

# Infracrvena termografija u održavanju fotonaponske elektrane

---

**Bićanić, Ines**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:318806>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**INFRACRVENA TERMOGRAFIJA U ODRŽAVANJU  
FOTONAPONSKE ELEKTRANE**

**Diplomski rad**

**Ines Bićanić**

**Osijek, 2020.**

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	1
2. POVIJEST RAZVOJA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE.....	1
3. OSNOVNI POJMOVI INFRACRVENE TERMOGRAFIJE.....	3
3.1. Spektar zračenja crnog tijela.....	4
3.2. Emisivnost materijala $\epsilon$ .....	6
3.3. Apsorpcija $\alpha$ , refleksija $\rho$ i transmisija $\tau$ .....	7
4. OSNOVE RADA FN PANELA I ODRŽAVANJE.....	9
4.1. Fizikalne osnove rada FN panela.....	9
4.1.1. Fotonaponski efekt.....	9
4.1.2. Poluvodička dioda (PN spoj).....	9
4.1.3. Kristali.....	10
4.2. Tehničke karakteristike fotonaponskih panela.....	11
4.2.1. Materijali.....	11
4.2.2. Postupak proizvodnje.....	12
4.2.3. Princip rada solarne ćelije.....	14
4.2.4. I-U karakteristike.....	15
4.3. Održavanje i analiza FN panela u eksploataciji.....	17
4.3.1. Metode ispitivanja FN panela.....	17
4.3.2. Analiza FN panela u eksploataciji.....	19
5. INFRACRVENA TERMOGRAFSKA ANALIZA - FNE FERIT 1.....	27
6. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43
SAŽETAK.....	46
ŽIVOTOPIS.....	47

# 1. UVOD

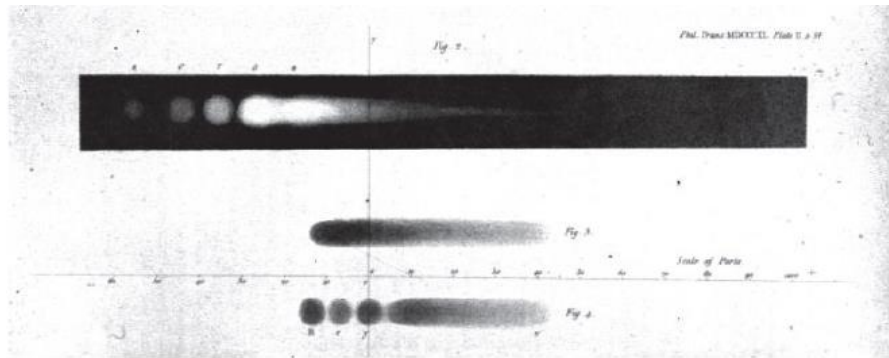
U vrijeme kada se u svijetu koriste različiti izvori energije, ponajviše fosilna goriva, dolazi do sve većeg usmjeravanja fokusa na obnovljive izvore energije. Na globalnoj razini različite organizacije pokušavaju kroz direktne poticaje usmjeriti zemlje na korištenje što je više moguće obnovljivih izvora energije. Razlog tome je činjenica da su fosilna goriva ograničena dok primjerice energije sunca i vjetra mogu biti korištene bez bojazni oko nestanka. Iz tog razloga mnogo resursa ulaže se u istraživanja za korištenje sunčeve energije. Korištenjem sunčeve energije imamo stalni razvoj opreme koja nam je potrebna za dobivanje električne energije iz energije sunca. Najviše u tom dijelu imamo korištenje solarnih elektrana kojih na svijetu ima sve više te samim time dolazi i do potreba za dodatnim istraživanjima i ispitivanjima efikasnosti takvih elektrana. Glavni dio toga su solarni paneli o kojima će se detaljnije pisati u ovome radu kako bi se detaljnije moglo vidjeti sa kakvim izazovima se susrećemo kod obnovljivih izvora energije.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak rada je analizirati mogućnosti primjene infracrvene termografije u održavanju fotonaponske elektrane. S ciljem ispunjenja zadatka potrebno je provesti analizu svih čimbenika koji mogu dovesti do otkazivanja fotonaponskih panela i mogućnosti uočavanja istih infracrvenom termografijom. Potrebno je utvrditi kriterij odlučivanja na osnovu kojega se može sa sigurnošću detektirati neispravnost fotonaponskog panela.

## 2. POVIJEST RAZVOJA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Otkriće infracrvene termografije počinje 1800. godine kada je Sir William Herschel (1738-1822) objavio zapažanje da postoji zračenje ispod vidljivog crvenog dijela spektra koje zagrijava jače od zračenja vidljive svjetlosti. Herschel je započeo eksperiment ponavljanjem Newtonog eksperimenta s prizmom, no više je tražio efekt zagrijavanja nego vizualnu raspodjelu intenziteta u spektru svjetlosti. Pomoću termometra pozicioniranog iznad crvenog dijela spektra svjetlosti stvorene iz prizme, Herschel je prikazao prisutnost nevidljive radijacije čija energija je otkrivena zbog efekta zagrijavanja [1]. Otkriće termo-električnog efekta 1821. godine bio je jedan korak u razvoju termografije. Thomas Johann Seebeck uočava električnu struju koja teče kroz spoj dvaju različitih metala kada su njihovi spojevi na različitim temperaturama. Nakon otkrića termopara Macedonio Melloni dolazi na ideju da formira seriju termoparova od bizmuta i bakra. Tako povećava osjetljivost za 40 puta i mogao je detektirati zračenje osobe na udaljenost do 9 metara. John Frederick William Herschel (1792-1871), sin Sir Wiliama, snima prvi termogram 1840. godine. Osim termografa John je utvrdio postojanje različitih spektralnih prizora za pojedine valne dužine [2].

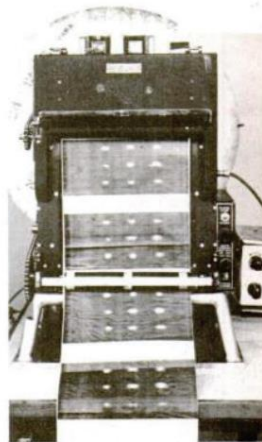


**Slika 2.1.** Prvi termogram napravljen 1840. godine, izvor [2]

Slika 2.1. dobivena je fokusiranjem sunčevog zračenja pomoću leće na čestice ugljika u alkoholu postupkom isušivanja. Daljnji razvoj termografije učinio je Samuel Pierpont Langley (1834-1906) izumom bolometra 1878. godine. To je uređaj koji detektira elektromagnetsko zračenje pomoću povećanja otpora vodiča. Zasniva se na promjeni neke električne veličine koja

nastaje zbog promjene temperature električnog osjetljivog elementa. Langley je uređaj razvijao 20 godina tijekom kojih je povećavao osjetljivost 400 puta u odnosu na prototip [2].

Prva generacija termografskih kamera bio je projekt Pyroscan koji je započeo u Kelvin Hughes Istraživačkom laboratoriju (Essex) u zimu 1955. godine kao matematičko istraživanje mogućnosti gledanja kroz maglu. Mark I Pyroscan kamera (slika 2.2.) je prvi prototip kamere koja snima jaja nakon 8 dana inkubacije, oplođena toplija i neoplođena hladnija.



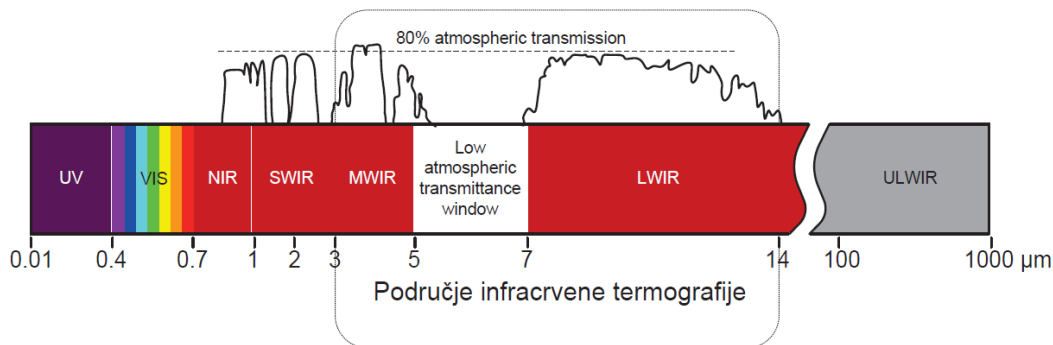
**Slika 2.2.** *Mark I Pyroscan kamera, izvor [2]*

Većina kamera na tržištu 80-tih godina snimala je u rasponu 3-5  $\mu\text{m}$ . To je bio problem jer je Sunčevo zračenje imalo veći utjecaj na sam termogram. Problem je riješen u obliku ISI Videotherm kamere koja je detektirala zračenje 7-13  $\mu\text{m}$ , što je i danas tipični raspon detekcije IC kamera. Prednost ISI Videotherm kamere je što nije trebala tekući dušik za hlađenje osjetnika.

Napredak je napravljen 2006. godine kada se pojavljuju kamere za detekciju plinova. Kamere su sve dostupnije, a 2014. godine dogodio se preokret pojavom malih kamera uslijed smanjenja troška senzora [2]. Od 2014. godine termografija postaje dostupna zahvaljujući modelima koje su tvrtke FLIR, Thermal Seek i Therm App plasirale na tržište. Tako sada možemo naći IC kamere i na mobilnim uređajima. Radi se o trećoj generaciji termografskih kamera koje se razvijaju od 1995. godine [2].

### 3. OSNOVNI POJMOVI INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Infracrvena termografija je beskontaktna metoda za određivanje temperaturne distribucije na površini promatranog objekta kroz mjerenje intenziteta radijacije u području infracrvenog elektromagnetskog spektra. Uz to infracrvena termografija često se koristi i kao alat za održavanje [3]. Infracrveno elektromagnetsko zračenje ima široki spektar zračenja u rasponu od 750nm do 1 mm, a to odgovara rasponu frekvencije od 405 THz do 300 GHz. Spektar infracrvenog zračenja prikazan je na slici 3.1.



**Slika 3.1.** Područje spektra infracrvenog zračenja, izvor [1]

Infracrvena područja u elektromagnetskom spektru mogu se podijeliti na pet područja: blisko IC područje (0,75-1 μm), kratkovalno IC područje (1-2,7 μm), srednjevalno IC područje (3-8 μm), dugovalno IC područje (8-14 μm), daleko IC područje (14-30 μm). Većina termografskih kamera snima zračenje u dugovalnom IC području (8-14 μm).

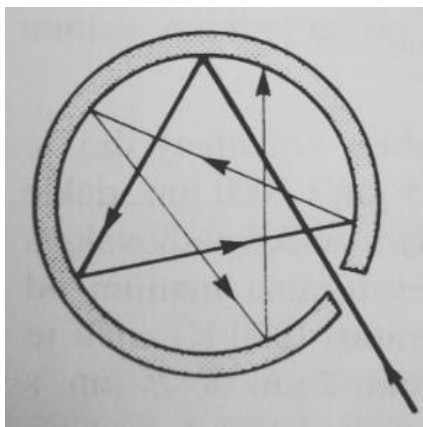
Definicija toplinskog zračenja kaže nam da je to proces koji nastaje kada atomi ili molekule tijela, pobuđeni termičkim gibanjem, emitiraju elektromagnetske valove. Užarena tijela zrače elektromagnetske valove uglavnom u infracrvenom području. Intenzitet i spektralni sastav izračene toplinske energije nekog tijela uglavnom ovise o njegovoj temperaturi. Samo zračenje nekog tijela ovisi o temperaturi tijela te tako primjerice kada je temperatura promatranog tijela veća od oko 800K tada dolazi i do zračenja vidljive svjetlosti, inače je zračenje samo infracrveno. Kod vrlo visokih temperatura osim infracrvene i vidljive svjetlosti, dolazi i do pojave zračenja ultraljubičastog svjetla. Bitno je naglasiti da su emisijski spektri kod užarenih tijela kontinuirani i sastoje se od valnih duljina (od najkraćih ultraljubičastih, pa do najdužih

infracrvenih). Kod užarenih tijela neke valne duljine isijavaju jače dok druge isijavaju slabije [4].

