez [29].

5.2. Troškovi za održavanje i pogon

Troškovi koji se odnose na održavanje i pogon (P_t) mogu biti:

- varijabilni,
- fiksni,
- ili prikazani kao zbroj.

Varijabilni segment troškova za održavanje i pogon se odnosi na trošenje pomoćnoga materijala poput raznih aditiva gorivu, maziva i vode. Također, pod varijabilne troškove spadaju troškovi održavanja i popravaka koje ne pokriva osiguranje i jamstvo. Fiksni segment troškova za održavanje i pogon se odnosi na sve troškove koji ne zavise o veličini proizvodnje elektrane poput neplaniranih i planiranih održavanja, kamata i anuiteta na zajme tvrtke, osiguravajuće premije, administracijske troškove, operativne troškove za osoblje i drugo [31].

Trošak za održavanje i pogon može se izračunati uz pomoć sljedećeg izraza:

$$P_t = p_t * W_t \quad (5.1.)$$

gdje se P_t odnosi kao što je već spomenuto na trošak za održavanje i pogon, p_t na jedinični trošak pogona na godišnjoj razini za proizvodnju jednog megavat sata (MWh) ili kilovat sata (kWh) električne energije, t je godina, a W_t električna energija koja je proizvedena u godini.

5.3. Nivelirani trošak proizvodnje električne energije

Nivelirani trošak proizvodnje električne energije (engl. LCOE – levelized cost of electricity) upotrebljava se za računanje troškova proizvodnje električne energije u kilovat satima (kWh). Uz pomoć niveliranog troška može se dati procjena o isplativosti investicije u fotonaponski sustav, a moguće ga je izračunati uz pomoć sljedeće relacije [30]:

$$LCOE = \frac{OCS \times CRF \times FO\&MC}{\frac{E_0}{N} \times \sum_{k=1}^N \left(1 - \frac{d_r \times (k-1)}{100}\right)} \quad (5.2.)$$

Gdje se:

OCS – odnosi na investicijski trošak

CRF – izražava u postocima (%) i odnosi na faktor oporavka kapitala

E_0 – odnosi na električnu energiju koja je proizvedena u jednoj godini (kilovati po satu / kilovat peak / godina)

FO&MC – odnosi na fiksne troškove održavanja i rada

N – označava broj godina

D_r – označava stopa degradacije fotonaponskoga modula (postotak (%) / godina)

CRF (engl. Capital recovery factor) ili faktor oporavka kapitala se odnosi na udjel u ukupnom trošku kojeg elektrana ima, a prihodovna strana ga mora zatvoriti tijekom svake godine s ciljem da cjelokupni projekt pred kraj radnoga vijeka fotonaponske elektrane bude izbalansiran odnosno ujednačen. Moguće ga je izračunati uz pomoću sljedeće relacije:

$$CRF = \frac{WACC \times (WACC + 1)^N}{(WACC + 1)^N - 1} + k_{inst} \quad (5.3.)$$

Gdje se:

WACC – odnosi na procijenjeni (prosječni) trošak kapitala u postocima (%)

K_{inst} – odnosi na godišnji trošak za osiguranje, izražen u postocima (%)

5.4. Ispitivanje isplativosti fotonaponske elektrane

U svrhu ispitivanja postojanja isplativosti za fotonaponsku elektranu upotrebljava se metoda NPV (eng. Net present value) ili metoda neto sadašnje vrijednosti. Pored fotonaponskih instalacija, moguće je napraviti procjenu povrat ostalih investiranja kao što su poslovni podvizi i nekretnine. NVP se računa na način da se zbrajaju svi diskontinuirani budući novčani tokovi tijekom vremena investiranja te se od njih oduzme iznos početnih investicijskih troškova. Novčani tokovi se odnose na uštede energije, a inicijalno ulaganje je trošak sustava u fotonaponskim sustavima.

Neto sadašnja vrijednost može se izračunati uz pomoć sljedećeg izraza u kojem su u brojniku diskontinuirani novčani tokovi [30]:

$$NVP = \sum_{i=0}^N \frac{\text{protok novca}_i}{(1+d)^i} \quad (5.4.)$$

Gdje je:

d – diskontna stopa

i – godina tijekom vijaka trajanja

N – duljina trajanja investicije

protok novca – neto novčani tok tijekom jedne godine

Da bi bila prisutna isplativost fotonaponske elektrane NVP ili neto sadašnja vrijednost mora biti veća od nule ($NVP > 0$) odnosno pozitivna.

5.5. Razdoblje povrata investicije

Razdoblje povrata investicije predstavlja vrijeme nužno kako bi se vratio iznos inicijalnih ulaganja. Tom prilikom treba imati na umu vremensko trajanje projekta gdje je za fotonaponske elektrane oko 25 godina. Prema tome, razdoblje u kojem se investicija mora povratiti mora biti kraće od vremenskog trajanja projekta fotonaponske elektrane [32].

Razdoblje potpune otplate fotonaponske elektrane moguće je izračunati sljedećim načinom [32]:

- treba se izvršiti izračun godišnje naknade G_{el} za električnu energiju koja je predana distributivnoj mreži. Električnu energiju koja je proizvedena u fotonaponskoj elektrani E_{pr} u kilovat satima (kWh) treba pomnožiti s c odnosno s cijenom električne energije izraženom u eurima po kilovat satu (€/kWh),

$$G_{el} = E_{pr} * c \quad (5.5.)$$

- razdoblje otplate fotonaponske elektrane t izračunava omjerom inicijalne (početne) investicije te naknade za predanu električnu energiju na godišnjoj razini G_{el} .

$$t = \frac{1}{G_{el}} \quad (5.6.)$$

5.6. Dobit za kupca s vlastitom fotonaponskom elektranom

Kupac električne energije može posjedovati vlastitu fotonaponsku elektranu te tijekom godine proizvoditi električnu energiju. Kupac koji je ujedno i vlasnik fotonaponske elektrane energiju koju je proizvede upotrebljava za vlastite potrebe, dok viškove energije preuzima distribucijska mreža. Kupcu električne energije koji ima vlastitu proizvodnju traži se da plati plaća naknadu za priključenje sukladno Pravilniku Hrvatske energetske regulatorne agencije o naknadama za priključenje u elektroenergetsku mrežu te za povećavanje priključene snage.

