

Termografsko ispitivanje fotonaponske elektrane Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli

Vivoda, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:601345>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli



JURAJ VIVODA

**TERMOGRAFSKO ISPITIVANJE FOTONAPONSKE
ELEKTRANE SVEUČILIŠTA JURJA DOBRILE U PULI**

Diplomski rad

Pula, 2023.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli



JURAJ VIVODA

**TERMOGRAFSKO ISPITIVANJE FOTONAPONSKE
ELEKTRANE SVEUČILIŠTA JURJA DOBRILE U PULI**

Diplomski rad

JMBAG: 0303086877

Studijski smjer: Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Predmet: Diplomski rad

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarstvo

Znanstvena grana: Konstruiranje i mehatronika

Mentor: doc.dr.sc. Marko Kršulja

Pula, rujan, 2023.

doc.dr.sc. Marko Kršulja
(Ime i prezime nastavnika)



Tehnički fakultet u Puli

Diplomski rad
(Predmet)

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli

ZADATAK TEME DIPLOMSKOG RADA

Pristupniku Juraj Vivodi

JMBAG: 0303086877

Studentu Tehničkog fakulteta u Puli, izdaje se zadatak za diplomski rad - tema rada pod nazivom:

TERMOGRAFSKO ISPITIVANJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE
SVEUČILIŠTA JURJA DOBRILE U PULI

Sadržaj zadatka:

Korištenjem infracrvene termografije izvršiti procjenu stanja fotonaponskih panela na krovu studentskog doma Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli. Također, treba uključiti i druge metode kao što su: vizualni pregled i proračun konstrukcije panela. Vizualnom provjerom ispitati postojanje fizičkih oštećenja i/ili prljavština na fotonaponskim panelima.

Potrebno je izvršiti analizu dobivenih podataka i na temelju njih donijeti zaključak o daljnjem održavanju i poboljšanju rada predmetne fotonaponske elektrane.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom/diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

Juraj Vivoda

(Ime i prezime studenta):

Redovni, Diplomski sveučilišni studij strojarstva

(status, smjer)

Datum: 27.3.2023.

Potpis profesora _____

Potpis profesora _____



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Juraj Vivoda, kandidat za magistra inženjera strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Diplomskog rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student: Juraj Vivoda

U Puli, rujan 2023.



IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOG DJELA

Ja, Juraj Vivoda dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj diplomski rad pod nazivom

Termografsko ispitivanje fotonaponske elektrane sveučilišta Jurja Dobrile u Puli

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, rujan 2023.

Student: Juraj Vivoda

ZAHVALA

Zahvaljujem se svome mentoru, doc.dr.sc. Marku Kršulji i komentoru dr.sc. Damiru Karabaiću na pristupačnosti, nesebičnoj pomoći i stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Također. zahvaljujem se tehničkom osoblju Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli a posebice domarima Sveučilišta na strpljivom objašnjavanju prilikom obilaska cijelog postrojenja.

Student: Juraj Vivoda

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Cilj rada	1
1.2. Hipoteza	1
1.3. Metode rada	2
1.4. Struktura rada	2
2. ISKORIŠTAVANJE SOLARNE ENERGIJE UPORABOM FOTONAPONSKE ELEKTRANE	3
2.1. Solarna energija	3
2.2. Fotonaponska elektrana	9
2.2.1. <i>Povijest</i>	10
2.2.2. <i>Pozitivna i negativna strana rada fotonaponskog sustava:</i>	11
2.2.3. <i>Princip rada</i>	11
2.2.4. <i>Komponente fotonaponskih sustava</i>	14
2.2.5. <i>Fotonaponski efekt</i>	15
2.2.6. <i>Utjecaj temperature na fotonaponske panele</i>	17
2.2.7. <i>Utjecaj solarnog zračenja na fotonaponske panele</i>	17
2.2.8. <i>Vrste fotonaponskih panela</i>	18
2.2.9. <i>Inspekcija i održavanje fotonaponskih panela</i>	20
2.2.10. <i>Kvarovi fotonaponskih panela</i>	21
2.3. Fotonaponska elektrana Sveučilište Jurja Dobrile u Puli	22
2.3.1. <i>Fotonaponski paneli</i>	22
2.3.2. <i>Inverteri</i>	23
2.3.3. <i>Softver za kontrolu FN panela</i>	24
2.3.4. <i>Fotonaponski montažni sustavi za krovove</i>	26
3. INFRACRVENA TERMOGRAFIJA	27
3.1. Povijest	27
3.2. Infracrvena termografija	31
3.3. Infracrveno zračenje	39
3.4. Primjena infracrvenog zračenja	41

4. TERMOGRAFSKO SNIMANJE I ANALIZA – SVEUČILIŠTE JURJA DOBRILE U PULI	
45	
4.1. Analiza podataka	50
4.2. Proračun idealnog kuta i razmaka montiranja fotonaponskih panela pula	56
4.3. Rješenje poboljšanja rada fotonaponske elektrane	59
5. ZAKLJUČAK	61
LITERATURA	63
POPIS SLIKA	65
POPIS TABLICA.....	66
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI	67
ABSTRACT AND KEY WORDS.....	67

1. UVOD

Obnovljivi izvori energije postaju sve važniji kako nastojimo smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima i ublažiti utjecaje klimatskih promjena. Pojam obnovljiva energija odnosi se na energiju koja dolazi iz izvora koji se obnavljaju prirodno i održivo tijekom vremena, poput sunca, vjetra, hidroenergije, geotermalne energije i biomase. Ti su izvori energije izdašni i čisti te imaju potencijal da nam osiguraju značajan dio naših energetske potrebe. Pomak prema obnovljivim izvorima energije potaknut je nizom čimbenika, uključujući zabrinutost zbog klimatskih promjena, energetske sigurnosti i konkurentnosti na tržištu. Kako troškovi razvoja i primjene tehnologija za dobivanje energije iz obnovljivih izvora nastavljaju padati, time postaju sve konkurentniji tradicionalnim fosilnim gorivima. Osim toga, razvoj novih tehnologija i rast energetske industrije obnovljivih izvora stvaraju nova radna mjesta i gospodarske prilike. Međutim, prijelaz na obnovljivu energiju nije bez izazova. Obnovljivi izvori energije često su povremeni i promjenjivi te ih uključiti u mrežu zahtijeva pažljivo planiranje i upravljanje. Također, treba uzeti u obzir okolišne i društvene utjecaje, kao što je mogućnost uništavanja staništa i sukobi oko korištenja zemljišta. [1]

1.1. Cilj rada

Cilj ovoga rada je upoznavanje sa načinom iskorištavanja solarne energije uporabom fotonaponskih panela tj. fotonaponske elektrane, te objasniti održavanje fotonaponske elektrane primjenom infracrvene termografije. Potrebno je analizirati čimbenike koji mogu dovesti do neispravnosti na fotonaponskim panelima i mogućnosti uočavanja istih infracrvenom termografijom.

1.2. Hipoteza

Da li Fotonaponska elektrane na krovu studentskog doma Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli radi optimalno i ako ne koja su rješenja za poboljšanje rada.

1.3. Metode rada

Metode koje su primijenjene prilikom izrade ovog diplomskog rada:

- deskriptivna metoda
- metoda analize
- metoda sinteze
- induktivna metoda
- deduktivna metoda

1.4. Struktura rada

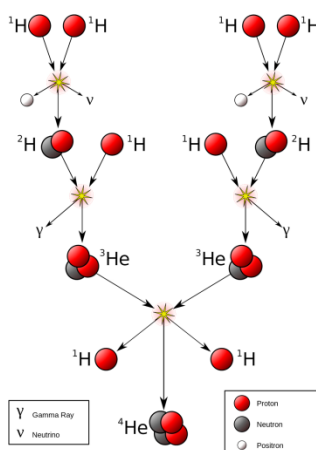
Diplomski rad podijeljen je na četiri dijela. Uvodnim dijelom se objašnjava predmet istraživanja, ciljevi te struktura rada. Drugim poglavljem nastoji se objasniti iskorištavanje solarne energije uporabom fotonaponskih elektrana, a trećim poglavljem objašnjava se primjena infracrvene termografije s osvrtom na povijest nastanka i razvoj. Četvrto poglavlje analizira mogućnosti primjene infracrvene termografije u održavanju fotonaponske elektrane. Potrebno je analizirati čimbenike koji mogu izazvati kvar na fotonaponskim panelima i mogućnosti pronalaska istog uporabom infracrvene termografije. Rad završava zaključkom.

2. ISKORIŠTAVANJE SOLARNE ENERGIJE UPORABOM FOTONAPONSKE ELEKTRANE

2.1. Solarna energija

Solarna energija je obnovljiva vrsta energije koja se dobiva procesom nuklearne fuzije sa sunca. Fuzija je proces sudaranja protona atoma vodika koji se stapaju i stvaraju atom helija (slika 1.). Ovaj proces je također poznat kao i PP proces to jest proton-proton lančana reakcija te emitira izuzetno veliku količinu energije u obliku valova i čestica.

Slika 1. Proces nuklearne fuzije sa sunca



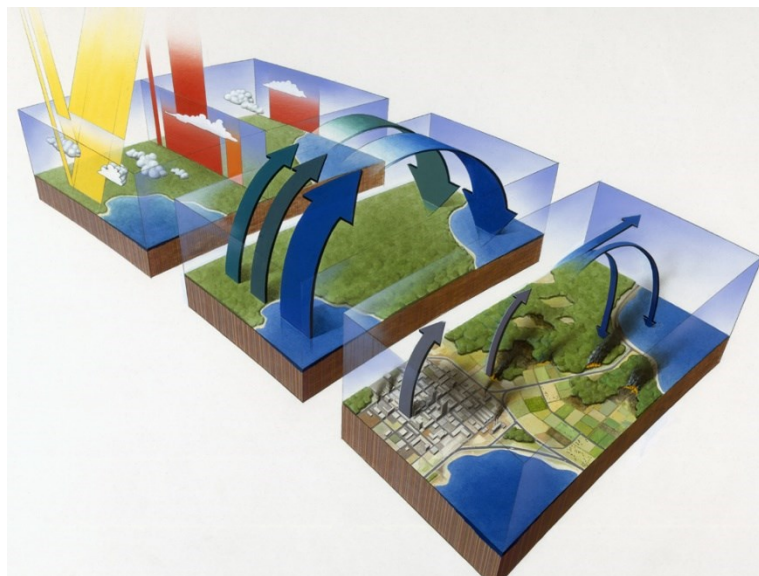
Izvor: Turgeon A., Morse E. (2023.) Solar Energy, National Geographic Society, <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/>

Sunčeva svjetlost je prvenstveni izvor energije za Zemlju. Sunčeva konstanta je snaga koju Sunce prenese na Zemljinu atmosferu po jedinici površine. Ona iznosi 1.368 W/m^2 u gornjim slojevima Zemljine atmosfere, dok na direktno osunčanoj Zemljinoj površini u zenitu iznosi oko 1.000 W/m^2 jer ga oslabi atmosfera. Solarna energija je zaslužna za život na zemlji i za prirodne pojave koje ponajviše ovise o djelovanju Sunca (jakost i trajanje Sunčeva zračenja, temperatura zraka). Energija koja dolazi sa sunca na zemlju dolazi u obliku elektromagnetskog zračenja (EMR). Elektromagnetsko zračenje postoji kao valovi različitih frekvencija i valnih duljina. Valna frekvencija predstavlja

ponavljanje vala u određenoj jedinici vremena. Što se više val ponavlja u jednoj jedinici vremena to mu je frekvencija viša, a što je valna duljina veća to je veća frekvencija. Elektromagnetski valovi dolaze u različitim frekvencijama te ih dijelimo na vidljivi spektar zračenja, gama zrake, X-zrake, ultraljubičasto zračenje i infracrveno zračenje. [2]

Infracrveni, vidljivi i UV valovi koji dopiru do Zemlje sudjeluju u procesu zagrijavanja planeta uzrokujući tzv. "efekt staklenika" čime omogućavaju život (slika 2.). Toplina od sunca ulazi u Zemljinu atmosferu i apsorbira je površina - zemlja, pijesak i vodena tijela. Zagrijana površina tada reflektira toplinu natrag u atmosferu. Plinovi u atmosferi, uglavnom ugljikov dioksid i vodena para, apsorbiraju i zadržavaju toplinu u Zemljinoj atmosferi. Bez tih stakleničkih plinova, većina topline (prikazana na slici 2. žutom i crvenom bojom) bi pobjegla u svemir. [2]

Slika 2. Dijagram efekta staklenika



Izvor: Turgeon A., Morse E. (2023.) Solar Energy, National Geographic Society, <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/>

Pridobivanje solarne energije dijeli se na tehnologiju koja je smještena direktno na potrošaču energije što se zove aktivni tip potrošnje ili se ta energija prikuplja zasebno i zatim skladišti i troši po potrebi što je pasivni tip potrošnje energije. Aktivne solarne tehnologije koriste električne ili mehaničke pretvaračke uređaje koji tu solarnu energiju

zatim pretvaraju u električnu ili u toplinsku. Pasivni fotonaponski uređaji se koriste tom energijom kako bi direktno grijali neku vrstu građevine ili strukture po zimi, a ljeti istu tu građevinu ili strukturu štite od prevelikog utjecaja topline reflektirajući tu energiju. [2]

Postoji nekoliko vrsta tehnologija solarne energije koje se koriste za iskorištavanje sunčeve svjetlosti:

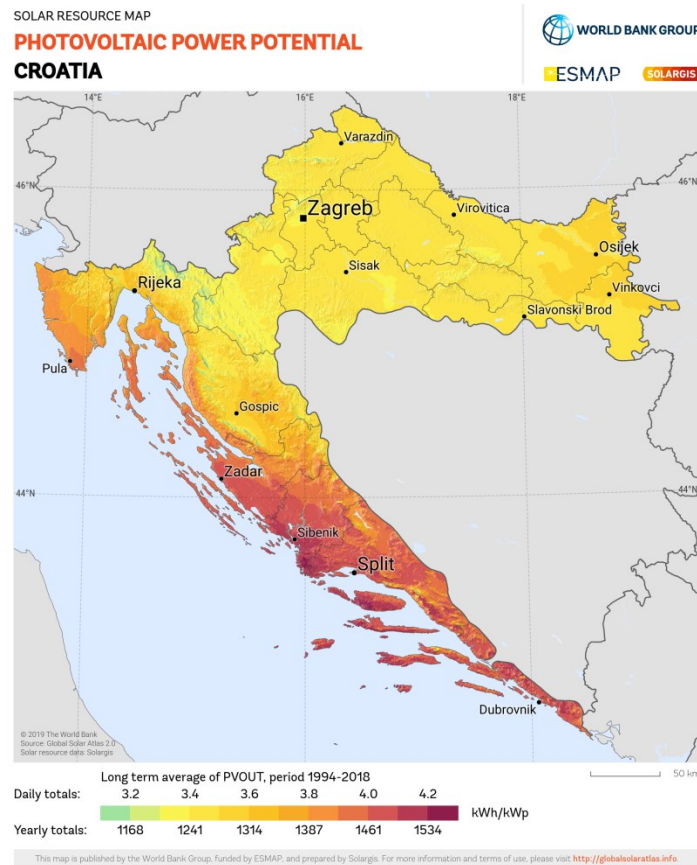
- Fotonaponske ćelije: najčešći tip solarne tehnologije koja se koristi za proizvodnju električne energije. Fotonaponski paneli su izrađeni od poluvodičkih materijala, kao što je silicij, i mogu biti instalirani na krovovima ili u velikim fotonaponskim elektranama za proizvodnju električne energije za domove, tvrtke i zajednice.
- Solarni toplinski kolektori: koriste se za zagrijavanje vode ili zraka koristeći sunčevu energiju. Mogu se koristiti za stanovanje ili poslovni prostor grijanje vode, grijanje prostora ili hlađenje. Postoje dvije glavne vrste toplinskih kolektora, ravni i vakuumski cijevni kolektori.
- Koncentrirana solarna energija: sustavi koji koriste zrcala ili leće da koncentriraju sunčevu svjetlost na malo područje, stvarajući visoke temperature koje se koriste za proizvodnju električne energije. Najčešći tipovi sustava su: parabolično korito, električni toranj i tanjur/Stirling sustavi.
- Pasivni solarni dizajn: uključuje elemente dizajna koji maksimiziraju solarnu dobit i minimiziraju gubitak topline, kao što je orijentacija zgrada licem prema suncu, korištenjem materijala visoke toplinske mase i ugradnjom uređaja za sjenčanje.
- Solarna klimatizacija: sustavi koji koriste sunčevu energiju za pokretanje apsorpcije ili za rashladne sustave za sušenje koji mogu osigurati hlađenje za kuće ili poslovne zgrade.
- Vozila na solarni pogon: solarna energija se također može koristiti za pogon vozila, kao što su solarni automobili i brodovi na solarni pogon. [2]

U Republici Hrvatskoj najveći potencijal za proizvodnju solarne energije imaju priobalni i južni dijelovi države što je vidljivo na slikama 3.,4. i 5.

