

# Preliminarna analiza isplativosti gradnje solarne elektrane na lokaciji zagrebačkog UPOV-a

---

**Bebić, Glorija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:356178>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet

ZAVRŠNI RAD

**Preliminarna analiza isplativosti gradnje solarne elektrane na  
lokaciji zagrebačkog UPOV-a**

Student:  
Glorija Bebić

Mentor:  
doc. dr. sc. Domagoj Nakić

Zagreb, rujan 2023.

## SAŽETAK

U završnom radu prikazana je mogućnost proizvodnje električne energije iz solarnih fotonaponskih elektrana na lokaciji zagrebačkog UPOV-a (uređaj za pročišćavanje otpadnih voda). Energetski sektor zahtjeva temeljne promjene kako bi se postiglo održivu budućnost, a solarni fotonaponski sustavi igraju ključnu ulogu u ostvarivanju tog cilja, pružajući potencijal za čistu i obnovljivu proizvodnju električne energije. Analizirana je lokacija zagrebačkog UPOV-a, na način da je izračunata snaga solarnog fotonaponskog sustava u odnosu na dostupnu površinu za potencijalnu izgradnju solarne elektrane te očekivana količina proizvedene električne energije. Procjena potencijala solarnog zračenja i proizvodnje električne energije dobivena je uz pomoć programa PVGIS. Kroz rad je detaljno opisana lokacija, veličina i vrsta solarnih panela te njihova učinkovitost. Investicijski troškovi procijenjeni su na oko 34,7 milijuna eura, dok godišnja proizvodnja električne energije iznosi oko 36,1 milijun kWh. Na temelju predviđenih investicijskih troškova određeno je vrijeme povrata investicije s iznosom od 12 godina.

Ključne riječi: solarna energija, efekt staklenika, fotonaponski paneli, solarne fotonaponske elektrane, UPOV Zagreb

## SUMMARY

In the final thesis, the potential for electricity generation from solar photovoltaic plants at the location of the Zagreb WWTP (Wastewater Treatment Plant) is presented. The energy sector calls for fundamental changes to achieve a sustainable future, and solar photovoltaic systems play a pivotal role in achieving this goal, offering the potential for clean and renewable electricity production. The Zagreb WWTP location was analyzed by calculating the power of the solar photovoltaic system in relation to the available surface area for potential solar power plant construction and the expected amount of electricity generated. The estimation of solar radiation and electricity production potential was obtained using the PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) software. The thesis provides a detailed description of the location, size, and type of solar panels, as well as their efficiency. The investment costs are estimated at approximately 2 million euros, while the annual electrical energy production amounts to around 36.1 million kWh. Based on the projected investment costs, a payback period of 12 years has been determined.

Keywords: solar energy, greenhouse effect, solar panels, solar photovoltaic power plants,  
WWTP Zagreb

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. EKOLOŠKA KRIZA .....	3
2.1. Klimatske promjene u Europi .....	3
2.2. Klimatske promjene u Hrvatskoj .....	6
2.3. Efekt staklenika.....	8
3. SOLARNE ELEKTRANE I SOLARNA ENERGIJA .....	11
3.1. Solarna energija .....	11
3.2. Pojam solarnih panela .....	13
3.2.1. Pločasti kolektori .....	14
3.2.2. Kolektori s vakuumskim cijevima .....	14
3.3. Vrste panela prema tehnologiji proizvodnje .....	15
3.3.1. Amorfni paneli .....	15
3.3.2. Monokristalni paneli .....	16
3.3.3. Polikristalni paneli .....	16
3.4. Pojam fotonaponskih elektrana .....	17
3.4.1. Koncept fotonaponske elektrane .....	17
3.4.2. Klasifikacija fotonaponskih sustava .....	19
3.4.3. Samostalni fotonaponski sustavi .....	20
3.4.4. Fotonaponski sustavi spojeni na mrežu .....	23
3.5. Zanimljivi primjeri specifičnih solarnih elektrana .....	24
3.5.1. Orbitalna elektrana .....	24
3.5.2. Primjer fotonaponske elektrane Francisco Pizarro .....	26
3.5.3. Solarne elektrane u Hrvatskoj .....	27
4. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA ISPLATIVOSTI SOLARNE ELEKTRANE U SKLOPU ZAGREBAČKOG UPOV-a .....	28
4.1. Korišteno softwaresko rješenje za dimenzioniranje fotonaponskih sustava .....	28
4.2. Lokacija uređaja za pročišćavanje otpadnih voda .....	29
4.3. Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana .....	34
4.4. Povrat investicije .....	35
5. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA .....	38

# 1. UVOD

Suvremeno doba sa sobom nosi mnogobrojne izazove, a među najznačajnijim su sve učestalije klimatske promjene s globalnim posljedicama koje zahtijevaju hitne interdisciplinarnе intervencije. Situacija je većim dijelom izazvana ljudskim djelatnostima pri čemu je proizvodnja električne energije jedan od ključnih faktora. Upotreba fosilnih goriva kao što su nafta, ugljen i plin u tradicionalnim metodama proizvodnje električne energije rezultira značajnom emisijom stakleničkih plinova u atmosferu, dodatno pojačavajući efekt staklenika i pridonoseći globalnom zagrijavanju.

Solarna energija predstavlja održivu i ekološki prihvatljivu alternativu tradicionalnim metodama proizvodnje električne energije, koja bi trebala igrati ključnu ulogu u borbi protiv ekološke krize i globalnog zatopljenja. Solarne tehnologije transformiraju sunčevu svjetlost u električnu energiju putem fotonaponskih (*engl. photovoltaic*, PV) panela ili kroz ogledala koja koncentriraju sunčevo zračenje. Poticanje na razvoj i korištenje solarne energije bit će ključno za stvaranje održive budućnosti, umanjivanje nepovoljnog ekološkog utjecaja i očuvanje planeta za nadolazeće generacije.

Količina sunčeve svjetlosti koja dolazi na Zemljinu površinu u sat i pol dovoljna je da osigura cjelokupnu svjetsku potrošnju energije tijekom jedne godine [1]. S ovom količinom Sunčeve energije na raspolaganju, otvara se ogroman potencijal za održivo opskrbljivanje ljudske civilizacije. Predstavlja ključ za održavanje životnih procesa na Zemlji te ima značajan utjecaj na atmosferske i ekološke cikluse, pružajući vitalnu podršku životu na Zemlji.

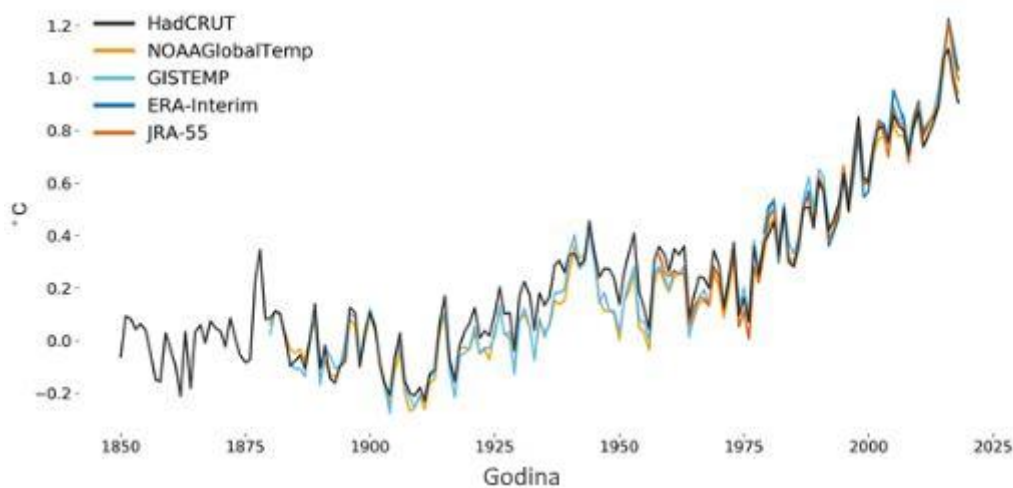
Stoga je danas ključno dizajnirati i stvoriti energetske učinkovite i troškovno prihvatljive sustave za proizvodnju električne i ostalih oblika energije. Hrvatska, kao zemlja s dominirajućim mediteranskim klimatskim tipom i obiljem sunčanih sati tijekom godine, ima značajan potencijal za napredak i razvoj solarnih tehnologija. Na primjer, obalna područja poput Dalmacije i Istre obično bilježe oko 2600 do 2800 sunčanih sati godišnje. Unutrašnjost Hrvatske, osobito kontinentalni dio, također može uživati u znatnom broju sunčanih sati, ali se količina može malo razlikovati ovisno o geografskom položaju i visini. U radu je analizirano područje grada Zagreba koji prosječno godišnje broji 2100 do 2200 sunčanih sati [2]. Sunčeva energija predstavlja prirodni, obnovljiv i besplatan izvor energije, međutim početni troškovi projektiranja i izgradnje solarnih elektrana mogu biti značajni. S obzirom na

to, ovim radom provedena je analiza isplativosti izgradnje solarne elektrane na lokaciji zagrebačkog UPOV-a. Kao glavni alat korišten je PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*), program razvijen od strane Europske komisije koji pruža informacije o solarnom potencijalu i performansama fotonaponskih sustava na različitim lokacijama diljem svijeta.

## 2. EKOLOŠKA KRIZA

### 2.1. Klimatske promjene u Europi

Promjene globalne temperature pokreću niz mehanizama koji ubrzavaju klimatske promjene. Podaci i istraživanja pokazuju da je globalna temperatura počela postupno rasti sredinom 19. stoljeća, a porast se ubrzao posebice od 1970-ih godina, odnosno nakon Industrijske revolucije (Slika 1.). Posljednje desetljeće se svrstava u najtoplije razdoblje s porastom temperature za 2,04 do 2,10 °C na Europskom teritoriju, a godina 2022. smatra se jednom od najtoplijih godina u povijesti premašujući temperature predindustrijskog doba vrijednostima između 1,13 °C i 1,18 °C [3].



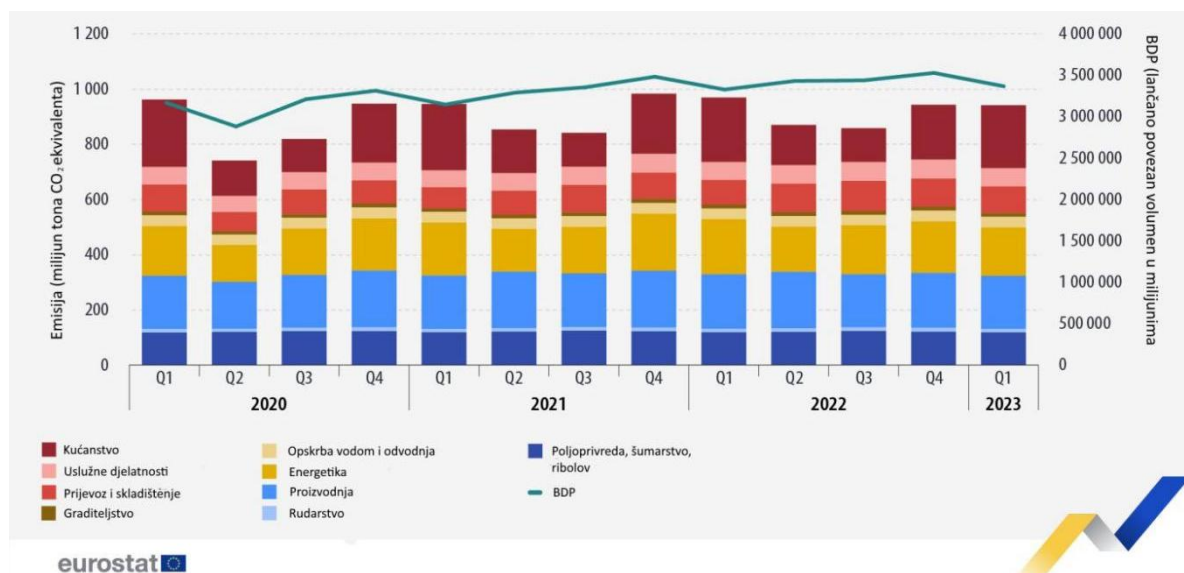
Slika 1. Globalna srednja razlika temperatura od 1850. do 1900. (°C) [4]

Tijekom razdoblja od 1890. do 2010. godine, smatra se da su prirodni čimbenici, kao što su promjene sunčevog zračenja ili vulkanske aktivnosti, doprinijeli ukupnom zagrijavanju za manje od plus ili minus 0,1 °C [5]. Na temelju mnogobrojnih analiza prihvaća se znanstveni konsenzus kojim se čovjek odnosno antropogeni utjecaj smatra najvećim pokretačem klimatskih promjena. Suvremene klimatske promjene većim dijelom su uzrokovane emisijom stakleničkih plinova, uglavnom ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) i vodene pare (NO<sub>2</sub>), ali i drugih stakleničkih plinova kao što su ozon (O<sub>3</sub>), dušikov suboksid (N<sub>2</sub>O), freon R-12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), freon R-22(CHClF<sub>2</sub>) i sumporov heksafluorid (SF<sub>6</sub>) [6]. Promet, izgaranje fosilnih goriva i proizvodnja cementa su ključni generatori emisija stakleničkih plinova, s prometnim sektorom koji izaziva emisije CO<sub>2</sub> zbog upotrebe vozila koja koriste fosilna goriva. Izgaranje fosilnih goriva u energetske sektoru, bilo za generiranje električne energije, grijanje ili industrijske namjene, glavno je izvorište emisija CO<sub>2</sub>. Nadalje, ovaj sektor također generira



emisije drugih stakleničkih plinova, kao što su dušikovi oksidi (N<sub>2</sub>O) i sumporni spojevi. Osim navedenih izvora, poljoprivreda svojim praksama uzgoja stoke, korištenjem gnojiva i promjenama u korištenju zemljišta također znatno utječe na ukupne emisije stakleničkih plinova. U kontekstu emisije stakleničkih plinova, građevinarstvo značajno doprinosi, s posebnim naglaskom na proizvodnju cementa. Proces proizvodnje cementa, koji uključuje kalcinaciju vapnenca, rezultira značajnim oslobađanjem ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) kao nusproizvoda.

Različiti sektori imali su različit doprinos emisiji stakleničkih plinova u zemljama Europske Unije u tijekom 2020. , 2021. , 2022. i u prvom tromjesječju 2023. godine kako je prikazano na slici 2. Svrha ovog grafa je vizualno prikazati kako su ekonomska aktivnost i emisije stakleničkih plinova povezane. Ekonomski sektori raspoređeni su po stupcima dok krivulja predstavlja bruto domaći proizvod (BDP) ostvaren u navedenom razdoblju. Najveći udio stakleničkih plinova tijekom prvog kvartala 2023.godine dolazi od kućanstava sa 24 %, proizvodnja doprinosi s 20 %, energetika s 19 %, dok poljoprivreda čini 13 % udjela. Ako se napravi usporedba s prvim kvartalom 2022. godine vidljivo je smanjenje emisija stakleničkih plinova unutar 5 od 9 sektora, a najveće smanjenje je zabilježeno u sektoru energetike za čak 12,3 %. Povećanje od 7,2 % zabilježeno je u sektoru prijevoza i skladištenja [7].