Po standardu ISO 20473:2007 „Optics and photonics — Spectral bands,, putem termografije vrši se analiza zračenja u tri zadana područja (NIR 0,78-3  $\mu\text{m}$ , MIR 3-50  $\mu\text{m}$  i FIR 50-1000  $\mu\text{m}$ ).

### 3.1. Spektar zračenja crnog tijela

Crno tijelo je idealni model kojim je opisano elektromagnetsko zračenje zagrijanog tijela i služi nam kao standard kojim se uspoređuju svojstva zračenja realnog tijela kako bi se odredila maksimalna količina elektromagnetskog zračenja koja može biti emitirana površinom pri danoj temperaturi. Crno tijelo ima sposobnost apsorpiranja svog 100% upadnog elektromagnetskog zračenja neovisno o frekvenciji ili kutu upada te također emitira energiju zračenja uniformno tj. jednako u svim smjerovima po jedinici površine [2].

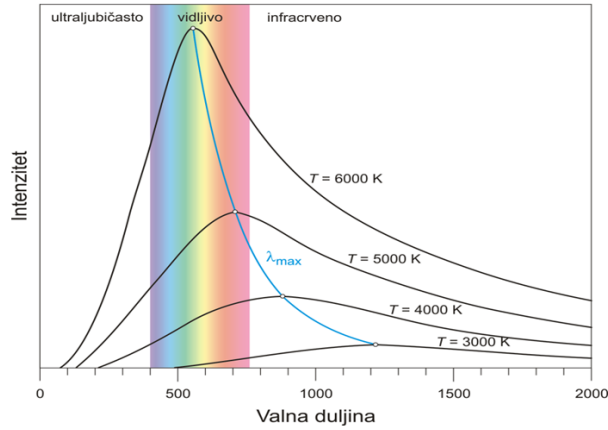


**Slika 3.1.1.** *Idealno crno tijelo, reflektirane zrake, izvor [4]*

Sivo tijelo emitira nekoherentno elektromagnetsko zračenje raspodijeljeno po svim valnim duljinama u omjeru manjem od jedan u odnosu na elektromagnetsko zračenje emitirano crnim tijelom pri istoj temperaturi. Koncept sivog tijela je posebno koristan u određivanju stvarne temperature zagrijanog tijela korištenjem beskontaktnih termometara ili FLIR kamera (FLIR – Forward looking infrared) [2].



Gledajući sliku 3.1.2. spektra crnog tijela možemo uočiti par bitnih stvari koje su dosta bitne u promatranju određenog tijela. Tako možemo uočiti da što imamo veću temperaturu u tom slučaju veća je i ukupna izražena energija.



**Slika 3.1.2.** Spektri crnog tijela za različite temperature, izvor [4]

Iz slike 3.1.2. možemo vidjeti da svaka krivulja na određenoj valnoj duljini  $\lambda_m$  ima maksimum. To je ona valna duljina oko koje se na određenoj temperaturi emitira najviše energije. Maksimumi spektralne gustoće  $f(\lambda, T)$  pomiču se prema kraćim valnim duljinama kada temperatura raste. Tu ovisnost iskazuje Wienov zakon pomicanja, a kaže da je valna duljina koja odgovara maksimumu ozračene energije  $\lambda_m$  obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi [4]:

$$\lambda_m T = 2,898 \cdot 10^{-3} K m \quad (3-1)$$

Spektralnu gustoću zračenja objasnio je M. Planck. Došao je do zaključka da spektralnu gustoću opisuje izraz:

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} \quad (3-1)$$

gdje je  $\lambda$  valna duljina,  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Js je Planckova konstanta,  $c$  je brzina svjetlosti,  $k$  je Boltzmannova konstanta i  $T$  je temperatura [4].

### 3.2. Emisivnost materijala $\epsilon$

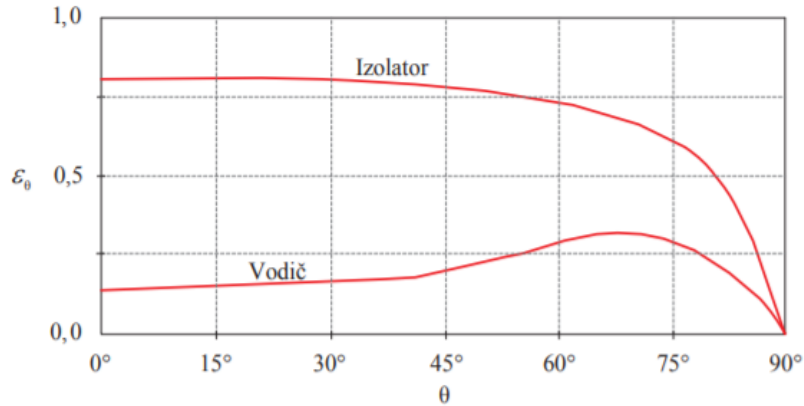
Emisivnost materijala definirana je kao relativna sposobnost površine da emitira elektromagnetsku energiju zračenjem. Emisivnost je omjer elektromagnetskog zračenja nekog određenog materijala i izbačene elektromagnetske energije crnog tijela pri istoj temperaturi. Idealno crno tijelo ima emisivnost jednaku jedan dok realna tijela imaju emisivnost uvijek manju od jedan [2]. Emisivnost pojedinih materijala prikazano je u tablici 3.2.1.

**Tablica 3.2.1.** *Emisivnost različitih materijala, izvor [6]*

Materijal	Temperatura (K)	Emisivnost
<i>volfram</i>	500	0,05
	1000	0,11
	2000	0,26
	3000	0,33
	3500	0,35
<i>polirano srebro</i>	650	0,03
<i>polirani aluminij</i>	300	0,03
	1000	0,07
<i>polirani bakar</i>		0,02-0,15
<i>polirano željezo</i>		0,2
<i>polirani mjed</i>	4-600	0,03
<i>oksidirano željezo</i>		0,08
<i>crni oksidirani bakar</i>	500	0,78
<i>aluminijev oksid</i>	80-500	0,75
<i>voda</i>	320	0,94
<i>led</i>	273	0,96-0,985
<i>papir</i>		0,92
<i>staklo</i>	293	0,94
<i>čađ</i>	273-373	0,95
<i>šupljina laboratorijskog tijela</i>		0,98-0,99

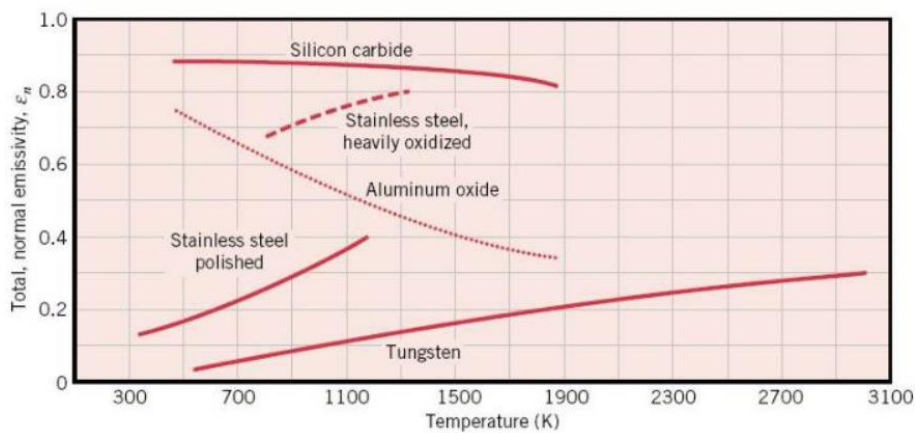
Emisivnost ovisi o faktorima kao što su materijal, struktura površine, kut promatranja, valna duljina, temperatura i geometrija promatranog objekta. Ovisnost emisivnosti o prethodno navedenim faktorima vidljiva je na dolje prikazanim slikama [2].

Emisivnost nije uniformna promjena, svaki materijal se drugačije ponaša. Referentne krivulje imamo jer onda znamo kakve krivulje možemo očekivati prilikom snimanja (slika 3.2.1).



**Slika 3.2.1.** Ovisnost emisivnosti u ovisnosti kuta promatranja, izvor [2]

Slika 3.2.3. nam pokazuje da sama površina koju snimamo mijenja emisivitet promjenom temperature.

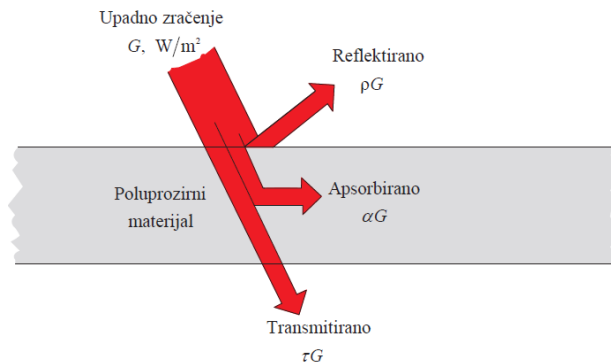


**Slika 3.2.3.** Promjena emisivnosti sa promjenom temperature, izvor [7]

### 3.3. Apsorpcija $\alpha$ , refleksija $\rho$ i transmisija $\tau$

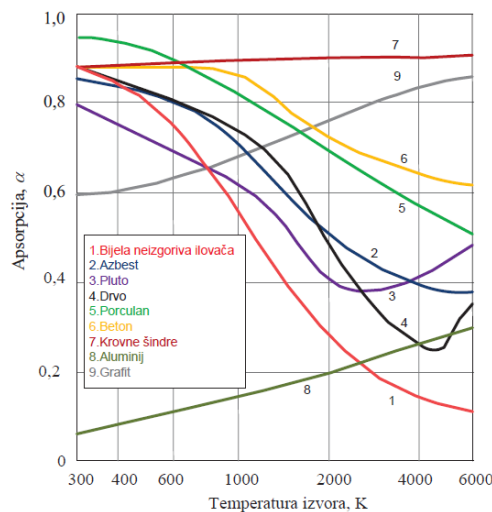
U ovom dijelu rada pojasnit će se definicija apsorpcije, refleksije i transmisije te će se kroz određene formule i prikazane slike detaljnije objasniti njihove zakonitosti i strukture.

Tok upadnog zračenja na površinu nazivamo ozračenje (eng. Irradiation) i označava se sa  $G$ . Dio zračenja na površini se apsorbira (objekt prima i zadržava energiju), dio reflektira (objekt prosljeđuje energiju nazad), a ostatak ukoliko se radi o poluprozirnom tijelu se transmitira (objekt propušta energiju kroz sebe) (slika 3.3.1.). Prvi zakon termodinamike zahtjeva da zbroj apsorbirane, reflektirane i transmitirane energije zračenja mora biti jednak upadnom zračenju.



**Slika 3.3.1.** Apsorpcija, refleksija i transmisija upadnog zračenja, izvor [2]

Za razliku od emisivnosti, apsorpcija materijala je neovisna o temperaturi površine. Ali apsorpcija ovisi o temperaturi izvora sa kojega upadno zračenje potječe. Refleksija se razlikuje od drugih svojstava po tome što je po prirodi dvosmjerna. Možemo reći da vrijednost refleksije površine ne ovisi samo o smjeru upadnog zračenja nego i o smjeru refleksije. Apsorpcija tijela nije konstanta već se mijenja s temperaturom (slika 3.3.2.) [2].