Karta fotonaponskog energetskeg potencijala (slika 3.) daje sažetak procijenjenog potencijala solarne fotonaponske proizvodnje energije. Predstavlja dugoročni prosjek godišnje/dnevne potencijalne proizvodnje električne energije iz 1 kW vršne

fotonaponske elektrane spojene na mrežu. Izračun solarne električne energije temelji se na podacima o solarnim resursima visoke rezolucije i softveru za fotonaponsko modeliranje koji osigurava Solargis. Izračun uzima u obzir sunčevo zračenje, temperaturu zraka i teren, kako bi se simulirala pretvorba energije i gubici u fotonaponskim modulima i drugim komponentama fotonaponske elektrane. U simulaciji, gubici zbog prljavštine i onečišćenja procijenjeni su na 3,5%. Pretpostavlja se da kumulativni učinak ostalih gubitaka pretvorbe (sjenčanje među redovima, neusklađenost, pretvarači, kabeli, transformator itd.) iznosi 7,5%. Raspoloživost elektrane smatra se 100%. [3]

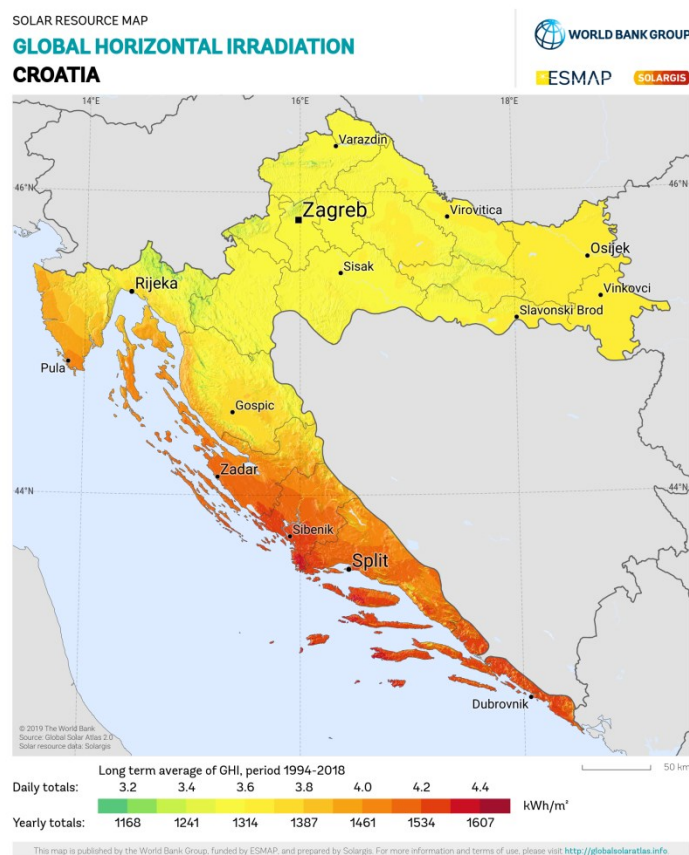
Slika 3. Karta fotonaponskog energetskeg potencijala RH



Izvor: © 2020 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis
<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/croatias>

Globalno horizontalno zračenje je najvažniji parametar za izračun prinosa energije i ocjenu performansi fotonaponskih (PV) tehnologija ravnih ploča. Ova karta solarnih resursa (slika 4.) daje sažetak procijenjene solarne energije dostupne za proizvodnju električne energije i druge energetske primjene. Predstavlja dugoročni prosjek godišnjeg/dnevnog zbroja globalnog horizontalnog zračenja. [3]

Slika 4. Karta globalnog horizontalnog zračenja RH

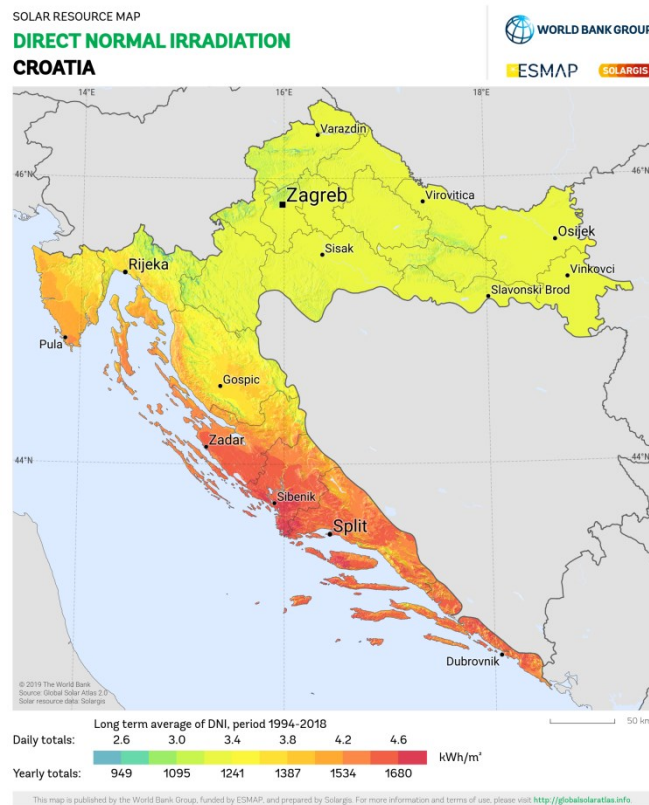


Izvor: © 2020 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis
<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/croatias>

Izravno okomito zračenje je najvažniji parametar za izračun prinosa energije i procjenu učinkovitosti tehnologija koncentriranja solarne energije i koncentratorskih solarnih fotonaponskih tehnologija. Količina izravnog okomitog zračenja je također važan podatak za izračun globalnog zračenja koje primaju nagnuti fotonaponski paneli ili fotonaponski paneli koji prate sunce. Ova karta solarnih resursa (slika 5.) daje sažetak

procijenjene solarne energije dostupne za proizvodnju električne energije i druge energetske primjene. Predstavlja dugoročni prosjek godišnjeg/dnevnog zbroja izravnog okomitog zračenja (DNI). [3]

Slika 5. Karta izravnog okomitog (normalnog) zračenja RH



Izvor: © 2020 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis
<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/croatias>

2.2. Fotonaponska elektrana

Fotonaponska elektrana (slika 6.) je fotonaponski sustav koji proizvedenu električnu energiju predaje u elektroenergetski sustav. Fotonaponske elektrane omogućuje izravnu pretvorbu sunčeve energije u električnu i predstavljaju jedan od najelegantnijih načina korištenja energije Sunca.

Slika 6. Fotonaponske elektrane Kaštelir 1 i Kaštelir 2



Izvor: Neintegrirane sunčane elektrane, HEP

<https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/neintegrirane-suncane-elektreane/3422>

Način rada fotonaponskog sustava zasniva se na fotonaponskom efektu. Osnovni elektronički elementi u kojima se događa fotonaponska pretvorba nazivaju se fotonaponske ćelije. Fotonaponske ćelije međusobno su povezane u veće cjeline koje se zovu fotonaponski paneli. Fotonaponski paneli osiguravaju mehaničku čvrstoću, te štite fotonaponske ćelije i kontakte od korozije i vanjskih utjecaja. Fotonaponska elektrana (slika 7.), osim fotonaponskih panela (a.), sastoji se i od pretvarača (inverter) (b.), regulatora punjenja baterija i dovoda energije potrošačima (c.), baterije za pohranu električne energije (d.), zaštitnih uređaja, nosača modula i potrebnih električnih instalacija.

Slika 7. Osnovne komponente fotonaponske elektrane



Izvor: Fotonaponske elektrane, Zeleni kutak, VL Automatika,
<https://vlautomatika.hr/zeleni-kutak/fotonaponske-elektrane/>

2.2.1. Povijest

Princip rada modernih fotonaponskih ćelija prvi je otkrio 1839. francuski fizičar A.E. Becquerel. Nakon njega, brojni su se znanstvenici radili s Becquerelovim izvornim otkrićem i poboljšali ga. U 1950-ima, Bell Labs je stvorio prvi dio fotonaponske tehnologije dizajniran za korištenje u svemiru. Ova se tehnologija ubrzo je našla zemaljsku primjenu u telekomunikacijskim aplikacijama u udaljenim područjima. U 1970-ima i 1980-ima ljudi su počeli koristiti fotonaponske panele za punjenje baterija, a zatim su koristili te baterije za pokretanje raznih svjetala i uređaja u svojim udaljenim domovima. Ovi rani fotonaponski pioniri pomogli su postaviti pozornicu za današnju fotonaponsku industriju. Prve fotonaponske ćelije nisu bile vrlo učinkovite niti su se široko koristile izvan svemirskih programa. Ovakvi sustavi napajanja su također bili prilično skupi. Ipak, tijekom godina, istraživači i proizvodne tvrtke povećale su učinkovitost i pouzdanost, a troškovi su drastično smanjeni. Svi ovi razvojni koraci su doveli do širok uporabe solarnih modula. Moderni fotonaponski sustavi mogu se naći u širokom rasponu primjena. Oni napajaju kalkulatore, pumpaju vodu, pomažu u nadoknadi energije koju troše reflektori duž autocesta i, naravno, napajaju domove i tvrtke. Za sve nas, struja je dostupna gotovo svugdje gdje idemo, a fotonaponski sustavi mogu se integrirati s postojećom komunalnom mrežom. U udaljenim

područjima u razvoju, fotonaponski sustavi daju dragocjenu energiju za napajanje sustava rasvjete, rad hladnjaka i pomoć u isporuci čiste pitke vode.[5]

2.2.2. Pozitivna i negativna strana rada fotonaponskog sustava:

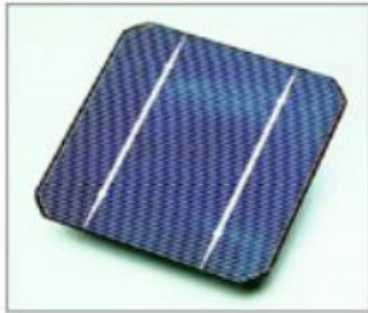
Prednosti fotonaponskog sustava odlikuju se u tome da proizvodnja električne energije iz sunca ima koristi za okoliš jer je izvor energije obilan obnovljivi resurs koji je dostupan svaki dan (iako fotonaponski sustavi nisu toliko učinkoviti tijekom oblačnog vremena, još uvijek proizvode malu količinu energije tim danima). Fotonaponski sustav je također vrlo prilagodljiv izvor energije. Mogu se koristiti pojedinačne ćelije za napajanje male elektronike i pojedinačne ploče za napajanje određenih opterećenja. Također, mogu se izgraditi mali nizovi za napajanje domova ili se mogu izgraditi projekti velikih razmjera za slanje ogromnih količina energije u komunalnu mrežu. Nakon što su fotonaponski sustavi instalirani, mogu osigurati dugi niz godina čiste, pouzdane energije na gotovo bilo kojem mjestu na zemlji. U domovima i poslovnim objektima povezanim s komunalnim mrežama, fotonaponski sustavi smatraju se distribuiranom proizvodnjom, izvorom energije koji proizvodi električnu energiju u blizini mjesta na kojem se energija koristi. U stanju su nadoknaditi zahtjeve centralnih elektrana koje šalju električnu energiju koju većina ljudi koristi.[5]

Negativna strana fotonaponskog sustava očituje se u tome da sunce nije kontinuirani izvor energije. Noću, fotonaponski paneli ne mogu proizvoditi energiju te se mora koristiti metoda za pohranu energije za kasniju upotrebu (dodavanje troškova i složenosti dizajnu i instalaciji sustava). Također, velika je količina površine potrebna za proizvodnju energije. Za velike projekte potrebni su značajni dijelovi zemljišta ili krovnog prostora. Nema svaki vlasnik kuće ili tvrtke pristup takvom prostoru.[5]

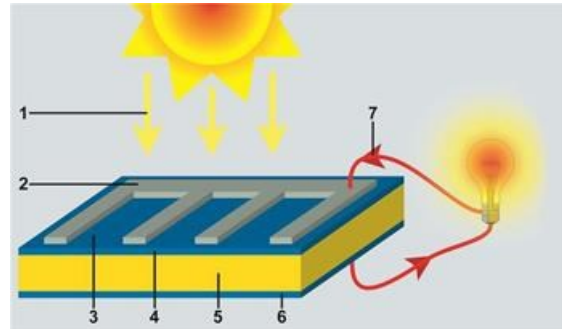
2.2.3. Princip rada

Fotonaponski električni sustavi hvataju energiju sunčeve svjetlosti i pretvaraju je u električnu energiju. Ova se pretvorba odvija u fotonaponskim modulima, odnosno fotonaponskim panelima. FN modul se sastoji od brojnih FN ćelija (slika 8.). Većina FN modula sadrži 60 ili 72 FN ćelije.

Slika 8. Fotonaponska ćelija, osnovni element fotonaponskog sustava



Izvor: Fotonaponski sistemi korištenja energije Sunca,
http://vetar-sunce.imsi.rs/tekstovi/Studija_EE704-1052A



1. Sunčevo svjetlo, 2. prednji kontakt, 3. antirefleksni sloj, 4. n-tip poluvodiča, 5. p-tip poluvodiča, 6. stražnji kontakt, 7. smjer toka struje

Izvor: Solarna ćelija, Proleksis enciklopedija,
<https://proleksis.lzmk.hr/54907/>

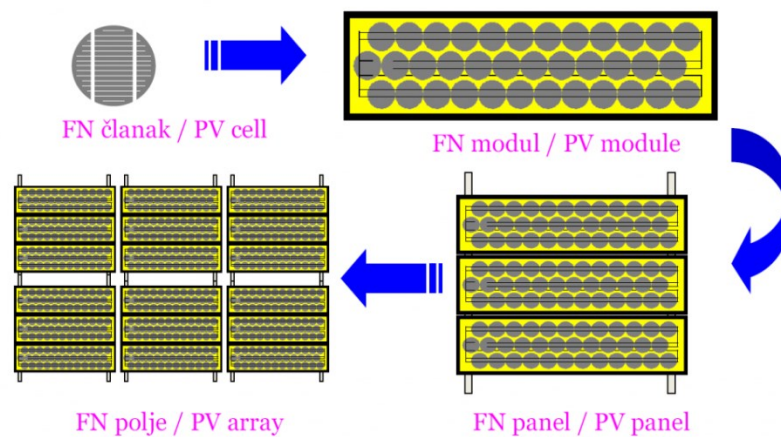
FN ćelije izrađene su od jedne od najzastupljenijih kemijskih tvari na Zemlji: silicijeva dioksida. Čini 26% Zemljine kore. Silicijev dioksid nalazi se u kvarcu i vrsti pijeska koji sadrži čestice kvarca. Silicij za konstrukciju modula dobiva se iz pijeska. Atomi silicija sadrže elektrone koji kruže oko središnje jezgre koja sadrži protone i neutrone. U siliciju, međutim, neki od elektrona mogu biti izbačeni iz svoje orbite kada ih obasja sunčeva svjetlost tj. fotoni svjetla. Fotoni prilikom pada na površinu solarne ćelije svoju energiju predaju panelu pri čemu izbijaju negativno nabijene elektrone. Ti elektroni kreću prema negativno nabijenoj strani panela. Uslijed razlike potencijala, generira se električna energija.

Većina FN ćelija koje se danas koriste su tanke pločice od silicija koje se sastoje od dva dijela. Gornji sloj sastoji se od atoma silicija i fosfora; donji sloj se sastoji od atoma silicija i bora. Kada sunčeva svjetlost pogodi atome silicija u FN ćelijama, ona izbacuje elektrone iz orbite. Ti elektroni teku prema površini gdje ih pokupe tanki metalni kontakti na površini ili odmah ispod površine FN ćelija. Budući da su FN ćelije spojene u seriju u FN modulu, one tvore kontinuirani krug. Elektroni oslobođeni iz jedne ćelije teku u sljedeću ćeliju, a zatim u sljedeću itd., sve dok ne dođu do negativnog terminala FN modula.[6]

FN ćelije su međusobno povezane u modul. Moduli su obloženi staklom (s prednje strane) i obično tankim slojem plastične folije (sa stražnje strane) kako bi se ćelije zaštitile od vremenskih nepogoda, posebice vlage. Većina modula ima srebrne ili crne

aluminijske okvire, iako na tržištu postoje neki moduli bez okvira, koji su uvedeni zbog estetike i pojednostavljenja instalacije i smanjenja troškova. Dva ili više modula obično se montiraju na stalak i ožiče zajedno. Zajedno, stalak i moduli poznati su kao FN niz. Nizovi montirani na tlo obično su usidreni u tlo betonskim temeljima ojačanim čelikom. U takvim slučajevima, temelj se također smatra dijelom niza. Unutar FN modula, FN ćelije su "povezane" zajedno u seriju. Moduli u nizu su također spojeni u seriju i tvore FN panele. Više FN panela spojenih zajedno tvore FN polje (slika 9.).