Slika 2. Emisije stakleničkih plinova (milijun tona CO<sub>2</sub> ekvivalenta) u EU po sektorima tijekom razdoblja od 1. kvartala 2020. godine do 1. kvartala 2023. godine [7]

Sunčevo kratkovalno zračenje, koje uključuje vidljivu svjetlost i ultraljubičasto zračenje, prolazi kroz atmosferu i dolazi do Zemljine površine. Kratkovalno zračenje ima veću energiju i kratke valne duljine te ima sposobnost prodiranja kroz atmosferu i dopiranja do površine Zemlje. Kada Zemljina površina apsorbira ovu energiju, zagrijava se i emitira dugovalno zračenje, poznato kao infracrveno zračenje. Staklenički plinovi poput vodene pare i ugljičnog dioksida, prisutni u atmosferi, apsorbiraju dio ovog dugovalnog zračenja što omogućuje zagrijavanje Zemljine površine [8].

Zagrijavanje Zemlje može rezultirati mnogobrojnim katastrofalnim posljedicama kao što su porast razine mora, ekstremni vremenski događaji, nestašica vode i prijetnje biodiverzitetu. Pustinje se kontinuirano šire, dok toplinski valovi i šumski požari postaju sve učestaliji. Porast temperature na Arktiku doprinosi otapanju permafrosta, povlačenju ledenjaka i smanjenju morskog leda. Također, više temperature potiču pojavu intenzivnijih oluja i drugih ekstremnih vremenskih događaja. Brze promjene u okolišu u planinskim područjima, koraljnim grebenima i Arktiku prisiljavaju mnoge vrste na selidbu ili čak prijeti njihovom izumiranju. Ovi utjecaji su već primjećeni na trenutačnim razinama globalnog zatopljenja, a dodatno zagrijavanje će samo pojačati ove posljedice, s mogućnošću izazivanja kritičnih prekretnica, poput otapanja grenlandskog ledenog pokrivača.

Prema procjeni Svjetske zdravstvene organizacije (WHO), očekuje se da će između 2030. i 2050. godine klimatske promjene prouzročiti dodatnih 250.000 smrtnih slučajeva godišnje, uglavnom zbog povećanog onečišćenja zraka i učestalijih toplinskih valova. Procijenili su smrtnost od izloženosti toplini kod starijih ljudi, povećanje broja oboljelih od dijareje, malarije, denga groznice, obalnih poplava i pothranjenosti u djetinjstvu. Procjenjuje se da će godišnje do 2050. godine umrijeti više od 500.000 odraslih osoba zbog ograničene dostupnosti i nedovoljne kvalitete hrane [9].

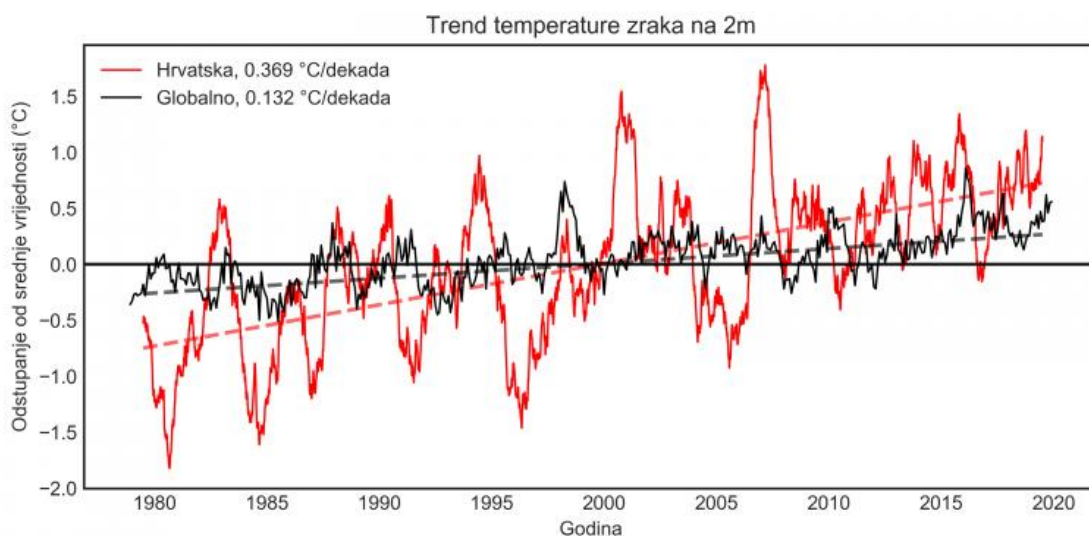
CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) predstavlja šestu fazu projekta međunarodne inicijative usmjerene analiziranju klimatskih promjena i pronalaženju rješenja za njihovu redukciju. Analizama provedenim unutar navedenog projekta predviđa se nastavak drastičnog trenda porasta temperatura na Europskom kopnu za čak 8,5 °C do 2100. godine. S obzirom na upozoravajuću situaciju i predviđeno pogoršanje iste, u prosincu 2015. potpisan je Pariški sporazum na Konferenciji Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama kojim nacije kolektivno dogovaraju da će nastojati zadržati porast globalne temperature ispod 2 °C. Dodatno, nastoji se ograničiti zagrijavanje na 1,5 °C što zahtijeva smanjenje emisija za polovicu do 2030. i postizanje neto nulte emisije do 2050. godine [10]. Sporazum je stupio na

snagu 4. lipnja 2016. godine nakon što ga je ratificiralo 55 zemalja koje proizvode 55 % emisija stakleničkih plinova, a neke od njih su Narodna Republika Kina, Sjedinjene Američke Države te Europska Unija. Pariški sporazum do danas podržalo je 197 stranaka što uključuje 196 zemalja i Europsku Uniju [11]. Povjerenik Europske unije za klimatske akcije je Frans Timmermans od 1. prosinca 2019. godine i njegov mandat kao Povjerenika za klimatske akcije obuhvaća ključnu ulogu u koordinaciji i provedbi politika usmjerenih na smanjenje emisije stakleničkih plinova donesenih Pariškim sporazumom, povećanje obnovljivih izvora energije, prilagodbu na klimatske promjene i promicanje održivog razvoja unutar Europske unije.

Radikalno smanjenje emisija zahtijeva prijelaz s uporabe fosilnih goriva na korištenje električne energije proizvedene iz ekološki prihvatljivih izvora. Ovo uključuje postupno zatvaranje elektrana koje koriste ugljen, značajno povećanje upotrebe vjetroelektrana, solarnih panela i drugih obnovljivih izvora energije, prelazak na električne automobile, primjenu toplinskih pumpi u zgradama i provedbu dodatnih mjera za energetska učinkovitost.

## 2.2. Klimatske promjene u Hrvatskoj

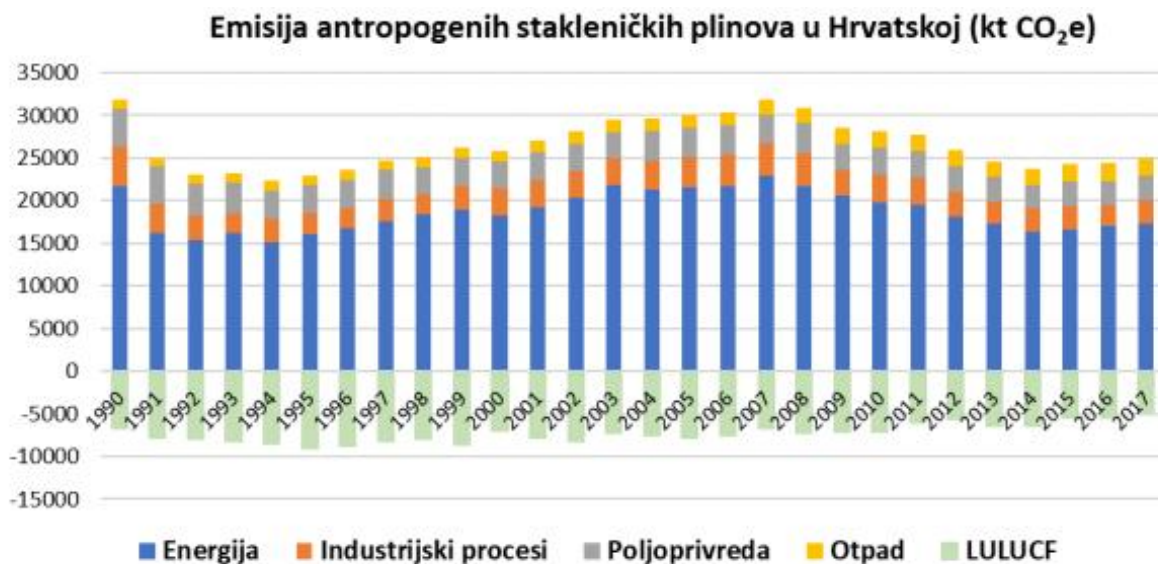
Hrvatska, smještena na jugoistoku Europe, ima raznoliku klimu koja je pod utjecajem njene geografske raznolikosti. Zbog toga u Hrvatskoj prevladavaju tri tipa klime, a to su: mediteranska klima na obali i otocima, kontinentalna klimu u unutrašnjosti i gorska klima u planinskim krajevima Hrvatske. S obzirom da se Hrvatska svrstava u zemlje Mediterana, bitan podatak je da prosječno odstupanje temperature od predindustrijskog doba iznosi  $1,54\text{ }^{\circ}\text{C}$  s tendencijom rasta do  $+2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  do 2040. godine [12].



Slika 3. Usporedba anomalija temperature u Hrvatskoj s anomalijama na globalnoj razini [13]

Na slici 3 prikazana je usporedba porasta temperature zraka na području Hrvatske (crvena krivulja) s porastom temperature zraka na globalnoj razini (crna krivulja). U Hrvatskoj se prosječni trend porasta temperature tijekom desetogodišnjeg razdoblja kreće oko 0,369 °C , dok je globalno gledano ta vrijednost nešto niža, 0,132 °C [13].

Podaci bilježeni u posljednjih 40 godina daju informaciju da se Hrvatska zagrijavala trostruko brže nego što je prosjek planeta [13]. Porast temperature rezultira klimatskim promjenama koje uzrokuju pojavu ekstremnih vremenskih uvjeta kao što su olujna nevremena i suše, poremećaj ravnoteže učestalosti i količine oborina tijekom godine, porast razine mora te poremećaj učestalosti pojava regionalnih ciklona, kao i povećanje broja i intenziteta šumskih požara. Kao i na globalnoj razini tako i u Hrvatskoj glavni krivac za nastanak klimatskih promjena je pojačani efekt staklenika prouzrokovan ljudskom djelatnošću.



Slika 4. Trend udjela sektora u emisiji stakleničkih plinova [14]

Na slici 4 prikazana je projekcija emisije stakleničkih plinova u razdoblju 1990.-2017. iz koje je vidljivo da značajan stvaratelj emisije čini transformacija energije na koju je 2017. godine otpadalo 69,5 % emisije stakleničkih plinova. U periodu od 1991. do 1994. godine Hrvatska je doživjela značajan pad gospodarske aktivnosti i potrošnje energije zbog ratnih događanja. Taj pad je rezultirao smanjenjem ukupnih emisija stakleničkih plinova u tom razdoblju. U razdoblju 1995.-2008. godine emisije stakleničkih plinova počinju rasti s godišnjom stopom od 3 %. Glavni razlog tome je sektor energetike, a dodatni prirast čine industrijski procesi i proizvodnja cementa, vapna, amonijaka, dušične kiseline te potrošnja halogeniranih ugljikovodika te sektor otpada [14]. Hrvatska sustavno mijenja strukturu

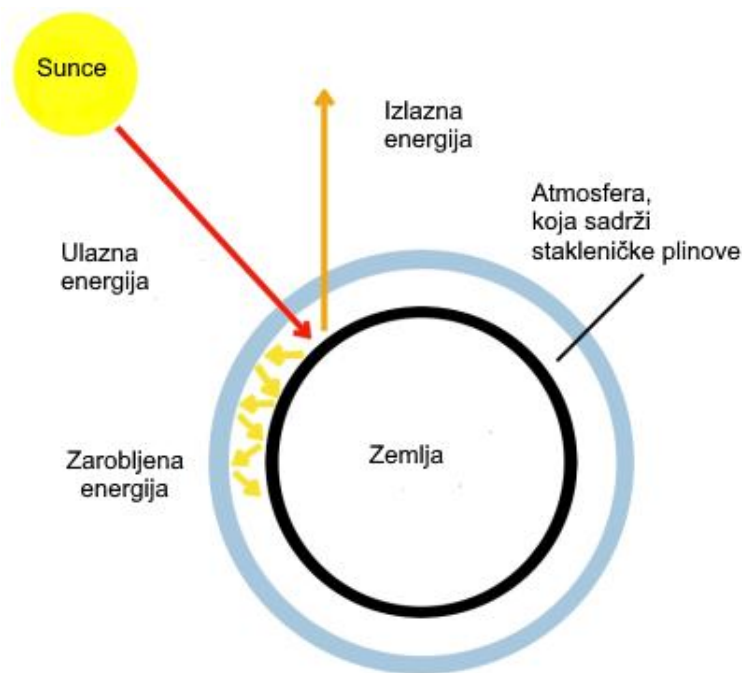
korištenih energenata za što se obvezala priključenjem Pariškom sporazumu 2017. godine. Kako bi ispunila uvjete potpisanog sporazuma mora nastojati smanjiti emisije stakleničkih plinova za 40 % do 2030. godine. Na to se u najvećem dijelu može utjecati prelaskom na obnovljive izvore energije za što Hrvatska ima ogroman potencijal, a što je detaljno prikazano u tablici 1. Prema tablici 1. tehnički potencijal energije sunca iznosi 8000 MW od čega 5300 MW otpada na fotonaponske elektrane, a 2700 MW na fotonaponske sustave na građevinama.