Električna energija se predaje u distribuciju mrežu HEP-u na osnovu ugovora o opskrbljivanju krajnjega korisnika vlastitom proizvodnjom. Ako nisu zadovoljeni uvjeti kako bi se zaključio ovakav ugovor i dalje postoji mogućnost za zaključivanje ugovora o otkupu s ostalim otkupljivačima koji su prisutni na tržištu. Pri vršenju preuzimanja električne energije opskrbljivač električne energije određuje minimum vrijednosti električne energije C_i kupcu električne energije prema sljedećoj relaciji [32]:

$$C_i = 0,9 * PKC_i \quad (5.7.)$$

u kojoj je:

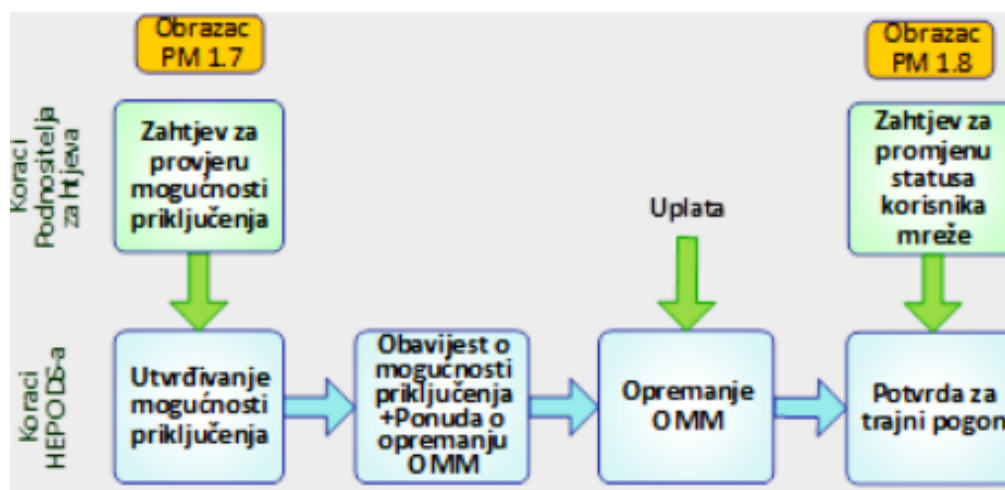
PKC_i – iznos cijene za električnu energiju koja se plaća o strane kupca onome koji opskrbljuje električnom energijom, te je potrebno naglasiti da ne postoje naknade za upotrebu mreže i porez (euri/kilovat sat – €/kWh).

U sljedećoj tablici 5.2. prema dostupnim podacima iz [34] dan je prikaz broja kućanstava koji imaju instaliran fotonaponski sustav za samoopskrbu u Hrvatskoj u razdoblju od 2019. do 2021. godine. Vidljivo je određeno povećanja broja instaliranih kućnih fotonaponskih elektrana.

Tablica 5.2. Kućanstva koja imaju instaliran fotonaponski sustav za samoopskrbu [34]

	Brojka kućanstava koja imaju instalirani fotonaponski sustav za samoopskrbu
2019.	146
2020.	855
2021.	1580

Od strane Hrvatske elektroprivrede se definiraju otkupne cijene za višak električne energije od krajnjega kupca koji ujedno koristi postrojenje za samoopskrbu. Temeljem zakonskog okvira o obnovljivim izvorima energije i visokotlačnoj kogeneraciji određuju se cijene i promjenjive su u skladu s zakonskim promjenama ili temeljem odluke opskrbljivača o ponudi više cijene. Na slici 5.4. prikazani su koraci priključenja kućanstva koje ima vlastitu proizvodnju.



Slika 5.4. Priključenje kućanstva s vlastitom proizvodnjom [38]

6. ANALIZA ISPLATIVOSTI FOTONAPONSKIH ELEKTRANA BEZ POTICAJA

6.1. Opći pregled poticaja za fotonaponske elektrane

U ovom dijelu rada dan je opis smisla realizacije fotonaponske elektrane bez poticaja. U današnje vrijeme ulaganje u fotonaponske elektrane je najisplativije nego ikad prije, ali i dalje predstavlja znatan financijski izdatak ako se govori o kućnim budžetima. Izgradnja fotonaponske elektrane s poticajima smanjiva ukupne troškova investiranja te skraćuje vrijeme povrata investiranog iznosa. Od strane Fonda za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost daju se veći postotci sufinanciranja u usporedbi s poticajima za fotonaponske elektrane od strane županija i gradova. Financiranje od strane Fonda iznosi 40, 60 i 80 posto ukupne vrijednosti projekta, a ovisi ponajprije o tome koliko je razvijeno područje u kojem je smješten prijavitelj projekta [35].

Prema [35] moguće je ostvariti sufinanciranje projekta do najviše 16.988,52 € ili:

- do 80% troškova koji su opravdani na lokacijama kao što su područja od posebne državne skrbi i prva skupina otoka,
- do 60% troškova koji su opravdani na lokacijama pri brdsko-planinskim područjima te otocima iz druge skupine,
- do 40% troškova koji su opravdani na svim ostalim lokacijama u Republici Hrvatskoj.