**Slika 3.3.2.** Promjena apsorpcije u ovisnosti temperature izvora za različite materijale pri sobnoj temperaturi, izvor [2]

## **4. OSNOVE RADA FN PANELA I ODRŽAVANJE**

### **4.1. Fizikalne osnove rada FN panela**

U ovom dijelu fizikalno će se objasniti fotonaponski efekt, odnosno što se događa kad se ćelija osvijetli. Fizikalno će se objasniti kako radi poluvodička dioda, te od kojeg materijala se najčešće izrađuje solarna ćelija.

#### **4.1.1. Fotonaponski efekt**

Kada se solarna (suncana) ćelija osvijetli, odnosno kada apsorbira sunčevo zračenje, fotonaponskim se efektom na njezinim krajevima pojavljuje elektromotorna sila (napon) i tako solarna ćelija postaje izvorom električne energije [9].

Fotonaponski ili fotoelektrični efekt otkrio je francuski fizičar A. E. Becquerel 1839. godine. Eksperimentirajući u laboratoriju stvorio je prvi fotonapon tako što je srebrni klorid stavio u kiselu otopinu i osvijetlio, kada je spojio elektrode platine generirao se napon i struja. Zbog toga često se fotonaponski efekt zove i Becquerelov efekt.

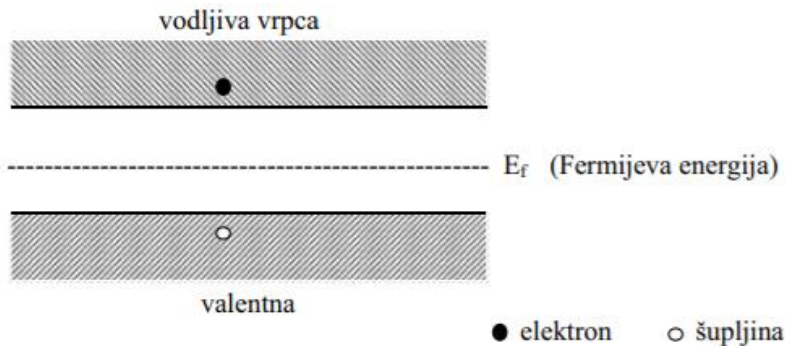
Becquerelovo otkriće ne pobuđuje preveliki interes te tek 1883. godine američki izumitelj Charles Fritts prvi proizvodi solarnu ćeliju. Pri proizvodnji ćelije, on poluvodički materijal selen oblože s tankim slojem zlata i tako ostvaruje potencijalnu barijeru na kontaktu metal-poluvodič [8].

#### **4.1.2. Poluvodička dioda (PN spoj)**

Razlikuju se dvije vrste poluvodiča, čisti poluvodiči i poluvodiči s primjesama. Dodavanjem primjesa čistim poluvodičima dobija se p-tip odnosno n-tip poluvodiča. Svrha dopiranja n-tipa je da se stvori mnoštvo pokretnih elektrona ili elektrona *nosioca* u materijalu, dok svrha dopiranja p-tipa je stvaranje mnoštva šupljina [8].

Suncana je ćelija u biti PN-spoj (poluvodička dioda). PN-spoj nastaje kada se jednom dijelu kristala čistog poluvodiča dodaju trovalentne (akceptorske) primjese, tako da nastane p-tip poluvodiča, a drugom dijelu peterovalentne (donorske) primjese, te nastaje n-tip poluvodiča. Na granici između tih dvaju područja (PN-spoj), kao posljedica gradijenta koncentracije, nastaje

difuzija elektrona iz n-područja prema p-području i šupljina iz p-područja prema n-području. Fermijeva je energijska razina  $E_f$  na sredini jer je broj elektrona u vodljivoj vrpici jednak broju šupljina u valentnoj vrpici (slika 4.1.1.1.) [9].



**Slika 4.1.1.1.** *Energijski dijagram za čisti poluvodič, izvor [9]*

Bitno je svojstvo PN-spoja njegovo ispravljачko djelovanje, tj. lakše vodi struju kad je p-područje pozitivno, a n-negativno. Tada je napon u propusnom smjeru, a suprotno tome je napon u zapornom smjeru. Dakle, PN-spoj radi kao dioda, i propušta struju samo u jednom smjeru. Ako se na PN-spoj priključi izvor vanjskog napona u propusnom smjeru, tako da je pozitivan pol na p-strani a negativan na n-strani, protekne struja elektrona iz n-područja prema p-području i šupljina iz p-područja prema n-području [9].

### 4.1.3. Kristali

Kristali su čvrsta tijela, sačinjena od atoma, iona ili molekula raspoređenih s pravilnom međusobnom udaljenošću tvoreći tzv. kristalnu rešetku. Promjena strukture kristalne rešetke utjecat će na mehanička, toplinska, električna i magnetska svojstva kristala. Materijali važni za izradu fotonaponskih solarnih ćelija dolaze u obliku monokristala, polikristala ili kao amorfne tvari. Ako se aktivni obujam ćelija sastoji od samo jednog kristala, tada je takva ćelija monokristalna ćelija, a ako se aktivni obujam ćelija sastoji od dva ili više kristala, tada je takva ćelija polikristalna ili multikristalna [9].

Za izradu solarnih ćelija koriste se poluvodljivi materijali poput kristalnog silicija koji je trenutno najzastupljeniji materijal pri izradi solarnih ćelija. Poluvodiči poput silicija su materijali koji imaju električnu vodljivost veću od izolatora, a manju od vodiča [8].

## 4.2. Tehničke karakteristike fotonaponskih panela

U ovom poglavlju obradit će se materijali od kojih se izrađuju ćelije, koji je njihov postupak proizvodnje, princip rada solarne ćelije i njihove U – I karakteristike. Slika 4.2.1. prikazuje osnovnu strukturu fotonaponske ćelije.



*Slika 4.2.1. Struktura fotonaponske ćelije, izvor [10]*

### 4.2.1. Materijali

Silicij se koristi kao osnovni materijal za izradu solarnih ćelija i on dominira s udjelom od oko 98%, i to pretežno u tehnologiji kristalnog silicija. Uglavnom prevladava tehnologija proizvodnje monokristalnog silicija. Proizvodnja je monokristalnog silicija skuplja, no učinkovitost ćelija je veća. Najveći nedostatak kristalnog silicija je svojstvo da je poluvodič s tzv. neizravnim zabranjenom pojasom, zbog čega su potrebne velike debljine aktivnog sloja kako bi se u najvećoj mjeri iskoristila energija sunčeva zračenja [9].

Fotonaponske ćelije od kristala silicija izvode se u više morfoloških oblika, kao monokristalne i polikristalne.

Za proizvodnju monokristalnih Si ćelija potreban je apsolutno čisti poluvodički materijal. Monokristalne ploče napravljene od silicija mogu pretvoriti  $100 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $140 \text{ W}$  električne energije s površinom ploče od  $1 \text{ m}^2$  [8]. Monokristalni štapići se izvade iz rastaljenog silicija i režu na tanke pločice. Takav način izrade omogućuje relativno visoki stupanj

iskoristivosti. Ovaj tip fotonaponske ćelije proizvodi više električne energije od polikristalnih Si ćelija [11].

Proizvodnja polikristalnih Si ćelija je ekonomski efikasnija u odnosu na monokristalne. Tekući silicij se ulijeva u blokove koji se zatim režu u ploče. Tijekom skrućivanja materijala stvaraju se kristalne strukture različitih veličina na čijim granicama se pojavljuju greške, zbog čega solarna ćelija ima manju iskoristivost [11].

Jedna od tankoslojnih tehnologija koje se istražuju je proizvodnja sunčanih ćelija od amornog silicija. Proizvodnja je relativno jednostavna, zasniva se na nanošenju tankog sloja silicija u amornom stanju na podlogu. Debljina sloja iznosi manje od 1  $\mu\text{m}$ , stoga su troškovi proizvodnje manju u skladu sa niskom cijelom materijala. Iskoristivost amornih ćelija je puno niža u usporedbi s drugim tipovima ćelija [11].

U tablici 1. Uspoređene su osnove karakteristike sunčanih ćelija izrađenih od nekoliko vrsta materijala te su dani temeljni parametri solarnih ćelija, kao napon otvorenog kruga  $U_{ok}$ , gustoća struje kratkog spoja  $J_{ks}$  i stupanj djelovanja ćelije  $\eta$  [9].

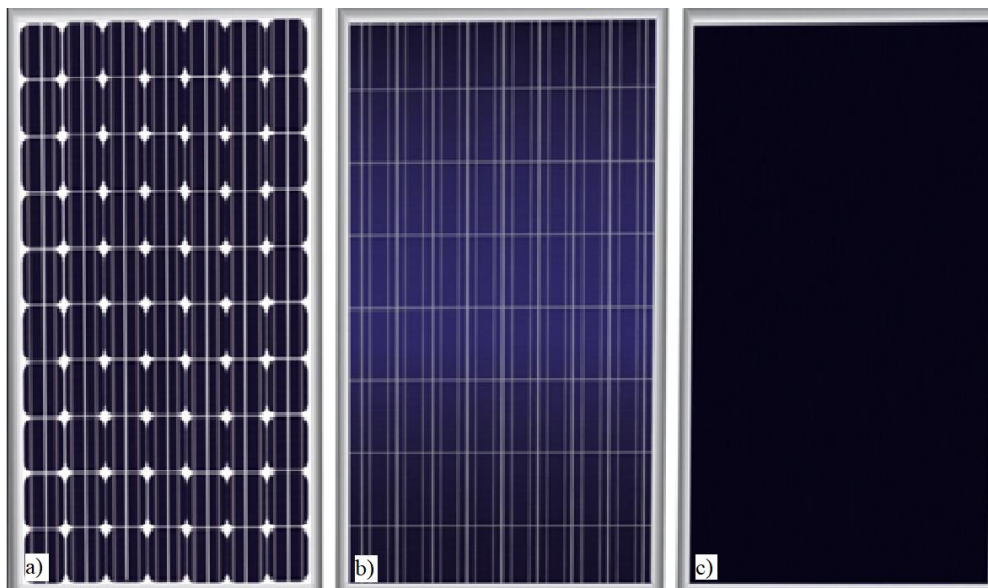
**Tablica 1.** Temeljni parametri solarnih ćelija, izvor [9]

VRSTA ĆELIJE	$U_{ok}$ [V]	$J_{ks}$ [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ]	$\eta$
Monokristalna-Si ćelija	0,65	30	0,17
Polikristalna-Si ćelija	0,60	26	0,15
Amorfna-Si ćelija	0,85	15	0,09
CdS / $\text{Cu}_2\text{S}$	0,5	20	0,10
CdS / CdTe	0,7	15	0,12
GaAlAs / GaAs	1	30	0,24
GaAs	1	20	0,27

#### 4.2.2. Postupak proizvodnje

Danas se na tržištu mogu naći različite silicijske solarne ćelije u različitim bojama i dimenzijama (slika 4.2.2.1.) [11].





*Slika 4.2.2.1. Fotonaponski paneli: a) monokristalni, b) polikristalna, c) tanki film, izvor [12]*

Postoje tri generacije u koje su podijeljeni paneli solarnih ćelija. U prvoj generaciji prevladava tehnologija proizvodnje monokristalnog silicija tehnologijom lebdeće zone. Proizvodnja je monokristalnog silicija skuplja, no učinkovitost ćelija je veća. Nedostatak je svojstvo da je poluvodič s tzv. neizravnim zabranjenim pojasom, zbog čega su potrebne velike debljine aktivnog sloja kako bi se u najvećoj mjeri iskoristila energija sunčeva zračenja. Druga generacija je jeftinija za proizvodnju i ima nisku učinkovitost. Tehnologija uključuje primjenu trakastog silicija, ima prednost što je u procesu proizvodnje izbjegnuta potreba rezanja vafra, čime se gubi i do 50% materijala. Kvaliteta i mogućnost proizvodnje nije dovoljna da bi prevladala u bliskoj budućnosti. U trećoj generaciji koristi tehnologiju tanki film, primjenjuju se poluvodiči s tzv. izravnim zabranjenim pojasom i njihove debljine mogu biti znatno manje, što omogućava nižu cijenu i mogućnost proizvodnje većih količina ćelija [9].