Tablica 1. Tehnički potencijal obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj [14]

OIE	Tehnički potencijal
Potencijal vodotoka-ukupno	3700-4250 MW
Veliki vodotoci ( velike HE > 10 MW)	3500-4000 MW
Mali vodotoci ( male HE < 10 MW)	200-250 MW
Energija vjetra-ukupno	7000-9000 MW
Energija sunca-ukupno	8000 MW
Energija sunca- FN elektrane	5300 MW
Energija sunca- FN sustavi na građevinama	2700 MW

### 2.3. Efekt staklenika

Ključni faktor koji potiče klimatske promjene je efekt staklenika. Pojedini plinovi u Zemljinoj atmosferi djeluju poput staklenika, zadržavajući toplinu od Sunca i sprječavajući je da se vrati u svemir. Ovaj proces rezultira globalnim zagrijavanjem. Kratkovalno zračenje od Sunca prolazi kroz atmosferu i dolazi do površine Zemlje. Kada se zrake Sunca apsorbiraju na površini, Zemlja se zagrijava, a zatim u ciklusu svog hlađenja emitira dugovalno infracrveno zračenje natrag prema atmosferi (Slika 5). Dio ovog infracrvenog zračenja prolazi kroz atmosferu i napušta planet, ali dio se apsorbira i ponovno emitira natrag prema površini [8].



Slika 5. Efekt staklenika [15]

Razlike u valnim duljinama zračenja koje dolaze od Sunca i Zemlje proizlaze iz njihovih različitih površinskih temperatura. Naime, Sunce ima površinsku temperaturu od otprilike 5500 °C (9900 °F), što rezultira emisijom većeg dijela svoje energije u obliku kratkovalnog zračenja u bliskom infracrvenom i vidljivom dijelu spektra, što uključuje i vidljivu svjetlost. [16].

Nasuprot tome, Zemljina površina ima mnogo nižu temperaturu, pa emitira dugovalno zračenje na srednjim i daleko infracrvenim valnim duljinama što se ponekad naziva toplinsko zračenje ili izračena toplina. Plin se klasificira kao staklenički plin ako apsorbira dugovalno zračenje. Važno je napomenuti da Zemljina atmosfera apsorbira samo oko 23% dolaznog kratkovalnog zračenja, dok značajno veći udio, otprilike 90%, apsorbira dugovalno zračenje koje emitira površina Zemlje. Ovo akumuliranje energije u atmosferi doprinosi zagrijavanju površine Zemlje. [17].

Prirodno se pojavljuje mnogo stakleničkih plinova, ali ljudske aktivnosti značajno povećavaju koncentraciju određenih plinova u atmosferi, posebice [18]:

- ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>)
- metan
- dušikov oksid
- fluorirani plinovi

Ljudske aktivnosti su najveći generator CO<sub>2</sub>-a, što ima značajan doprinos globalnom zatopljenju. Do 2020. godine, koncentracija ovog plina u atmosferi porasla je za 48 % u odnosu na razinu prije industrijske ere, koja datira prije 1750. godine. Iako i ostali staklenički plinovi proizlaze iz ljudskih aktivnosti, njihova emisija je znatno manja.

*“Metan je snažniji staklenički plin od CO<sub>2</sub>, ali ima kraći životni vijek u atmosferi. Dušikov oksid, poput CO<sub>2</sub>, dugotrajan je staklenički plin koji se nakuplja u atmosferi desetljećima do stoljeća. Zagađivači koji nisu staklenički plinovi, uključujući aerosole poput čađe, imaju različite učinke zagrijavanja i hlađenja te su također povezani s drugim problemima kao što je loša kvaliteta zraka.”*[10]

*“Prosječna površinska temperatura Zemlje bila bi oko -18 °C (-0,4 °F) bez efekta staklenika, u usporedbi sa Zemljinim prosjekom u 20. stoljeću od oko 14 °C (57 °F), ili novijim podacima s prosjekom oko 15 °C (59 °F). Osim prirodno prisutnih stakleničkih plinova, izgaranje fosilnih goriva povećalo je količinu ugljičnog dioksida i metana u atmosferi. Kao rezultat toga, globalno zagrijavanje od oko 1,2 °C (2,2 °F) dogodilo se od industrijske revolucije, s globalnom prosječnom površinskom temperaturom koja raste stopom od 0,18 °C (0,32 °F) po desetljeću od 1981. godine.”* [19]

### 3. SOLARNE ELEKTRANE I SOLARNA ENERGIJA

#### 3.1. Solarna energija

Potencijalna energetska kriza i pogoršanje ekološkog okoliša potiču svjetski glomazan razvoj obnovljive energije uključujući nove oblike energije, posebice solarnu energiju. Tradicionalna energija u ugljenu, nafti i prirodnom plinu nastala je iz drevnih fosila, te se ovi izvori energije zajednički nazivaju fosilnim gorivima. Kako svjetske potrebe za energijom nastavljaju rasti, fosilna goriva će u određenom trenutku također biti iscrpljena, te je potrebno pronaći nove oblike energije koji će zamijeniti tradicionalnu energiju. Solarna energija je čista obnovljiva energija s neusporedivom superiornošću mineralne energije.

Solarna elektrana je elektrana koja koristi sunčevu svjetlost za dobivanje energije. Sunce je središnja zvijezda u solarnom sustavu udaljena 150 milijuna kilometara od Zemlje kojoj putem elektromagnetnog zračenja odašilje energiju neophodnu za održavanje života. Održavanje ravnoteže unutar Sunčeve jezgre omogućuje proces nuklearne fuzije kojim dolazi do spajanja vodikovih atoma pod visokim tlakom i temperaturom čime nastaje helij. Prema aktualnim znanstvenim spoznajama očekuje se kontinuirani proces nuklearne fuzije u Sunčevoj jezgri tijekom sljedećih 5 milijardi godina što će omogućiti Sunčevoj svjetlosti da ostane neiscrpan i trajan izvor energije [20].

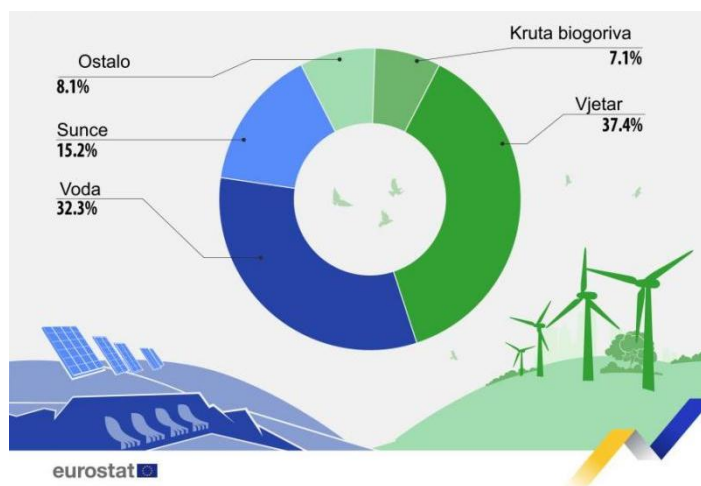


Slika 6. Godišnje sunčevo zračenje na površini zemlje u usporedbi sa zalihama fosilnih i nuklearnih goriva te godišnjom potrošnjom energije u svijetu [21]

Svake godine, Zemljina atmosfera, oceani i kopnene mase upijaju ogromnu količinu sunčeve energije, čiji se iznos procjenjuje na oko 3,850,000 eksadžula (EJ) [22]. Količina sunčeve energije koja dopire do Zemljine površine tijekom jedne godine dvostruko je veća od ukupne energije koju će čovječanstvo ikada dobiti iz svih ograničenih izvora kao što su nafta, ugljen, prirodni plin i iskopani uran zajedno (Slika 6.).



Solarna energija zauzima treće mjesto među vodećim tehnologijama za generiranje električne energije širom Svijeta, s doprinosom od 4,5 % ukupne globalne proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Kina je zemlja koja svojim potencijalom najznačajnije doprinosi rastu generiranja električne energije iz energetskih resursa koji se mogu neprestano obnovljati, točnije iz solarne energije. Zemlje Europske Unije doprinose ovom porastu ukupno 17 % [23]. Prema statističkim podacima Eurostata solarna energija na razini Europe čini 15 % proizvodnje električne energije, a prednjače joj vjetar i hidroelektrane čineći skoro dvije trećine ukupne proizvodnje električne energije kao što je prikazano na slici 7 [24]. Podaci se odnose samo na obnovljive izvore energije. Republika Hrvatska rangirana je na 26. mjestu po korištenju solarne energije na području Europske Unije, a prema statistikama u 2022. godini Sunčevom energijom proizvedeno je samo 0,43 % ukupno proizvedene električne energije [25].



Slika 7. Postotak obnovljivih izvora energije u bruto potrošnji električne energije, EU, 2021.

[24]

Iako solarna energija predstavlja ogroman potencijal kao obnovljiv izvor energije procjenjuje se da se samo 1 % koristi za proizvodnju električne energije. Budući da je solarna energija prepoznata kao ekološki prihvatljivija alternativa neobnovljivim izvorima energije, važno je posvetiti značajnu pozornost povećanju iskorištenosti njenih potencijala. Aktivno istraživanje i implementacija obnovljivih tehnologija, posebice solarne energije, osigurat će održivo korištenje energetskih resursa čime se pridonosi zaštiti okoliša, smanjenju emisije stakleničkih plinova i osiguranju održive energetske budućnosti za društvo i planetu.

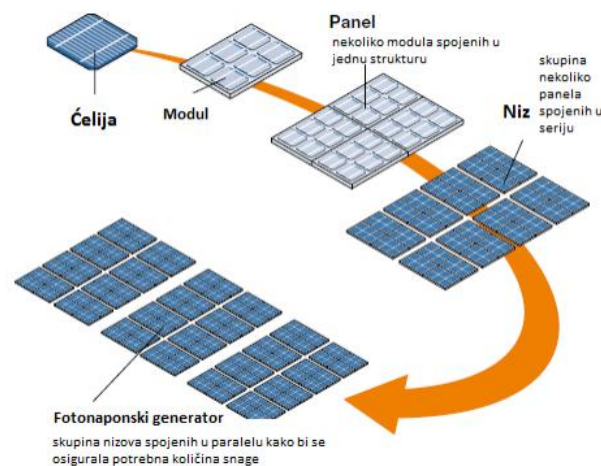
Uz navedene ekološke prednosti bitno je spomenuti minimalne negativne učinke na okoliš. Solarni paneli proizvode se od poluvodičkih metala uz korištenje raznih kemikalija što otvara mogućnost zagađenja okoliša i otežava samu mogućnost recikliranja materijala. Uglavnom

zauzimaju velike zemljišne površine što potencijalno može ugroziti staništa za mnogobrojne biljne i životinjske vrste. Iako solarne elektrane na direktan način ne pospješuju emisije stakleničkih plinova, otvorena je opcija njihovog indirektnog doprinosa zbog potrebe za njihovim transportom koji uglavnom generira stakleničke plinove.

Primjenom naprednih metoda solarna energija može se transformirati u druge korisne oblike energije kao što su toplinska i električna energija. Transformacija solarne energije u toplinsku odvija se pomoću solarnih termalnih kolektora koji apsorbiraju sunčevu svjetlost i pretvaraju ju u toplinsku. Uz to, solarna energija se može efikasno transformirati pomoću fotonaponskih sustava čime se ostvaruje najučinkovitija pretvorba solarne energije u praktično iskoristivu električnu energiju.

### 3.2. Pojam solarnih panela

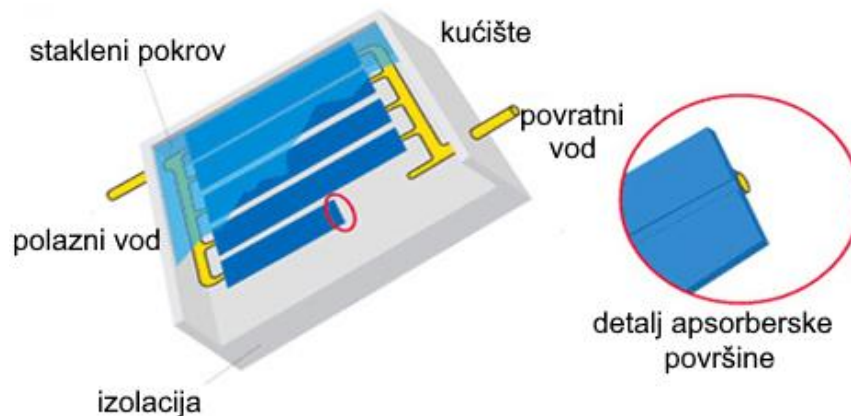
Solarni paneli ili solarni kolektori su toplinski uređaji koji apsorbiraju sunčevu svjetlost i toplinu, te je putem tekućina prenose u kotlove, akumulatore ili izmjenjivače topline. Ovaj aranžman omogućuje grijanje sanitarne vode, vode za centralno grijanje i vode u bazenu. Solarni paneli su konstruirani od solarnih modula čija je osnovna jedinica solarna ćelija napravljena od poluvodičkog materijala, obično silicija [26]. Kapacitet električne energije koju modul može stvoriti ovisi o intenzitetu sunčeva zračenja u konkretnom trenutku, kao i usmjerenju i nagibu modula. Paneli nastali spajanjem modula mogu se spajati serijski, paralelno ili kombinirano, ovisno o tome želi li se dobiti maksimalni napon ili struju (Slika 8.) [26]. Primjene solarnih panela obuhvaćaju širok spektar područja, uključujući stambene objekte, komercijalne komplekse, industrijske postrojenja te čak svemirske letjelice.



Slika 8. Solarni panel [27]

### 3.2.1. Pločasti kolektori

Obloženi ili ravni kolektori su konstruktivno jednostavniji, ekonomičniji i široko rasprostranjeni. Oni efikasnije apsorbiraju direktno sunčevo zračenje, smanjujući raspršeno zračenje. Kvaliteta ovih panela očituje se u maksimalnoj iskorištenosti direktno primljene sunčeve energije, pretvarajući je u toplinu uz minimalne gubitke i što manje toplinsko zračenje u okoliš [28].

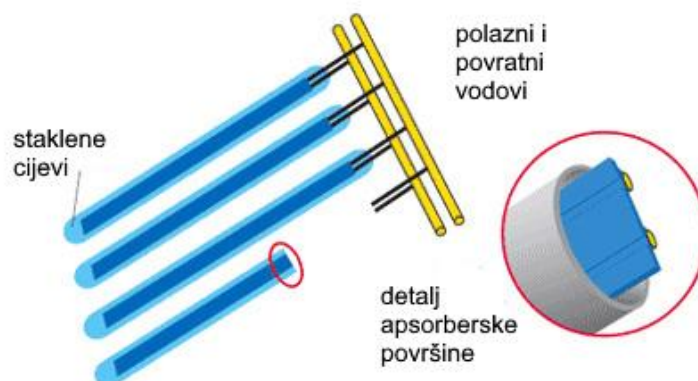


Slika 9. Pločasti kolektor [29]

Pločasti paneli imaju pravokutan oblik i putem staklene površine sa smanjenim refleksijama prikupljaju toplinsku energiju sunca (Slika 9.). Ova energija se zatim prenosi do odgovarajućih uređaja-trošila, pomoću regulatora napona (regulatora napona baterije) i invertera (pretvarača napona s 12 V na 220 V). Drugim riječima, ovaj način prikupljanja prirodne energije omogućava pohranu i pretvaranje prema korisničkim potrebama. Unutarnji apsorber može biti izrađen s selektivnom površinom, koja apsorbira refleksije i infracrvene zrake, ili s neselektivnom površinom s malo nižom efikasnošću, kada je kolektor jednostavno obojen crnom bojom koja apsorbira svjetlost [29].