Slika 9. Fotonaponska elektrana – elementi sustava



Izvor: Fotonaponska elektrana – elementi sustava, <https://www.solarne-elektrane.hr/elementi-sustava-fn-elektrana/>

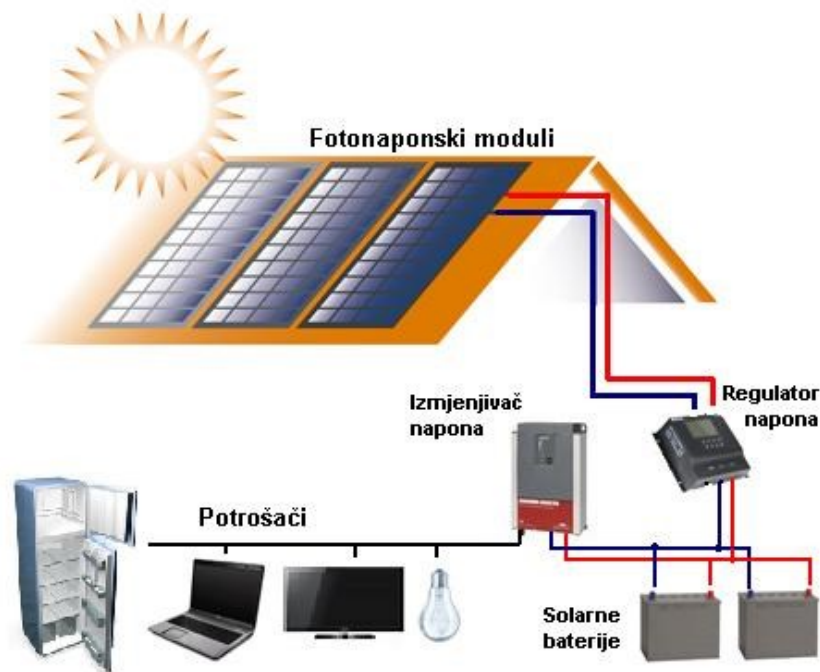
U FN modulima svaka FN ćelija ima pozitivan i negativan vod (žicu). Prilikom proizvodnje FN ćelija, pozitivni vod jedne FN ćelije zalemljen je na negativ sljedeće, i tako dalje i tako dalje. Većina FN ćelija koje se danas koriste su četvrtaste i mjere 125 × 125 mm ili 156 × 156 mm i imaju napon od oko 0,6 volti. Kada proizvođači spoje (zapravo leme) 60 FN ćelija zajedno u seriju u modulu, napon se povećava na 36. Sedamdeset i dvije ćelije spojene u seriju stvaraju FN modul od 43 volta. FN moduli su sami spojeni u seriju kako bi dodatno povećali napon. Deset 36-voltnih modula spojenih u seriju daje napon polja od 360 volti.[6]

Fotonaponski moduli proizvode istosmjernu struju. U solarnom sustavu, istosmjerna struja proizvedena u solarnim modulima teče (putem žica) do uređaja poznatog kao pretvarač. Njegov zadatak je pretvaranje istosmjerne struje koju proizvode fotonaponske ćelije u izmjeničnu struju.[6]

2.2.4. Komponente fotonaponskih sustava

Komponente FN sustava prikazane su na slici 10. i u daljnjem tekstu pojedinačno objašnjene.

Slika 10. Komponente FN sustava



Izvor:

<https://onlinestores.factoryoutlets2023.com/content?c=samostalni+fotonaponski+sustavi+sunceve+baterije&id=2>

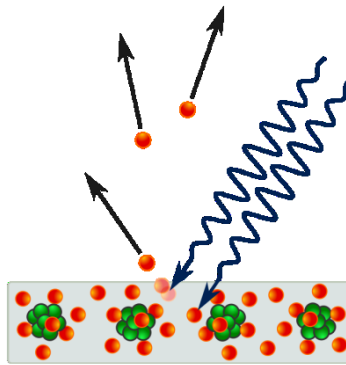
1. Fotonaponski paneli (moduli) - izvor energije u fotonaponskom sustavu. Oni proizvode istosmjernu struju, koja se lako pohranjuje u baterije, a pretvara se u izmjeničnu struju putem pretvarača. Nosači drže FN niz na mjestu na koje ste odabrali postaviti paneli. Jedan tipičan način montiranja cijelog niza je na krov strukture s kojom radite. Druge opcije su montaža tako da su FN paneli integrirani u zgrade (gdje FN elektrana postaje zamjena za materijale za krovove ili prozore) ili montažu FN elektrane direktno na tlo. Još jedna uobičajena opcija je montiranje FN elektrane na vrh štapnog stalka kao kod rasvjete. Nadalje što se tiče FN modula oni se razlikuju od FN panela to jest FN panel označava grupu FN modula umreženih zajedno, dok je modul jedinica koja je sačinjena od FN ćelija.[5]

2. Baterija - kod FN panela dijele se na zatvorene baterije ili baterije otvorenog tipa. Zatvorene baterije često se nazivaju "baterijama koje ne zahtijevaju održavanje". One su opcija smanjenog održavanja u usporedbi s otvorenim tipom baterija, ali ipak im je potrebna određena pozornost. Ako ne se ne prati rad baterija, ne vrši inspekcije baterija te se baterije ne održavaju pravilno može doći do gubljenja kapaciteta baterije i na kraju samog kvara. Svaka baterija dok se puni ispušta malene količine vodika te se savjetuje da se svaka baterija drži u zaštitnoj kutiji kako ne bi došlo do nesreće.[5]
3. Kontroler punjenja (regulator napona) – je elektronički dio koji se nalazi između FN polja i baterije. Njegova primarna funkcija je kontrolirati struju koja dolazi u bateriju iz FN polja. Kontroleri punjenja mogu varirati od male jedinice namijenjene povezivanju jednog FN modula s jednom baterijom pa sve do kontrolera dizajniranog za povezivanje više kilovatnog FN polja s velikom baterijom.[5]
4. Pretvarači struje ili inverteri (izmjenjivač napona) - pretvaraju istosmjernu struju koju proizvode FN nizovi ili struju koja se pohranjuje u baterije, u izmjeničnu struju koja se koristi u domovima i tvrtkama. Dolaze u mnogo različitih oblika i veličina. Inverter može biti malen kao jedinica od 100 W koja se uključi u (istosmjernu) utičnicu u automobilu ili velik kao jedinica od nekoliko MW instalirana u sklopu fotonaponskog projekta velikih elektrana. [5]

2.2.5. *Fotonaponski efekt*

Fotonaponski efekt (slika 11.) je pojava kada djelovanjem zračenja svjetlosti dolazi do izbijanja elektrona s površine obasjanog metala tj. dolazi do generiranja električne energije u njemu. Ovo je najvažnija fizikalnih pojava za rad FN panela. Jedan od najvažnijih faktora kod fotonaponskog efekta je frekvencija sunčeve svjetlosti, a ne snaga kako su nekada znanstvenici mislili.[7]

Slika 11. Prikaz fotonaponskog efekta



Izvor: Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponska_plo%C4%8Da

Proces fotonaponskog efekta:

1. Svjetlosna apsorpcija: Kada foton udari u površinu materijala, kao što je poluvodič, fotoni budu apsorbirani u materijal sa atomima. Svjetlost koja će biti apsorbirana to jest fotoni moraju imati određenu frekvenciju koja odgovara energetskej praznini materijala od kojeg je načinjen FN panel.
2. Adsorbirani fotoni daju energiju elektronima u materijalu te time izazivajući elektrone da se pobude i pomaknu na nabijenije dijelove atoma ili da se izbijaju iz atoma.
3. Kod FN panela koji su većinom napravljeni od dva sloja materijala to jest N-p materijala koji imaju različita svojstva što izaziva stvaranje električnog polja između ta dva materijala. Pobuđeni elektroni su slobodni i podijeljeni su zbog električnog polja što stvara tok elektrona sa nabijenijeg dijela na manje nabijeni dio materijala. Izbijeni elektroni putuju kroz materijal te se uz pomoć metalnih kontaktnih točaka na fotonaponskim pločama skupljaju u stvaraju vanjski elektronski tok. Taj tok elektrona je struja generirana fotonaponskim efektom. [7]

2.2.6. Utjecaj temperature na fotonaponske panele

Temperatura panela ima veliki utjecaj na učinkovitu proizvodnju solarne energije fotonaponskih panela. Pokazatelj koji nam pokazuje ovisnost FN panela o temperaturi se zove temperaturni koeficijent snage. Fotonaponski paneli imaju negativan temperaturni koeficijent što znači da učinak FN panela opada s porastom temperature FN ćelije. Nazivna izlazna snaga FN panela definirana je prema standardnim referentnim uvjetima ispitivanja to jest standardna referentna sunčeva svjetlost je 1000 W/m^2 , standardna referentna temperatura ćelije je $25 \text{ }^\circ\text{C}$ i standardni referentni spektar pri zračnoj masi od 1,5, prema tim referentnim podacima vršimo usporedbe sa našim rezultatima mjerenja. Za pozitivne temperature okoline, temperatura ćelije je oko $15 \text{ }^\circ\text{C}$ viša od temperature okoline, kao rezultat inkapsulacije panela. Ako je temperaturni koeficijent panela $-0,5\%/^\circ\text{C}$, a temperatura okoline 40°C , očekuje se da će temperatura ćelije biti oko 15°C viša od temperature okoline zbog inkapsulacije panela. Stoga će gubitak izlazne snage panela na 40°C biti: $0,5\%/^\circ\text{C} * (55^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 15\%$. Drugim riječima, panel koji proizvede 100 W prema STC (temperatura ćelije $25 \text{ }^\circ\text{C}$) proizvest će samo 85 W na temperaturi okoline od $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Stoga je temperaturni koeficijent tanko slojnih FN panela manje negativan u usporedbi s temperaturnim koeficijentom kristalnih panela.

Stoga bi tanko slojni fotonaponski paneli mogli proizvesti više energije od kristalnih panela na povišenim temperaturama.[7]

2.2.7. Utjecaj solarnog zračenja na fotonaponske panele

Jedan od važnijih faktora prilikom odabira najboljeg tipa fotonaponskog panela za određenu situaciju su klimatski uvjeti na toj lokaciji. Kao što je već poznato glavni parametri rada panela su dani pod standardnim uvjetima ispitivanja, a svaka odstupanja od tih uvjeta daju nam gubitke energije u određenom postotku. Glavni čimbenici koji pridonose produktivnosti i efikasnosti panela su temperaturni uvjeti i solarno zračenje. Svako odstupanje od referentne razine zračenja od 1000 W/m^2 , što odgovara običnom sunčanom danu. Solarno zračenje direktno utječe na produktivnost fotonaponskog panela, ako je razina zračenja niža od 1000 W/m^2 tada će biti manja

produktivnost panela. Niže razine zračenja su obično u jutarnjim satima i tijekom zime.[7]

2.2.8. Vrste fotonaponskih panela

1. Monokristalni FN panel (slika 12.) - ovaj tip FN panela je najučinkovitiji, ali i najskuplji. Izrađeni su od jedne kristalne strukture, obično silicija. Obično su crne boje i elegantnog izgleda. FN ćelije su oblikovane poput kvadrata sa odrezanim uglovima. Također imaju izvrsne performanse u različitim uvjetima osvjetljenja. Monokristalni FN paneli obično imaju najveću učinkovitost i kapacitet snage od svih vrsta FN panela. Učinkovitost se kreće od 17% do 22%. Veća učinkovitost monokristalnog panela znači da je potrebno manje panela u sustavu da bi se proizvela ista količina energije kao sa većim brojem polikristalnih FN panela.. To monokristalne panele čini idealnim za ograničene krovne prostore.

Slika 12. Monokristalni fotonaponski panel

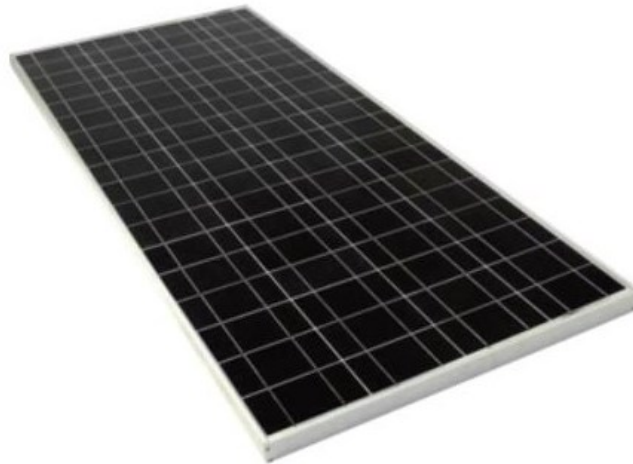


Izvor: [samoodrzivost.com](https://samoodrzivost.com/vrste-solarnih-panela-koji-je-najbolji-izbor/), <https://samoodrzivost.com/vrste-solarnih-panela-koji-je-najbolji-izbor/>

2. Polikristalni FN panel (slika 13.)- ovi paneli su manje učinkoviti i jeftiniji su za 30 do 50 posto u odnosu na monokristalne panele kada su namijenjeni za proizvodnju iste količine energije. Oni imaju životni ciklus od 25 godina. Ove ploče su izrađene od više kristala silicija, što rezultira mramornim plavim izgledom. Najviše se koriste kod stambenih i poslovnih objekata. Tehnologija i proizvodnja sve više napreduju te se razlika u cijeni između polikristalnih i monokristalnih panela smanjuje. Zbog

toga, kao i njihova manja učinkovitost, dovodi do toga da sve više ljudi bira monokristalne panele.

Slika 13. Polikristalni fotonaponski panel



Izvor: samoodrživost.com, <https://samoodrzivost.com/vrste-solarnih-panela-koji-je-najbolji-izbor/>

3. Tankoslojni FN panel (slika 14.) – tankoslojni FN paneli izrađuju se taloženjem tankog sloja poluvodičkog materijala, poput amornog silicija, kadmij telurida, bakar indija i galij selenida, na podlogu poput stakla ili metala. Lagani su, fleksibilni i mogu se koristiti na raznim površinama. Nedostatak im je izuzetno niska učinkovitost i kratak vijek trajanja. Tankoslojni paneli nisu najbolja opcija za kućni FN sustav i uglavnom se koriste u velikim FN sustavima, poput komunalnih ili industrijskih jer se može ugraditi više panela kako bi se zadovoljile potrebe za energijom.[7]

Slika 14. Tankoslojni fotonaponski panel



Izvor: samoodrživost.com, <https://samoodrzivost.com/vrste-solarnih-panela-koji-je-najbolji-izbor/>

Snaga fotonaponskog panela odgovara njegovom kapacitetu za proizvodnju energije. Općenito se izražava za 1 m², kako bi se dobila referentna veličina za sve modele. Svaki FN panel ima nazivnu snagu izraženu u watt-peak (Wp) ili kilovat-peak (kWp). U tablici 1. prikazana je usporedba između učinkovitosti fotonaponskih panela ovisno o području potrebnom za ugradnju FN panela nazivne snage 1 kWp.

Tablica 1. Učinkovitost fotonaponskih panela ovisno o području potrebnom za ugradnju FN panela nazivne snage 1 kWp

Vrsta FN panela	Učinkovitost FN panela	Područje potrebno za 1 kWp
Monokristalni	13-16 %	7 m ²
Polikristalni	12-14 %	8 m ²
Tankoslojni	6-7 %	15 m ²

Izvor: autor modificirao prema izvoru Pop L., Avram D., (2015.) The Truth About Solar Panels,

2.2.9. Inspekcija i održavanje fotonaponskih panela

Inspekcija fotonaponskih panela sastoji se slijedećih faza:

1. Vizualni pregled - koristan je način pregleda koji nam može dati brzi pregled općeg stanja fotonaponskih panela, ukazujući na moguća područja kvara. Najčešći uočeni problemi vizualnim pregledom su žućenje, delaminacija to jest razdvajanje dijelova panela, pojava mjehurića, pukotine na površini fotonaponskih panela, greške na anti refleksnom premazu i izgorene ćelije fotonaponskih panela.
2. Infracrvena termografija - vrsta nerazornog ispitivanja koja je više pouzdana od vizualnog pregleda. U Infracrvenom spektru možemo promatrati određene greške koje nisu vidljive golim okom kao što su područja panela sa većom temperaturnom vrijednosti. Područja fotonaponskih panela sa većom temperaturnom vrijednosti potencijalno su mjesta kvarova (vruće točke) .

3. Elektroluminiscencija - princip ovog nerazornog pregleda je da fotonaponski panel spojimo na struju te se emitira zračenje koje se nalazi u infracrvenom području, te se specijalnom kamerom prikuplja to zračenje i dobiva se slika izvora. Ovim ispitivanjem možemo otkriti pukotine i dijelove fotonaponskih panela koji nisu operativni i ne proizvode struju nakon djelovanja sunčevog zračenja. Ti dijelovi se zovu mrtve zone.
4. Električni pregled - pregled fotonaponskih panela koji obavljamo uz pomoć multi metra, fotonaponskog analizatora i sličnom opremom. Mjerenjem parametara rada električnog kruga fotonaponskih panela dobivamo podatke o njihovoj efikasnosti i mogućim kvarovima sustava. Djelovi koji se kontroliraju ovim pregledom su zaštitno uzemljenje, polaritet istosmjernih kablova i izolacijski otpor jednosmjernih strujnih krugova. Nakon mjerenja možemo pomoću fotonaponskih analizatora dobiti grafički karakteristiku struje i napona te usporediti sa onom koju propisuje proizvođač. [8]

2.2.10. Kvarovi fotonaponskih panela

1. Neusklađenost ćelija - manifestira se kao tamnija boja jedne ili više ćelija u odnosu na normalne ćelije. Infracrvena termografija prikazati će da na tim ćelijama imamo veću temperaturu nego na ostalima. Do ovoga kvara dolazi kada se u istu fotonaponski panel ugrade ćelije različitih karakteristika.
2. Promjena boje oko membrana ili takozvano žutilo - različite foto naponske ćelije promjene boje svoje površine. Do ove greške dolazi zbog promjene boje membrane zaštitne folije, koja se nalazi između ćelije i zaštitnog stakla. Promjena boje se dešava zbog djelovanja ultra ljubičastog zračenja i visokih temperatura na membranu prilikom čega dolazi do promjene kemijskih svojstava.
3. Mehanička greška - pukotina na staklu ćelije. Pukotine na staklu mogu dovesti do prodiranja zraka unutar strukture panela nepropusnu barijeru koja može spriječiti solarnu energiju da dođe do elektrona što može rezultirati smanjenjem efikasnosti foto naponskog panela.