Cijena solarnih ćelija još uvijek drži cijenu, ali vremenom im se poboljšavaju karakteristike. Kako bi se cijena solarnih ćelija smanjila, potrebno je pojednostaviti izradu ćelija i korištenje jeftinijih materijala. U novije vrijeme sve više se koriste koncentrirajuće solarne ćelije koje prate kretanje sunca te se dobije veći stupanj djelovanja ćelija.

Na slici 4.2.2.2. prikazan je u fazama postupak proizvodnje solarnih ćelija.



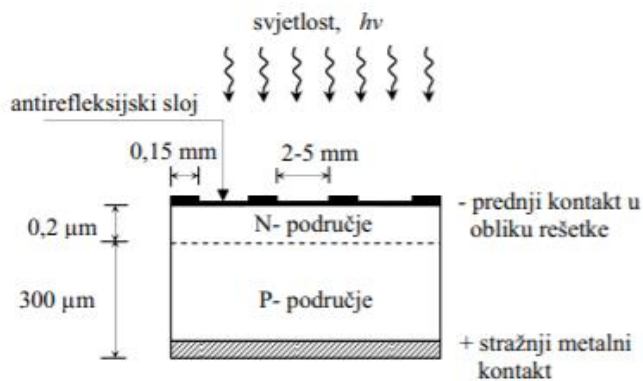
*Slika 4.2.2.2. Postupak proizvodnje solarnih ćelija i solarnog modula, izvor [9]*

### 4.2.3. Princip rada solarne ćelije

Kada se solarna ćelija osvjetli, fotonaponskim se efektom na njezinim krajevima pojavljuje elektromotorna sila (napon) i tako solarna ćelija postaje izvorom električne energije. Pri praćenju emisije i apsorpcije sunčeva zračenja, zračenje se može promatrati kao snop čestica, tzv. fotona. Svaki foton nosi određenu količinu energije.

Elektromagnetska zračenja razlikuju se jedino po frekvenciji. Svjetlost nastaje kada se električni naboji kreću u elektromagnetskom polju. Svjetlost manje energije ima manju frekvenciju ali veću valnu duljinu, a svjetlost s više energije ima veću frekvenciju ali manju valnu duljinu [9].

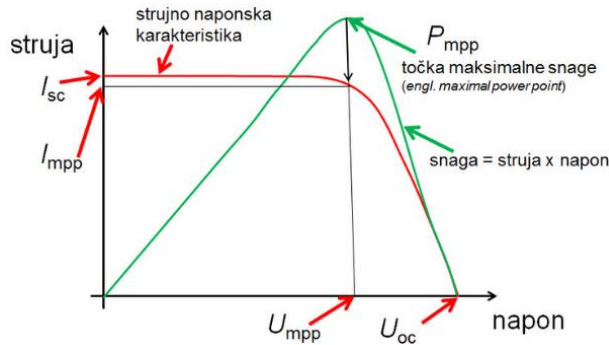
Slika 4.2.3.1. pokazuje apsorpciju sunčeva zračenja silicijeve solarne ćelije. Na površini pločice P-tipa silicija difundirane primjese na tankom površinskom sloju nastane područje N-tipa poluvodiča. Da bi se skupili naboji nastali apsorpcijom fotona iz sunčeva zračenja, na prednjoj površini ćelije nalazi se metalna rešetka. Stražnja strana ćelije prekrivena je metalnim kontaktom. Prednja površina ćelije prekriva se prozirnim antirefleksirajućim slojem koja smanjuje refleksiju sunčeve svjetlosti [9].



*Slika 4.2.3.1. Silicijeva solarna ćelija, izvor [8]*

#### 4.2.4. I-U karakteristike

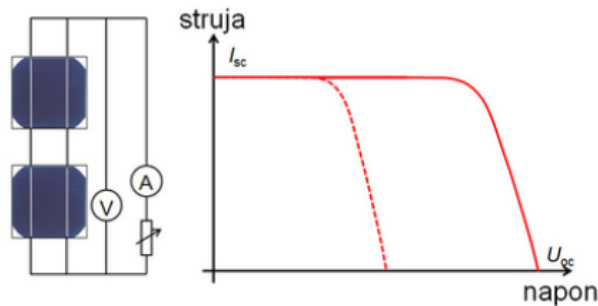
Pozitivna struja je ona koja izlazi iz fotonaponske ćelije jer je obasjana fotonaponska ćelija u stvari izvor struje. Na prikazanoj slici 4.2.4.1. se na strujno-naponskoj karakteristici fotonaponske ćelije uočavaju dvije karakteristične vrijednosti: napon praznog hoda kao napon pri otvorenim stezaljkama fotonaponske ćelije ( $U_{OC}$ ) i struja kratkog spoja kao struja uz kratko spojene stezaljke fotonaponske ćelije ( $I_{SC}$ ). Sve međutočke krivulje se mogu dobiti terećenjem osunčanog fotonaponskog modula i snimanjem iznosa napona i struje. Iz strujno-naponske karakteristike se može dobiti i karakteristika snage jednostavnim množenjem vrijednosti napona i struje [13].



**Slika 4.2.4.1.** Strujno-naponska karakteristika i karakteristika snage, izvor [13]

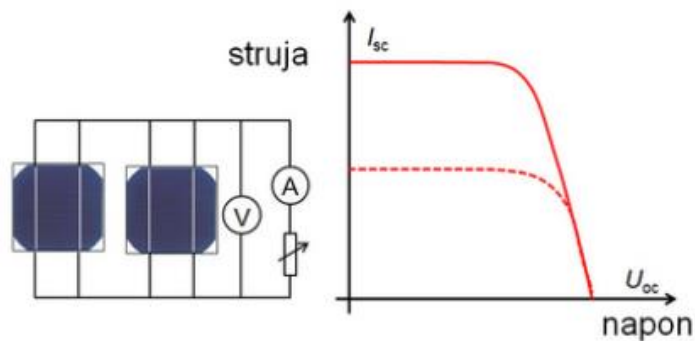
Spajanje ćelija može biti izvedeno na dva načina:

1. Serijski – serijskim spajanjem ćelija se povećava napon s povećanjem površine, izvodi se tako da se naizmjenično spajaju (+) i (-) pol ćelija u nizu [8] (slika 4.2.4.2)



**Slika 4.2.4.2.** Serijsko spajanje fotonaponskih ćelija, izvor [13]

2. Paralelno – paralelnim spajanjem ćelija povećava se jakost struje s povećanjem površine, izvodi se tako da se svi (+) polovi spoje na jedan vodič, a svi (-) polovi na drugi vodič [8] (slika 4.2.4.3.)



**Slika 4.2.4.3.** Paralelno spajanje fotonaponskih ćelija, izvor [13]

### **4.3. Održavanje i analiza FN panela u eksploataciji**

#### **4.3.1. Metode ispitivanja FN panela**

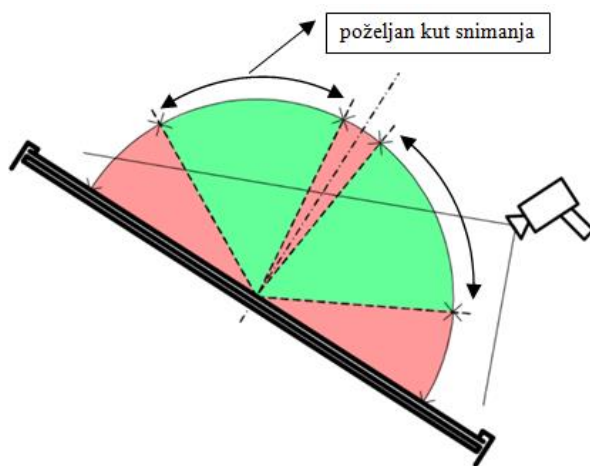
Kontrola PV instaliranog sustava može se provoditi u četiri faze koje ćemo objasniti dalje u tekstu.

Vizualni pregled je korisna metoda pregleda PV instaliranog sustava zato što se na brži način može vidjeti općenito stanje instalacija te fokusirati na moguće dijelove gdje postoje veće šanse za kvarovima. Veliki značaj se dogodio u proteklom vremenu gdje je kreirana baza kataloga u kojima se navode greške koje se mogu dogoditi kod PV sustava, a koje su bili uočene vizualnim pregledom. Također, kreirane su procedure provođenja kontrole koje su uvedene kao obrasci s pitanjima kojima se odrađuje vizualni pregled. Najčešći uočeni problemi koji su primijećeni prilikom provođenja vizualnog pregleda su: razdvajanje slojeva panela (delaminacija), pojava mjehurića, pukotine uočene na ćeliji, različiti nedostaci uočeni na antireflektirajućem sloju, pregorene ćelije [14].

Električni pregled uključuje mjerenja pomoću multimetara, PV analizatora i ostalom opremom. Kontrola mjerenja električnog sustava omogućuje ekvivalent stupnju izvedbe i sigurnosti. Kako bi provjerili da PV instalacije rade uredno, zahtjeva se da se provedu kontrole: kontinuiranost zaštitnog uzemljenja, ispitivanje polariteta za sve istosmjerne kablove i izolacijski otpor jednosmjernih krugova. PV analizatori mogu izmjeriti I-U karakteristiku PV modula i niza kako bi se uspoređivali s I-U karakteristikom od strane proizvođača. Multimetri mogu mjeriti napon otvorenog strujnog kruga i struju kratkog spoja. Također je korisno izmjeriti i sunčevo zračenje i temperaturu panela [14].

Pregled infracrvenom termografijom znatno je pouzdaniji. Korištenjem infracrvenog spektra moguće je vidjeti oštećenja koja nisu vidljiva golim okom. Promatrana područja panela gdje se očitavaju veće temperaturne vrijednosti i to učestalije prilikom termografske provjere potencijalno su moguća mjesta gdje može doći do određenih grešaka. Proizvođači termografske opreme razvili su upute za provođenje termografskih kontrola, te izbjegavanje grešaka u procedurama koje bi mogle ugroziti rezultat provedene kontrole. Po navedenim uputama mjerenja bi se trebala provoditi u dobrim osunčanim uvjetima u rasponu od 500-700 W/m<sup>2</sup>, uz uvjet vedrog neba kako bi se izbjegle sjene oblaka tijekom snimanja promatranih površina.

Mjerenja u pogodnim vremenskim uvjetima potrebna su kako temperaturno polje nebi bilo pod utjecajem čimbenika koji mogu dovesti do nepouzdanih rezultata. Iako temperaturno polje na površini panela postaje čitljivije, određene refleksije od sunca ili okolnih objekata na staklo mogu uništiti kompletnu infracrvenu sliku. Razlog tome je da se promatrani objekt ne snima direktno usmjereno na površinu panela već se usmjери na 5-60° (slika 4.3.1.1.) [14].