### 3.2.2. Kolektori s vakuumskim cijevima

Solarni kolektori s vakuumskim cijevima rade na principu prolaska sunčevog zračenja kroz vakuumski prostor u kojem se nalazi apsorber s cijevima (Slika 10.). Ovaj dizajn smanjuje gubitke energije i povećava efikasnost kolektora [29]. Unatoč višim troškovima, za razliku od pločastih kolektora koji postižu temperaturu zagrijavanja do 100 °C, ovdje se postižu temperature do čak 200 °C [30]. Kolektori s vakuumskim cijevima posebno su korisni u područjima s oblačnim vremenom.



Slika 10. Kolektor s vakuumskom cijevi [29]

Također postoje fotonaponski solarni kolektori koji se koriste za generiranje električne energije. Oni su korisni u situacijama gdje nije moguće osigurati konvencionalno napajanje električnom energijom. Njihova instalacija je financijski zahtjevna (2,95 €/W) [31]. Solarni paneli se obično proizvode s naponom od 12 V do 48 V i snagom od 2 W do 280 W [32]. Ovi paneli predstavljaju optimalno rješenje za lokacije gdje je klasična elektroenergetska opskrba teška ili nemoguća te pružaju dugoročno besplatno korištenje energije, s izuzetkom povremenih zamjena baterija (kao u slučaju automobila). Ovisno o proizvodnoj tehnologiji, solarni paneli mogu biti klasificirani na sljedeće načine [33]:

- Amorfni
- Monokristalni
- Polikristalni

### 3.3. Vrste panela prema tehnologiji proizvodnje

#### 3.3.1. Amorfni paneli

D.E.Carlson je 1974. godine u SAD-u stvorio prvotnu ćeliju za solarnu energiju koristeći amorfni silicij. Prva komercijalna a-Si solarna ćelija se pojavila 1980. godine s učinkovitošću od 3 % [34]. Amorfni silicij predstavlja poseban oblik silicija koji ne posjeduje regularnu kristalnu strukturu, što ga čini prikladnim za primjene u fotonaponskim uređajima. Često nalaze primjenu u situacijama gdje je ključna fleksibilnost panela, kao što su fleksibilni solarni paneli za integraciju u različite oblike i površine. Također se koriste u uređajima kao što su solarni satovi ili punjive baterije. Unatoč tome što imaju manju efikasnost u usporedbi s određenim drugim tipovima fotonaponskih ćelija (poput kristalnih silicijskih ćelija), amorfne

ćelije posjeduju prednosti kao što su niži troškovi proizvodnje i sposobnost prilagodbe obliku [35]

### **3.3.2. Monokristalni paneli**

Glavna prednost solarne ćelije izrađene od monokristalnog silicija je visoka učinkovitost. Učinkovitost komercijalnih monokristalnih ćelija je oko 15 %, a učinkovitost laboratorijskih oko 24 %. Neki svjetski proizvođači solarnih ćelija danas proizvode monokristalne silikonske ćelije s učinkovitošću od 17 %. Prednosti upotrebe amorfnog silicija za izradu solarnih ćelija naspram monokristalnog silicija su kako slijedi [35]:

-Amorfni silicij ima veći faktor apsorpcije sunčeve svjetlosti u usporedbi s monokristalnim silicijem

-Za izradu solarnih ćelija od amorfnog silicija potrebna je značajno manja količina materijala u usporedbi s monokristalnim silicijem.

Usporedba solarnih ćelija od amorfnog silicija s onima od monokristalnog i polikristalnog silicija pokazuje sljedeće razlike:

-Amorfne silicijske solarne ćelije imaju nešto nižu učinkovitost (5 % - 7 %) u usporedbi s učinkovitošću polikristalnih i monokristalnih silicijskih solarnih ćelija

-Tijekom dugotrajne izloženosti svjetlu, dolazi do određenog pogoršanja optičkih i električnih karakteristika amorfnih silicijskih solarnih ćelija.

### **3.3.3. Polikristalni paneli**

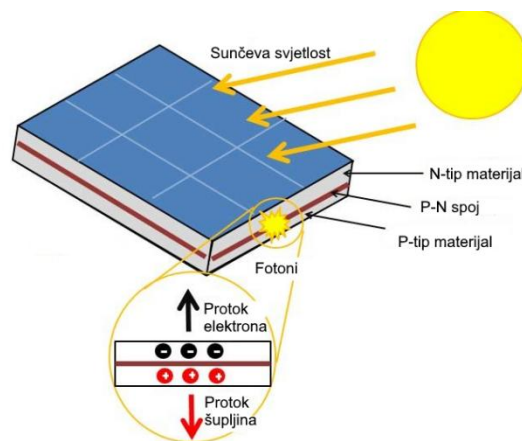
Solarne ćelije od polikristalnog silicija imaju učinkovitost od 14 %, a laboratorijske oko 18 %. Neki proizvođači solarnih ćelija proizvode ih s učinkovitošću od 17 % [36]. Moduli sa solarnim ćelijama izrađenim od polikristalnog silicija dolaze u različitim tonovima plave i sive boje. Solarne ćelije od polikristalnog silicija vizualno podsjećaju na naslikane slike.

Očekivano trajanje solarnih ćelija izrađenih od polikristalnog silicija iznosi otprilike dvadeset godina [37]. Solarne ćelije izrađene od polikristalnog silicija predstavljaju vodeći proizvod na tržištu solarnih ćelija i proizvode ih mnogi proizvođači.

## 3.4. Pojam fotonaponskih elektrana

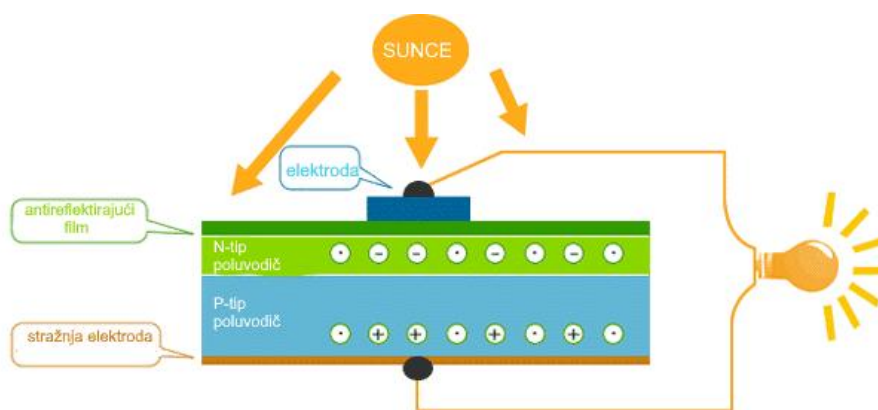
### 3.4.1. Koncept fotonaponske elektrane

Solarna fotonaponska elektrana predstavlja postrojenje u kojem se solarna energija kao obnovljiv i neiscrpan izvor energije pretvara u koristan oblik energije odnosno u električnu energiju koja primjenu pronalazi u različitim područjima ljudskog života te industriji. Za direktnu transformaciju sunčeve svjetlosti u električnu energiju primjenjuju se fotonaponske ćelije najčešće izrađene od silicija ili drugih poluvodiča. Alexandre Edmond Becquerel je 1839. godine otkrio fotonaponsku proizvodnju istosmjerne električne struje u poluvodičkom materijalu, time otvarajući vrata temeljnoj metodi funkcioniranja fotonaponskih sustava za generiranje električne energije iz Sunčevog zračenja. Njegovo otkriće potkrijepljeno je pokusom u kojem dvije ploče zlata ili platine uronjene u lužnatu, neutralnu ili kiselu otopinu istodobno podvrgnute nejednolikom Sunčevom zračenju generiraju električnu struju procesom nazvanim fotonaponski efekt (Slika 11.) [22].



Slika 11. Fotonaponski efekt solarnog panela [38]

Tek 1883. godine američki izumitelj Charles Fritts izrađuje prvu solarnu ćeliju s učinkovitošću od 1 %. Tijekom vremena, brojni znanstvenici su postepeno napredovali razvijajući solarne ćelije veće učinkovitosti i na koncu iznimno učinkovitu solarnu ćeliju lansiraju Daryl, Chapin, Calvin Souther Fuller i Gerald Pearson 1954. godine [39]. Zbog relativno visokih investicijskih cijena solarne ćelije isprva pronalaze svoju primjenu isključivo u svrhu istraživanja svemira. Poboljšanjem tehnologije proizvodnje solarnih ćelija i njihova cijena se ekstremno snizila te one pronalaze širu primjenu.



Slika 12. Shematski prikaz fotonaponske ćelije [40]

Na slici 12 prikazan je poluvodički uređaj koji se naziva fotonaponska ćelija, a može biti izrađen od monokristalnog, polikristalnog ili amornog silicija ili drugih tankoslojnih poluvodičkih materijala. Ćelije izrađene od monokristalnog silicija dobivene su iz jednog kristala čistog silicija i postižu maksimalnu učinkovitost, u prosjeku između 18 % i 20 %. Oni od polikristalnog silicija izrađeni su u blokovima od nekoliko kristala, pa su jeftiniji i imaju prosječnu učinkovitost između 16 % i 17,5 %. Konačno, oni izrađeni od amornog silicija imaju neuređenu kristalnu mrežu, što dovodi do niže učinkovitosti (prosječna učinkovitost između 8 % i 9 %), ali i niže cijene [35].

Čisti silicij kao poluvodič nema svojstvo dobre provodljivosti električne energije zbog čega se u njegovu kristalnu rešetku dodaju atomi fosfora kako bi se stvorila slobodna mjesta za elektrone. Navedeni proces rezultira proizvodnjom silicija s nečistoćama, a naziva se dopovanje. Na ovaj način prilikom dovođenja topline potiče se oslobađanje elektrona odnosno nosioca naboja koji se slobodno kreću kristalnom rešetkom tragajući za slobodnim mjestom te na taj način prenose električnu energiju [41].

Navedeni proces olakšava objašnjenje modela silicijeve solarne ćelije (Slika 12). Vanjski sloj solarne fotonaponske ćelije čini zaštitno staklo s ulogom zaštite od vanjskih utjecaja ispod kojeg se nalazi antirefleksivni film koji sprječava odbijanje svjetlosti te na taj način povećava učinkovitost solarne ćelije. Ključan dio solarne ćelije čini PN-spoj koji nastaje kombinacijom N-tipa silicija odnosno negativnog silicija koji sadrži slobodne elektrone te P-tipa silicija koji ima šupljine. Sunce kao ogroman izvor svjetlosti šalje svoju energiju u obliku fotona koji udarom u fotonaponsku ćeliju imaju tendenciju prijenosa svoje energije poluvodiču. Rezultat toga je oslobađanje elektrona koji se kreću prema N-strani spoja te stvaranja šupljina koji se kreću prema P-strani spoja. Rezultat ovog procesa jest stvaranje

električnog napona koji će omogućiti protok struje kroz vanjsko trošilo spojeno na solarnu ćeliju [42].

S obzirom da je izlazna energija solarno fotonaponskih sustava poprilično mala oni se najčešće povezuju serijski ili paralelno kako bi se povećao ukupan dobitak električne energije. Navedenim procesom dobije se fotonaponski modul koji se dalje međusobno mogu spojiti u fotonaponski panel kojeg karakterizira znatno veća snaga, a samim time i intezivnija proizvodnja električne energije [43].

### 3.4.2. Klasifikacija fotonaponskih sustava

Postoje različiti načini klasifikacije fotonaponskih sustava, temeljeni na raznim kriterijima [44]:

#### 1. Prema svrsi:

- Fotonaponski sustavi za stambene objekte: sustavi instalirani na stambenim zgradama i kućama kako bi osigurali dovoljno električne energije za potrošnju u kućanstvu.
- Fotonaponski sustavi za komercijalne objekte: postavljaju se na poslovnim i komercijalnim zgradama s ciljem smanjenja troškova električne energije
- Fotonaponski sustavi za industrijske svrhe: riječ je o većim sustavima koji opskrbljuju električnom energijom industrijske pogone
- Solarne elektrane: obimni fotonaponski sustavi čija je svrha generiranje električne energije u velikim razmjerima te se povezuju s elektroenergetskom mrežom.

#### 2. Prema konfiguraciji:

- Niskonaponski sustavi: često se postavljaju na stambenim i manjim komercijalnim zgradama te su uobičajeno neovisni o elektroenergetskoj mreži.
- Visokonaponski sustavi: često su primjenjivani u komercijalnim i industrijskim kontekstima te su često povezani s elektroenergetskom mrežom

#### 3. Prema načinu povezivanja na mrežu (Slika 13.) [22]:

- Samostalni sustavi (*off-grid*): sustavi nisu povezani s elektroenergetskom mrežom i koriste se za proizvodnju energije u udaljenim područjima gdje nedostaje pristup javnoj mreži.



-Sustavi priključeni na mrežu (*grid-connected*): sustavi su integrirani u elektroenergetsku mrežu, što omogućava i stvaranje viška električne energije koja se može prodati operatorima elektroenergetske mreže.

#### 4. Prema orijentaciji i nagibu panela:

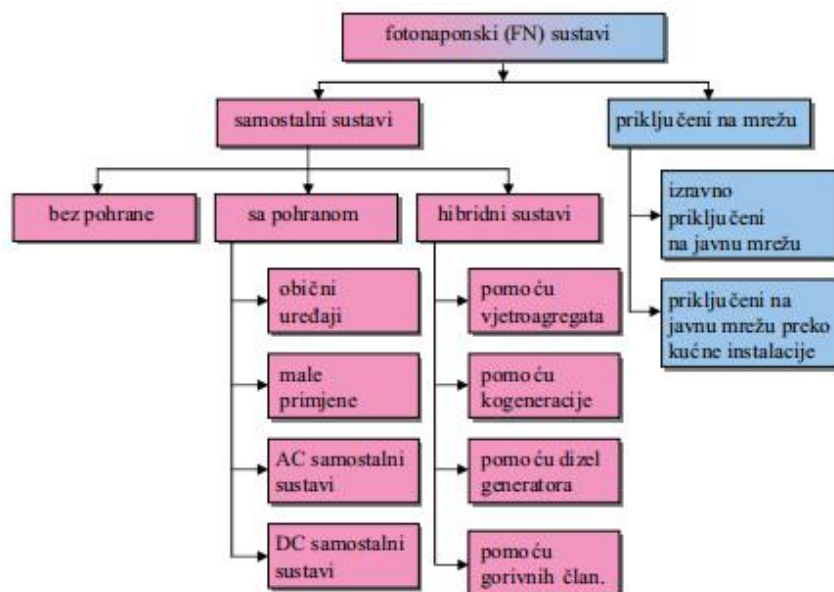
-Fiksni nagibi: paneli su nepomično montirani pod preciznim kutem i usmjerenjem prema suncu.