4. Vruće točke (hot spots) - točke na površini fotonaponskog panela koje su uočljive termografskom kamerom. Vruće točke prikazuju dijelove fotonaponskog panela koji ima povišenu temperaturu u odnosu na ostale. Ovo se dešava zbog mogućih grešaka na ćeliji kao što su stvaranja kratkog spoja zbog prašine ili prljavština na fotonaponskoj ćeliji, pukotina na površini i djelomično zasjenjene ćelije.[8]

2.3. Fotonaponska elektrana Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

2.3.1. Fotonaponski paneli

Fotonaponska elektrana na krovu Studenskog doma sačinjena je od 55 običnih fotonaponskih panela i 55 hibridnih fotonaponskih panela (slika 15.). Obični fotonaponski paneli služe za proizvodnju struje, a hibridni služe za grijanje vode pomoću solarne energije. Fotonaponski paneli proizvod su kompanije Solimpeks Company, a njihov tip je SOL60M3-330 i Excell Pv-T Hybrid Panela. Excell Pv-T Hybrid monokristalni paneli poznati su da se mogu koristiti za proizvodnju struje i proizvodnju tople vode u isto vrijeme te time zauzimaju manje prostora zbog toga što nije potrebno imati zasebne elemente za grijanu vodu i proizvodnju struje. Oni maju produženi vijek trajanja zbog manjeg zagrijavanja panela od ostalih, a povrat investicije je smanjen. SOL60M3-330 su obični paneli za proizvodnju struje, maksimalne snage od 330 W i maksimalne voltaže od 1000 V. Temperatura na ćelijama diže se do 25 °C, te su rađeni prema IEC 61215 I IEC 61730 standardima. Fotonaponski paneli su dimenzija od 1.655 mm visine i 870 mm širine, a montirani su na postolje pod kutem od 35 °.

Slika 15. Fotonaponski paneli na krovu Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli



Izvor: autor

2.3.2. Inverteri

Inverteri koji se nalaze na krovu studentskog doma su tipa „Fronius symo“ inverter (slika 16.). Ovi pretvarači struje snage su u rasponu od 3,0 do 8,2 kW, Fronius Symo bez transformatora je trofazni pretvarač za svaku veličinu sustava. Ovaj sustav se najčešće koristi na krovovima krivog oblika ili različite orijentacije. Ima mogućnost upravljanja internetskom vezom to jest spajanja na Internet. Sučelje upravljača je jednostavno i lako je moguće vidjeti napajanje i potrošnju na njemu. Na foto naponskoj elektrani na krovu studentskog domu dva invertira oba invertira rade na maksimalno 30 posto.

Inverteri su uređaji koji pretvaraju istosmjerni napon u izmjenični i šalju ga u mrežu. Ovaj sustav je u potpunosti automatiziran te ima digitalni ekran koji u svakom trenutku pokazuje podatke o proizvodnji električne energije. Sustav sam mjeri veličinu istosmjerne struje na izlazu invertera te ako dođe do kvara ili greške da istosmjernu struju ne pretvori u izmjeničnu, sustav ga automatski gasi. Također inverteri posjeduju regulator snage i frekvencije koji sprečava skokovito odstupanje od 10 posto nazivne snage fotonaponske elektrane kod opterećenja.

Slika 16. Inverter

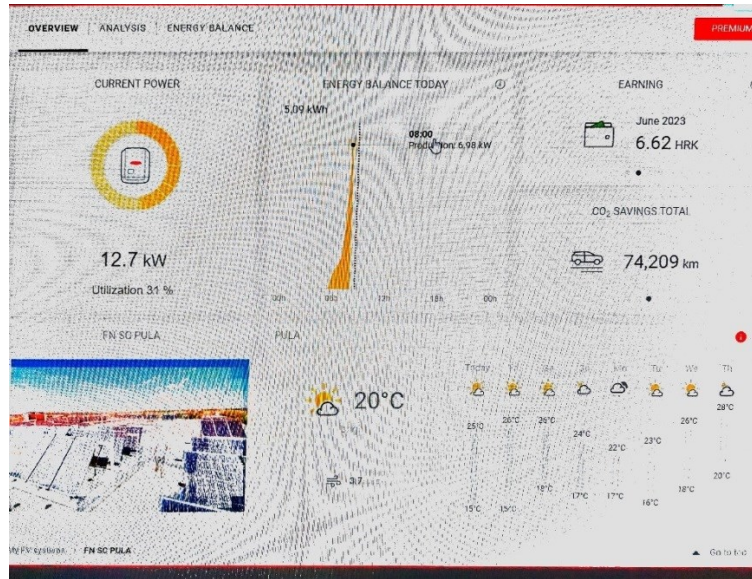


Izvor: Fotonaponski sustavi sunčana elektrana Sea-R Labin,
https://www.istra-istria.hr/media/filer_public/70/cd/70cd2348-2aa8-4b57-a490-9d01ce60248a/fotonaponski_sustavi_web.pdf

2.3.3. Softver za kontrolu FN panela

Fotonaponska elektrana je kontrolirana i motri se uz pomoć Fronius softvera (slika 17.). Softver nam omogućava uvid u godišnju, dnevnu i satnu potrošnju i proizvodnju struje i toplinske energije (slika 18.), a moguće je promatrati i cijeli tok proizvodnje električne energije te vremenske prilike tijekom dana.

Slika 17. Fotografija softvera za kontrolu fotonaponskog panela



Izvor: autor

Slika 18. Fotografija softvera za kontrolu fotonaponskog panela



Izvor: autor

2.3.4. Fotonaponski montažni sustavi za krovove

Fotonaponski montažni sustavi za krovove dijele se na sustave montaže za kose krovove, tena na sustave montaže za ravne krovove. Ovo je jedno od područja intenzivnog razvoja novih inovacija unutar industrije fotonaponskih panela. [9]

1. Fotonaponski sustavi za montažu na kosi krov

Najčešće se radi o stambenim jedinicama koje imaju kose krovove. Ovaj sustav zahtjeva neku vrstu sidrenja ili prodiranja u krov, kao što su pričvršćivanje na rogove kuća ili izravno u krov. Najčešće se koriste sustavi sa čeličnim profilima pričvršćenima na krov za podupiranje nizova FN panela (slika 19.). Svaka se ploča postavlja okomito u portretom stilu, te se pričvršćuje se dva profila sa stezaljkama. Profili se pričvršćuju u krov pomoću vijka. Sustavi bez profila se spajaju direktno na krov, a sustav sa zajedničkim profilima sastoji se od dva reda panela koji su pričvršćeni na četiri čelična profila, s time da se jedan profil uklanja nakon montiranja kako bi se učvrstilo na zajednički srednji profil.[9]

Slika 19. Fotonaponski sustav na tračnicama za kosi krov



Izvor: solarpowerworldonline.com/2017/02/different-types-solar-mounting-systems-roofs/

2. Fotonaponski sustav za montažu na ravni krov

Najčešći tip krovova u industriji ili komercijalnom poslu su ravni krovovi na koje se stavlja ovakav tip konstrukcije (slika 20.). Oni se postavljaju na veliku i ravnu površinu, laki su za montiranje. Ploče su najčešće pod nagibom od 5 do 15 stupnjeva, a paneli se učvršćuju pomoću stezaljki ili kopči za krov. Na velikim ravnim krovovima paneli se postavljaju na jug ili smjer istok-zapad. Sustavi za ravne krovove najčešće su napravljeni od aluminija ili nehrđajućeg čelika. [9]

Slika 20. Fotonaponski sustav za ravni krov



Izvor: solarpowerworldonline.com/2017/02/different-types-solar-mounting-systems-roofs/

3. INFRACRVENA TERMOGRAFIJA

3.1. Povijest

Prije 1800. godine nije se ni naslućivalo postojanje infracrvenog dijela elektromagnetskog spektra. Izvorno značenje infracrvenog spektra kao oblika toplinskog zračenja danas je možda manje očito nego što je bilo u vrijeme kada ga je

1800. godine otkrio Sir William Herschel (slika 21.) tijekom svoje potrage za novim optičkim materijalom.

Slika 21. Sir William Herschel (1738.-1822.)



Izvor: InterNACHI, <https://www.nachi.org/history-ir.htm>

Sir William Herschel (1738.-1822.), kraljevski astronom engleskog kralja Georgea III. – i već slavan po svom otkriću planeta Urana – tražio je materijal za optički filter koji bi smanjio svjetlinu Sunčeve slike u teleskopima tijekom promatranja Sunca. Dok je testirao različite uzorke obojenog stakla koji su dali slično smanjenje svjetline, zaintrigiralo ga je otkriće da neki od uzoraka propuštaju vrlo malo sunčeve topline, dok drugi propuštaju toliko topline da je riskirao oštećenje oka nakon samo nekoliko sekundi promatranja. Herschel je ubrzo bio uvjeren u nužnost postavljanja sustavnog eksperimenta s ciljem pronalaženja jednog materijala koji bi dao željeno smanjenje svjetline, kao i maksimalno smanjenje topline. Započeo je pokus zapravo ponavljajući Newtonov pokus s prizmom, ali tražeći učinak zagrijavanja, a ne vizualnu distribuciju intenziteta u spektru. Prvo je tintom zacrnio žarulju osjetljivog termometra sa živom u staklu, a s tim kao detektorom zračenja nastavio je testirati učinak zagrijavanja različitih boja spektra formiranih na vrhu stola propuštanjem sunčeve svjetlosti kroz staklenu prizmu. Ostali su termometri postavljeni izvan Sunčevih zraka i služili su kao kontrola. Dok se zacrnjeni termometar polako pomicao uzduž boja spektra, očitavanja temperature pokazivala su stalni porast od ljubičastog kraja do crvenog kraja. To nije bilo sasvim neočekivano, budući da je talijanski istraživač Landriani, u sličnom eksperimentu 1777., primijetio gotovo isti učinak. Međutim, Herschel je bio taj koji je prvi prepoznao da mora postojati točka u kojoj učinak zagrijavanja doseže maksimum, te da mjerenja

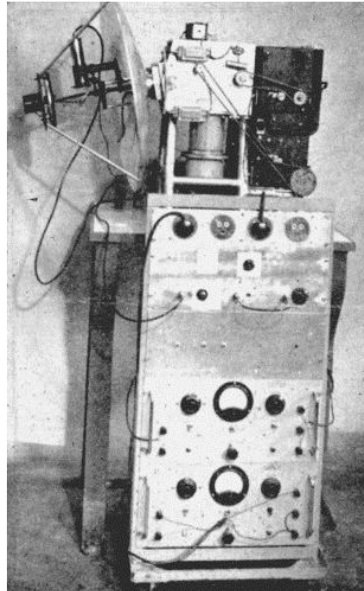
ograničena na vidljivi dio spektra nisu uspjela locirati tu točku. Pomaknuvši termometar u tamno područje iza crvenog kraja spektra, Herschel je potvrdio da toplina nastavlja rasti. Kada je konačno pronašao maksimalnu točku, otkrio je da ona leži daleko iza crvenog kraja u onome što je danas poznato kao "infracrvene valne duljine". Kada je Herschel otkrio svoje otkriće, ovaj novi dio elektromagnetskog spektra nazvao je "termometrijskim spektrom". Samo zračenje ponekad je nazivao "tamnom toplinom" ili jednostavno "nevidljivim zrakama". Međutim, Herschel nije bio taj koji je stvorio izraz "infracrveno". Riječ se počela tiskati tek 75 godina kasnije, a još uvijek nije jasno tko ju je izumio. [10]

Godine 1840. njegov sin John Herschel nastavio je očeve eksperimente nakon što je njegov otac umro, i napravio jednostavan prikaz isparavanjem smjese ugljika i alkohola koristeći fokusiranu sunčevu svjetlost. Prikaz je nazvao "termogram". Zanimljivo je primijetiti da Johnov najbliži prijatelj bio je Charles Babbage kojeg je susreo na Sveučilištu Cambridge, i s kim putovao je po Europi u znanstvenim potragama. Babbage je općenito hvaljen kao jedan od pionira računarstva; budući da je sagradio matematički uređaj koji se zove diferencijalni stroj, i konstruirao jednostavne matematičke programe za upravljati strojem. Dakle, otac, sin i obiteljski prijatelj mogu se smatrati pravim pionirima današnjeg kompjuteriziranog termalnog snimanja. Drugo važno otkriće objavljeno je 1935. kada je JD Hardy, američki fiziolog pokazao da površina ljudske kože ima karakteristike gotovo savršenog radijatora crnog tijela, budući da je visoko učinkovit u izmjeni topline zračenjem (4). U međuvremenu su fizičari proučavali načine kako povećati osjetljivost termometrije posebno električne vodiče i termoparove. Američki profesor Samuel Langley napravio je sjajan doprinos izumom bolometra. To je uređaj koji detektira elektromagnetsko zračenje pomoću povećanja otpora vodiča. [11]

U Njemačkoj Marianus Czerny koji je bio profesor fizike na Goethe Institutu Frankfurtskog Sveučilišta, postao je poznat u spektroskopiji, ali također je postavio temelje za toplinske senzore. Razvio je evaporograf 1925. Jedan od njegovih studenata Bowling Barnes izgradio je prvu termografsku kameru temeljenu na termistorima 1950-ih. U Velikoj Britaniji, fizičar istraživač dr. Max Cade napravio je skenirajući infracrveni termograf koristeći elektronski detektor indijevog antimonida. Ovo je izgrađeno tijekom Drugog svjetskog rata, ali se nije pokazao dovoljno brz za

navigaciju u usporedbi s radarskim sustavom. To je dovelo do upotrebljivijeg, velikog uređaja koji proizvodi bolju i kvalitetniju sliku, Pyroscan (slika 22.), prvi britanski medicinski termograf 1960. Godine. [11]

Slika 22. Pyroscan, termograf iz 1960.



Izvor: Francis E., Ring J.,(2012.), History of Thermology and Thermography: Pioneers and Progress, <http://www.uhlen.at/thermology-international/data/pdf/223A03.pdf>

Dramatičan napredak učinjen je u području infracrvenog detektorskog sustava koji su prošli nekoliko generacija inovativne tehnologije. Sada postoje infracrvene odašiljačke leće koje rade ogromnu razliku u termalnom snimanju ljudskih i bioloških subjekata. Termografske kamere koje se danas koriste temelje se na tehnologiji koja je izvorno razvijena za vojsku. Infracrvena tehnologija pruža mogućnost da se vide i ciljaju protivničke snage kroz mrak noći ili preko bojnog polja prekrivenog dimom. Svojstva koja su infracrvenu detekciju učinila vrijednom za vojne snage diljem svijeta također su je učinile vrijednom za vatrogasce i organe za provođenje zakona. [11]

Kasnih 1950-ih i 1960-ih, Texas Instruments, Hughes Aircraft i Honeywell razvili su jednoelementne detektore koji su skenirali scene i proizvodili linijske slike. Vojska nije dopustila pristup tehnologiji jer je bila skupa i imala je osjetljive vojne primjene. Ovi osnovni detektori doveli su do razvoja moderne toplinske slike. Piroelektričnu vidicon cijev razvili su 1970-ih Philips i EEV i postala je srž proizvoda koji je Kraljevska mornarica prvi put koristila za gašenje požara na brodu. Godine 1978., Raytheonova

grupa za istraživanje i razvoj, tada dio Texas Instrumentsa, patentirala je feroelektrične infracrvene detektore koji su koristili barij stroncij titanat ili BST, što je materijal koji oblaže senzor termalne slike. Raytheon je prvi put demonstrirao tehnologiju vojsci 1979. godine. Termografske kamere temeljene na BST i mikrobolometarskim tehnologijama sada su dostupne za nevojne primjene. Zapravo, termalne slike su se proširile za upotrebu u policiji, komercijalnim i industrijskim aplikacijama, sigurnosti, transportu i mnogim drugim industrijama. [11]

Uočljiva je velika razlika nekadašnjih termografskih kamera, u težini i broju potrebnih komponenti, u odnosu na današnji izgled termografskih kamera (slika 23.)

Slika 23. Termografska kamera, nekad i danas



1969. Termografska kamera, Model 661, Težina: kamere 25 kg, oscilokopa 20 kg, stativ 15 kg. Operateru je također bio potreban generator za izmjeničnu struju (AC) od 220 V i staklenka od 10 L tekućeg dušika za hlađenje kamere.