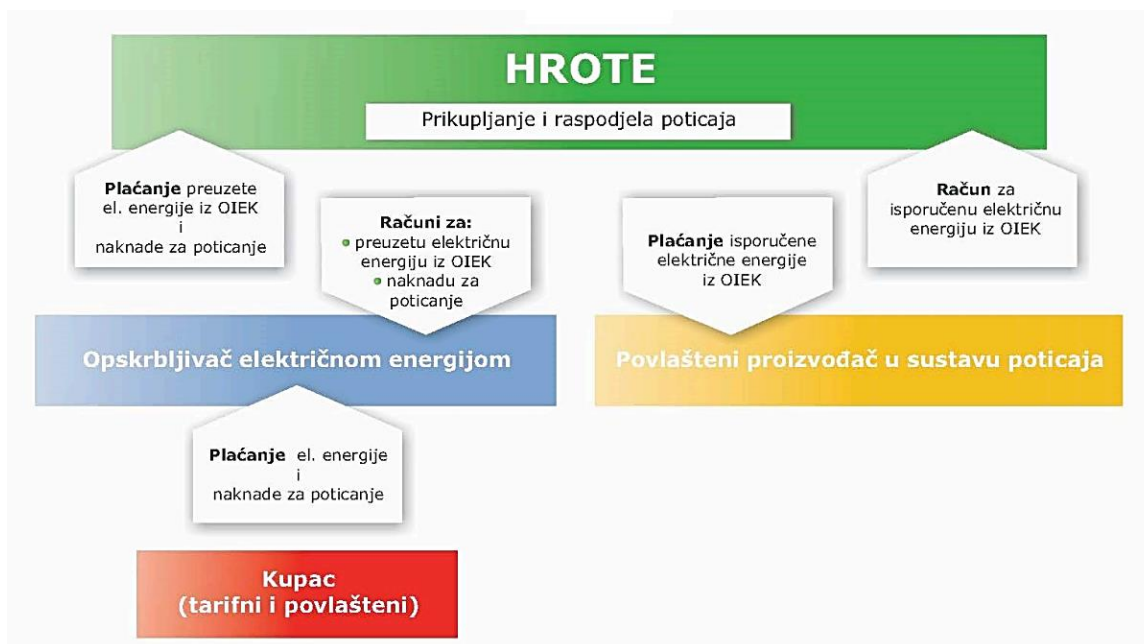
Ovdje se radi o sredstvima koja pokrivaju troškove za nabavu i ugrađivanje opreme za fotonaponsku elektranu, te se dobivaju na osnovu dokaza o samostalno izvršenom plaćanju. To znači da troškove koje želite da vam Fond prekrije prvo morate podmiriti samostalno. Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima na određene stavke prilikom ulaganja u fotonaponske elektrane se ne plaća PDV [35].

Pri prijavljivanju na Javni povi raspisan od strane Fonda potrebno je imati objekt koji je u potpunosti legaliziran, te je također potrebno u naprijed imati riješeno pitanje priključka i vlasništva. Pored navedenog, nužno je unaprijed imati izrađen glavni projekt fotonaponske elektrane te imati pribavljenu suglasnost o ugradnji Hrvatske elektroprivrede – Operatera distribucijskoga sustava [35].

Dobivanje sufinanciranja od strane Fonda za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost moguće je dobiti samo za sljedeće objekte:

- koji imaju napravljen energetska certifikat,
- koji imaju napravljen izvještaj o provedenom energetskom pregledu adekvatnog energetskoga razreda.

Uz prethodno navedeno, vrijedni spomenuti da su u sustavu uvedene tarife (Feed-in) po kojima se dobije fiksna naknada po kilovat satu (kWh) proizvedene električne energije. Proizvođača se štiti ugovorom kojim se jamči otkup po cijeni koja nije promjenjiva. Ovaj sustav je potreban u situacijama kada investitori žele uložiti u novu tehnologiju te na taj način poticati razvoj. Na slici 6.1. prikazan je princip prikupljanja i raspodjele poticaja od HROTE-a.



Slika 6.1. Prikaz prikupljanja i raspodjele poticaja od HROTE-a [39]

Također, jedan od načina poticanja obnovljivih izvora energije su udruživanja građana putem energetske zajednice. Tu se radi o pravnim osobama čiji je prvenstveni interes socijalna, ekonomska i korist okoliša umjesto stvaranja profita. U mogućnosti su razvijati i investirati u projekte koji su na objektima od članova udruženja, između sebe dijeliti višak generirane energije te se pri tome do maksimuma iskorištavaju viškovi proizvedene električne energije [40].

6.1.1. Kritične točke javnih poticaja

Poticaji od strane Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost nude mogućnost u velikoj mjeri skraćivanja vremena povrata investicije u fotonaponsku elektranu, odnosno mogu sačuvati novac kućnoga budžeta. Potrebno je naglasiti da se ne garantira ostvarivanje poticaja ukoliko se korisnik prijavi, pogotovo u prijavi gdje je brzina važna [35].

Ono što građane može odvratiti od ulaganja u fotonaponsku elektranu je to što je potrebno imati svoja sredstva kako bi ste uložili, a tek nakon prilaganja računa mogu očekivati povrat u vidu sufinanciranja, ukoliko je ostvareno to pravo. Ako se uzme u obzir konstantni rast cijena električne energije na godišnjoj razini, vrijeme povrata investicije u fotonaponsku elektranu se skraćuje [35].

Poticanje ima za cilj omogućiti provjerenim i skupljim tehnologijama probitak na tržištu. Ukoliko se u dovoljnoj mjeri koristi to bi trebalo značiti da će usluge i oprema pojeftiniti te će to imati za posljedicu isplativija ulaganja u takve tehnologije čak i bez poticaja. U Hrvatskoj i nije baš taj slučaj. Poticajne cijene bi morale biti prilagođene u slučaju pada cijene tehnologija odnosno morale biti bolje usklađene s snižavanjem investicijskih troškova u fotonaponske sustave. U Hrvatskoj su promjene nisu dovoljne i nisu pravodobne.