-Pratitelji sunca (*solar trackers*):sustavi prate sunčevo kretanje i prilagođavaju poziciju panela kako bi maksimizirali iskorištavanje sunčeve svjetlosti tokom dana.

#### 5. Prema vrsti instalacije:

-Krovni sustavi: paneli instalirani na krovovima zgrada

-Tlačni sustavi: paneli su postavljeni na zemlji, često koristeći okvire ili potpore kao potporu.



Slika 13. Klasifikacija fotonaponskih sustava [22]

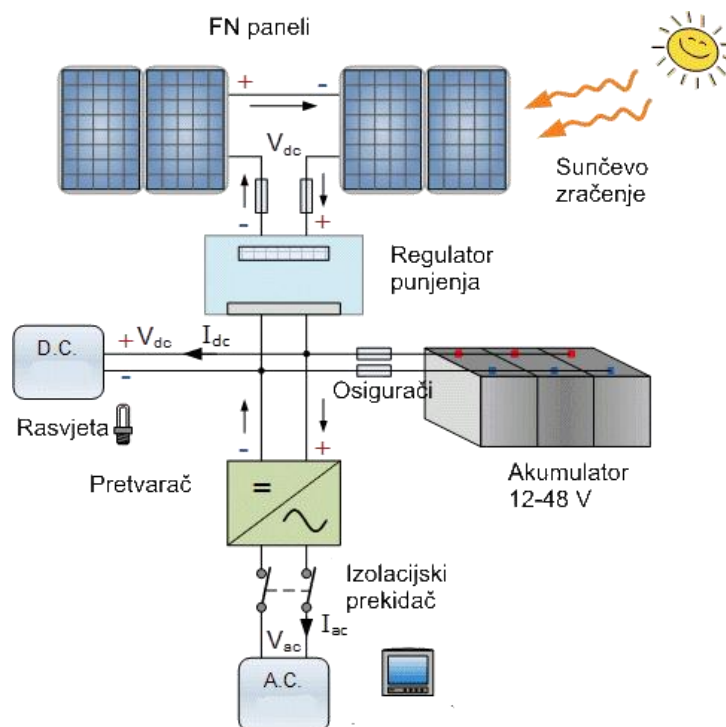
### 3.4.3. Samostalni fotonaponski sustavi

Samostalni fotonaponski sustavi su izolirani autonomni sustavi koji funkcioniraju neovisno o elektroenergetskoj mreži. U pravilu su koncipirani na način da teže ostvarenju maksimalnog energetskeg izlaza. Dobro su rješenje na područjima slabe pokrivenosti elektroenergetskom mrežom ili na područjima na kojima nije praktično primjeniti drugi oblik

napajanja, a razlikujemo samostalne sustave bez pohrane, s pohranom te one izvedene u obliku hibridnih sustava [22].

Osnovni dijelovi samostalnih solarnih fotonaponskih sustava su (Slika 14.) [22]:

- a) Fotonaponski moduli
- b) Regulator punjenja
- c) Akumulator
- d) Trošila
- e) Izmjenjivač



Slika 14. Samostalni solarni fotonaponski sustav [45]

Fotonaponski modul ključna je komponenta samostalnog fotonaponskog sustava. Fotonaponski moduli postavljaju se na mjesta izravno izložena suncu kako bi sa što većom učinkovitošću apsorbirali fotone iz sunčeve svjetlosti potrebne za stvaranje električne energije koja se skladišti u baterije kako bi se mogla upotrijebiti preko noći.

Punjenje baterija kontrolira se pomoću regulatora punjenja. Primarna funkcija mu je zaštita baterije od prekomjernog punjenja, prekomjernog pražnjenja i drugih štetnih utjecaja na bateriju s ciljem produženja njezinog vijeka.

Regulatore prema načinu punjenja može se podijeliti na [22] :

- a) Regulatore s konstantnim punjenjem koji osiguravaju konstantan protok električne struje prema baterijama bez obzira na varijacije napona, a mogu biti:
  - Linearni regulatori
  - Pulsno širinski regulator
- b) Regulatore s cikličkim punjenjem (*on-off*) koji su usmjereni na potpuno punjenje baterija odnosno punjenje je aktivno do trenutka u kojem se ostvari napon punog akumulatora.

Pulsno-širinska modulacija PWM (*Pulse Width Modulation*) i regulator s maksimalnom točkom snage su dva ključna tipa regulatora koji se koriste u samostalnim fotonaponskim sustavima. Osnovna svrha PWM regulatora je održavati stabilan napon punjenja kako bi se spriječilo prenapunjenje akumulatora. U ovom postupku, PWM regulator periodički prekida i pušta struju iz solarnih panela prema akumulatoru, održavajući prosječan napon jednak željenoj razini punjenja. Kada se postigne željena razina napunjenosti, PWM regulator održava pulsiranje struje kako bi se održala stabilnost naboja akumulatora [46]. S druge strane, regulator s maksimalnom točkom snage (MPPT) predstavlja sofisticiraniju tehnologiju koja omogućuje optimalno korištenje energije iz solarnih panela. MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) regulator prati i analizira napon i struju koja dolazi iz solarnih panela te prilagođava svoje radne parametre kako bi postigao maksimalnu snagu koja se može izvući iz panela u datim uvjetima. Ova tehnologija posebno dolazi do izražaja u uvjetima niske svjetlosti ili kada su solarni paneli izloženi sjeni, gdje PWM regulatori ne bi bili tako učinkoviti. MPPT regulator optimizira napon i struju kako bi se postigla najveća snaga koja se može isporučiti akumulatoru, čime se postiže značajna energetska učinkovitost i povećava ukupna proizvodnja električne energije iz solarnog sustava [47].

U samostalnim solarnim elektranama, akumulatori imaju ključnu ulogu u akumuliranju viška električne energije koju proizvode solarni paneli tijekom sunčanih razdoblja. Ovaj proces omogućuje pohranjivanje energije za kasniju upotrebu, osobito kada solarni paneli nisu u mogućnosti generirati potrebne količine električne energije, kao što se događa tijekom noći ili kad su dani oblačni. Kroz ovu sposobnost akumulatora, osigurava se kontinuirana opskrba električnom energijom te neovisnost sustava od javne elektroenergetske mreže [22].

Postoje brojni ograničavajući faktori koji utječu na trajnost akumulatora, a to su [22]:

- Mehanička oštećenja
- Previsok napon

- Prenizak napon
- Sulfatizacija baterije
- Prežnjenje baterije
- Temperatura baterije

Hibridni fotonaponski sistem nastaje spajanjem nezavisnog fotonaponskog sistema s dodatnim obnovljivim izvorima električne energije kao što su vjetroagregat, kogeneracija ili dizel i plinski generatori [22]. U ovakvom sustavu, električna energija koja dolazi iz fotonaponskih modula ili drugih izvora energije koristi se prvenstveno za napajanje trošila. Višak proizvedene energije skladišti se u akumulatorske baterije kako bi se osigurala neprekidna opskrba električnom energijom i kada solarni paneli ili drugi obnovljivi izvori nisu u mogućnosti generirati dovoljno energije (npr. tijekom noći ili razdoblja niske ozračenosti). Kada nedostaje adekvatna sunčeva svjetlost ili drugi obnovljivi izvori za generiranje električne energije, akumulatorske baterije preuzimaju ulogu snabdjevanja potrošača energijom. Međutim, ako se kapacitet akumulatora isprazni i ako nije moguće osigurati dovoljno energije iz obnovljivih izvora, tada se aktivira dizel agregat ili plinski agregat kako bi pružio dodatnu električnu energiju potrebnu za pogon trošila [48].

Cilj hibridnog fotonaponskog sustava je iskoristiti prednosti obnovljivih izvora energije i osigurati pouzdanu opskrbu električnom energijom tijekom cijelog vremena. Kada je dostupno dovoljno sunčeve svjetlosti ili drugih obnovljivih izvora, primarna opskrba dolazi iz tih izvora, a dodatna energija se akumulira u akumulatorske baterije za korištenje kada nema dovoljno energije iz tih izvora. Ako se akumulatorske baterije isprazne, sustav koristi dizel ili plinski agregat kako bi osigurao kontinuiranu opskrbu električnom energijom. Projektiranje hibridnih fotonaponskih sustava odgovara na potrebu za fleksibilnošću i učinkovitosti u korištenju obnovljivih izvora energije, čime se osigurava energetska neovisnost i smanjuju emisije stakleničkih plinova [48].

#### **3.4.4. Fotonaponski sustavi spojeni na mrežu**

Razlikujemo fotonaponske sustave izravno spojene na javnu mrežu te one spojene preko kućne instalacije. Fotonaponski sustav izravno povezan na javnu elektroenergetsku mrežu

("on-grid" ili "grid-connected") omogućuje proizvodnju i izravnu distribuciju solarne energije u elektroenergetsku mrežu bez potrebe za baterijama ili sustavima za pohranu energije. Fotonaponski sustavi koji su povezani s javnom elektroenergetskom mrežom preko kućne instalacije čine segment distribuirane proizvodnje električne energije te su obično spojeni na niskonaponski nivo elektroenergetskog sustava [22].

Osnovne komponente fotonaponskog sustava priključenog na javnu mrežu preko kućne instalacije su [22]:

- fotonaponski moduli
- spojna kutija sa zaštitnom opremom
- kablovi istosmjernog razvoda
- glavna sklopka za odvajanje
- izmjenjivač
- kablovi izmjeničnog razvoda
- brojila predane i preuzete električne energije.

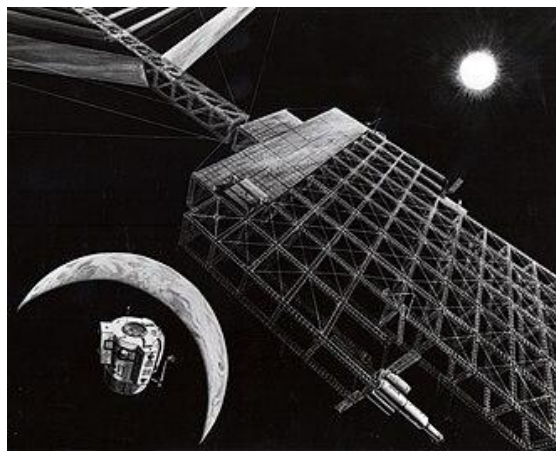
Kućna instalacija omogućuje povezivanje fotonaponskog sustava s električnom mrežom koja opskrbljuje kućanstva i industriju. Kada fotonaponski sustav proizvodi više električne energije od trenutnih potreba potrošača u kući, višak energije se šalje natrag u elektroenergetsku mrežu. Ovaj proces se naziva neto mjerenje (engl. *net metering*) i omogućuje vlasniku fotonaponskog sustava da prodaje višak proizvedene energije elektroenergetskoj tvrtki [49]. Spoj fotonaponskog sustava na kućnu instalaciju i javnu elektroenergetsku mrežu pruža brojne prednosti. Primarno, vlasnici sustava mogu smanjiti svoje račune za električnu energiju jer koriste besplatnu i obnovljivu energiju sunčeve svjetlosti. Također, proizvodnja električne energije iz fotonaponskog sustava smanjuje potrebu za tradicionalnim izvorima energije koji proizvode emisije stakleničkih plinova, što pomaže u borbi protiv klimatskih promjena.

### **3.5. Zanimljivi primjeri specifičnih solarnih elektrana**

#### **3.5.1. Orbitalna elektrana**

Sunčeve zrake u svemiru nisu ometane oblacima i atmosferskim utjecajima što stvara idealno područje za iskorištavanje Sunčeve energije pomoću solarnih svemirskih elektrana. Stoga, sunčeva radijacija u orbiti doseže intenzitet koji je oko 144 % veći od maksimalnog

intenziteta koji se može doseći na površini Zemlje. Konkretni planovi za ostvaranje ove ideje javljaju se 70-ih godina prošlog stoljeća kada NASA zajedničkim snagama s Odjelom za energiju organizira Program razvoja i evaluacije koncepta satelitskih elektroenergetskih sustava što predstavlja najveću studiju do sada (Slika 15.) [50]. Energija proizvedena u orbitalnoj solarnoj elektrani može se prenositi na Zemlju putem tehnika bežičnog prijenosa, poput mikrovalova ili laserskog zračenja. Solarni paneli u svemiru generiraju električnu energiju koja se pretvara u mikrovalove ili laserske zrake usmjereni prema Zemlji. Prijemnici na Zemlji zatim konvertiraju primljene signale natrag u električnu energiju, omogućavajući potencijalno efikasan prijenos svemirske energije za upotrebu na Zemlji [51].



Slika 15. NASA-in koncept orbitalne elektrane [52]

Jedna od ključnih prednosti orbitalnih elektrana je odsutnost izmjena dana i noći u svemiru. Sateliti u orbiti mogu biti osvijetljeni veći dio vremena, više od 99 %, i samo maksimalno 72 minute tijekom noći na proljetnom i jesenskom ekvinociju budu unutar Zemljine sjene. Ova svojstva omogućuju tim satelitima da budu kontinuirano izloženi snažnom sunčevom zračenju tijekom cijelog dana i noći, za razliku od solarnih panela na Zemlji koji trenutno prosječno sakupljaju energiju samo tijekom 29 % vremena [53]. Još jedna prednost je fleksibilnost u preusmjeravanju snage. Satelit za prikupljanje energije iz svemira ima sposobnost efikasnog preusmjeravanja snage tamo gdje je najpotrebnija. To omogućuje bolje upravljanje i prilagodbu isporuke energije prema potrebama različitih područja. Osim toga, velike primjene orbitalnih elektrana mogu imati pozitivan učinak na smanjenje ulaznog sunčevog zračenja na površinu Zemlje, posebno na nižim nadmorskim visinama. Takav efekt bi mogao biti od velike koristi za suzbijanje posljedica globalnog zatopljenja i smanjenje negativnih utjecaja klimatskih promjena. Glavna prepreka na koju nailazi ovaj koncept su veliki investicijski troškovi koje ovakav projekt zahtijeva. Osim toga,

okolina svemira negativno utječe na materijal satelitskih panela što bi zahtijevalo skupo održavanje. Napredak u tehnologiji i daljnja istraživanja u ovom području mogli bi dovesti do ostvarenja ovog inovativnog koncepta i revolucionizirati način na koji se koristi sunčevu energiju za ljudske potrebe [51].