2015. FLIR one, dodatak za iPhone i android mobitele. Težina 90 g

Izvor: InterNACHI, <https://www.nachi.org/history-ir.htm>

3.2. Infracrvena termografija

Infracrvena termografija (IRT) je infracrvena tehnika nerazornog ispitivanja koja se koristi za brzu analizu materijala, struktura i komponenti. Metoda je pouzdana zbog beskontaktnosti, kvalitativne i kvantitativne kontrole, neovisno o veličini i obliku uzorka

od interesa. IRT procjenjuje materijale bez naknadnog utjecaja na mehanička, fizikalna ili kemijska svojstva. Međutim, metoda je podložna smetnjama kada okolina nije kontrolirana ili postavka eksperimenta nije optimalna. Izazovi kao što su nejednoliko zagrijavanje, niska prostorna razlučivost i buka iz okoliša uzrokuju određene poteškoće u otkrivanju i karakterizaciji nedostataka. Koriste se za mnoge primjene, ali se eksperimentalne postavke uvelike razlikuju. Na primjer, oprema je montirana na robotske ruke i bespilotne letjelice (UAV), dok uvjeti postavljanja nisu tako povoljni kao laboratorijski uvjeti; stoga je vjerojatno da će se buka povećati zbog kretanja, vibracija i neusklađenosti sekvenci. [12]

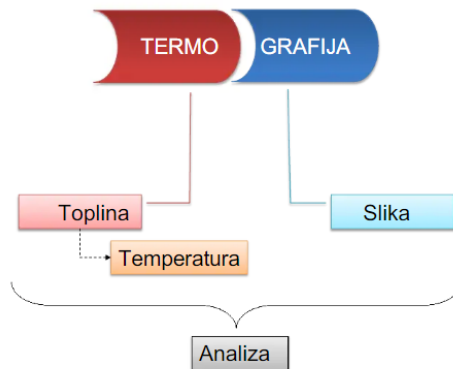
Prethodno navedeni izazovi zahtijevaju nužnost nekih metoda obrade signala kako bi se optimizirali rezultati inspekcije. Fourierova transformacija (FT) često je korištena alat za obradu slike, koji se koristi za rastavljanje slike na njene sinusne i kosinusne komponente. Ovaj signal se filtrira i izlazna slika predstavlja sliku u frekvencijskoj domeni, dok je ulazna slika ekvivalent prostorne domene; svaka točka će tada predstavljati frekvenciju sadržanu u slici prostorne domene. U aktivnoj termografskoj obradi signala, metoda čita niz toplinskih podataka i izdvaja amplitudne i fazne slike, koje sadrže kvantitativne razumljive informacije. [12]

LIT (termografija s zaključavanjem) i PPT (termografija s pulsnom fazom) dvije su uobičajene tehnike ne razornog ispitivanja koje se koriste za procjenu temperaturnog odziva u frekvencijskoj domeni pomoću Fourierove transformacije. Podaci o amplitudi i faznom kutu izračunavaju se iz povijesti temperature i vremena svakog piksela i zatim se pohranjuju kao dvodimenzionalne (2D) matrice. Matrice se pretvaraju u zasebne slike amplitude i faze. Amplitudna slika fokusira se na površinu uzorka do ograničene dubine, dok je fazna slika manje osjetljiva na artefakte kao što su nejednoliko zagrijavanje i varijacije emisivnosti, ali se fokusira na dubinu koju postiže toplinski val; ovo može naknadno locirati dubinu defekta. [12]

Omjer signala i šuma (SNR) u znanosti i inženjerstvu može se definirati kao mjera koja uspoređuje razinu željenog signala s razinom pozadinske buke. U ovom kontekstu, SNR je definiran usporedbom signala unutar oštećenog područja materijala sa zvučnim područjem materijala. [12]

Infracrvena termografija (slika 24.) je proces prikupljanje i analiza toplinskih informacije iz beskontaktnih termografskih uređaja. [13]

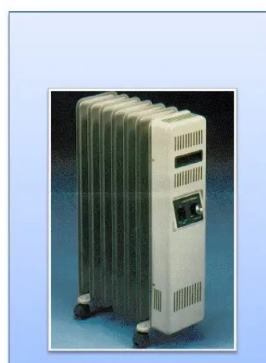
Slika 24. Infracrvena termografija



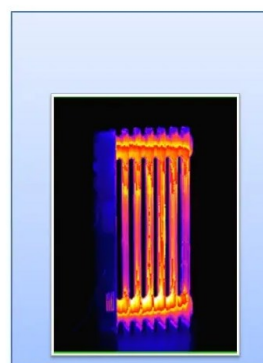
Izvor: ITC, Introduction to Infrared Thermography Basics,
<https://www.scribd.com/document/347590702/Introduction-to-Infrared-Thermography-Basics>

Toplina je energija koja se izmjenjuje između sustava koji imaju različite temperature. Kad nema temperaturne razlike infracrvena slika neće pokazati kontrast i ne može se analizirati. Mi, svojim očima, vidimo svijet u bojama. Ovaj radijator (slika 25.) je sivo-bijeli na plavoj pozadini. Radijator je sivo-bijele boje jer njegova površina reflektira ove komponente bijele boje Infracrveno je slično vidljivo očima. Infracrvena kamera također koristi boje koje predstavljaju toplinski spektar koji se vidi. Razlika je u tome da boje u infracrvenom prikazu izražava oboje: refleksiju i emisiju. [13]

Slika 25. Radijator u vidljivom i infracrvenom spektru



Radijator vidljiv očima

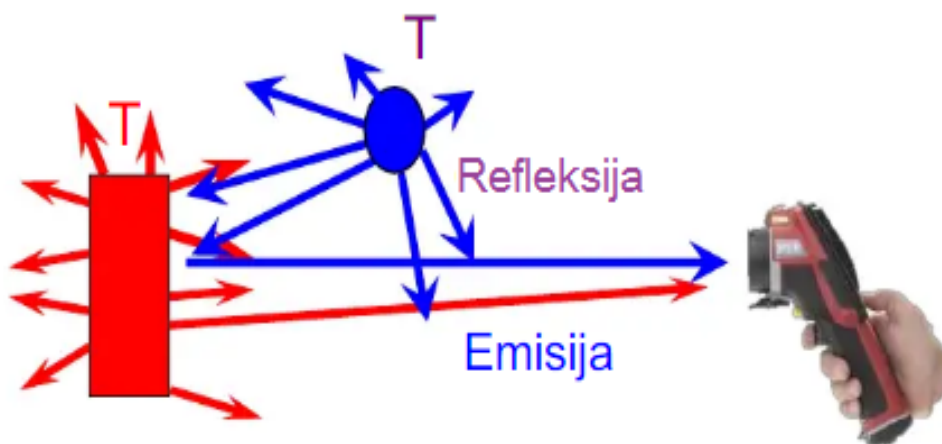


Radijator vidljiv infracrveno

Izvor: ITC, Introduction to Infrared Thermography Basics,
<https://www.scribd.com/document/347590702/Introduction-to-Infrared-Thermography-Basics>

Emisija topline dolazi od samog materijala. Refleksija (odraz) dolazi od onoga što se nalazi ispred; koje ponekad mogu uključivati i operatora. Emisija i refleksija (slika 26.) su komplementarne: dobar emiter je loš reflektor, dobar reflektor je loš emiter. [13]

Slika 26. Emisija i Refleksija

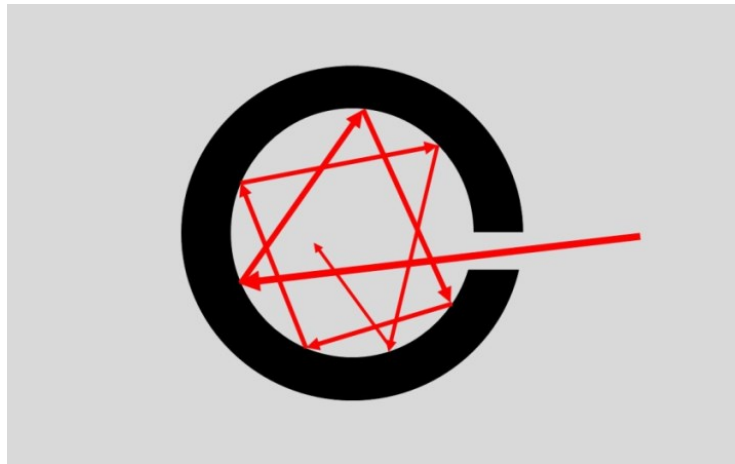


Izvor: ITC, Introduction to Infrared Thermography Basics,
<https://www.scribd.com/document/347590702/Introduction-to-Infrared-Thermography-Basics>

Emisivnost ili faktor emisivnosti je pojam koji predstavlja sposobnost materijala da emitira toplinsko zračenje. Svaki materijal ima drugu emisivnost, a određivanje točne emisivnosti nekog materijala je poprilično teško. Emisivnost materijala se kreće od 0,00 (ništa ne emitira) do 1,00 (potpuno emitira – crno tijelo). [13]

Crno tijelo, prikazano na slici 27., je tijelo koje na svakoj temperaturi potpuno apsorbira zračenje svih valnih duljina naziva se idealno crno tijelo. Ono ne odbija i ne propušta niti jedno upadno zračenje, crno je za sve valne duljine elektromagnetskog zračenja. Osim što apsorbira zračenje, crno tijelo ga i emitira. Zračenje koje primamo od crnog tijela rezultat je aktivnosti samog tijela, a ne zračenja drugih izvora koje se od njega odbilo. U prirodi ono ne postoji, tijela oko nas nisu idealno crna. [14]

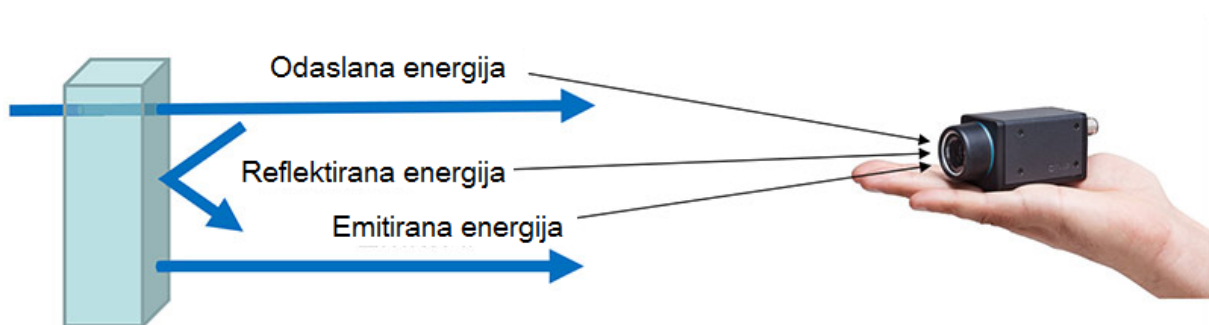
Slika 27. Crno tijelo potpuno apsorbira sva zračenja



Izvor: Galović S., Tuškan T., Fizika 4, digitalni obrazovni sadržaj za četvrti razred gimnazije
<https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a985a697-8949-410e-af32-bfd69b605dd6/kvanti-elektromagnetskog-zracenja.html>

Mjerenja temperature snimljena termalnom kamerom sastoje od tri komponente: odaslane energije, reflektirane energije i emitirane ili zračene energije (slika 28.). [15]

Slika 28. Tri komponente mjerenja temperature termalnom kamerom



Izvor: Tarin M., What is emissivity? The Key to Accurate Temperature Measurements, Movitherm,
<https://movitherm.com/knowledgebase/what-is-emissivity/>

Odaslana energija je komponenta energije koja prolazi kroz objekt. Uobičajen primjer odaslane energije je dnevno svjetlo koje struji kroz stakleni prozor. Reflektirana energija je energija koja se odbija od mete i vraća u kameru. Na isti način na koji ulašteno ogledalo može odražavati vaš lik, toplinska se energija također može reflektirati. Stupanj refleksije ovisi o materijalima i površinama. Emitirana (ili zračena) energija je energija koja je svojstvena meti. Ovu vrstu energije stvara objekt ili je

rezultat temperaturne razlike između objekta i okolnog okoliša. Toplinska energija teče od objekata s višom temperaturom do objekata s nižom temperaturom bilo kondukcijom, konvekcijom ili zračenjem. [15]

Korisni primjeri mogu se naći u svjetlu žarulje ili toplinskoj energiji električnog grijača. Ovi izvori energije odaju ili emitiraju toplinsku toplinu u okolni okoliš, djelujući na izjednačavanje temperaturne neravnoteže. U većini slučajeva, kada mjerimo temperaturu nekog objekta, prvenstveno nas zanima emitirana energija zračenja. Odašlana i reflektirana energija dodaju pristranost ili pogrešku mjerenja sustavu i smanjuju točnost mjerenja. Stoga je korisno imati praktičan način izražavanja odnosa između emisivnosti, odašlanosti i refleksije. [15]

1. Emisija

Formula emisivnosti omogućuje izračunavanje relativnog intenziteta energetskih komponenti. Formula se izražava kao:

$$1 = \text{Prijenos} + \text{Refleksija} + \text{Emisija}$$

Ova se formula temelji na ideji da zbroj svih izvora energije (odašlanih, reflektiranih i emitiranih) ima zajedničku vrijednost 1. Svaka komponenta doprinosi odgovarajućim udjelom ili postotkom prema ukupnom iznosu. Budući da smo pretpostavili da je zbroj svih komponenti 1, možemo izračunati ukupnu energiju koja se emitira:

$$1 - (\text{Prijenos} + \text{Refleksija}) = \text{Emisija}$$

Ako je precizno mjerenje temperature kritično, tada se reflektirana i odašlana energija moraju minimizirati. To je potrebno za optimizaciju omjera signala i prednaprežanja između emitirane energije i ostalih komponenti energije. [15]

2. Prijenos

Općenito, većina materijala ne odašilje toplinsku energiju ili toplinsko zračenje posebno dobro. Iz tog razloga, leće za termalne kamere moraju biti izrađene od neobičnih i često rijetkih materijala. Materijali poput germanija (Ge), safira ili cinkovog selenida (ZnSe). Dok će refleksija imati veći utjecaj na točnost mjerenja u većini okolnosti, prijenos može biti razmatran, ovisno o primjeni. . [15]

3. Refleksija

Ako se mjeri (infracrveni) neproziran objekt, prijenos će biti nula, a formula za emisiju postaje:

$$1 - \text{Prijenos} = \text{Emisija}$$

Ovo pojednostavljuje jednadžbu, ali možda neće smanjiti složenost onoliko koliko je isprva zamišljeno. Iako prijenos nije uobičajen, mnogi materijali reflektiraju toplinsku energiju. Ovo stvara dva potencijalna problema: prvi se odnosi na dobivanje pouzdanih mjerenja od mjernog cilja visoke refleksije. Drugi je utjecaj drugih izvora topline u blizini objekta interesa. Sjajne, reflektirajuće površine kao što su polirani metali, najveći su izazov od svih. U slučaju poliranog aluminijskog prijenos je nula; toplinska energija ne prolazi niti se prenosi izravno kroz metale. No, reflektivnost je visoka, čak 0,9. Ako je zbroj svih energija jednak 1, a refleksija 0,9 ili 90%, tada će emisivnost biti vrlo niska. Emisivnost može biti oko 0,1 ili 10% signala. S druge strane, ako ista aluminijska površina ima mutnu i tamnu površinu, to će dramatično smanjiti refleksiju. Uz nisku refleksiju i bez prijenosa kroz materijal, veći postotak izmjerene toplinske energije bit će emitirana energija.. [15]

Emisivnost svakog uobičajenog materijala ovisi o njegovom sastavu i karakteristikama njegove površine. Standardizirane tablice emisivnosti (Tablica 2.) sastavljene su s popisom mnogih uobičajenih objekata i površina. Ako treba odrediti emisivnost određenog ciljanog objekta, tablice emisivnosti mogu biti od velike koristi. [15]

Tablica 2. Emisivnost materijala

Materijal	Emisivnost
Ljudska koža	0,98
Voda	0,95
Aluminij (polirani)	0,10
Aluminij (anodiziran)	0,65
Plastični	0,93
Keramika	0,94
Staklo	0,87
Guma	0,90
Tkanina	0,95

Izvor: Tarin M., What is emissivity? The Key to Accurate Temperature Measurements, Movitherm, <https://movitherm.com/knowledgebase/what-is-emissivity/>

Ostali čimbenici koji utječu na točnost mjerenja:

Temperatura okoline atmosfere (koja je u biti reflektirano zalutalo zračenje) također će imati određeni utjecaj na mjerenja. Ako se želi optimizirati točnost mjerenja, isplati se postaviti konfiguraciju temperature okoline u termalnoj kameri. Ako je temperatura objekta blizu temperature okolnog zraka, zračenje okoline će imati veći utjecaj na točnost. To je zato što meta ima nižu vrijednost emisije. Komponenta emisivnosti temeljena na zračenju mete će zauzimati manji udio u izmjerenim vrijednostima. Atmosfera i refleksija, iako niže vrijednosti, činit će veći udio "kolača" emisivnost. [15]