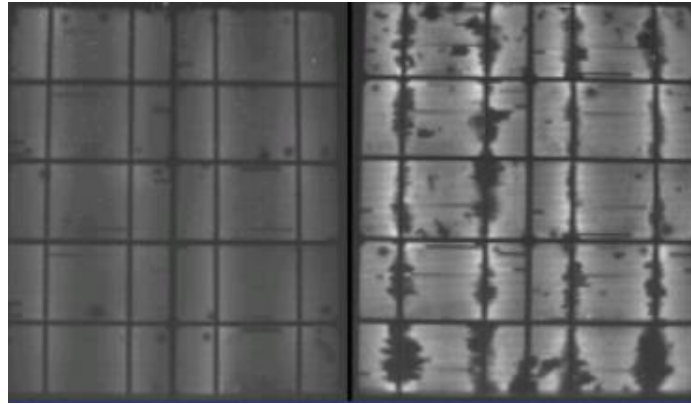
*Slika 4.3.1.1. Poželjan kut za očitavanje, izvor [3]*

Postupak kvantitativne termografije iziskuje osobu s iskustvom i znanjem prvog stupnja obuke. Edukacija na području termovizije odvija se u tri stupnja. Sadržaj potrebnih znanja opisuje BS ISO 18436-7:2014 „Condition monitoring and diagnostics of machines- Requirements for qualification and assessment of personnel, Part 7: Thermography“[2].

Minimalni zahtjevi za instalaciju i nadziranje PV sustava prezentirani su smjernicama IEC 62446-1:2016 „Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 1: Grid connected systems - Documentation, commissioning tests and inspection“. Ovaj dokument sačinjava dijelove teksta koju su posvećeni isključivo termografskoj kontroli. Potrebna razina osunčanosti koja premašuje  $400 \text{ W/m}^2$ , te čisto vedro nebo uvjeri su koji su potrebno za uredno očitavanje temperaturnog polja. Infracrveno snimanje potrebno je obaviti sa obje strane (prednje i zadnje). Svi PV paneli moraju biti provjereni sa posebnom pozornošću na razvodnim kutijama i kompletna provjera elektro spojeva [14].

Elektroluminiscencija koristi se kao sredstvo za nerazorno kontrolno ispitivanje za pregled PV modula. Temelji se na sljedećem principu: kad se PV modul podvrgne struji, emitira se zračenje u približno infracrvenom području. Zahvaljujući specifičnoj kameri moguće je prikupiti ovo

zračenje kako bi se dobila slika izvora. Stoga je moguće otkriti pukotine i mikropukotine, fragmente ili cijele stanice koje ne sudjeluju u trenutnoj proizvodnji nakon što su podvrgnute sunčevom zračenju. Te takozvane „mrtve zone“ na završnoj se slici čine crnim (slika 4.3.1.2.) [15].



*Slika 4.3.1.2. Termički prikaz PV modula prije i nakon 1000 sati rada, izvor [15]*

#### **4.3.2. Analiza FN panela u eksploataciji**

U sljedećem poglavlju opisuju se događaji koji mogu voditi ka kvarovima PV modula.

##### Razdvajanje slojeva panela

Prianjanje između stakla može biti ugroženo iz više razloga. Delaminacija se može pojaviti zbog zagađenosti, zbog nepravilnog čišćenja stakla, utjecaja vremenskih faktora, pojavom vlage i korozije. Delaminacija može postati ozbiljniji problem ako se vlaga stvara u praznini i stvori kratke spojeve u blizini žica koje su lemljenje (slika 4.3.2.1).



**Slika 4.3.2.1. Delaminacija c-Si modula, izvor [16]**

Stražnja podloga modula služi za zaštitu elektronskih komponenti od izravnog izlaganja okolišu. Zaštitna podloga može biti sačinjena od stakla ili polimera te može biti napravljena i od metalne folije. Najčešće je podloga napravljena od lamilantnih struktura s visokom stabilnošću te UV zaštitnim polimerima. Većinom je to fluoropolimer izvana direktno izložen okolišu, te unutarnji sloj PET-a, nakon čega slijedi inkapsulirani sloj [17].

Kada se koristi stražnje staklo umjesto podloge može doći do pucanja stakla, i to se događa zbog nepreciznog postavljanja, udarca od tuče, udarca od različitih stvari za vrijeme jakih vjetrova ili nekih drugih mehaničkih naprezanja. Naprezanja koja imaju utjecaja na podlogu mogu uzrokovati povećanje delaminacije te pucanje stakla gdje može doći do velikih problema u funkcioniranju.

Kod podloga s više slojeva, može se dogoditi da određeni broj sučelja može delaminirati zbog povećane topline, temperaturne cirkulacije, mehaničkog stresa, vlage, UV svijetlosti, ili nekog drugog fizičkog ili kemijskog naprezanja. Ako dođe do delaminacije koja stvara mjehure u sredini trenutno neće predstavljati problem (slika 4.3.2.2.). Takvo područje će raditi s povećanom temperaturom zato što se temperatura ne provodi na stražnji dio podloge. Dok god se mjehur dalje ne širi, ne puca ili distribuira dalje, funkcionalnost modula biti će dobra. Ukoliko se delaminacija stražnje podloge dogodi blizu razvodne kutije ili na krajevima modula tada može doći do većih sigurnosnih problema i poteškoća. Delaminacija na rubu ploče može stvoriti direktan put do električnog puta prema zemlji i tada može doći do većih poteškoća koje ugrožavaju sigurnost [17].



**Slika 4.3.2.2.** *Delaminacija stražnje strane modula, izvor [18]*



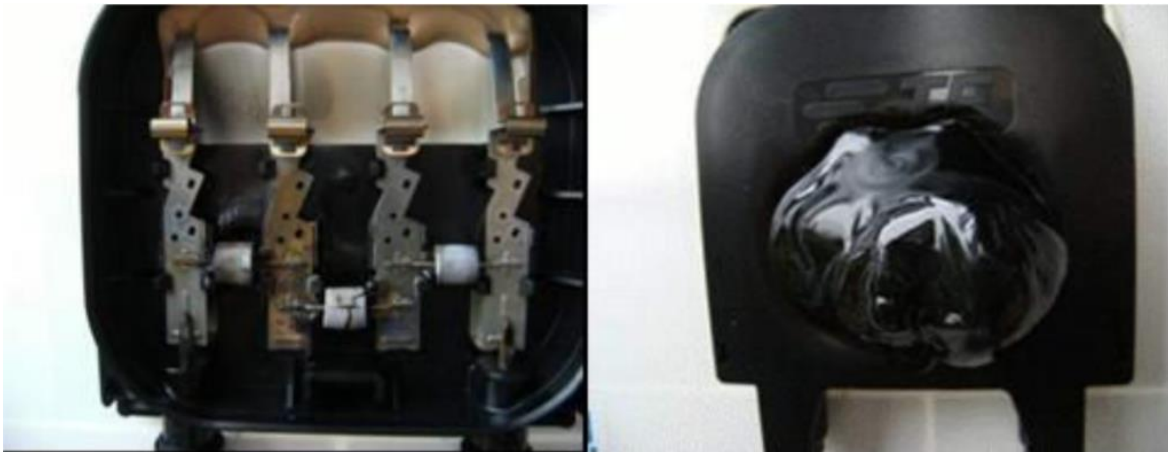
### Spojna kutija panela

Spojna kutija ili razvodna kutija panela pričvršćena je na stražnjoj strani modula koji štiti spojeve koji dolaze od modula i koji idu na vanjski terminal. Razvodna kutija u sebi ima premosne (engl. bypass) diode kako bi se zaštitile ćelije povezane u niz u slučaju pojave žarišta ili sjene.

Promatrane greške koje se pojavljuju:

1. Loše učvršćivanje razvodne kutije na stražnju podlogu.
2. Otvorene ili loše zatvorene razvodne kutije kod proizvodnog procesa.
3. Pojava vlage koja uzrokuje koroziju međusobnih spojeva u razvodnoj kutiji.
4. Loše ožičenje može uzrokovati topljenje unutar razvodne kutije te može doći do zapaljenja i eksplozije.

Nepouzdana kontakti za lemljenje međusobnih veza između žica mogu prouzročiti visoki otpor i posljedično zagrijavanje u razvodnoj kutiji. U težim slučajevima može doći do povećane opasnosti od požara. (slika 4.3.2.3.) [17].



**Slika 4.3.2.3.** Uočena neispravnost razvodne kutije u eksploataciji, izvor [19]

### Tragovi puža

Puževе staze (slika 4.3.2.4.) vidljivi su nedostatak nastao promjenom boje srebrne paste na prednjem metaliziranom dijelu solarne ćelije. U PV modulu učinak izgleda poput puževе staze na prednjem staklu modula. Promjena boje nema utjecaja na performanse PV modula, ali pukotine na stanicama mogu smanjiti snagu PV modula. U nekoliko studija pokazalo se da je odabir EVA-e pomoću aditivnog sastava i vrste pozadine određuje osjetljivost ili otpornost na

stvaranje puževih tragova. Promjena boje dogodi se zbog stvaranja srebrnog traga. Čestice srebra su spojevi sumpora, fosfora ili ugljika [20].



*Slika 4.3.2.4. Fotografija puževe staze, izvor [21]*

#### EVA diskoloracija

U proteklih nekoliko godina provedena su razna istraživanja i eksperimenti koju su istraživali ključne čimbenike koji mogu uzrokovati fotokemijsko posmeđivanje EVA-e. Rezultati pokazuju da na stopu i opseg promjene boje EVA mogu utjecati brojni čimbenici. Ti čimbenici su interaktivni i međusobno povezani. Čimbenici se mogu klasificirati kao kemijski i fizički. U kemijskoj kategoriji čimbenici uključuju EVA formulu, iscrpljivanje UV apsorbera, koncentracija kromofora stvorenih stvrdnjavanjem, reakcije uslijed toka zraka. Fizički faktori uključuju intenzitet svjetlosti, debljinu filma, laminiranje, propusnost plina polimernih supstrata. Promjena boje EVA slijedi od blago svijetlosmeđe do smeđe (slika 4.3.2.5.) [22].



*Slika 4.3.2.5. EVA smeđenje, izvor [23]*

### Pucanje ćelije

Fotonaponske ćelije napravljene su od silicija te su samim time fotoćelije dosta lomljive. Stanične pukotine su pukotine na silicijskoj podlozi fotonaponskih stanica koje se često ne mogu vidjeti golim okom te mogu biti različitih duljina i ići u različitim smjerovima u solarnom panelu. U današnjim PV modulima najčešće je ugrađeno 60 fotonaponskih ćelija po jednom modulu. Vodeno rezanje, proizvodnja ćelija, ožičavanje te postupak sastavljanja tokom proizvodnje solarnih panela i modula mogu uzrokovati pukotine u fotonaponskim ćelijama. Uz sve nabrojano do puknuća može doći prilikom transporta ukoliko se ploče pažljivo ne pakiraju i dostavljaju te tokom samog montiranja modula kada netko može slučajno udariti modul ili ukoliko mu neki dio ispadne oko modula.

Postoje tri različita izvora pukotina stanica tijekom proizvodnje i svaki ima svoju vjerojatnost pojave:

1. Pukotine koje počinju od vrpce međusobno povezanih stanica nastaju zbog zaostalih napreznja izazvanih postupkom lemljenja (slika 4.3.2.6.). Te se pukotine često nalaze na kraju ili početnoj točki priključka, jer postoji najveći zaostali napon. Ova pukotina je najčešća.