### 3.5.2. Primjer fotonaponske elektrane Francisco Pizarro

Francisco Pizarro predstavlja projekt fotonaponske elektrane instalirane snage 590 MW smještene između regija Aldeacentenera i Torrecillas de la Tiesa u Španjolskoj te zauzima površinu od 1.300 hektara (Slika 16.). Solarni paneli dimenzija 991 mm x 956 mm izrađeni su od polikristalnog silicija. Sa svojih 1,5 milijun postavljenih solarnih modula ima mogućnost napajanja električnom energijom za čak 335.000 domova. Investicijom vrijednom 300 milijuna eura postići će se smanjenje emisije ugljikovog dioksida za 245.000 tona po godini. Unutar ovog projekta, planira se izgradnja električne podstanice na prostoru od 5,67 hektara, koja će uključivati dvije transformatorske stanice napona 30/400 kV [54]. Tijekom realizacije projekta posebna pažnja pridavala se zaštiti okoliša i kulturne baštine. Prilikom istraživanja pronađeno je dvadesetak stijena s umjetničkim tragovima te čak tri arheološka nalazišta koja su analizom svrstana u doba antike i srednjeg vijeka. Navedene lokacije su detaljno kontrolirane, istražene te na adekvatan način zaštićene od mogućih posljedica projekta. Također, u cilju zaštite okoliša poduzete su mjere kojima se sprječava ugrožavanje postojećih ekosustava i staništa na tom području. Stvoreni su posebni uvjeti za uzgoj zečeva, postavljena su gnijezda i osigurala se hrana za ptice, a posebna pažnja dana je stepskim pticama. S obzirom da ovaj projekt zauzima pozamašnu površinu, postrojenje je sjedinjeno s okolišem kako bi se zemljište moglo iskoristiti za razvoj ovčarstva [55].



Slika 16. Francisco Pizarro fotonaponska elektrana [56]

### 3.5.3. Solarne elektrane u Hrvatskoj

HEP-ova solarna elektrana Obrovac smještena na sjeveru Dalmacije u Zadarskoj županiji predstavlja najveću solarnu elektranu u Hrvatskoj. Solarna elektrana Obrovac ima mogućnost opskrbljivanja 3.500 kućanstava s instaliranom snagom od 8,7 MW. Sa svojih 27.544 fotonaponskih modula zauzima prostor od 117.137 m<sup>2</sup> (Slika 17.). Prognozirana godišnja proizvodnja energije je 11,3 milijuna kWh. Projekt je bio vrijedan 6,9 milijuna kuna, a predstavlja dio razvojne strategije Hrvatske do 2030. godine. Solarna elektrana je započela s proizvodnjom električne energije u svibnju 2023 [57].



Slika 17. Solarna elektrana Obrovac [58]

Uskoro puštanje u pogon elektrane SE Dubrava priključne snage 9,9 MW, postaviti će elektranu Obrovac na drugo mjesto među najvećim solarnim elektranama u Hrvatskoj. Ova elektrana, smještena u Međimurju, uz rijeku Dravu, prostire se na impozantnih 17,6 hektara, što je čini vodećom među sličnim postrojenjima u Hrvatskoj, kako po veličini tako i po važnosti (Slika 18). Sastavljena je od 23.114 fotonaponskih modula, a snaga svakog iznosi 12,36 MW. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije cilja iznositi 14 GWh. Električna energija koja se proizvede u elektrani prvo se prenosi u objekt trafostanice na visokoj naponskoj razini od 35 kV. Provode se daljnje transformacije kako bi se električna energija prilagodila potrebama i potrošnji, te se zatim usmjerava prema krajnjim potrošačima [59].



Slika 18. Solarna elektrana SE Donja Dubrava [58]



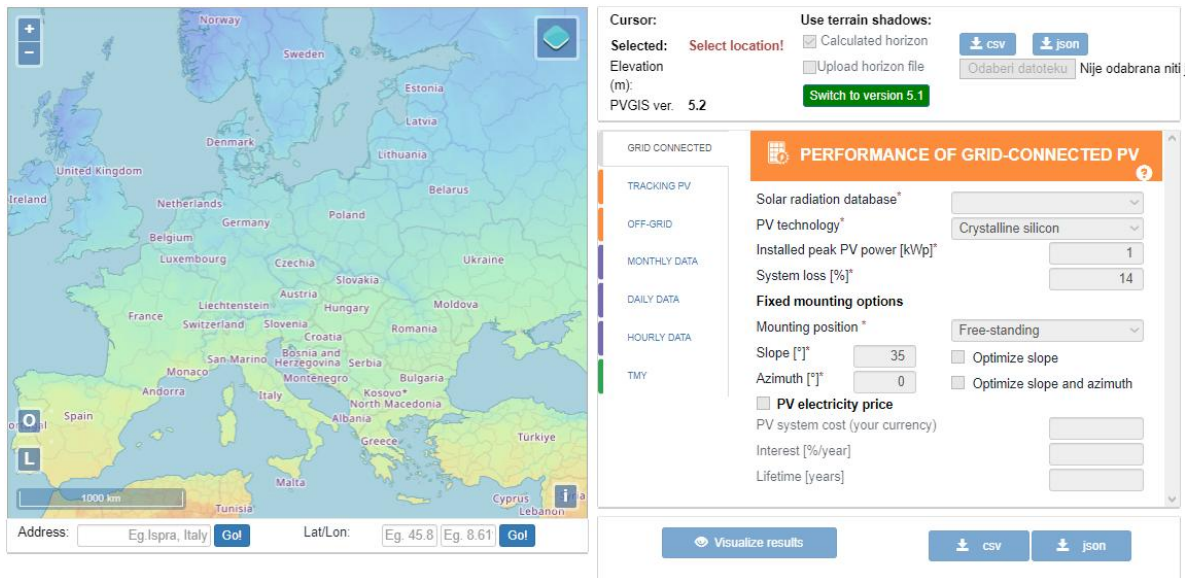
## **4. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA ISPLATIVOSTI SOLARNE ELEKTRANE U SKLOPU ZAGREBAČKOG UPOV-a**

### **4.1. Korišteno softwaresko rješenje za dimenzioniranje fotonaponskih sustava**

Postoji širok spektar softwareskih rješenja (programa) dostupnih za simulaciju rada fotonaponskih sustava, poput PV f-Chart, DASTPVPS, Greenius, Homer, PVcad, PV Design Pro, PVS, PV\*Sol, PVSYST, SOLDIM, SolEm, Sunny Design SMA i mnogi drugi [21]. Ovi programi omogućuju detaljno modeliranje i analizu performansi fotonaponskih sustava uzimajući u obzir različite ulazne parametre. Jedna od ključnih prednosti ovih simulacijskih alata je mogućnost uspoređivanja rezultata simulacija sa stvarnim mjerenjima provedenim na radu izvedenih fotonaponskih sustava. Ova usporedba omogućuje korisnicima da procjene koliko su simulacije precizne i pouzdane u realnim uvjetima. Ovisno o složenosti programa, moguće je dobiti detaljne izlazne podatke kao što su očekivana proizvodnja električne energije tijekom vremena, financijska analiza, CO<sub>2</sub> emisije i drugi relevantni parametri.

U ovom radu korišten je PVGIS (eng. *Photovoltaic Geographical Information System*), besplatni internetski program osmišljen za procjenu potencijala proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava na temelju geografskih podataka diljem Europe, Afrike i jugozapadne Azije. Program koristi dostupnost mnogih meteoroloških mjernih postaja u ovim regijama gdje se solarna radijacija bilježi neposredno ili posredno. Djeluje kao komponenta inicijative Solarne električne energije (SOLAREC), pridonoseći integraciji obnovljivih izvora energije unutar Europske unije kao održivog i dugoročnog energetskog rješenja. PVGIS baza podataka za Europu sadrži tri različite razine rezolucije podataka na 1×1 km, uključujući geografske detalje kao što su administrativne granice i gradovi, klimatske informacije uključujući dnevne horizontalne radijacije te omjer difuzne i globalne radijacije, kao i regionalne prosjeke za odabrana područja. Ti regionalni prosjeci obuhvaćaju godišnje sume radijacije, godišnju proizvodnju električne energije te optimalne kuteve nagiba modula za maksimalno iskorištavanje energije tijekom cijele godine. Baza podataka prilagođena za mediteranske zemlje, Afriku i jugozapadnu Aziju uključuje prve dvije razine podataka kao za Europu (geografske i klimatske podatke), no rezolucija je 2×2 km [21]. Na slici 19 prikazani su parametri koje je potrebno odabrati kako bi proračun u programu PVGIS bio omogućen, a

najvažniji od njih su odabir lokacije na kojoj se postavljaju solarni paneli, vrsta fotonaponske tehnologije s pridruženim postotkom gubitka energije te parametri vezani za orijentaciju samog sustava kao što su nagib panela i nagib azimuta.



Slika 19. Ulazni parametri potrebni za rad programa PVGIS [60]

Za izračun prosječne snage solarnog fotonaponskog sustava može se primijeniti sljedeća formula [61]:

$$P_s = A \times \eta_s \times 1000 \text{ [w]} \quad (1)$$

gdje su:

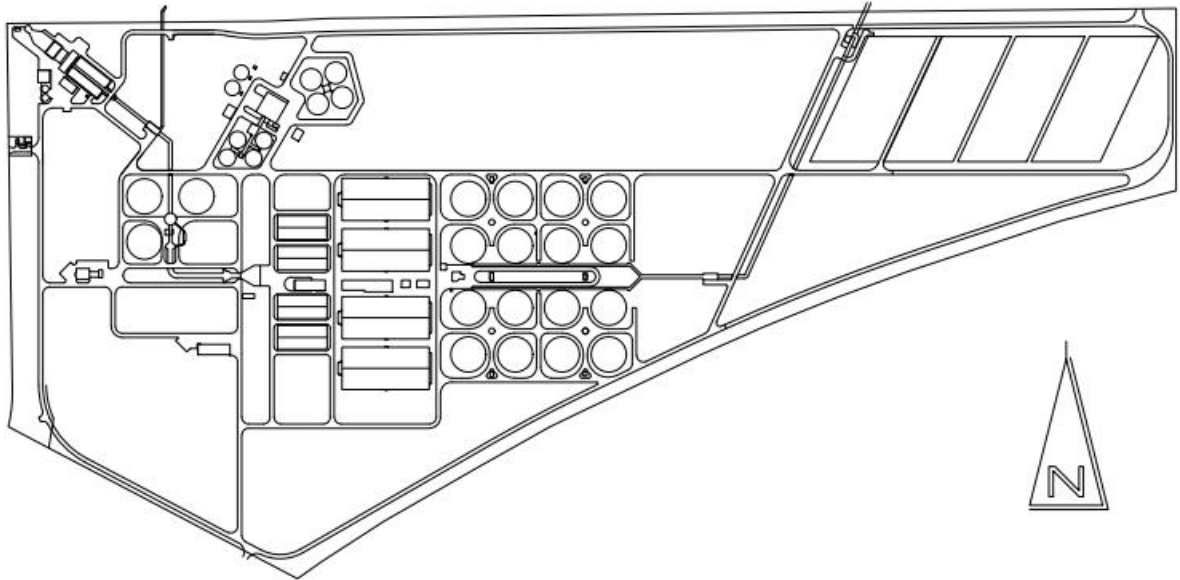
A - površina fotonaponskih panela [m<sup>2</sup>]

$\eta_s$  - učinkovitost fotonaponskog sustava

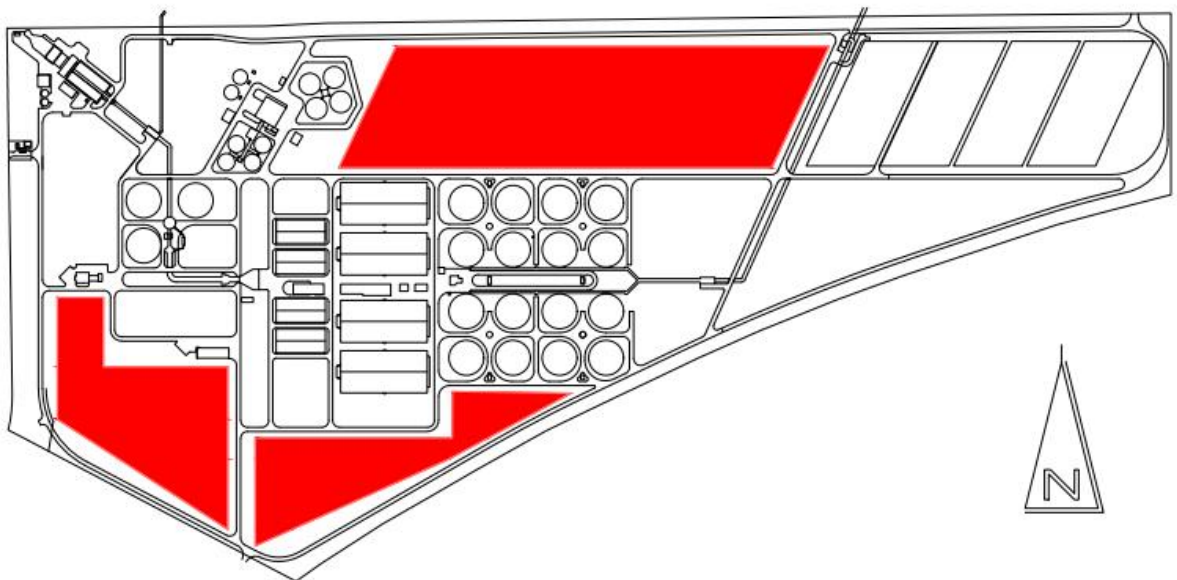
## 4.2. Lokacija uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

Ovim radom obuhvaća se ekonomska analiza isplativosti postavljanja solarnih panela na području zagrebačkog UPOV-a (uređaj za pročišćavanje otpadnih voda) smještenog na katastarskoj čestici k.č 4383/1 K.o. Žitnjak na lokaciji zagrebačkog UPOV-a (Slika 20). Na spomenutoj adresi nalazi se UPOV drugog stupnja pročišćavanja, a u tijeku su pripreme za nadogradnju na treći stupanj pročišćavanja. Centralni dio UPOV-a opremljen je turbopuhalima za aeraciju procesa, omogućuje učinkovito uklanjanje onečišćenja i poboljšanje kvalitete vode. Osim centralnog objekta, kompleks sadrži komplementarne komponente. Obilazni cjevovod osigurava neprekidnost protoka otpadnih voda, novi

aeracijski bazeni koriste biološku obradu za razgradnju onečišćenja, dok dozirne stanice za  $\text{FeCl}_3$  i octenu kiselinu doprinose kemikalijama potpomognutoj obradi. Biološko odsumporavanje plina, spremnik muljne vode i biofilter, povezani u integriranu cjelinu, optimiziraju kvalitetu vode i smanjuju štetne emisije [62].