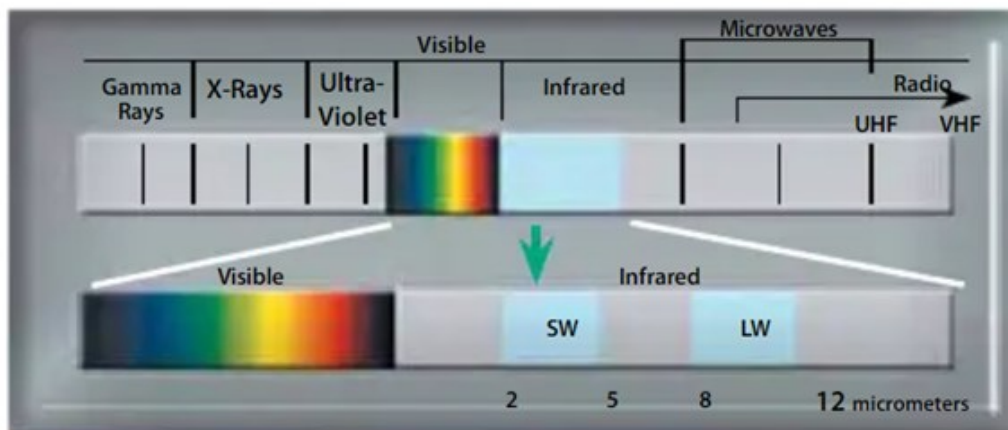
Kut gledanja također može utjecati na mjerenje temperature. Ako je vaša kamera postavljena pod kutom, izgubit će se postotak emitirane energije. Iznos gubitka ovisit će o kutu. Najtočnija mjerenja temperature bit će prikupljena kada je ravnina senzora kamere paralelna s površinom. Što se kut više povećava, to će senzor kamere detektirati manje emitirane energije. Također, veći će utjecaj zračenje iz okoliša imati na rezultirajuća mjerenja. [15]

Utjecaj refleksije bit će složeniji ako postoje vrući objekti u blizini vaše mete. Vrući objekt koji se reflektira od površine sjajnog predmeta može nadmašiti mnogo manju emisiju. Jarka sunčeva svjetlost koja se odbija od glatke površine gotovo će uvijek utjecati na mjerne vrijednosti. Ukupna temperatura uključuje reflektiranu energiju, tako da će refleksije vrućih objekata dodati šum i pogoršati rezultate. To je uvijek važno imati na umu kada se određuje položaj kamere u odnosu na cilj. [15]

3.3. Infracrveno zračenje

IR je vrsta elektromagnetskog zračenja, kontinuum frekvencija koje nastaju kada atomi apsorbiraju i zatim oslobađaju energiju. Od najviše do najniže frekvencije, elektromagnetsko zračenje uključuje gama-zrake, X-zrake, ultraljubičasto zračenje, vidljivu svjetlost, infracrveno zračenje, mikrovalove i radio valove. Zajedno, ove vrste zračenja čine elektromagnetski spektar. (Slika 29.) [16]

Slika 29. Elektromagnetski spektar



Izvor: Schwoegler M., ITC, Infrared Thermography Basics,
<https://www.scribd.com/document/425109282/Infrared-Thermography-Basics>

Unutar elektromagnetskog spektra, infracrveni valovi pojavljuju se na frekvencijama iznad onih mikrovalova i odmah ispod onih crvenog vidljivog svjetla, otuda i naziv "infracrveni". Valovi infracrvenog zračenja duži su od valova vidljive svjetlosti. Infracrvene frekvencije (Tablica 3..) kreću se od oko 300 gigaherca (GHz) do oko 400

teraheca (THz), a procjenjuje se da su valne duljine između 1000 mikrometara (μm) i 760 nanometara (2,9921 inča), iako te vrijednosti nisu konačne [16].

Tablica 3. Elektromagnetski spektar – usporedba svjetla

Ime	Valna duljina	Frekvencija (Hz)	Energija fotona (eV)
Gama-zrake	manje od 22 sata	više od 30 EHz	više od 124 keV
X- zrake	22 sata – 10 nm	30 PHz – 30 EHz	124 keV – 124 eV
Ultraljubičasto zračenje	10 nm – 400 nm	750 THz – 30 Phz	124 eV – 3,3 eV
Vidljivo svjetlo	400 nm – 700 nm	430 THz – 750 THz	3,3 eV – 1,7 eV
Infracrveno zračenje	700 nm – 1 mm	300 GHz – 430 THz	1,7 eV – 1,24 meV
Mikrovalovi	1 mm – 1 metar	300 MHz – 300 GHz	1,24 meV – 1,24 μeV
Radio valovi	1 metar i više	300 MHz i niže	1,24 μeV i niže

Izvor: Infrared, Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>

Slično spektru vidljive svjetlosti, koji se proteže od ljubičaste (najkraća valna duljina vidljive svjetlosti) do crvene (najduža valna duljina), infracrveno zračenje ima vlastiti raspon valnih duljina. Kraći "blizu infracrveni" valovi, koji su bliži vidljivom svjetlu na elektromagnetskom spektru, ne emitiraju nikakvu vidljivu toplinu i oni su ono što se ispušta iz daljinskog upravljača za promjenu kanala. Duži infracrveni valovi, koji su bliži mikrovalnom dijelu elektromagnetskog spektra, mogu se osjetiti kao intenzivna toplina, poput topline od sunčeve svjetlosti ili vatre. Infracrveno zračenje jedan je od tri načina prijenosa topline s jednog mjesta na drugo, a druga dva su konvekcija i kondukcija. Sve s temperaturom iznad 5 Kelvina ($-268,15\text{ }^\circ\text{C}$) emitira infracrveno zračenje. Sunce daje polovicu svoje ukupne energije kao infracrveno, a veliki dio vidljive svjetlosti zvijezde se apsorbira i ponovno emitira kao infracrveno. Primarni izvor infracrvenog zračenja je toplina ili toplinsko zračenje. Svaki predmet koji ima temperatura iznad apsolutna nula ($-273,15\text{ }^\circ\text{C}$ ili 0 Kelvin) emitira zračenje u infracrveno područje. Čak i predmeti za koje mislimo da su vrlo hladni, kao što je kockice leda, emitiraju infracrveno zračenje. Infracrveno zračenje doživljavamo svaki dan. Toplina koju osjećamo iz

sunca, vatre ili radijatora su svi infracrveno zračenje. Iako naše oči ne vide to, živci u našoj koži osjećaju toplinu. Što je objekt topliji emitira više infracrvenog zračenja. [16]

3.4. Primjena infracrvenog zračenja

Kućanski uređaji poput grijaćih lampi i tostera (slika 30.) koriste infracrveno zračenje za prijenos topline, kao i industrijski grijači poput onih koji se koriste za sušenje i stvrdnjavanje materijala. Žarulje sa žarnom niti pretvaraju samo oko 10 posto svoje električne energije u vidljivu svjetlosnu energiju, dok se ostalih 90 posto pretvara u infracrveno zračenje.

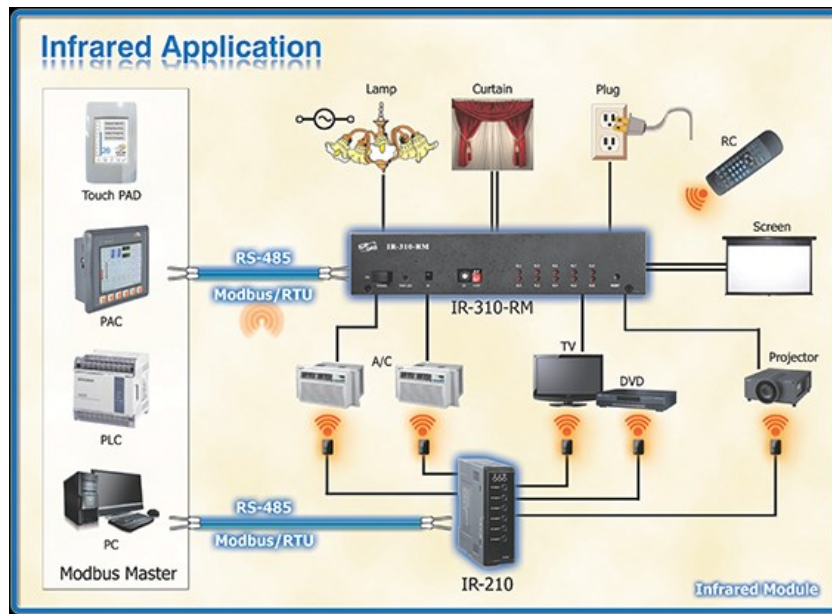
Slika 30. Uporaba infracrvenog zračenja u kućanstvu



Izvor: Lucas J., (2019.) What Is Infrared?, <https://www.livescience.com/50260-infrared-radiation.html>

Infracrveni laseri mogu se koristiti za komunikaciju od točke do točke na udaljenostima od nekoliko stotina metara. TV daljinski upravljači (slika 31.) koji se oslanjaju na infracrveno zračenje ispaljuju impulse infracrvene energije od svjetleće diode (LED) do infracrvenog zračenja prijemnika u TV-u. Prijemnik pretvara svjetlosne impulse u električne signale koji nalažu mikroprocesoru da izvrši programiranu naredbu. Na taj način rade i ostali infracrveni proizvodi za kućnu automatizaciju. [16]

Slika 31. Primjena infracrvenog zračenja



Izvor: Lucas J., (2019.) What Is Infrared?, <https://www.livescience.com/50260-infrared-radiation.html>

Jedna od najkorisnijih primjena infracrvenog spektra je u sensorima i otkrivanju. Svi objekti na Zemlji emitiraju infracrveno zračenje u obliku topline. To se može detektirati elektroničkim sensorima, poput onih koji se koriste u naočalama za noćno gledanje i infracrvenim kamerama. Jednostavan primjer takvog senzora je bolometar, koji se sastoji od teleskopa s otpornikom osjetljivim na temperaturu ili termistorom, u njegovoj žarišnoj točki. Ako toplo tijelo dođe u vidno polje ovog instrumenta, toplina uzrokuje vidljivu promjenu napona na termistoru. Termalne kamere (slika 32.) koriste mikrobolometre za dobivanje preciznih infracrvenih slika. Mikrobolometar sastoji se od rešetke toplinskih senzora, izrađenih od vanadijevog oksida. Te su rešetke izgrađene preko odgovarajućih silikonskih mreža. Kad god infracrveno zračenje pogodi ove senzore, električni otpor vanadijevog oksida se mijenja. Te se promjene mogu mjeriti i grafički prikazati kao temperature. Ovisno o veličini mreže, vidno polje kamere se povećava ili smanjuje. Ove kamere obično sadrže slikovne čipove uređaja s spregnutim nabojem koji su osjetljivi na IR svjetlo. Slika koju stvara kamera može se zatim reproducirati u vidljivom svjetlu. Ovi sustavi mogu biti dovoljno mali da se mogu koristiti u ručnim uređajima ili nosivim naočalama za noćno gledanje. Kamere se također mogu koristiti za nišane sa ili bez dodavanja infracrvenog lasera za ciljanje. [16]

Slika 32. Primjer termalne kamere koja se ugrađuje na bespilotnu letjelicu



Bespilotna letjelica

Termalna kamera

Izvor: Shakeb Deane i dr., (2020.), Comparison of Cooled and Uncooled IR Sensors by Means of Signal-to-Noise Ratio for NDT Diagnostics of Aerospace Grade Composites, MDPI <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3381>

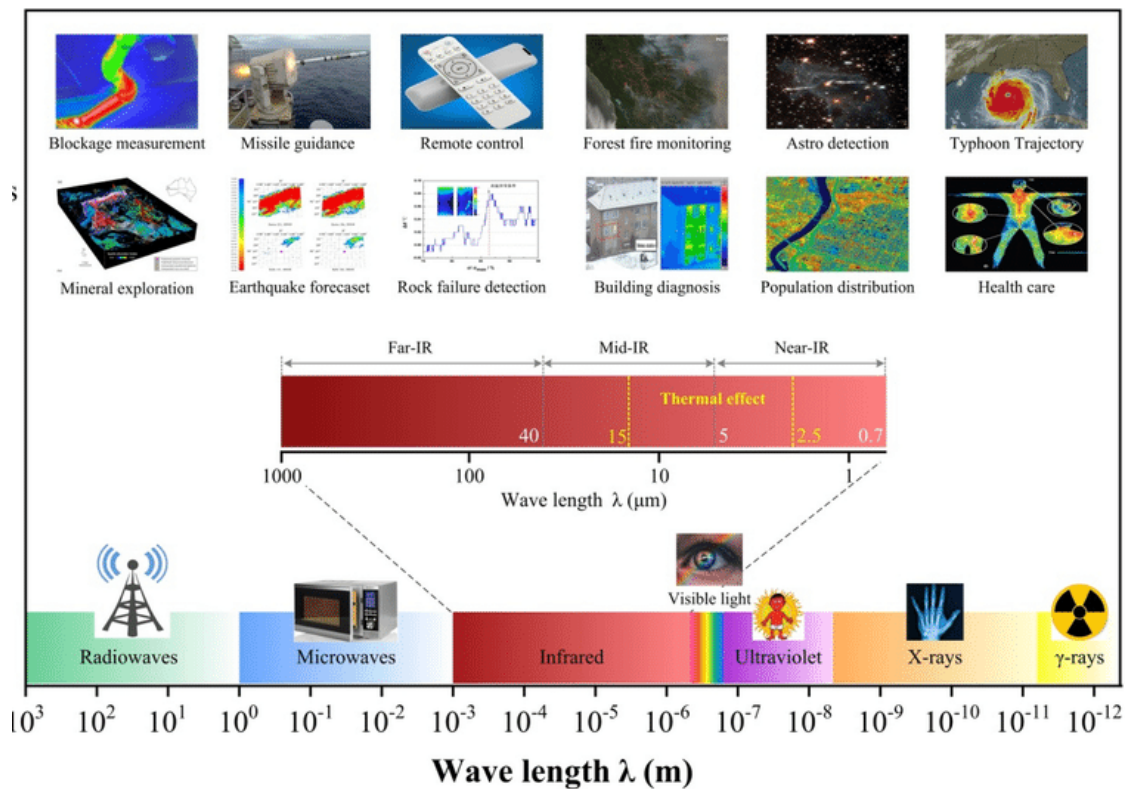
Infracrvena spektroskopija mjeri infracrvene emisije iz materijala na određenim valnim duljinama. Infracrveni spektar tvari pokazat će karakteristične padove i vrhove kako fotone (čestice svjetlosti) apsorbiraju ili emitiraju elektroni u molekulama dok elektroni prelaze između orbita ili energetske razine. Te se spektroskopske informacije zatim mogu koristiti za identifikaciju tvari i praćenje kemijskih reakcija. [16]

Infracrvenu astronomiju kao "otkrivanje i proučavanje infracrvenog zračenja (toplinske energije) koje emitiraju objekti u svemiru." Napredak u Infracrvenim sustavima snimanja omogućio je detaljno promatranje distribucije infracrvenog izvora u svemiru, otkrivajući složene strukture u maglicama, galaksijama i strukturu svemira velikih razmjera. Jedna od prednosti infracrvenog promatranja je ta što može otkriti objekte koji su previše hladni da bi emitirali vidljivu svjetlost. To je dovelo do otkrića prethodno nepoznatih objekata, uključujući komete, asteroide i tanke oblake međuzvezdane prašine za koje se čini da prevladavaju širom galaksije. Infracrvena astronomija je posebno korisna za promatranje hladnih molekula plina i za određivanje kemijskog sastava čestica prašine u međuzvezdanom mediju. Ta se promatranja provode pomoću specijaliziranih detektora koji su osjetljivi na Infracrvenu fotone. Još jedna prednost infracrvenog zračenja je ta što njegova duža valna duljina znači da se ne raspršuje toliko kao vidljiva svjetlost. Dok čestice plina i prašine mogu apsorbirati ili

reflektirati vidljivu svjetlost, dulji infracrveni valovi jednostavno obilaze ove male prepreke. Zbog ovog svojstva, infracrveno zračenje se može koristiti za promatranje objekata čiju svjetlost zaklanjaju plinovi i prašina. Takvi objekti uključuju novonastale zvijezde ugrađene u maglice ili središte Zemljine galaksije. [16]

Na slici 33. je prikazan elektromagnetski spektar infracrvenog područja i primjena tehnologije infracrvenog zračenja.

Slika 33. Područja primjene tehnologije infracrvenog zračenja



Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Electromagnetic-spectrum-of-infrared-region-and-applications-of-infrared-radiation_fig1_342581749

4. TERMOGRAFSKO SNIMANJE I ANALIZA – SVEUČILIŠTE JURJA DOBRILE U PULI

U ovom poglavlju diplomskoga rada objasniti će se i prikazati izvršeno mjerenje i istraživanje u skladu sa temom ovoga rada. Glavna tema ovoga rada je mjerenje i analiza fotonaponske elektrane i pripadajućih fotonaponskih panela na Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli i donošenje zaključaka o radu i poboljšanju gore spomenute fotonaponske elektrane. Mjerenja su bila vršena tri puta tijekom četvrtog i petog mjeseca 2023. godine u popodnevnim satima. Foto naponska elektrana se nalazi na krovu zgrade studentskog doma Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli (slika 34.).

Slika 34. Fotonaponska elektrana Jurja Dobrile u Puli



Izvor: autor

Za analizu tehnikom infracrvene termografije korištena je termografska kamera PeakTech 5605 (slika 35.). Kamera je nabavljena preko europskog projekta: „Stručnom praksom do razvoja karijere“.