Sukladno analizi iz [41] praktički je veliki dio poticaja koji se odnose na financije otišao manjoj grupi poduzetnika, dok se pojedinci i lokalne zajednice zapravo uopće nisu okoristili s ovim sustavom. U drugim više razvijenim državama članicama Europske unije razvijen je model zadruga u kojem skupine osoba postavljaju na primjer vjetroagregate te od viškova energije zarađuju.

Hrvatska se iz više razloga nalazi pri dnu država u Europi po iskoristivosti energije sunca, međutim tri su temeljna razloga koja idu tome u prilog. Najprije je potrebno spomenuti nisku cijenu električne energije čija je posljedica umanjena isplativost instaliranja fotonaponske elektrane. Također, u praksi je prisutna sporost sustava pri izdavanju uvjeta o priključivanju i puštanju u pogon i mnoge administrativne blokade. Prisutan je model otkupa viška električne energije koji nije stimulativan te se sustavno ne potiče gradnja fotonaponskih elektrana.

6.2. Povrat investicije bez poticaja

Povrat investiranoga iznosa u fotonaponsku elektranu bez poticaja očekuje se u okviru pet do deset godina gdje važan faktor ima potrošnja. Hrvatska sa svojim solarnim potencijalom pripada u zemlje Europe koje imaju najveći solarni potencijal. Na tržištu fotonaponskih elektrana postoje određeni pokazatelji koji govore kako više nisu potrebni poticaji kako bi projekt ugrađivanja fotonaponske elektrane bio isplativ. Prvo što je potrebno naglasiti da je došlo do znatnoga pada cijene opreme fotonaponskih sustava, a paralelno s tim desio se vrlo veliki porast troška za električnu energiju. S povećanjem naknada obnovljivih izvora energije došlo je do povišenja cijene električne energije pravnim osobama. Potrebno je naglasiti da je cijena električne energije u kontinuiranom poratu. Kad se ukomponiraju ti uvjeti dolazi se do zaključka da se vrijeme povrata investiranja u fotonaponske elektrane bez poticaja smanjuje.

S obzirom da se energija sunca nalazi svuda okolo, električna energija iz fotonaponskih sustava ima najveći potencijal kad se uzmu u obzir svi obnovljivi izvori. Poslije početnih ulaganja preostaju troškovi održavanja koju nisu veliki. Prilikom sagledavanja povrata investicije fotonaponskih elektrana treba imati u vidu da fotonaponski uređaji imaju životni vijek duži od 20 godina.

6.2.1. Primjeri povrata investicije bez poticaja

U ovom dijelu rada dani su primjeri povrata investicije u fotonaponsku elektranu bez poticaja. Kao prvi primjer na temelju [35] dan je prikaz projekcije investicije (Tablica 6.1.) u fotonaponsku elektranu snage 5,6 kW obiteljske kuće u Zagrebu.

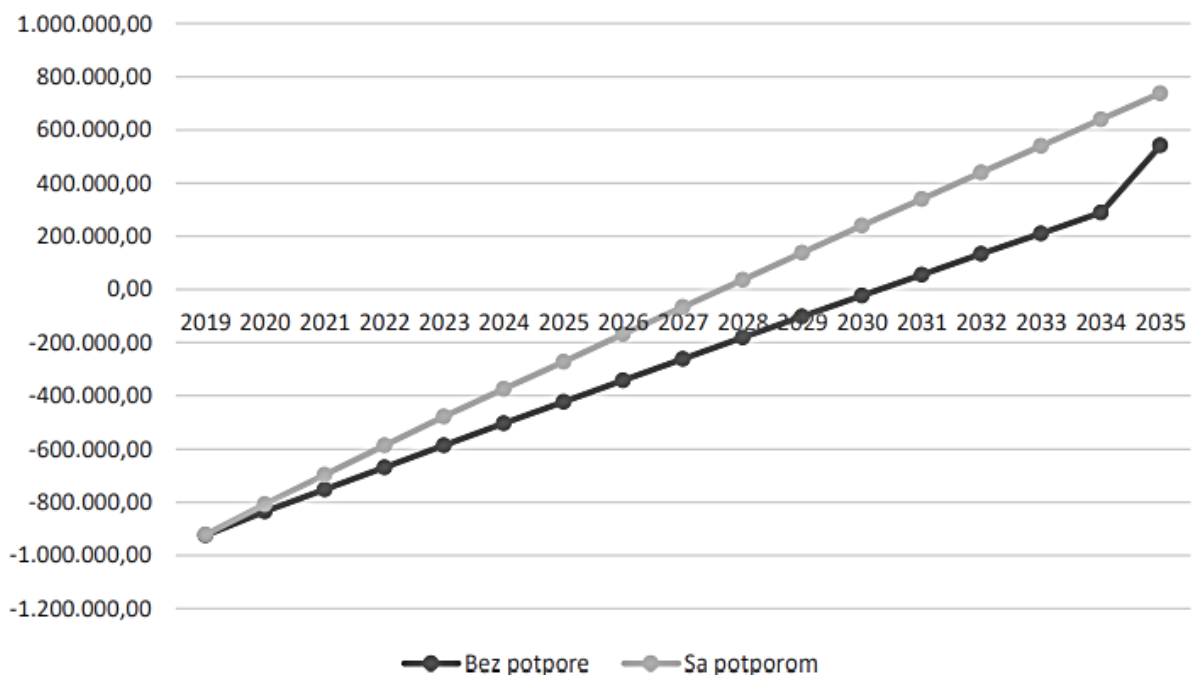
Tablica 6.1. Projekcija investicije u fotonaponsku elektranu u Zagrebu (5,6 kW) bez poticaja i uz 40% poticaja [35]