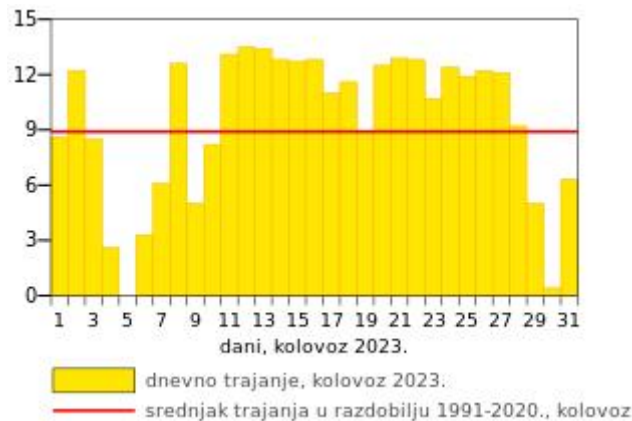


Slika 20. Prikaz katastarske čestice 4383/1 Žitnjak [62]



Slika 21. Prikaz katastarske čestice 4383/1 Žitnjak s označenim površinama za izgradnju solarnih panela

Proizvodnja vlastite solarne energije na mjestu UPOV-a prirodnijela bi osiguranju energetske neovisnosti. Uređaji za pročišćavanje otpadnih voda zahtijevaju kontinuirano napajanje kako bi se održao nesmetan proces obrade otpadnih voda. Integrirajući solarne panele, smanjuju se troškovi električne energije iz mreže, čime se optimizira ukupna učinkovitost procesa i smanjuju dugoročni operativni troškovi. Integracijom se postiže optimalno korištenje prostora dajući mu dvostruku ulogu što je posebno korisno u urbanom i gusto naseljenom području kao što je Zagreb.



Slika 22. Trajanje sisanja sunca (h) za kolovoz 2023. godine [63]

Lokacija je prepoznata kao područje koje nosi dobar potencijal za izgradnju solarne elektrane, obzirom na svoje geografske karakteristike i sunčevu insolaciju. Na slici 22 prikazano je trajanje sisanja sunca za svaki dan mjeseca kolovoza 2023. godine (žuti stupci) izmjereno na mjernoj postaji Zagreb Maksimir. Crvena linija označava srednjak trajanja sisanja sunca dobiven na temelju mjerenja u razdoblju 1991.-2023. godine iz koje se očitava da on iznosi 9 h na dan. Zimski dani su manje sunčani pa se tako naprimjer za mjesec siječanj bilježi srednjak trajanja sisanja sunca od samo 2 h za razdoblje 1991.-2003. [63]. Zagreb je osunčan 40 % vremena, broji oko 1800 sunčanih sati godišnje odnosno ima u prosjeku 4,9 sunčanih sati dnevno [64].

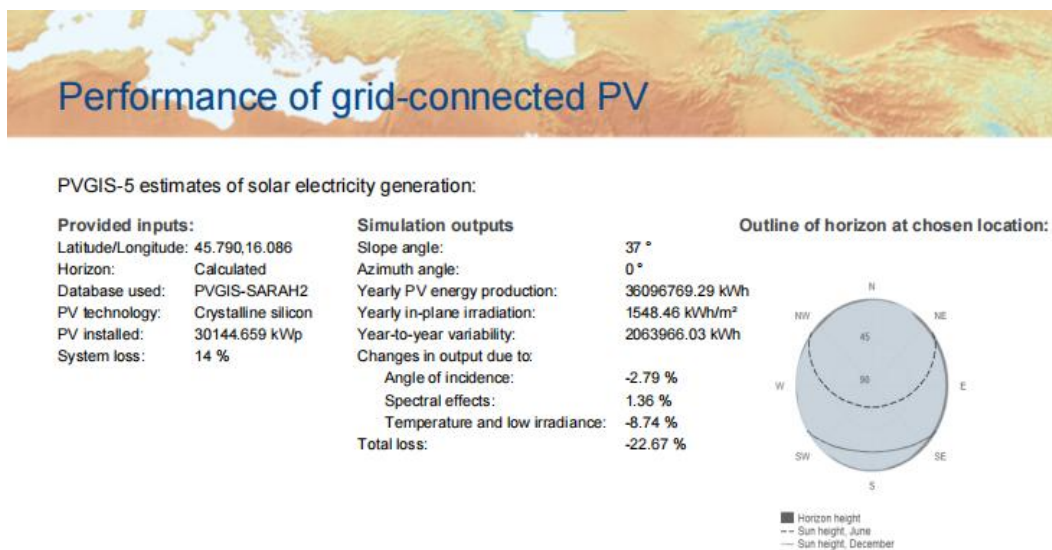
Topografski, lokaciju karakterizira pretežno ravan teren s blagim varijacijama u nadmorskoj visini. Ovo omogućava relativno ravno zemljište koje se može koristiti za različite svrhe, uključujući infrastrukturne projekte poput solarnih elektrana.

Površine označene crvenom bojom na slici 21 predstavljaju područja predviđena za postavljanje solarnih panela. Ukupna površina na kojoj bi se paneli potencijalno mogli postaviti iznosi 200.964,39 m<sup>2</sup>.

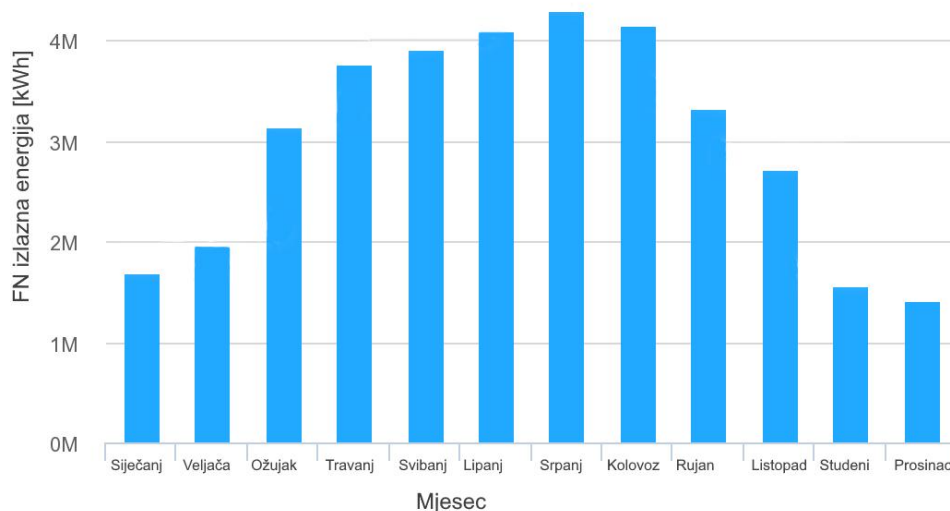
Snaga fotonaponske elektrane za odabranu lokaciju računa se primjenom formule (1):

$$P_s = 200.964,39 \text{ m}^2 \times \frac{15}{100} \times 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 30.144.658,5 \text{ W} = 30.144,659 \text{ kWp} = 30,145 \text{ MWp}$$

Nakon što su uneseni svi parametri za promatranu lokaciju kako je prikazano na slici 22 , program Photovoltaic Geographical Information System generira izvješće o količini proizvedene energije u solarnim elektranama za svaki mjesec tijekom godine što je prikazano slikom 23.



Slika 23. Ulazni parametri za izračun snage solarne elektrane na lokaciji zagrebačkog UPOV-a korištenjem programa Photovoltaic Geographical Information System [60]



Slika 24. Mjesečna proizvodnja električne energije iz solarnog fotonaponskog sustava, dobivena korištenjem aplikacije Photovoltaic Geographical Information System [60]

Tablica 2. Mjesečne brojke koje prikazuju izlaznu energiju solarnog fotonaponskog sustava na lokaciji zagrebačkog UPOV-a [60]

Mjesec	Izlazna energija [kWh]
Siječanj	1.694.346,35
Veljača	1.974.616,36
Ožujak	3.148.613,47
Travanj	3.775.761,42
Svibanj	3.922.101,15
Lipanj	4.094.518,73
Srpanj	4.299.628,8
Kolovoz	4.161.251,89
Rujan	3.331.929,04
Listopad	2.717.527,02
Studeni	1.568.225,1
Prosinac	1.408.251,95
<b>Ukupno na razini godine</b>	<b>36.096.769,29</b>

Prema tablici 2 vidljivo je da je najveća količina električne energije proizvedena u srpnju te iznosi 4.299.628,8 kWh. Godišnja proizvodnja električne energije iznosi 36.096.769,99 kWh.

Prosječna godišnja potrošnja električne energije po kućanstvu u Zagrebu iznosi otprilike 3.500 do 4.000 kWh. To znači da bi električna energija proizvedena na predmetnoj lokaciji mogla zadovoljiti potrebe približno 9.024 do 10.313 kućanstava tijekom cijele godine. Ovaj obim proizvedene solarne energije predstavlja značajan korak prema energetskej neovisnosti, smanjenju troškova energije za lokalne zajednice i poticanju korištenja obnovljivih izvora energije, pridonoseći istovremeno očuvanju okoliša i smanjenju emisija stakleničkih plinova.

Također je bitno spomenuti da oko 40 % površine predviđene za gradnju solarnih panela prekriveno vegetacijom. Važno je postići ravnotežu između proizvodnje obnovljive energije i očuvanja okoliša. Iako je lokacija već urbanizirana i ima manje biološke vrijednosti, nakon izgradnje solarnih panela, nužno je implementirati program revegetacije kako bi se obnovile zelene površine. Tijekom izvedbe projekta, ključno je poduzeti potrebne mjere kako bi se zaštitilo postojeće drveće i druge biljne vrste na preostalom terenu koji se ne bi zauzeo solarnim panelima.

### **4.3. Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana**

Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana ima ključnu ulogu u ocjeni održivosti i isplativosti ovog oblika obnovljive energije. Ona omogućuje identifikaciju troškova, prednosti i izazova povezanih s solarnim elektranama te pruža nužne informacije za donošenje informiranih odluka. Ekonomska analiza također pomaže u vrednovanju isplativosti investicija i doprinosu solarnih elektrana energetskej neovisnosti i smanjenju emisija stakleničkih plinova. Kroz kvantitativno i kvalitativno vrednovanje financijskih aspekata, postaje nezamjenjiv alat u planiranju i razvoju solarnih projekata, doprinoseći tranziciji prema održivijem energetskej sustavu.

Na predmetnoj lokaciji zagrebačkog UPOV-a izgradnja solarnih panela rezultirat će ukupnom godišnjom proizvodnjom električne energije u iznosu od 36.096.769,99 kWh. Tarifa za otkup 1 kWh električne energije od strane HEP-a iznosi 0,07 €, a kada uključimo PDV stopu od 13 %, ukupna cijena iznosi 0,08 € [65]. Primjenom navedene tarife na konkretno ovaj slučaj dobijemo novčanu vrijednost ukupno godišnje proizvedene električne energije u iznosu od 2.887.741,599 €. Raspon cijena za instalaciju solarnih elektrana kreće se između 0,93 i 1,39 € po svakom wattu instalirane snage [66]. U svrhu detaljne analize situacije, često se koristi srednja vrijednost od 1,15 €, uz uračunat PDV. Snaga predmetne fotonaponske elektrane iznosi 30.144.658,5 W te bi sukladno tome troškovi instalacije iznosili 34.666.357,28 €.

#### 4.4. Povrat investicije

Povrat investicije pruža uvid u koliko brzo će uloženi kapital generirati povrat u obliku ekonomske dobiti, te također služi kao kritički faktor u odlučivanju o izgradnji solarnih elektrana. Pritom se uzimaju u obzir faktori kao što su inicijalni troškovi instalacije, godišnji prihodi od prodaje električne energije, uštede na energiji i potencijalne subvencije ili poticaji za obnovljive izvore energije.

Tablica 3. Kapitalni troškovi solarne elektrane

POSTROJENJE	PRODAJNA CIJENA (€/kW)	PROIZVEDENA ELEKTRIČNA ENERGIJA (kWh)	KAPITALNI TROŠKOVI (€)
SE Žitnjak	0,08	36.096.769,99	34.666.357,28

Tablica 3 prikazuje sistematizaciju ukupnih troškova za izgradnju solarne elektrane na lokaciji zagrebačkog UPOV-a, odnosno solarne elektrane Žitnjak. Na temelju ovih podataka moguće je izračunati vremenski okvir potreban za povrat ulaganja za analiziranu lokaciju. Ovdje je bitno napomenuti da otkupitelj, tj. HEP d.d., podliježe plaćanju poreza na dodanu vrijednost (PDV) i taj faktor neće biti uključen u proračun. U izračun je također uključena približna procjena projektne dokumentacije za predmetno postrojenje, uključujući PDV.

Povratni period investicije računa se primjenom izraza:

$$P = \frac{\text{kapitalni trošak investicije} + \text{trošak projektne dokumentacije}}{\text{godišnji iznos otkupa električne energije}} \quad (2)$$

SE Žitnjak:

34.666.357,28 € - kapitalni trošak investicije

30.000,00 € - trošak projektne dokumentacije (gruba procjena)

2.887.741,599 € - godišnji iznos otkupa električne energije

Primjenom izraza (2) dobije se period povrata investicije SE Žitnjak:

$$(34.666.357,28 + 30.000,00) / 2.887.741,599 = 12,01$$

Povratni period investicije iznosi 12 godina što znači da će investicija biti potpuno isplativa i da će se uloženi kapital vratiti tijekom 12 godina od početka projekta. Bitno je naglasiti da se povratni periodi za solarnu energiju obično kreću u rasponu od 5 do 20 godina



[67]. U pravilu, kraći povratni periodi sugeriraju na bržu isplativost investicije, što može biti atraktivno za investitore. No, važno je uzeti u obzir različite čimbenike kao što su lokalna tržišna dinamika, cijene električne energije i trendovi njezina kretanja, dostupnost poticaja i subvencija te tehnološki napredak solarnih sustava kako bi se donijela informirana odluka o investiranju.

## 5. ZAKLJUČAK

Solarna energija predstavlja održivu i čistu alternativu fosilnim gorivima, s brojnim ekološkim i ekonomskim prednostima. Solarni sustavi sve više postaju isplativi i konkurentni, smanjujući troškove električne energije i potrebu za ovisnošću o tradicionalnim izvorima energije.