PeakTech 5605 je termografska kamera rezolucije 60x60 piksela, vidnoga polja 20°x20°, temperaturni razmak od 20 °C do +300 °C i termalne osjetljivosti 0,3 °C. Pomoću ove kamere nije moguće snimati videozapise nego je moguće slikati pojedinačne fotografije.

Slika 35. Peak tech kamera



Izvor: autor

Tijekom sva tri dana snimanja bilo je djelomično sunčano, a takvo vrijeme je dobro za analizu pošto je jedino moguće vidjeti rezultate analize ako sunčeve svjetlosti obasjavaju fotonaponske panele. Također, u sva tri dana bila je idealna dozračnost od 1000 W/m² . Pošto je bilo sunčano vrijeme bilo je otežano uzimati fotografije radi refleksije ekrana same kamere, a temperatura okoline je bila 25 °C. Ove informacije o dozračnosti uzete su iz Fronius softvera kojim se upravlja fotonaponskom elektranom i iz kojega se mogu iščitati podaci o radu elektrane.

Slika 36. Prikaz snimanja



Izvor: autor

Za potrebe snimanja, bilo je potrebno popeti se na krov zgrade studentskog doma gdje se nalazi fotonaponska elektrana. Na krovu, namještena je kamera kako bi se moglo što bolje snimati u uvjetima tog dana. Nakon namještanja kamere, prvo se vizualnim pregledom izbrojilo koliko je fotonaponskih panela na krovu i fotografiralo ih se. Također, prikupile su se informacije o kakvim se panelima radi od tehničkog osoblja Sveučilišta. Na krovu studentskog doma montirano je 55 običnih fotonaponskih panela i 55 hibridnih fotonaponskih panela koji služe za grijanje vode (slika 37. i 38.).

Slika 37. Obični FN paneli



Izvor: autor

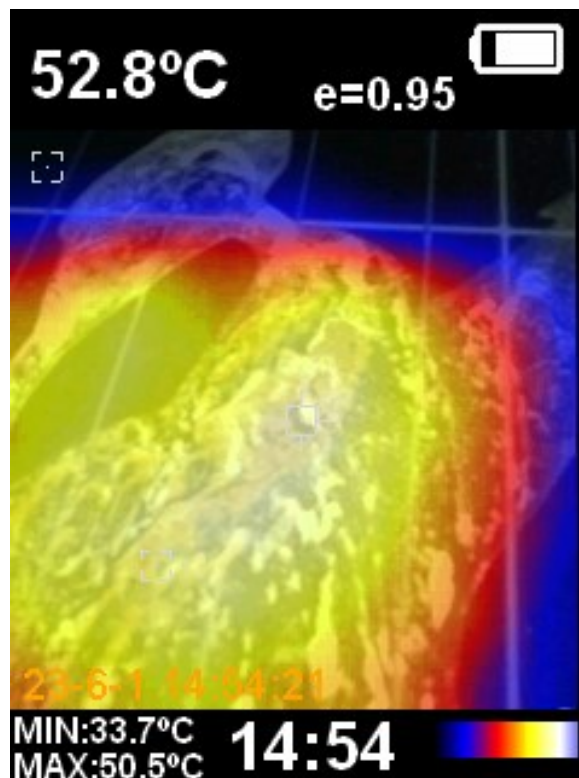
Slika 38. Hibridni FN paneli



Izvor: autor

Vizualnim pregledom utvrdilo se stanje panela i opreme oko panela kao što je inverter, nosači panela, uzemljenja i razni drugi dijelovi. Ustanovilo se kako su paneli većinom u dobrom stanju osim nekih metalnih dijelova postolja koja su na nekim mjestima minimalno korodirala (zahrđala) i fotonaponskih ćelija koje su bile prljave zbog ptičjeg izmeta ili prašine (slika 39. i 40.). Navedene nečistoće i hrđa djeluju na produktivnost samih fotonaponskih panela i njihovu učinkovitost u proizvodnji el. struje te mogućnost pojavljivanja vrućih točaka na panelima.

Slika 39. Prljavština na fotonaponskom panelu snimljena termalnom kamerom



Izvor: autor

Slika 40. Prljavština na fotonaponskom panelu snimljena običnom kamerom



Izvor: autor

Nakon vizualnog pregleda fotonaponskih panela prešlo se na snimanje termografskom kamerom koje je bilo otežano radi vremenskih uvjeta tog dana. Zbog jakog sunca, vidljivost na ekranu kamere je bila slaba radi odsjaja. Nakon termografskog snimanja prezentiran je rad softvera kojim se upravlja elektranom od strane tehničke osobe za održavanje fotonaponske elektrane, a u kojem su vidljive bazične informacije o radu elektrane. Informacije koje daje softver su slijedeće: kolika je proizvodnja el. energije, kolika je ušteda energije doma za studente i informacije o grijanoj vodi i sustavu.

4.1. Analiza podataka

Temeljem uzetih podataka iz softvera Fronius i analize uočeno je da fotonaponska elektrana radi na 30 posto učinkovitosti, a što ne zadovoljava potrebe za energijom doma za studente. Pregledom fotografija (slika 41.) i termografskih fotografija (slike 42.–47.) uočeno je da je učinkovitost smanjena zbog kuta montiranja fotonaponskih panela i dosta gustog rasporeda nosača na koje su montirani paneli. Na termografskim snimkama vidljivo je da su donji dijelovi panela zbog kuta nagiba svakog pojedinog

reda panela zaklonjeni od sunčevih zraka te se na tom djelu ne odvija fotonaponski proces koji je potreban za proizvodnju električne energije, dok u isto vrijeme dolazi do pregrijavanja tih dijelova FN panela te su moguća oštećenja i kvarovi samih FN panela.

Slika 41. Zasjenjenje donjeg dijela panela



Izvor: autor

U tablici (4.) i slikama 42. do 47. prikazana su mjerenja na deset panela te je za dobivene podatke termalnog snimanja izvršena usporedba. Iz slika je vidljivo da svaka prljavština i loše montiranje panela dovodi do smanjenja njihovih kapaciteta i učinkovitosti. Iz temperaturne tablice vidljiva je usporedba temperatura na različitim vrstama panela i utjecaj nagiba i zasjenjenja donjeg djela fotonaponskog panela. Temperature dobivene iz fotografija su maksimalne i kamera ih sama računa pomoću svog softvera.

Tablica 4. Temperature FN panela

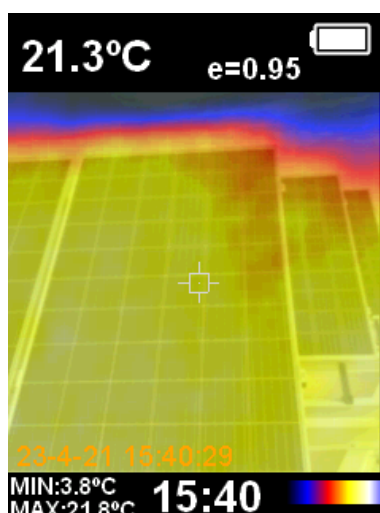
BROJ MJERENOG PANELA	TEMPERATURA MJERENOG PANELA
Panel broj 1	21.3 °C
Panel broj 2	21.7 °C
Panel broj 3	22.1 °C
Panel broj 4	36.4 °C
Panel broj 5	36.7 °C
Panel broj 6	37.0 °C

Izvor: autor

Panel broj 1

Mjerenje na prvom FN panelu (slika 42.) je izvršeno na udaljenosti od jedan metar te je iz mjerenja vidljivo da je maksimalna temperatura na foto naponskom panelu 21.3 °C, a minimalna temperatura na slici je temperatura prikazana plavom bojom.

Slika 42. Temperatura na panelu broj 1

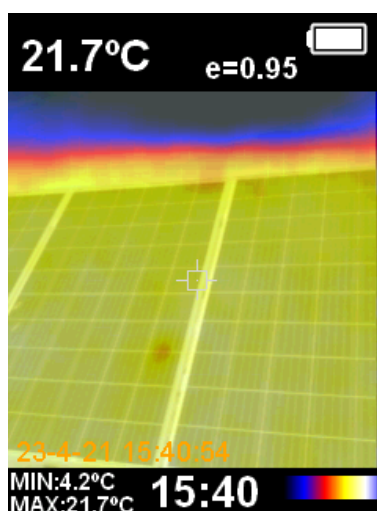


Izvor: autor

Panel broj 2

Mjerenje na drugom FN panelu (slika 43.) je izvršeno na udaljenosti od jedan metar te je iz mjerenja vidljivo da je temperatura na foto naponskom panelu 21.7 °C. Na ovom FN panelu također se mogu vidjeti vruće točke koje se pojavljuju radi oštećenja ili zamazanih mrlja na panelu.

Slika 43. Temperatura na panelu broj 2

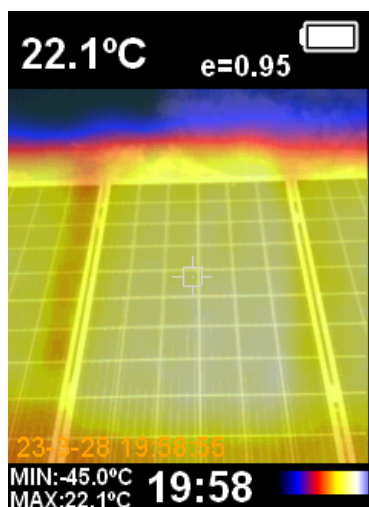


Izvor: autor

Panel broj 3

Mjerenje na trećem FN panelu (slika 44.) je izvršeno na udaljenosti od jedan metar te je iz mjerenja vidljivo da je maksimalna temperatura na panelu 22.1 °C, a minimalna temperatura je označena plavom bojom to jest temperatura neba i ona je u ovom slučaju u minusu pošto se na slici nalazi oblak.

Slika 44. Temperatura na panelu broj 3

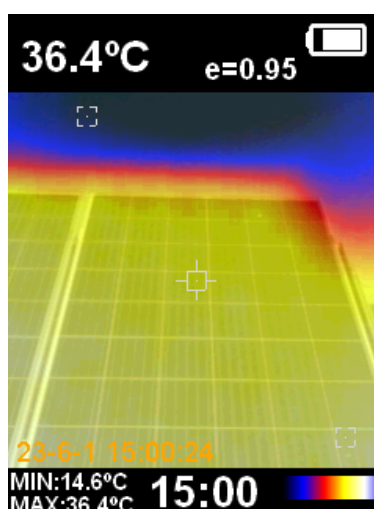


Izvor: autor

Panel broj 4

Mjerenje na četvrtom FN panelu (slika 45.) je izvršeno na udaljenosti od jedan metar te je iz mjerenja vidljivo da je maksimalna temperatura na panelu 36.4 °C, a minimalna temperatura je označena plavom bojom na slici .

Slika 45. Temperatura na panelu broj 4

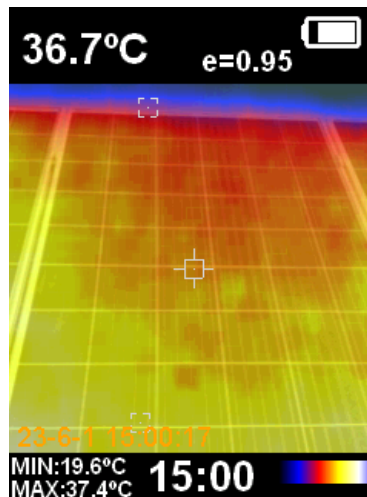


Izvor: autor

Panel broj 5

Mjerenje na petom FN panelu (slika 46.) je izvršeno na udaljenosti od jedan metar te je iz mjerenja vidljivo da je maksimalna temperatura na panelu 36.7 °C, a minimalna temperatura na slici temperatura vidljiva plavom bojom koja ne pripada panelu.

Slika 46. Temperatura na panelu broj 5

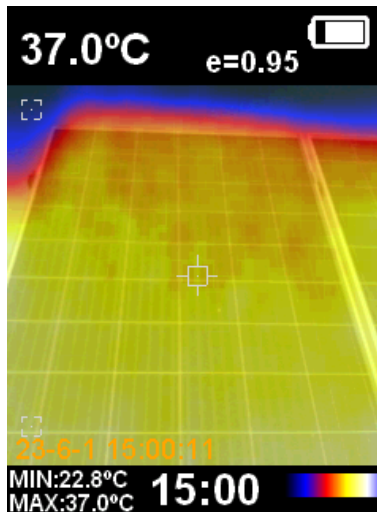


Izvor: autor

Panel broj 6

Mjerenje na šestom FN panelu (slika 47.) je izvršeno na udaljenosti od jedan metar te je iz mjerenja vidljivo da je maksimalna temperatura na panelu 37 °C i minimalna temperatura je temperatura oko panela zraka.

Slika 47. Temperatura na panelu broj 6



Izvor: autor

Iz gornjih slika (br. 42.- 47.) i tablice 4. vidljiv je utjecaj kuta montiranja FN panela i zasjenjenja istog. Paneli koji se nalaze u sjeni u odnosu na prednje panele, zbog zasjenjenja, pregrijavaju se i imaju deset stupnjeva veću temperaturu u odnosu na ostale panele i manji kapacitet proizvodnje struje. Sljedećim proračunom će se prikazati idealan kut i udaljenost montiranja FN panela na Sveučilištu Jurja Dobrile u gradu Puli.

4.2. Proračun idealnog kuta i razmaka montiranja fotonaponskih panela pula

U ovom dijelu će se prikazati proračun montiranja fotonaponskih panela. Za proračun montiranja FN panela potrebni su nam podaci o smjeru kretanja sunca i nagibu Sunca u Puli.

Kao opće pravilo, da bi se postigla optimalna godišnja proizvodnja energije, kut nagiba FN panela trebao bi biti isti kao i geografska širina mjesta. Ako se fotonaponski niz nalazi na geografskoj širini od 50°, optimalni kut nagiba također bi bio 50°. Što je mjesto udaljenije od ekvatora i bliže polovima, veći bi nagib trebao biti da bi ploča bila okrenuta

prema suncu. Međutim, naginjanje redova FN panela stvara zasjenjenje susjednih paralelnih redova, što djelomično sprječava njihovu izloženost izravnoj sunčevoj svjetlosti. Kada je čak i jedna ćelija u FN modulu zasjenjena, to smanjuje proizvodnju električne energije cijelog modula. Za projekte velikih razmjera, čak i mali stupanj zasjenjenja može rezultirati znatnim gubicima proizvodnje. [17]

Ključ optimizacije projekta je povećanje udaljenosti između paralelnih redova ploča bez pretjeranog povećanja ukupne veličine mjesta postavljanja. Krovni sustavi ograničeni su na korisnu površinu krova zgrade. Preveliki razmak između panela smanjuje broj panela koje krov može primiti i proizvodi manje električne energije. [17]

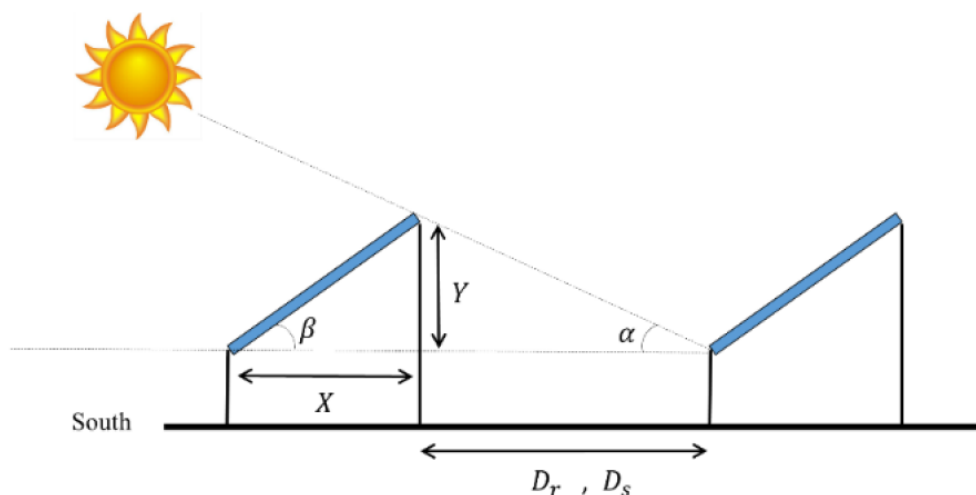
U tablici 5. prikazani su podaci o nagibu sunca za Pulu, po mjesecima. Na slici 48. prikazan je utjecaj nagiba sunca na montažu fotonaponskih panela tj. pod kojim kutem se moraju postaviti paneli na određenu površinu.