SOLARNA ELEKTRANA	BEZ POTICAJA			UZ 40% POTICAJA		
	Trošak	Povrat	Prosječno trajanje realizacije	Trošak	Povrat	Prosječno trajanje realizacije
5,6 kW (Zagreb)	55.000 HRK	9,8 godina	do 4 mjeseca	35.000 HRK	5,7 godina	do 14 mjeseci

Uz osobno financiranje ulaganja u fotonaponsku elektranu navedene snage od 5,6 kW investicija bi se vratila u razdoblju 9,8 godina. Ovisno o dinamici rada svih sudionika u procesu realizacija od izrade projekta do ugrađivanja bi trajala do maksimalno 4 mjeseca. To prvenstveno ovisi o izvođaču, Hrvatskoj elektroprivredi i korisniku [35].

U slučaju da se fotonaponska elektrana financira s poticajima koji iznose do minimalno 40% , ukupni troškovi odnosno troškovi za opremu i ugrađivanje bi iznosili oko 4.648,07 € (35.000 kn). Za ovakav slučaj bi vrijeme povrata investicije bilo vrlo kraće ili oko 5,7 godina. Međutim, potrebno je naglasiti da bi proces realizacije bio znatno duži (do tri puta) ukoliko je uračunato da se s pripremama krene najmanje 3 mjeseca ranije prije nego se otvori javni poziv od strane Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost [35].

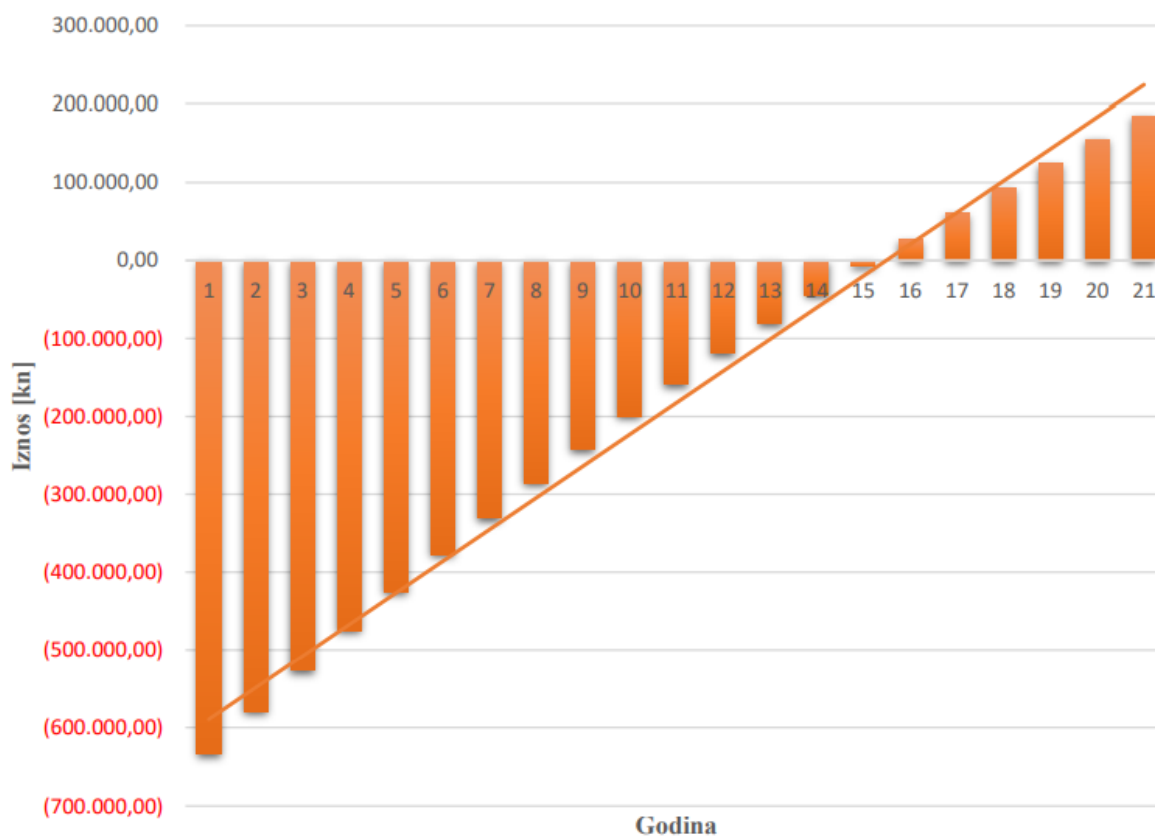
Sljedeći primjer koji je prikazan na slici 6.2. na temelju [36] je primjer povrata investicije fotonaponske elektrane za svaku godinu u zavisnosti o provedenoj potpori. Kao što se može primijetiti na slici vidljiv je povrat investicije koja ne sadrži poticaje od Europske unije u 2031. godini, dok se povrat za investiciju s uračunatim potporama Europske unije primjećuje ranije odnosno u 2028. godini.