Kroz analizu isplativosti gradnje solarne elektrane na području zagrebačkog UPOV-a, koja je uključivala korištenje programa PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*), dobiven je precizniji uvid u konkretne koristi ove tehnologije. PVGIS je pružio precizne podatke o potencijalu solarnog zračenja na određenoj lokaciji, što je omogućilo detaljnu procjenu proizvodnje električne energije i financijskih aspekata projekta.

Kapitalni trošak investicije je značajan i iznosi 34.666.357,28 €, a povratni period promatrane investicije od 12 godina nije osobito brz povrat, ali ova dva čimbenika u kombinaciji ističu ključnu karakteristiku solarnih projekata - njihovu dugoročnu prirodu. Solarni projekti često zahtijevaju strpljenje, jer njihova isplativost često dolazi tijekom duljeg vremenskog razdoblja. Provedena analiza daje uvid u potencijalne stabilne prihode projekta, uz godišnji iznos otkupa električne energije od 2.887.741,599 €. Neovisno o navedenom izračunu, dobivena energija bi se u praksi prvenstveno koristila za zadovoljenje energetske potreba UPOV-a, a tek bi se eventualno preostali viškovi dali na tržište za otkup. Važno je napomenuti da su solarni projekti investicija u budućnost, ne samo u financijskom smislu, već i u smislu održivosti i zaštite okoliša.

Kroz godine, solarni projekti često postaju sve isplativiji kako se troškovi tehnologije smanjuju, a cijene električne energije rastu. Osim toga, oni imaju ključnu ulogu u smanjenju emisija stakleničkih plinova i osiguravaju energetske neovisnost. Stoga, iako su financijski izazovni u kratkoročnom smislu, dugoročno gledano, solarni projekti često donose značajne koristi kako društvu tako i okolišu.

## LITERATURA

- [1] Solar Energy Tehnologies Office, How does Solar work, raspoloživo na: <https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [2] Državni hidrometeorološki zavod, Klimatski atlas Hrvatske, raspoloživo na: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_pracjenje&param=klel](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_pracjenje&param=klel) (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [3] European Environment Agency, Global and European temperatures, raspoloživo na: <https://www.eea.europa.eu/ims/global-and-european-temperatures> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [4] Državni hidrometeorološki zavod, raspoloživo na <https://meteo.hr> (pristupljeno 28. srpnja 2023.)
- [5] European commission, Causes of climate change, raspoloživo na: [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en) (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [6] Europski parlament, Klimatske promjene i plinovi koji uzrokuju globalno zagrijavanje, raspoloživo na: <https://www.europarl.europa.eu> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [7] Eurostat, EU economy greenhouse gas emissions, raspoloživo na: <https://ec.europa.eu/eurostat> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [8] NASA SCIENCE, The Earth's Radiation Budget, raspoloživo na: [https://science.nasa.gov/ems/13\\_radiationbudget](https://science.nasa.gov/ems/13_radiationbudget) (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [9] World Health Organization, Climate Change, raspoloživo na: [https://www.who.int/health-topics/climate-change#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/climate-change#tab=tab_1) (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [10] Andrić, P., Rogulj, I., (2018.) Klima je i naš izbor: priručnik o klimatskim promjenama za srednje škole. Zagreb: Društvo za oblikovanje održivog razvoja (DOOR)
- [11] United Nations Climate Change, The Paris Agreement, raspoloživo na: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [12] CO2GO – Priče o klimi, priče za klimatsku akciju, Klimatske promjene u Hrvatskoj, raspoloživo na: <https://www.znanost-klima.org/wp-content/uploads/2021/12/Klimatske-promjene-u-Hrvatskoj.pdf> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [13] Toman I. (2020) Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske u periodu od 1979. do 2020. temeljem podataka numeričke reanalize, raspoloživo na <https://gamma.meteoadriatic.net/meteoadriatic/research/Analiza%20klimatskih%20promjena%20u%20Hrvatskoj> (pristupljeno 28. srpnja 2023.)

- [14] Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu , raspoloživo na; [https://www.sabor.hr/sites/default/files/uploads/sabor/2019-10-31/111602/STRATEGIJA\\_ENERG\\_RAZVOJ\\_2030.pdf](https://www.sabor.hr/sites/default/files/uploads/sabor/2019-10-31/111602/STRATEGIJA_ENERG_RAZVOJ_2030.pdf) (pristupljeno 28. srpnja 2023.)
- [15] Simple Climate; raspoloživo na: <https://simpleclimate.wordpress.com/2010/12/22/a-picture-of-climate-change-is-worth-1000-words/> (pristupljeno 28. srpnja 2023.)
- [16] NASA Earth Observatory, Clouds & Radiation, raspoloživo na: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Clouds> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [17] NASA, What is Earth Energy Budget?, raspoloživo na: <https://www.nasa.gov> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [18] Novacek, M. (2008). Engaging the public in biodiversity issues. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105 (Supplement 1), str.11571-11578,
- [19] Beck, Hylke E.; Zimmermann, Niklaus E.; McVicar, Tim R.; Vergopolan, Noemi; Berg, Alexis; Wood, Eric F. (2018.) "Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution". Scientific Data. 5,
- [20] Simon, A. 2001. The Real Science Behind the X-Files: Microbes, meteorites, and mutants, Simon & Schuster
- [21] Fotonaponski sustavi, Ljubomir Majdandžić, raspoloživo na [https://www.scribd.com/doc/238304077/Fotonaponski-sustavi-Ljubomir-Majdandžić](https://www.scribd.com/doc/238304077/Fotonaponski-sustavi-Ljubomir-Majdandzic) (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [22] Sunčeva energija, Wikipedia, raspoloživo na; [https://hr.wikipedia.org/wiki/Sunčeva\\_energija#cite\\_ref-#1\\_4-0](https://hr.wikipedia.org/wiki/Sunčeva_energija#cite_ref-#1_4-0) (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [23] Iea, Solar PV; raspoloživo na;<https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv> (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [24] Electricity from renewable sources on the rise, Eurostat, raspoloživo na ; <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/products-eurostat-news/-/ddn-20230127-1> (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [25] OIE, Elektroenergetska kretanja u hrvatskoj u 2022. ; raspoloživo na; <https://oie.hr/elektroenergetska-kretanja-u-hrvatskoj-u-2022/>
- [26] Solar Reviews, How to wire solar panels in series vs. Paralel, raspoloživo na: <https://www.solarreviews.com> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [27] Research Gate, Using Solar Photovoltaic Energy for Irrigation: A Review of the Application,raspoloživo na: <https://www.researchgate.net> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)

- [28] Solar Square, Flat Plate Collectors, raspoloživo na: <https://www.solarsquare.in/blog/flat-plate-collector-overview/> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [29] AC instalacije, Solarni sustavi, raspoloživo na: <http://www.acinstalacije.com> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [30] MC Solar, Solarni kolektori, raspoloživo na: <https://mcsolar.hr/solarni-kolektori/>, (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [31] Energy Sage, How much do solar panels costs in 2023?, raspoloživo na: <https://www.energysage.com/local-data/solar-panel-cost/> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [32] Renogy, Solar system, raspoloživo na: <https://www.renogy.com> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [33] Solarne elektrane, Vrste fotonaponskih panela i učinkovitost, raspoloživo na: <https://www.solarne-elektrane.hr/vrste-fn-panela-i-ucinkovitost-2/> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [34] Kulišić, P.; Vuletin, J.; Zulim, I.: Sunčane ćelije, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [35] Singfosolar, Analiza prednosti i nedostataka monokristalnog silicijuma, polikristalnog silicija i amorfnih silicijumskih baterija, raspoloživo na: <http://ba.singfo-solar.com> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [36] Prana, Vrste solarnih panela, raspoloživo na: <https://www.snagasunca.ba/blog/vrste-solarnih-panela-koji-je-solarni-panel-najbolji-izbor> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [37] Greentech Renewables, How long do solar panel last, raspoloživo na: <https://www.greentechrenewables.com> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [38] A Novel Torque Ripple Minimization Scheme for Solar Powered BLDC Motor, raspoloživo na: <https://www.researchgate.net> (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [39] The Silicon Solar Cells Turns 50, Perlin, John 2004., raspoloživo na: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf> (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [40] Advantage of Solar cell which is enviromentally-friendly, ELECTRONICS AND MATERIALS CORPORATION LIMITED, raspoloživo na: [https://eandmint.co.jp/eng/solar/solar\\_merit.html](https://eandmint.co.jp/eng/solar/solar_merit.html) (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [41] Energy Theory, What is Crystalline Silicon Solar Cell?, raspoloživo na: <https://energytheory.com/what-is-crystalline-silicon-solar-cell/> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)

- [42] FKIT, Princip rada PN spoja u solarnim ćelijama, raspoloživo na: [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/poluvodici%5B1%5D.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/poluvodici%5B1%5D.pdf) (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [43] Eko sustavi, Fotonaponski sustavi, raspoloživo na: <https://eko-sustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [44] Soteris A. Kalogirou, Solar Energy Engineering Processes and Systems, Elsevier Science, 2013.
- [45] Energy efficiency constraints in photovoltaic power generation systems, S.M. Ferdous , Mohammad Abdul Moin Oninda , Md. Hasan Maruf, Md. Atique Islam and Md. Fayzur Rahma; raspoloživo na: <https://www.researchgate.net> (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [46] SOLDERED, PWM-Pulse-Width Modulation, raspoloživo na: <https://soldered.com/learn/pwm-pulse-width-modulation/> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [47] Clean Energy Reviews, MPPT Solar Charge Controllers, raspoloživo na: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [48] Clean Energy Reviews, What is a hybrid solar system, raspoloživo na: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/8/14/what-is-hybrid-solar> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [49] Alternative Energy Tutorials, Grid connected solar PV system, raspoloživo na: <https://www.alternative-energy-tutorials.com> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [50] Orbitalna elektrana, Wikipedija, raspoloživo na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Orbitalna\\_elektrana](https://hr.wikipedia.org/wiki/Orbitalna_elektrana) (pristupljeno 31. srpnja 2023.)
- [51] Wikipedia, Space-based solar power, raspoloživo na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based\\_solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based_solar_power) (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [52] NASA, raspoloživo na: <http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2003-00108.html> (pristupljeno 03. kolovoza 2023.)
- [53] SEED, Getting solar off the ground, raspoloživo na: <https://web.archive.org> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [54] Iberdola, Francisco Pizarro, the largest photovoltaic plant in Europe, raspoloživo na: <https://www.iberdrola.com/about-us> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [55] Iberdola, Iberdola starts up “Francisco Pizarro”, the largest photovoltaic plant in Europe, raspoloživo na: <https://www.iberdrola.com> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)

- [56] Europe's Largest Solar Plant, Rasmus Schjodt Larsen, raspoloživo na: <https://goexplorer.org/europes-largest-solar-plant/> (pristupljeno 03. kolovoza 2023.)
- [57] HEP, raspoloživo na: <https://www.hep.hr/hep-kod-obrovca-pustio-u-rad-najvecu-suncanu-elektranu-u-hrvatskoj/3738> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [58] Unintegrated solar power plants, HEP, raspoloživo na: <https://www.hep.hr/projects> (pristupljeno 03. kolovoza 2023.)
- [59] HEP, SE Donja Dubrava, raspoloživo na: <https://www.hep.hr/proizvodnja> (pristupljeno 17. kolovoza 2023.)
- [60] PVGIS, raspoloživo na: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) (pristupljeno 20. kolovoza 2023.)
- [61] Đurin, B.; Kranjčić, N.; Muhar, A.: Smart hydro-energy hybrid system potential in Croatia-Bednja River case study, Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS, 2020, 20, pp. 39-50
- [62] Inženjerski projektni zavod, Glavni projekt dogradnje centralnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Grada Zagreba, Zagreb, srpanj 2018.
- [63] Državni hidrometeorološki zavod, Trajanje Sunca, raspoloživo na: <https://meteo.hr/klima> (pristupljeno 20. kolovoza 2023.)
- [64] ABC Geografija, Je li Hrvatska sunčana zemlja, raspoloživo na: <https://abcgeografija.com teme/insolacija/> (pristupljeno 20. kolovoza 2023.)
- [65] Hrvatski operator tržišta energije, raspoloživo na: <https://www.hrote.hr> (pristupljeno 20. kolovoza 2023.)
- [66] [66] Forbes, Solar panel cost, raspoloživo na: <https://www.forbes.com> (pristupljeno 20. kolovoza 2023.)
- [67] EcoWatch, raspoloživo na: <https://www.ecowatch.com/solar/solar-panel-payback> (pristupljeno 20. kolovoza 2023.)

## Popis slika

Slika 1. Globalna srednja razlika temperatura od 1850. do 1900.

Slika 2. Emisije stakleničkih plinova (milijun tona CO<sub>2</sub> ekvivalenta) u EU po sektorima

Slika 3. Usporedba anomalija temperature u Hrvatskoj s anomalijama na globalnoj razini

Slika 4. Trend udjela sektora u emisiji stakleničkih plinova

Slika 5. Efekt staklenika

Slika 6. Godišnje sunčevo zračenje na površini zemlje u usporedbi sa zalihama fosilnih i nuklearnih goriva te godišnjom potrošnjom energije u svijetu

Slika 7. Postotak obnovljivih izvora energije u bruto potrošnji električne energije, EU, 2021.

Slika 8. Solarni panel

Slika 9. Pločasti kolektor

Slika 10. Kolektor s vakuumskom cijevi

Slika 11. Fotonaponski efekt solarnog panela

Slika 12. Shematski prikaz fotonaponske ćelije

Slika 13. Klasifikacija fotonaponskih sustava

Slika 14. Samostalni solarni fotonaponski sustav

Slika 15. NASA-in koncept orbitalne elektrane

Slika 16. Francisco Pizarro fotonaponska elektrana

Slika 17. Solarna elektrana Obrovac

Slika 18. Solarna elektrana SE Donja Dubrava

Slika 19. Ulazni parametri potrebni za rad programa PVGIS

Slika 20. Prikaz katastarske čestice 4383/1 Žitnjak

Slika 21. Prikaz katastarske čestice 4383/1 Žitnjak s označenim površinama za izgradnju solarnih panela

Slika 22. Trajanje sijanja sunca (h) za kolovoz 2023. godine



Slika 23. Ulazni parametri za izračun snage solarne elektrane na lokaciji zagrebačkog UPOV-a korištenjem programa Photovoltaic Geographical Information System

Slika 24. Mjesečna proizvodnja električne energije iz solarnog fotonaponskog sustava, dobivena korištenjem aplikacije Photovoltaic Geographical Information System

## **Popis tablica**

Tablica 1. Tehnički potencijal obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj

Tablica 2. Mjesečne brojke koje prikazuju izlaznu energiju solarnog fotonaponskog sustava na lokaciji zagrebačkog UPOV-a

Tablica 3. Kapitalni troškovi solarne elektrane