Tablica 5. Nagib sunca, podaci PGVIS za Pulu

MJESEC	NAGIB SUNCA
SIJEČANJ	22°
VELJAČA	28°
OŽUJAK	37°
TRAVANJ	50°
SVIBANJ	60°
LIPANJ	67°
SRPANJ	68°
KOLOVOZ	63°
RUJAN	53°
LISTOPAD	41°
STUDENI	31°
PROSINAC	23°

Izvor: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

Slika 48. Utjecaj nagiba sunca na montiranje fotonaponskih panela



Izvor: The_Required_Land_Area_for_Installing_a_Photovoltaic_Power_Plant,
<https://www.researchgate.net/publication/315739328>

Izračun udaljenosti između dva nosača fotonaponskih panela koji bi bio optimalan za krov studentskog doma Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli računa se prema sljedećoj formuli.

$$d = w \times \left(\frac{\sin(\beta)}{\tan(\gamma)} + \cos(\beta) \right)$$

Oznake u formuli:

d – udaljenost između dva foto naponska modula [mm]

w – visina foto naponskog modula [mm]

β – nagib foto naponskog modula [°]

γ – nagib sunca [°]

Uz pomoć internetskog programa PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) možemo doći do podataka o idealnom nagibu foto naponskog modula i nagibu sunca za određeno područje. Za područje Pule preporučeni nagib, prema specifikacijama fotonaponskih panela, je 35°. Nagib sunca je dobiven iz PVGIS i uzima

se najnepovoljniji nagib koji je očitao u mjesecu prosincu, a visinu fotonaponskog panela izmjerimo.

$$dr = 855 \times \left(\frac{\sin(35^\circ)}{\tan(23^\circ)} + \cos(35^\circ) \right)$$

$$d = 1855.7033 \text{ mm}$$

Zbog vertikalne projekcije fotonaponskog panela na krov mora se izračunati stvarna udaljenost d_2 , a to se računa po donjoj formuli:

$$ds = 1855.7033 - 855$$

$$ds = 1000.7033 \text{ mm}$$

4.3. Rješenje poboljšanja rada fotonaponske elektrane

Analizom dobivenih podataka i pregledom termografskih slika ustanovljeno je da bi se na fotonaponskoj elektrani trebalo češće vršiti redovito preventivno održavanje kao što je čišćenje i servis panela kako ne bi došlo do pojave parazitskih struja i sličnih pojava. Neodržavanje fotonaponske elektrane može izazvati veće kvarove na elektrani, a time i povećanje troškova održavanja. Također, preporuča se uvrstiti termografski pregled FN elektrane na studentskom domu u Puli kao dio redovitog godišnjeg održavanja.

Temeljem vizualnog pregleda i pregleda termografskom kamerom te dobivenih podataka iz softvera kojim se upravlja elektranom vidljivo je da bi elektrana mogla raditi većim kapacitetom kada bi se napravile odgovarajuće preinake na samoj konstrukciji fotonaponske elektrane, kao što je povećanje udaljenosti između paralelnih redova ploča. Navedenim preinakama bi se riješio problem zasjenjenja paralelnih redova elektrane jer naginjanje redova fotonaponskih panela stvara zasjenjenje susjednih paralelnih redova, što djelomično sprječava njihovu izloženost izravnoj sunčevoj svjetlosti.

Prema rezultatima izračunatima iz gore navedenih formula (poglavlje 4.2.) preporuča se da bi idealna udaljenost nosača fotonaponskih panela, jedni od drugih, bila 1 m pod kutom od 35° , za razliku od izmjerenih 30 cm udaljenosti, pod kutom od 35° , zbog čega fotonaponski paneli ne rade punim kapacitetom i dolazi do zasjenjenja donjih dijelova foto naponskih panela i pregrijavanja istih. Što više sunčeve svjetlosti svaki panel može pretvoriti u energiju, to je veća ukupna proizvodnja električne energije sustava i veći je potencijalni povrat ulaganja.

5. ZAKLJUČAK

Korištenje obnovljivih izvora energije ključno je za ublažavanje klimatskih promjena i postizanje održivog razvoja. Gledajući u budućnost, očekuje se da će obnovljiva energija nastaviti rasti kako se troškovi tehnologije smanjuju, a potražnja za čistom energijom raste. Ovo će zahtijevati više ulaganja u istraživanje i razvoj, kao i politike i regulaciju mjera za podršku prijelazu na gospodarstvo s niskim udjelom ugljika. Također je važno razmotriti ekološki i društveni utjecaj obnovljive energije i osigurati da je dugoročno održiv. Uz stalne inovacije i ulaganja, obnovljiva energija može osigurati pouzdan i održiv izvor energije za buduće generacije.

Fotonaponske ćelije su najčešći tip solarne tehnologije koja se koristi za proizvodnju električne energije. Fotonaponske ćelije su izrađene od poluvodičkih materijala, kao što je silicij, i mogu biti instalirani na krovovima ili u velikim fotonaponskim elektranama za proizvodnju električne energije za domove, tvrtke i zajednice.

Razumijevanje utjecaja zemljopisne širine i godišnjeg doba na intenzitet sunčevih zraka koje mogu doprijeti do panela ključno je za dobivanje najveće izlazne snage iz fotonaponskih panela modula kako bi se maksimizirala proizvodnja električne energije u postrojenju. Što više sunčeve svjetlosti svaki panel može pretvoriti u energiju, to je veća ukupna proizvodnja električne energije sustava i veći je potencijalni povrat ulaganja.

Kao opće pravilo, da bi se postigla optimalna godišnja proizvodnja energije, kut nagiba za fotonaponske panele trebao bi biti isti kao i geografska širina mjesta. Ako se fotonaponski niz nalazi na geografskoj širini od 50° , optimalni kut nagiba također bi bio 50° . Što je mjesto udaljenije od ekvatora i bliže polovima, veći bi nagib trebao biti da bi ploča bila okrenuta prema suncu. Naginjanje redova panela stvara zasjenjenje susjednih paralelnih redova, što djelomično sprječava njihovu izloženost izravnoj sunčevoj svjetlosti. Ključ optimizacije projekta je povećanje udaljenosti između paralelnih redova ploča bez pretjeranog povećanja ukupne veličine mjesta postavljanja. Sustav postavljen na tlo koji je prevelik povećava cijenu potrebnog zemljišta i možda neće biti održiv za mjesta gdje dodatno zemljište nije dostupno. A

krovni sustavi ograničeni su na korisnu površinu krova zgrade. Preveliki razmak između panela smanjuje broj panela koje krov ili komad zemlje može primiti i proizvodi manje električne energije.

Tijekom vremena mnoge instalacije gube dio svoje početno instalirane snage što dovodi do smanjenja prinosa energije. Pojedinačne ćelije se kvare, važne komponente poput pretvarača ne rade maksimalno učinkovito. Kao posljedica toga zagrijavanje i pregrijavanje lokalnih kvarova uzrokovanih parazitskim strujama može prouzročiti daljnje oštećenje instalacije i konačno dovesti do požara. Korištenjem termičke slike, te se greške mogu lako locirati zahvaljujući njihovom toplinskom potpisu i naknadno popraviti. Preduvjet za pouzdanu detekciju kvara je uporaba termografske kamere s izvanrednim karakteristikama kao i stručnost vještih inspektora.

Termografske kamere ne samo da nude brzi pregled velikih postrojenja, već također mogu pouzdano i detaljno uhvatiti male nedostatke na fotonaponskim panelima. Korištenje infracrvene kamere lako donosi brojne "šarene slike". Od najveće važnosti pri analizi toplinskih slika je duboko poznavanje funkcije fotonaponskih instalacija kao i fizikalnih zakonitosti.

Uporabom infracrvene kamere i naknadnom analizom toplinskih fotografija fotonaponske elektrane Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli došlo se do zaključka da bi idealna udaljenost nosača fotonaponskih panela, jedni od drugih, bila 1 m pod kutom od 35°, za razliku od izmjerenih 30 cm udaljenosti, pod kutom od 35°, zbog čega fotonaponski paneli ne rade punim kapacitetom i dolazi do zasjenjenja donjih dijelova fotonaponskih panela i pregrijavanja istih. Također, ustanovljeno je da bi se trebalo češće vršiti redovito preventivno održavanje kao što je čišćenje i servis panela kako ne bi došlo do pojave parazitskih struja i sličnih pojava. Neodržavanje fotonaponske elektrane može izazvati veće kvarove na elektrani, a time i povećanje troškova održavanja.

Preporuča se uvrstiti termografski pregled elektrane kao dio redovitog godišnjeg održavanja kako bi se preduhitrile moguće negativne posljedice neodržavanja fotonaponske elektrane na studentskom domu Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli.

LITERATURA

Mrežne stranice:

1. Chetan S., (2023.), Renewable Energy Sources: Overview, Technologies, Energy Storage, Terms, and Interview Q&A, Dostupno na: <https://www.scribd.com/read/642324385/Renewable-Energy-Sources-Overview-Technologies-Energy-Storage-Terms-and-Interview-Q-A> [Pristupljeno: 18. srpnja 2023.]
2. Turgeon A., Morse E. (2023.) Solar Energy, National Geographic Society, Dostupno na: <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/> [Pristupljeno: 19. srpnja 2023.]
3. © 2020 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis, Dostupno na: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/croatias> [Pristupljeno: 19. srpnja 2023.]
4. Perčić, M.; Franković, B. (2016.) Solarna energija u priobalnom području Republike Hrvatske – danas i sutra. Pomorski zbornik Posebno izdanje, 223-229
5. Mayfield R. (2010.), Photovoltaic-Design-Installation-For-Dummies, Dostupno na: <https://www.scribd.com/read/37142416/Photovoltaic-Design-and-Installation-For-Dummies> [Pristupljeno: 21. srpnja 2023.]
6. Chiras D., (2019), Solar Electricity Basics Powering Your Home or Office with Solar Energy, Dostupno na: <https://www.scribd.com/book/565183432/Solar-Electricity-Basics-Powering-Your-Home-or-Office-with-Solar-Energy> [Pristupljeno: 21. srpnja 2023.]
7. Pop L., Avram D., (2015.) The Truth About Solar Panels, Dostupno na: <https://www.scribd.com/read/274344013/The-Truth-About-Solar-Panels-The-Book-That-Solar-Manufacturers-Vendors-Installers-And-DIY-Scammers-Don-t-Want-You-To-Read> [Pristupljeno: 22. srpnja 2023.]
8. Elias Roumpakias, Fotis Bouroutzikas, Anastassios Stamatelos. On-site Inspection of PV Panels, Aided by Infrared Thermography. *Advances in Applied Sciences*. Vol. 1, No. 3, 2016, pp. 53-62. doi: 10.11648/j.aas.20160103.12

9. Kelly Pickerel, What are the different types of solar mounting systems for roofs?, Dostupno na: <https://www.solarpowerworldonline.com/2017/02/different-types-solar-mounting-systems-roofs/> [Pristupljeno: 22. srpnja 2023.]
10. InterNACHI, Dostupno na: <https://www.nachi.org/history-ir.htm> [Pristupljeno: 22. srpnja 2023.]
11. Francis.E., Ring J.,(2012.), History of Thermology and Thermography: Pioneers and Progress. Dostupno na: <http://www.uhlen.at/thermology-international/data/pdf/223A03.pdf> [Pristupljeno: 22. srpnja 2023.]
12. Shakeb Deane i dr., (2020.), Comparison of Cooled and Uncooled IR Sensors by Means of Signal-to-Noise Ratio for NDT Diagnostics of Aerospace Grade Composites, MDPI, Dostupno na: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3381> [Pristupljeno: 23. srpnja 2023.]
13. Infrared Training Center, (2014.) Introduction to Infrared Thermography Basics, Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/347590702/Introduction-to-Infrared-Thermography-Basics> [Pristupljeno: 23. srpnja 2023.]
14. Galović S., Tuškan T., Fizika 4, digitalni obrazovni sadržaj za četvrti razred gimnazije, Dostupno na: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a985a697-8949-410e-af32-bfd69b605dd6/kvanti-elektromagnetskog-zracenja.html> [Pristupljeno: 23. srpnja 2023.]
15. Tarin M., What is emissivity? The Key to Accurate Temperature Measurements, Movitherm, Dostupno na: <https://movitherm.com/knowledgebase/what-is-emissivity/> [Pristupljeno: 24. srpnja 2023.]
16. Lucas J., (2019.) What Is Infrared?, Dostupno na: <https://www.livescience.com/50260-infrared-radiation.html> [Pristupljeno: 24. srpnja 2023.]
17. Irene Negro, How PV panel tilt affects solar plant performance, Dostupno na: <https://ratedpower.com/blog/pv-panel-tilt/> [Pristupljeno: 25. srpnja 2023.]

POPIS SLIKA

Slika 1. Proces nuklearne fuzije sa sunca	3
Slika 2. Dijagram efekta staklenika	4
Slika 3. Karta fotonaponskog energetskog potencijala RH.....	6
Slika 4. Karta globalnog horizontalnog zračenja RH.....	7
Slika 5. Karta izravnog okomitog (normalnog) zračenja RH.....	8
Slika 6. Fotonaponske elektrane Kaštelir 1 i Kaštelir 2	9
Slika 7. Osnovne komponente fotonaponske elektrane	10
Slika 8. Fotonaponska ćelija, osnovni element fotonaponskog sustava.....	12
Slika 9. Fotonaponska elektrana – elementi sustava.....	13
Slika 10. Komponente FN sustava.....	14
Slika 11. Prikaz fotonaponskog efekta	16
Slika 12. Monokristalni fotonaponski panel	18
Slika 13. Polikristalni fotonaponski panel.....	19
Slika 14. Tankoslojni fotonaponski panel.....	19
Slika 15. Fotonaponski paneli na krovu Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli.....	23
Slika 16. Inverter	24
Slika 17. Fotografija softvera za kontrolu fotonaponskog panela	25
Slika 18. Fotografija softvera za kontrolu fotonaponskog panela	25
Slika 19. Fotonaponski sustav na tračnicama za kosi krov.....	26
Slika 20. Fotonaponski sustav za ravni krov	27
Slika 21. Sir William Herschel (1738.-1822.).....	28
Slika 22. Pyroscan, termograf iz 1960.	30
Slika 23. Termografska kamera, nekad i danas	31
Slika 24. Infracrvena termografija	33
Slika 25. Radijator u vidljivom i infracrvenom spektru	33
Slika 26. Emisija i Refleksija	34
Slika 27. Crno tijelo potpuno apsorbira sva zračenja.....	35
Slika 28. Tri komponente mjerenja temperature termalnom kamerom	35
Slika 29. Elektromagnetski spektar.....	39
Slika 30. Uporaba infracrvenog zračenja u kućanstvu.....	41
Slika 31. Primjena infracrvenog zračenja.....	42
Slika 32. Primjer termalne kamere koja se ugrađuje na bespilotnu letjelicu	43
Slika 33. Područja primjene tehnologije infracrvenog zračenja.....	44
Slika 34. Fotonaponska elektrana Jurja Dobrile u Puli	45
Slika 35. Peak tech kamera	46
Slika 36. Prikaz snimanja	47
Slika 37. Obični FN paneli	48
Slika 38. Hibridni FN paneli.....	48
Slika 39. Prljavština na fotonaponskom panelu snimljena termalnom kamerom.....	49
Slika 40. Prljavština na fotonaponskom panelu snimljena običnom kamerom	50
Slika 41. Zasjenjenje donjeg dijela panela.....	51
Slika 42. Temperatura na panelu broj 1	52

Slika 43. Temperatura na panelu broj 2.....	53
Slika 44. Temperatura na panelu broj 3.....	54
Slika 45. Temperatura na panelu broj 4.....	54
Slika 46. Temperatura na panelu broj 5.....	55
Slika 47. Temperatura na panelu broj 6.....	56
Slika 48. Utjecaj nagiba sunca na montiranje fotonaponskih panela	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Učinkovitost fotonaponskih panela ovisno o području potrebnom za ugradnju FN panela nazivne snage 1 kWp.....	20
Tablica 2. Emisivnost materijala.....	38
Tablica 3. Elektromagnetski spektar – usporedba svjetla	40
Tablica 4. Temperature FN panela	52
Tablica 5. Nagib sunca, podaci PGVIS za Pulu.....	57

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Obnovljivi izvori energije postaju sve važniji kako nastojimo obnoviti i smanjiti našu ovisnost o fosilnim gorivima i ublažiti utjecaje klimatskih promjena. Jedan od glavnih izvora energije je sunce. Kako bi pretvorili energiju sunca u struju ili njome grijali vodu koristimo se fotonaponskim panelima. Fotonaponski paneli koriste princip fotonaponskog procesa kojim pretvaraju energiju sunca u struju ili toplinsku energiju. U ovom radu je izvršen pregled termalnom kamerom fotonaponske elektrane na krovu studentskog doma Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli. Nakon što je pregled dobavljen izvršena je analiza uzetih podataka te je donesen zaključak o radu elektrane i kako bi se mogao poboljšati njezin rad.

Ključne riječi: fotonaponski paneli, termografija, fotonaponski proces, konstrukcija.

ABSTRACT AND KEY WORDS

Renewable energy sources are becoming increasingly important as we strive to restore and reduce our dependence on fossil fuels and mitigate the impacts of climate change. One of the main sources of energy is the sun. In order to convert the sun's energy into electricity or heat water with it, we use photovoltaic panels. Photovoltaic panels use the principle of the photovoltaic process, which converts the sun's energy into electricity or thermal energy. In this paper, a thermal camera inspection of the photovoltaic power plant on the roof of the student dormitory of Jurja Dobrila University in Pula was carried out. After the inspection was completed, the data was analyzed and a conclusion was reached about the operation of the power plant and how it could be improved.

Keywords: photovoltaic panels, thermography, photovoltaic process, construction.