**Slika 4.3.2.6** Pukotina u ćeliji, izvor [24]

2. Takozvana poprečna pukotina koja nastaje pritiskom igala na vodenom rezanju tijekom proizvodnje.

3. Pukotine koje počinju od ruba ćelije, one su uzrokovane udaranjem ćelije u tvrdi predmet (slika 4.3.2.7.).



**Slika 4.3.2.7.** *Lom stakla, izvor [17]*

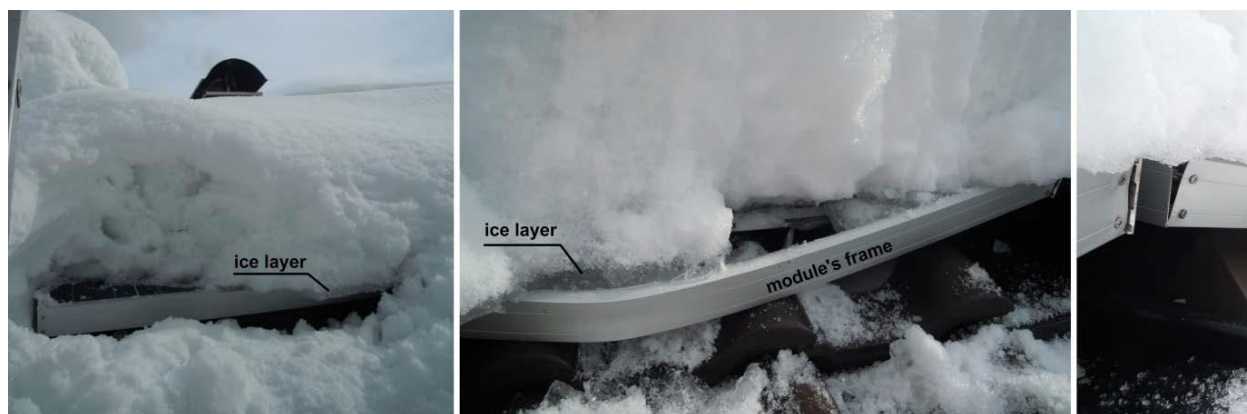
Nakon što su u solarnom modulu prisutne pukotine stanica, postoji povećani rizik da se tijekom rada solarnog modula kratke stanične pukotine mogu razviti u duže i šire. To je zbog mehaničkog napreznja uzrokovanog opterećenjem vjetrova ili snijega i termo mehaničkog napreznja na solarnim modulima zbog temperaturnih razlika, te prolaska oblaka i promjene vremena.

Ovisno o obrascu pukotine kod većih pukotina toplinsko i mehaničko napreznje i vlaga mogu dovesti do „mrtvih“ ili „neaktivnih“ dijelova ćelije što uzrokuje gubitak snage i pogođene fotonaponske ćelije. Mrtvi ili neaktivni dio ćelije znači da određeni dio fotonaponske ćelije više ne doprinosi ukupnom ishodu snage solarnog modula. Kad je ovaj mrtvi ili neaktivni dio fotonaponske ćelije veći od 8% ukupne ćelijske površine, to će dovesti do gubitka snage koja se otprilike linearno povećava s neaktivnom stanicom. [17]

#### Opterećenje panela dodatnim teretom – lom okvira

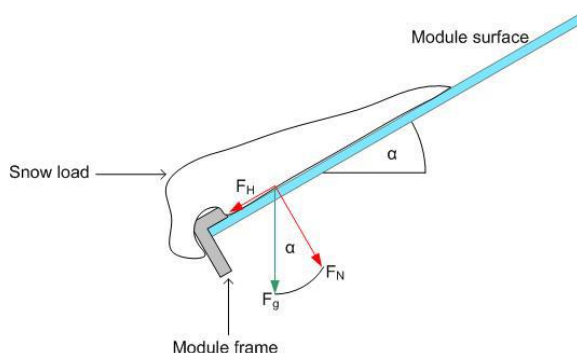
Mnogi PV moduli konstruirani su za područja gdje postoje velika opterećenja prilikom snježnih oborina. Testiranje i certificiranje PV modula za područja gdje padaju veće količine snijega izvodi se ispitivanjem testom IEC 61215. Što se tiče stvarnih karakteristika opterećenja snijegom, ispitivanje mehaničkog opterećenja ne može se primijeniti na donjem dijelu okvira modula zbog nagnutosti. Snježni nanosi spuštaju se prema dolje te postoji mogućnost upada

između rubova okvira i gornje površine. Led koji se stvara putem kompresije donjnjeg sloja snijega biva istiskan na otvoreni rubni dio okvira (slika 4.3.2.8.)



**Slika 4.3.2.8** Oštećeni okviri nakon velikog opterećenja snijegom; lijeva fotografija prikazuje ledeni soj koji klizi preko ruba modula, srednja fotografija okvir s slojem leda, i desna fotografija prikazuje kvar kutnih vijčanih spojeva, izvor [17]

Nagnuta površina ili vrh modula jednostavno omogućuju da se teret snijega prebaci na donji dio modula što uključuje i moment na stegnutim mjestima. Ovo ponašanje pojačano je većom gravitacijskom silom usporedno sa središtem ili vrhom modula. Slika 4.3.2.9. prikazuje ovaj odnos, dok pojednostavljuje razliku između vodoravnih i okomitih dugoročnih utjecaja snijega.



**Slika 4.3.2.9.** Opterećenje snijegom, razlika između vektora opterećenja, izvor [17]

Općenito možemo reći da PV moduli što se tiče nanosa snijega mogu biti podijeljeni u četiri karakteristike koje se koriste za stvaranje novih testnih metoda.

1. Okomita opterećenja koja djeluju na nagnutu površinu rastavlja se na dvije povezane sile: normalna sila  $F_n$  i silazna sila  $F_h$ . Sila  $F_r$  je sila trenja između snijega i stakla i djeluje protiv utjecaja sile  $F_h$ .
2. Snijeg koji kliže površinom prema dolje neravnomjerno je podijeljen na površini modula.
3. Neravnomjerni teret stvara momente i trenje na donjem dijelu modula po aksijalnom smjeru testiranog uzorka. Stezaljke donjeg dijela modula podliježu jačim aktivnostima.
4. Niske temperature (ispod 0) mogu uzrokovati krhkost i pucanje ljepila što može dovesti do sve lošije stabilnosti. Na većim temperaturama može doći do sklizanja nanesenog tereta [17].

## 5. INFRACRVENA TERMOGRAFSKA ANALIZA - FNE FERIT 1

U ovom dijelu rada prikazat će se provedeno istraživanje koje je rađeno u sklopu zadane teme te mjerenja koja su dobivena kroz očitavanja fotonaponskih ćelija. Istraživanje je bilo provedeno na FNE FERIT 1.



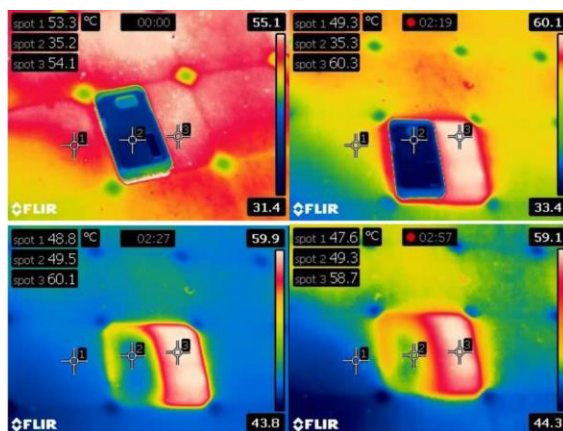
**Slika 5.1.** *FNE Ferit 1*

Provedeno testiranje FNE provedeno je 25.svibnja 2018. godine na krovu zgrade FERITA gdje su postavljene fotonaponske ćelije FNE (slika 5.1.)

Prilikom provedenih mjerenja korištene su dvije termografske kamere. Prva termografska kamera je FLIR E6 rezolucije 160x120 piksela, vidnog polja  $45^\circ \times 34^\circ$ , temperaturnog opsega mjerenja od  $-20^\circ\text{C}$  do  $250^\circ\text{C}$ , razlučivosti temperaturne razlike  $<0,06^\circ\text{C}$ , brzine osvježavanja 9 Hz i točnosti  $\pm 2\%$  ili  $2^\circ\text{C}$ . Druga termografska kamera je FLIR E60bx rezolucije 320x240 piksela, temperaturnog opsega mjerenja od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+260^\circ\text{C}$ , razlučljivost temperaturne razlike  $<0,05^\circ\text{C}$  i točnosti  $\pm 2\%$  ili  $2^\circ\text{C}$ .

Termografska kamera FLIR E6 nema mogućnost videozapisa. Kada termografska kamera ima mogućnost videozapisa poželjno ga je i napraviti bez prekida, zadržavajući se nekoliko sekundi na svakom panelu. Promjena položaja kamere uslijed promjene emisivnosti dovodi do

boljeg uočavanja razlike na panelima poput spojnih kutija, zasjenjenja, ptičjeg izmeta i ostalog. Videozapis je dosta koristan za daljnju analizu u uredu (slika 5.2).



**Slika 5.2.** Kadrovi videozapisa zasjenjenja ćelije FN panela, izvor [25]

Može se reći kako bi korištenje dronova u ispitivanju solarnih panela omogućilo znatno jednostavnije dobivanje informacija. Prednost drona također je u tome što dron može doći do određenih lokacija koje su nepristupačne za osobe i mogućnost pregleda u više kutova.

Postavljeni standardi kod testiranja i analize fotonaponske elektrane prema US Infraspection Institute Standard gdje se zahtijeva najmanje  $650 \text{ W/m}^2$  dok je u praksi minimum  $500 \text{ W/m}^2$ . Na dan samog testiranja bilo je sunčano vrijeme uz pojavu oblaka što je utjecalo i na same rezultate testiranja koji će biti prikazani dalje u tekstu. Na slici 5.3. može se vidjeti fotografija neba i mjerenja dozračenosti sa instrumentom Seaward Solar Survey 200-Solar Irradiance Meter i na panelu iznosi  $296 \text{ W/m}^2$ .



**Slika 5.3.** Nebo u trenutku dozračenosti  $296 \text{ W/m}^2$ , izvor [25]



Nakon nekog vremena došlo je do micanja oblaka te smo dobili i nove vrijednosti kod očitavanja rezultata što je vidljivo i na slici 5.4. gdje mjerenje ima vrijednost  $1030 \text{ W/m}^2$  što je potrebno kako bismo mogli krenuti sa provođenjem testiranja.



**Slika 5.4.** Nebo u trenutku dozračenosti  $1030 \text{ W/m}^2$ , izvor [25]

Primjerima gore prikazanih slika može se primijetiti da bez mjernog instrumenta za dozračenost tj. odokativnom metodom ne možemo procijeniti mogućnost provedbe mjerenja sukladno normama. Pojava sunčevih zraka ukazuje na najveći problem rada sa cjenovno pristupačnim kamerama, visoka sunčeva iluminacija na zaslonu kamere znatno slabije luminacije onemogućuje očitavanje sadržaja. Na slici 5.5. prikazan je odraz operatera i oblaka dok je na panelu  $103400 \text{ lux}$ -a [2].



**Slika 5.5.** Zaslona kamere pri visokoj iluminaciji, izvor [25]

Prilikom samog testiranja primijećeno je da postoje poteškoće pri očitavanju zaslona na kameri, iz toga razloga je uz pomoć crnog papira napravljeno zasjenjenje zaslona što je omogućilo lakše očitavanje podataka. U dolje navedenim slikama može se vidjeti primjer infracrvene kamere koja je zasjenjena crnim papirom (slika 5.6. i slika 5.7.). Također uočeno je da je sam pogled na kameru dosta težak za oči zbog naizmjeničnih promjena sjajnosti koja na površini zaslona iznosi  $250 \text{ cd/m}^2$ , dok na samoj promatranoj površini sjajnost je bila i 1000 puta veća.