Slika 6.2. Povrat investiranog iznosa u fotonaponsku elektranu bez poticaja i s poticajima tijekom godina [36]

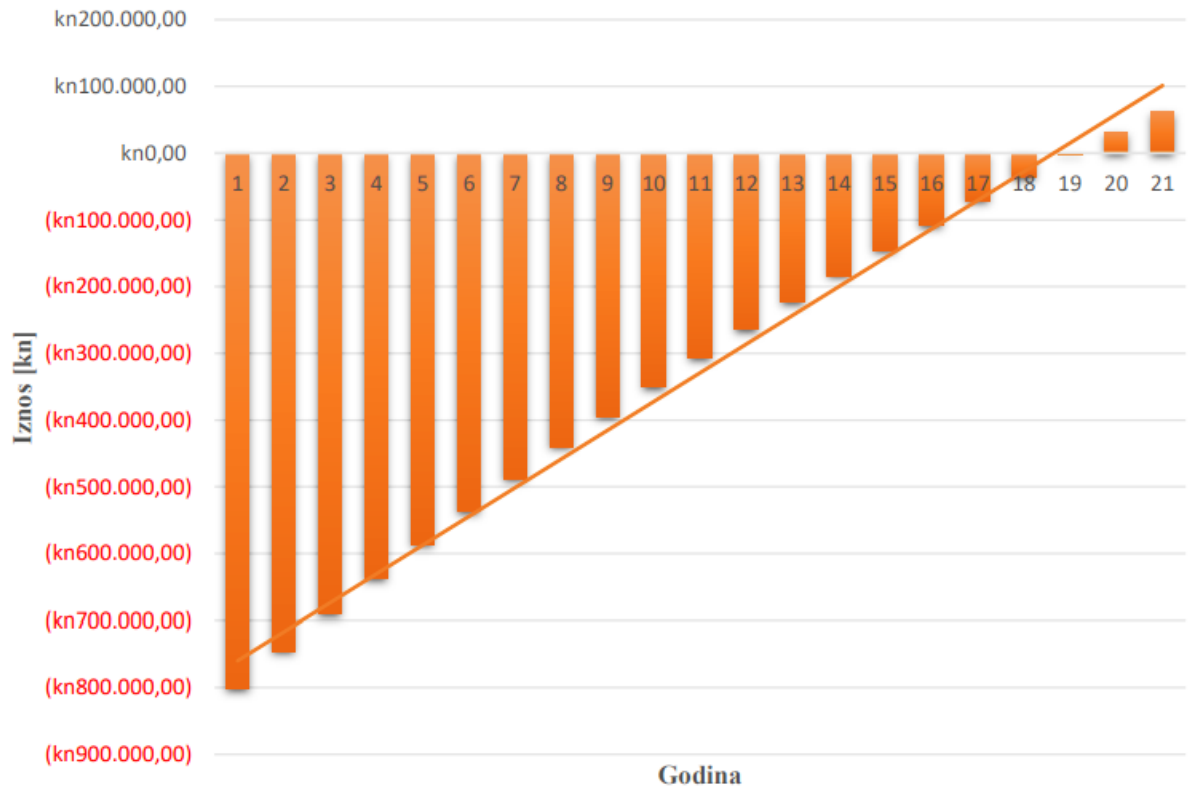
U sljedećem primjeru putem grafičkih prikaza iz [37] koji su prikazani na slici 6.2. i slici 6.3., ovoga rada, dan je prikaz povrat investicije bez subvencije kroz godine. Ovaj primjer se odnosi na projekciju novčanog tijeka fotonaponske elektrane FERIT 1 s vršnom snagom od 80 kW i sustavom baterija od 20 kW. Ova bi fotonaponska elektrana radila paralelno s mrežom, proizvodila električnu energiju za vlastitu potrošnju, viškove električne energije će predavati u mrežu. Projekcije novčanih tijekova koje su prikazane na slici 6.2. i 6.3. su izrađene uz pomoć programskog paketa PV Sol Premium. Investicijski troškovi za ovu fotonaponsku elektranu iznose 114.032,94 € (859.181,20 Kuna).

Slika 6.3. prikazuje prvi grafički prikaz povrata investicije s 0 posto subvencije odnosno prikazuje isplativost fotonaponske elektrane koja nema sustav baterija i subvencije na investiciju. U ovom grafičkom prikazu bitni troškovi se odnose na troškove investiranja, održavanja i troškove za električnu energiju.



Slika 6.3. Prikaz povrata investicije (novčanog tijeka) bez subvencija i bez sustava baterija [37]

Slika 6.4. prikazuje drugi grafički prikaz povrata investicije s 0 posto subvencije odnosno prikazuje isplativost fotonaponske elektrane koja nema subvencije na investiciju, a ima sustav baterija. U ovom grafičkom prikazu bitni troškovi se također odnose na troškove investiranja, održavanja i troškove za električnu energiju.



Slika 6.4. Prikaz povrata investicije (novčanog tijeka) bez subvencija i sa sustavom baterija [37]

Iz prethodno postavljenih grafova o prikazu novčanog tijeka bez subvencija vidljivo je da je rezultat roka povrata 15,5 godina za fotonaponsku elektranu koja nema ugrađen sustav baterija, a za fotonaponsku elektranu sa sustavom baterija 19 godina. Iz navedenih grafova se može zaključiti kako se za slučaj bez subvencija na investiciju ne isplati ulagati u baterije. Izgradanja fotonaponske elektrane sa sustavom baterija je isplativa samo u slučaju državne subvencije u iznosu najmanje 40% investicije [37].

7. ZAKLJUČAK

Uz pomoć fotonaponske elektrane može se izravno pretvarati energija sunca u električnu energiju bez da se koriste goriva za pogon i emitiraju štetne tvari. Određeni problem po pitanju fotonaponskih elektrana predstavljaju visoki troškovi izgradnje fotonaponske elektrane, neujednačeno proizvođenje električne energije koje izravno ovisi o količini sunčeve energije te kvaliteti komponenata unutar fotonaponskoga sustava. Kako bi se izgradila određena fotonaponska elektrana nužno je poštivati definiranu zakonsku regulativu. Postupak građenja trenutno je vrlo složen, a moguće je inicirati izgradnju većeg broja fotonaponskih elektrana ukoliko se pojednostavni spomenuti postupak. U Hrvatskoj su prisutni vrlo kvalitetni uvjeti za iskorištavanje sunčeve energije zbog geografske lokacije. Podaci iz prakse govore da je prisutan određeni porast po pitanju izgradnje solarnih elektrana, međutim, potrebno je naglasiti da Hrvatska poprilično zaostaje za područjima kao što su srednja i sjeverna Europa.

Izgradnja fotonaponske elektrane s poticajima smanjiva ukupne troškova investiranja te skraćuje vrijeme povrata investiranog iznosa. Na tržištu fotonaponskih elektrana postoje određeni pokazatelji koji govore kako više nisu potrebni poticaji kako bi projekt ugrađivanja fotonaponske elektrane bio isplativ. Prvo što je potrebno naglasiti da je došlo do znatnoga pada cijene opreme fotonaponskih sustava, a paralelno s tim desio se vrlo veliki porast troška za električnu energiju. S povećanjem naknada obnovljivih izvora energije došlo je do povišenja cijene električne energije pravnim osobama. Potrebno je naglasiti da je cijena električne energije u kontinuiranom porastu. Kad se ukomponiraju ti uvjeti dolazi se do zaključka da se vrijeme povrata investiranja u fotonaponske elektrane bez poticaja smanjuje.

LITERATURA

- [1] Begović, N., *Kvantna fizika*, <http://nedeljko-begovic.com/teorija/kf.html> [11.08.2023.]
- [2] Prirodoslovni – matematički fakultet, Sveučilište u Splitu, *Nastanak kvantne mehanike*, <https://mapmf.pmfst.unist.hr/~agicz/Pred2017ModPhys4.pdf> [11.08.2023.]
- [3] Galović, S., Tuškan T., *Valno-čestična priroda svjetlosti i tvari*, Fotoelektrični učinak, <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a985a697-8949-410e-af32-bfd69b605dd6/fotoelektricni-ucinak.html> [12.08.2023.]
- [4] Kirin A., Žugčić F., *Princip rada i primjena fotonaponskih ćelija*, Veleučilište u Karlovcu, 2018, <https://www.bib.irb.hr/1251401> [11.08.2023.]
- [5] "Report of the Board of Regents By Smithsonian Institution", Smithsonian Institution.
- [6] Klabučar, D., *Matematičko-fizički list*, Zagreb, 2006, Vols LVI, 1-10.
- [7] Subašić, D., *Einstein i kvant svjetlosti*, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.
- [8] Lelas, D., *Kvantna priroda, svjetlosti*, Fizika 2, Predavanje 10, <http://adria.fesb.hr/~zmiletic/Fizika%202/10.%20Kvantna%20priroda%20svjetlosti/10-Predavanje.%20Kvantna%20priroda%20svjetlosti.pdf> [12.08.2023.]
- [9] Horvat, D., *Fizika II*, Element, Zagreb, 2018.
- [10] Planckova konstanta, http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dandroic/nastava/fem/zadace_08-09/Planck.pdf [12.08.2023.]
- [11] Elektronika, *PN – spoj*, <http://www.fpz.unizg.hr/ztos/EE/Elektro6.pdf> [12.08.2023.]
- [12] Rebrović, D., *Fizikalne osnove solarnih elektrana*, 2019, <https://www.solarne-elektrane.hr/fizikalne-osnove-fotonaponskih-elektrana/> [11.08.2023.]
- [13] Kulišić, P., Vuletin, J., Zulin, I., *Sunčane ćelije*, Školska knjiga, Zagreb 1994.
- [14] Majdandžić, Lj., *Fotonaponski sustavi*, Priručnik, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf [12.08.2023.]
- [15] Majdandžić Lj., *SOLARNI SUSTAVI - Teorijske osnove, projektiranje, ugradnja i primjeri izvedenih projekata*, Graphis d.o.o., Zagreb, 2010.
- [16] Stanković, A. T., *Tehnologije solarnih ćelija*, EIHP, 2017, https://aolab.fer.hr/download/repository/Tehnologije_solarnih_celija_20170127_ATS.pdf [13.08.2023.]

- [17] Majdandžić, Lj., *Fotonaponski sustavi*, Priručnik, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf [13.08.2023.]
- [18] Šljivac, D., Topić, D., *Tehnologije obnovljivih izvora energije*, Interna skripta, Osijek, 2016.
- [19] ABB Technical Application Papers No. 10 *Photovoltaic plants*, 2010, <https://library.e.abb.com/public/9b867d77d5e0da7fc1257ca60057221b/QT10%20EN%202013.pdf> [13.08.2023.]
- [20] Šljivac, D., Topić, D., *Tehnologije obnovljivih izvora energije*, Interna skripta, Osijek, 2016.
- [21] E-learning Gornjogradska gimnazija Zagreb, <http://e-learning.gornjogradska.eu/wp-content/uploads/2016/10/26-3.png> [13.08.2023.]
- [22] D. Šljivac, D. Topić, *Obnovljivi izvori električne energije*, FERIT Osijek, 2018.
- [23] *Klimatske informacije i obnovljivi izvori energije: Sunčevo zračenje*, http://klima.hr/razno/projekti2013/climrun_radionica1/WS_suncevo_zracenje.pdf [13.08.2023.]
- [24] Topić, D., Varjů, V., Horváthné Kovács B., *Obnovljivi izvori energije i energetska učinkovitost za ruralna područja*, https://www.bib.irb.hr/984785/download/984785.rures_cro_final_2018_12_24.pdf [14.08.2023.]
- [25] Statista, *Average installed cost for solar photovoltaics worldwide from 2010 to 2021*, <https://www.statista.com/statistics/809796/global-solar-power-installation-cost-per-kilowatt/> [14.08.2023.]
- [26] Topić, D., Varjů, V., Horváthné Kovács B., *Obnovljivi izvori energije i energetska učinkovitost za ruralna područja*, https://www.bib.irb.hr/984785/download/984785.rures_cro_final_2018_12_24.pdf [14.08.2023.]
- [27] Rudvald, D., *Elektrotehnički projekt - Izgradnja integrirane sunčane elektrane instalirane snage 30 kW na krovu postojećeg objekta*, 2013.
- [28] Insulae, <http://insulae-h2020.eu/> [14.08.2023.]
- [29] Dojčić, I., Uvođenje nulte stope PDV-a i novi PDV obrazac, TEB Poslovno savjetovanje, 2022, <https://www.teb.hr/novosti/2022/uvođenje-nulte-stope-pdv-a-i-novi-pdv-obrazac/> [14.08.2023.]
- [30] LCOE for Zero-Energy Greenhouse, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7418616> [14.08.2023.]