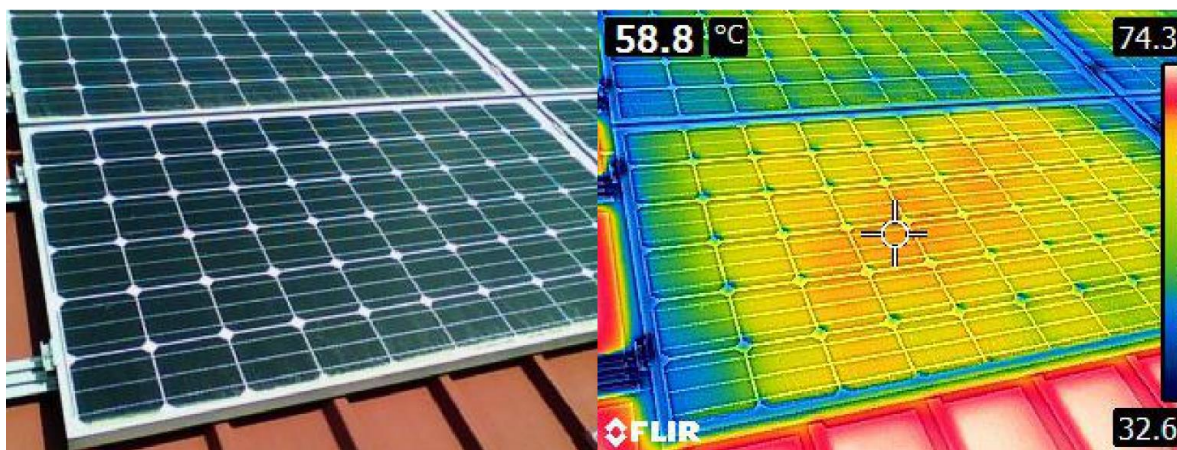
**Slika 5.6.** Zasjenjene zaslona kamere crnim papirom



**Slika 5.7.** Prikaz zaslona zasjenjenog crnim papirom

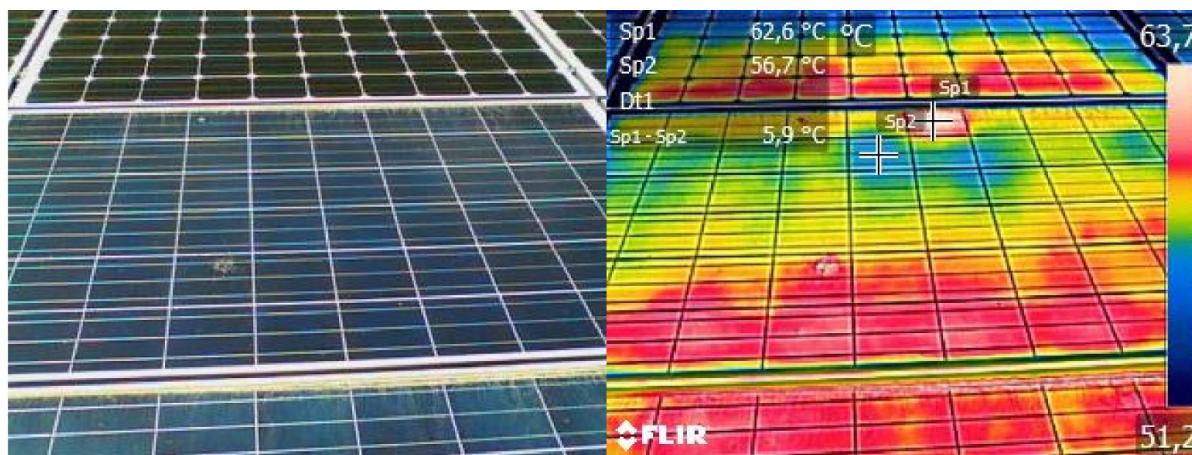
Tokom izvršenja testiranja fotonaponske elektrane pokušao je pregled što veće površine kako bi postojala mogućnost za uočavanje mogućih nedostataka i poteškoća na promatranim panelima

(slika 5.8.). Na dan kada je mjerenje izvršeno bilo je dosta sunčanog vremena i kako je limeni krov postavljen na zgradi temperatura je išla preko 70°C što je remetilo uredno praćenje promatranih podataka. Zbog velike vrućine koncentracija je kroz neko vrijeme popustila što nikako nije dobro kod vršenja testiranja kao u ovom primjeru.



**Slika 5.8.** Analiza jednog panela FNE, izvor [25]

Na jednom od panela uočeno je toplinsko žarište (slika 5.9.). Ustanovljeno je kako žarište koje je promatrano nije dobro snimljeno zbog kuta snimanja ali i pozicije snimanja koja je napravljena na sjevernoj strani krova. Najbolje bi bilo vršiti analizu s južne strane.



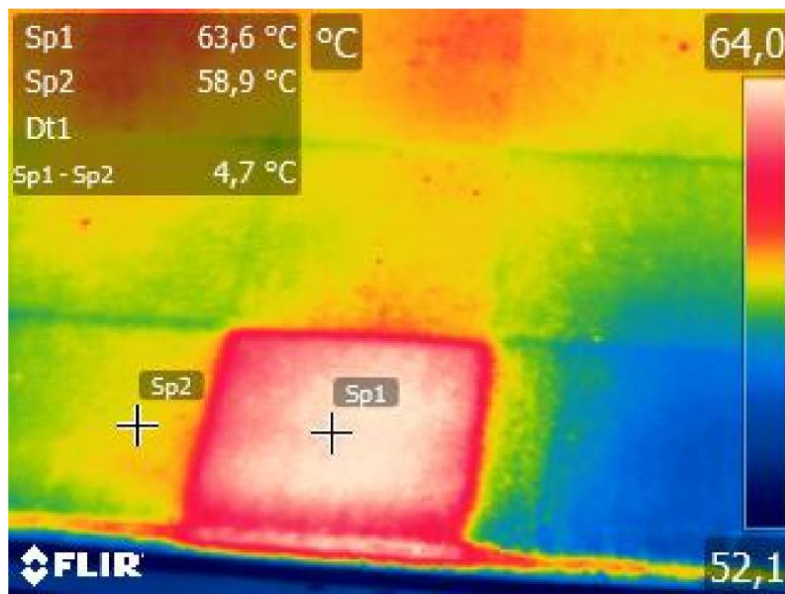
**Slika 5.9.** Uočeno toplinsko žarište na jednom od panela, izvor [25]

Uočene temperaturne razlike te izvršena prijašnja mjerenja pokazuju nam anomalije do kojih je vrlo vjerojatno došlo zbog lošeg održavanja elektrane tj. nakupine pijeska na solarnim panelima (slika 5.10.).



**Slika 5.10.** Donji rub panela sa akumuliranim slojem pijeska koji dovodi do zasjenjenja

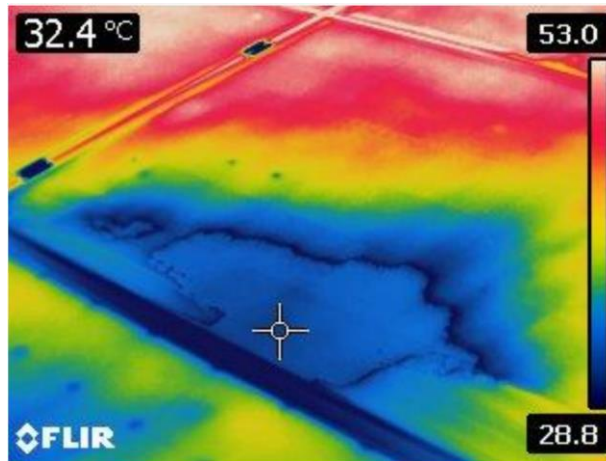
Solarni panel koji na sebi ima određenih nečistoća dovodi do efekta zasjenjenja koji je vidljiv na slici 5.11.



**Slika 5.11.** Detaljna analiza uočenog žarišta na FN panelu, izvor [25]

Žarište koje je promatrano ranije i koje je vidljivo na slici 5.9. ponovno je iskorišteno za još jedno testiranje iako sami uvjeti tokom testiranja nisu bili pogodni. Nakon provedenog testiranja

može se reći da je potrebno saniranje tj. čišćenje promatranog žarišta. Na sljedećoj slici 5.12. odrađeno je čišćenje nakupljenog pijeska te je samim time ustanovljeno kako je uslijed evaporacije vode uočen hladniji obrazac na samoj kameri.

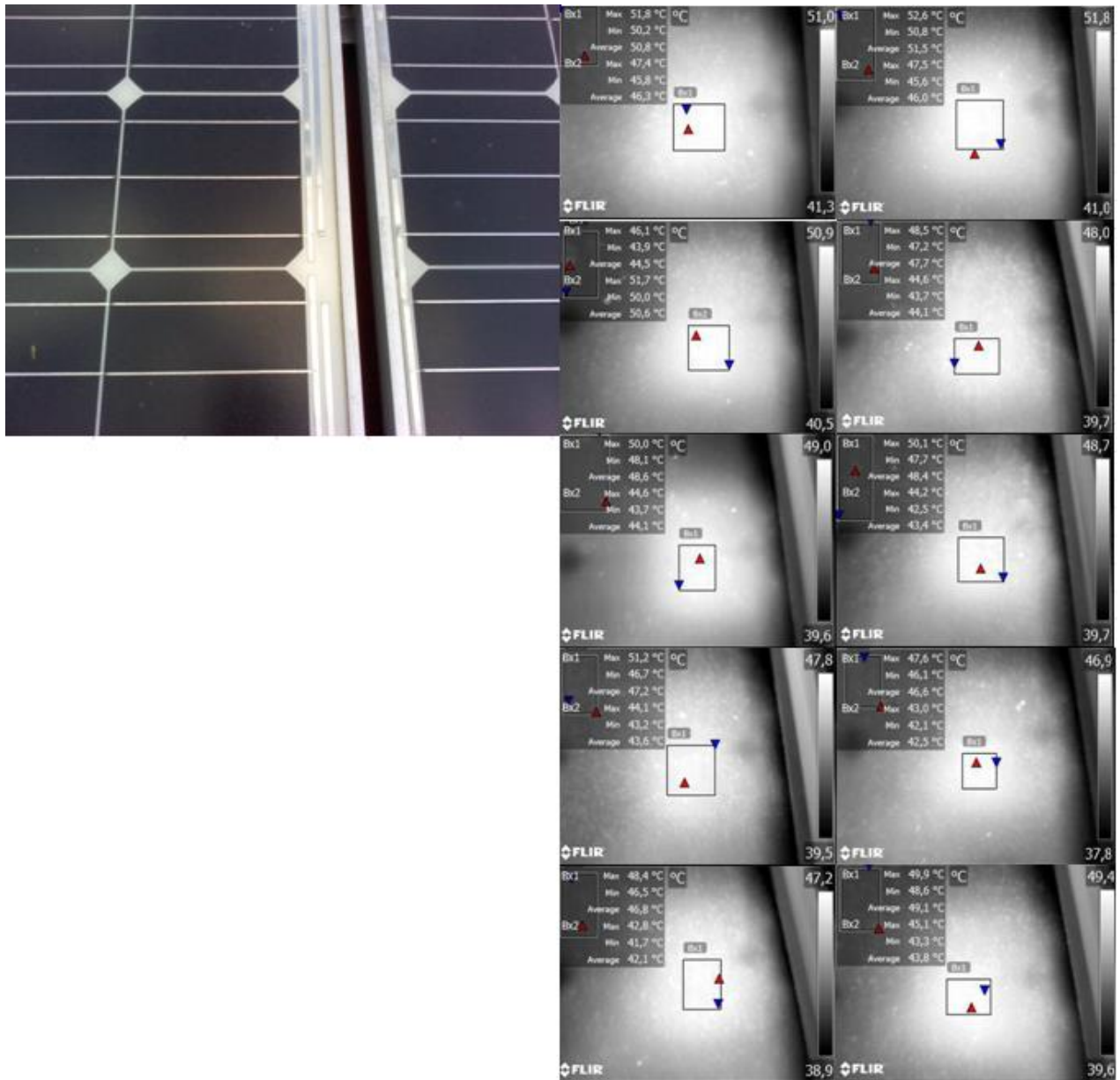


**Slika 5.12.** Čišćenje panela vodom, izvor [25]

Nakon što je čišćenje završeno vidljivo je da je toplinsko žarište nestalo i nakon toga solarni panel poprimio je karakteristike svih ostalih panela fotonaponske elektrane FERIT 1.