- [31] Danish Energy Agency, *Levelized cost of energy, LCOE calculator*, Copenhagen, 2015.
- [32] Solarni paneli, http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf [14.08.2023.]
- [33] Kupci s vlastitom proizvodnjom, <https://www.hep.hr/ods/korisnici/kupac-s-vlastitomproizvodnjom/29> [14.08.2023.]
- [34] HERA, *Izvešće 2021*, https://www.hera.hr/hr/docs/HERA_izvjesce_2021.pdf [13.08.2023.]
- [35] Ima li smisla realizirati solarnu elektranu bez poticaja Fonda?, <https://nasuncanojstrani.hr/ima-li-smisla-realizirati-solarnu-elektranu-bez-poticaja-fonda/> [12.08.2023.]
- [36] Pavlak, K., *Isplativost investicije u solarnu elektranu malog kapaciteta na poljoprivrednom gospodarstvu*, 2022, <https://repozitorij.agr.unizg.hr/islandora/object/agr%3A2555/datastream/PDF/view> [14.08.2023.]
- [37] Kucelj, M., *Projektiranje i ugradnja fotonaponske elektrane FERIT 1 u okviru RESCUE projekta*, 2021, <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A3341/datastream/PDF/view> [11.08.2023.]
- [38] Priključenje kućanstva s vlastitom proizvodnjom, <https://www.hep.hr/ods/pristup-mrezi/prikljucenje-na-mrezu-28/prikljucenje-kucanstva-s-vlastitom-proizvodnjom/185> [14.08.2023.]
- [39] HROTE, Raspodjela poticaja, <https://www.hrote.hr/raspodjela-poticaja> [11.08.2023.]
- [40] European commission, https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energycommunities_en [14.08.2023.]
- [41] Božičević M., Rogulj I., *Analiza sustava potcaja korištenja obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije*, 2018, http://s3-eu-west-1.amazonaws.com/zelenaakcija.production/zelena_akcija/document_translations/1139/doc_files/original/Analiza_OIE.pdf?1519648746 [14.08.2023.]

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Fotoelektrični efekt [1].....	5
Slika 2.2. Herzov emiter s detektorom elektromagnetskih valova [6].	6
Slika 2.3. Ilustracija Halwachsova pokusa [10]	7
Slika 2.4. Graf ovisnosti kinetičke energije o frekvenciji svjetlosti [2].	7
Slika 2.5. Izlazni rad određenih metala [8].....	8
Slika 3.1. Fizikalne pojave unutar ćelije [12].....	10
Slika 3.2. Fotonaponska ćelija silicija [14].	11
Slika 3.3. Fotonaponska ćelija koja služi kao izvor električne energije [15]	12
Slika 3.4. Strujno-naponska karakteristika osvijetljenje i ne osvijetljene fotonaponske ćelije [16]	13
Slika 3.5. Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije [16].....	14
Slika 4.1. Klasifikacija fotonaponskih sustava [17]	15
Slika 4.2. Shematski prikaz fotonaponske mrežne elektrane [18].....	16
Slika 4.3. Izvedba fotonaponske mrežne elektrane koja ima jedan izmjenjivač [20]	17
Slika 4.4. Izvedba fotonaponske mrežne elektrane koja ima jedan izmjenjivač po svakom nizu [20]	18
Slika 4.5. Izvedba fotonaponske elektrane koja ima više izmjenjivača [20].....	19
Slika 4.6. Osnovni dijelovi otočne fotonaponske elektrane [21].....	20
Slika 4.7. Hibridna otočna fotonaponska elektrana [23]	21
Slika 5.1. Prosječna cijena ulaganja u instalaciju fotonaponskih sustava u cijelome svijetu za razdoblje od 2010. do 2021. godine [25]	22
Slika 5.2. Podjela troškova fotonaponske elektrane	23
Slika 5.3. Udjel iznosa cijene fotonaponskog modula u ukupnom iznosu fotonaponskoga sustava (€/Wp) [15]	26
Slika 5.4. Priključenje kućanstva s vlastitom proizvodnjom [38]	32
Slika 6.1. Prikaz prikupljanja i raspodjele poticaja od HROTE-a [39]	34
Slika 6.2. Povrat investiranog iznosa u fotonaponsku elektranu bez poticaja i s poticajima tijekom godina [36]	38

Slika 6.3. Prikaz povrata investicije (novčanog tijeka) bez subvencija i bez sustava baterija	
[37]	39
Slika 6.4. Prikaz povrata investicije (novčanog tijeka) bez subvencija i sa sustavom baterija	
[37]	40

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Prikaz troškova za opremanje fotonaponskog sustava [27].....	24
Tablica 5.2. Kućanstva koja imaju instaliran fotonaponski sustav za samoopskrbu [34]	32
Tablica 6.1. Projekcija investicije u fotonaponsku elektranu u Zagrebu (5,6 KW) bez poticaja i uz 40% poticaja [35].....	37