Nadalje, na 30 panela snimljene su spojne kutije i to u tri grupe. Prva grupa je snimak iz neposredne blizine, druga grupa snimanje na udaljenosti od 0,5 - 1 metra, a treća grupa snimanje na udaljenosti veće od 1 metra. Promatrano je ima li negdje nekih nepravilnosti ili većih žarišta nego je to uobičajeno.

Promatrana grupa 1 snimljena je u neposrednoj blizini panela, do nekih pola metra udaljenosti. Slika 5.13. pokazuje vizualnu sliku i termogram panela.



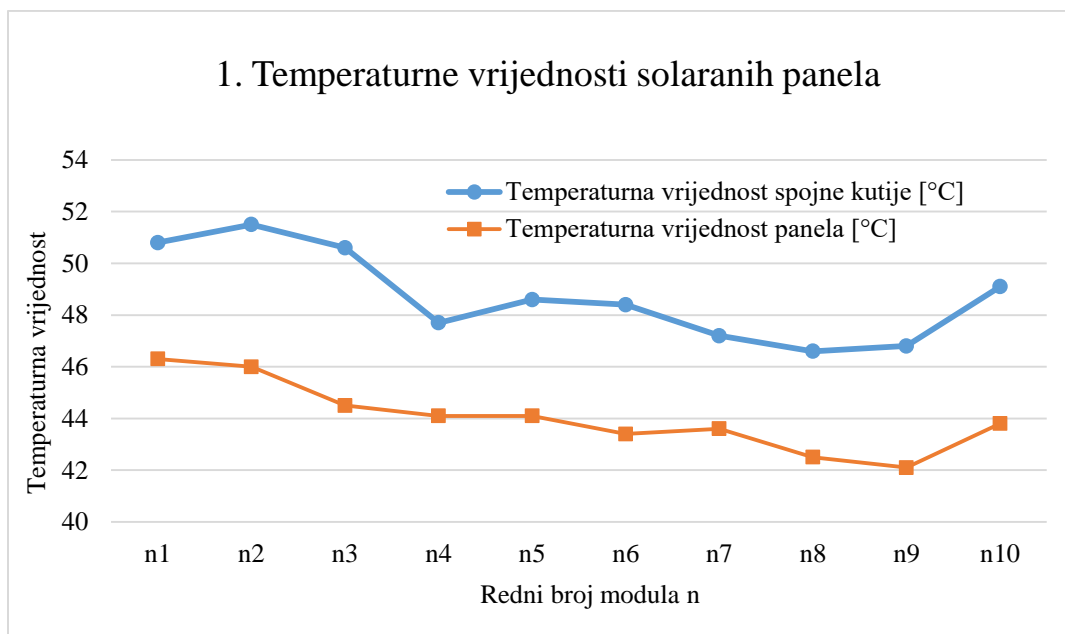
*Slika 5.13. Infracrveni termografski zapis promatrane grupe 1*

Za svih 10 snimaka napravljena je tablica temperaturnih vrijednosti na spojnoj kutiji i na panelu.

**Tablica 5.1.** Temperaturne vrijednosti spojne kutije i panela grupe 1

Redni broj modula n	Temperaturna vrijednost spojne kutije [°C]	Temperaturna vrijednost panela [°C]	Temperaturna razlika -delta vrijednost [°C]
n1	50,8	46,3	4,5
n2	51,5	46,0	5,5
n3	50,6	44,5	6,1
n4	47,7	44,1	3,6
n5	48,6	44,1	4,5
n6	48,4	43,4	5,0
n7	47,2	43,6	3,6
n8	46,6	42,5	4,1
n9	46,8	42,1	4,7
n10	49,1	43,8	5,3

Iz tablice se može napraviti graf za lakši pregled. Prosjek temperaturne razlike – delta vrijednost je 4,69°C.



**Slika 5.14.** Temperaturne vrijednosti solarnih panela skupine 1

Grupa 2 snimljena je na udaljenosti od 0,5 – 1 metra udaljenosti. U ovoj skupini također je napravljeno 10 mjerenja. Analiza je bolja zbog toga je veća površina panela pa je lakše izmjeriti vrijednost panela. Slika 5.15. pokazuje slike iz druge grupe.



5.15. Infracrveni termografski zapis grupe2

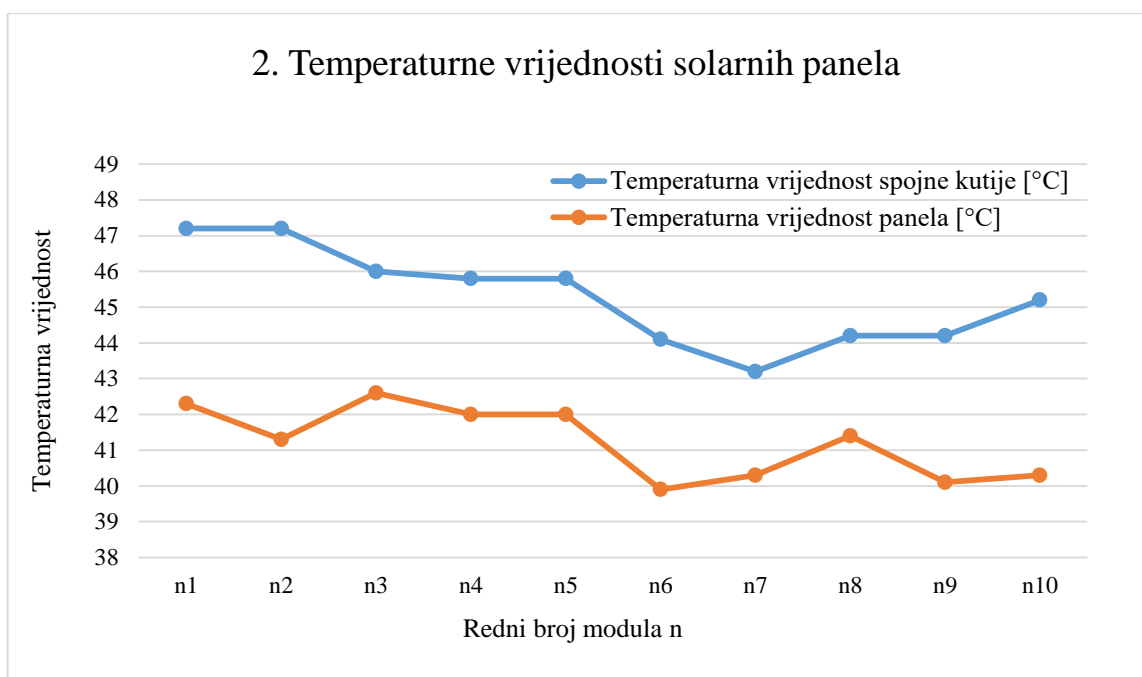
Također napravljena je tablica temperaturnih vrijednosti na spojnoj kutiji i na panelima.



**Tablica 5.2.** Temperaturne vrijednosti spojne kutije i panela grupe 2

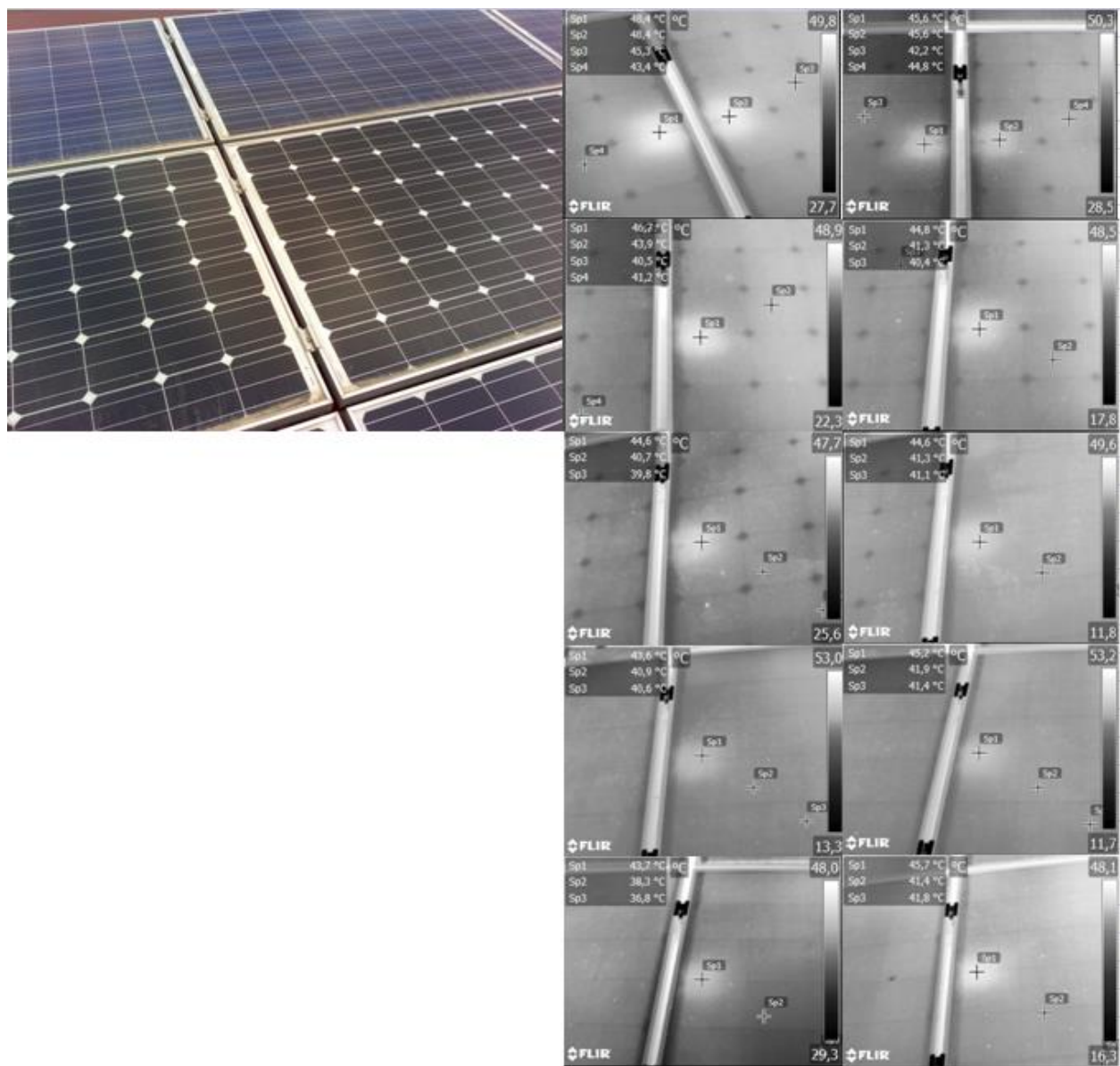
Redni broj modula n	Temperaturna vrijednost spojne kutije [°C]	Temperaturna vrijednost panela [°C]	Temperaturna razlika -delta vrijednost [°C]
n1	47,2	42,3	4,9
n2	47,2	41,3	5,9
n3	46,0	42,6	3,4
n4	45,8	42,0	3,8
n5	45,8	42,0	3,8
n6	44,1	39,9	4,2
n7	43,2	40,3	2,9
n8	44,2	41,4	2,8
n9	44,2	40,1	4,1
n10	45,2	40,3	4,9

Prosjek temperaturne razlike – delta vrijednost je 4,07 °C.



**Slika 5.16.** Temperaturne vrijednosti solarnih panela grupe 2

Idemo na treću skupinu mjerenja. To je mjerenje na udaljenosti većoj od 1 metar od panela. Također je napravljeno 10 mjerenja. U ovoj skupini mjerenja većinom se analizira veći dio ili cijeli panel. Slika 5.17. pokazuje sliku treće grupe.



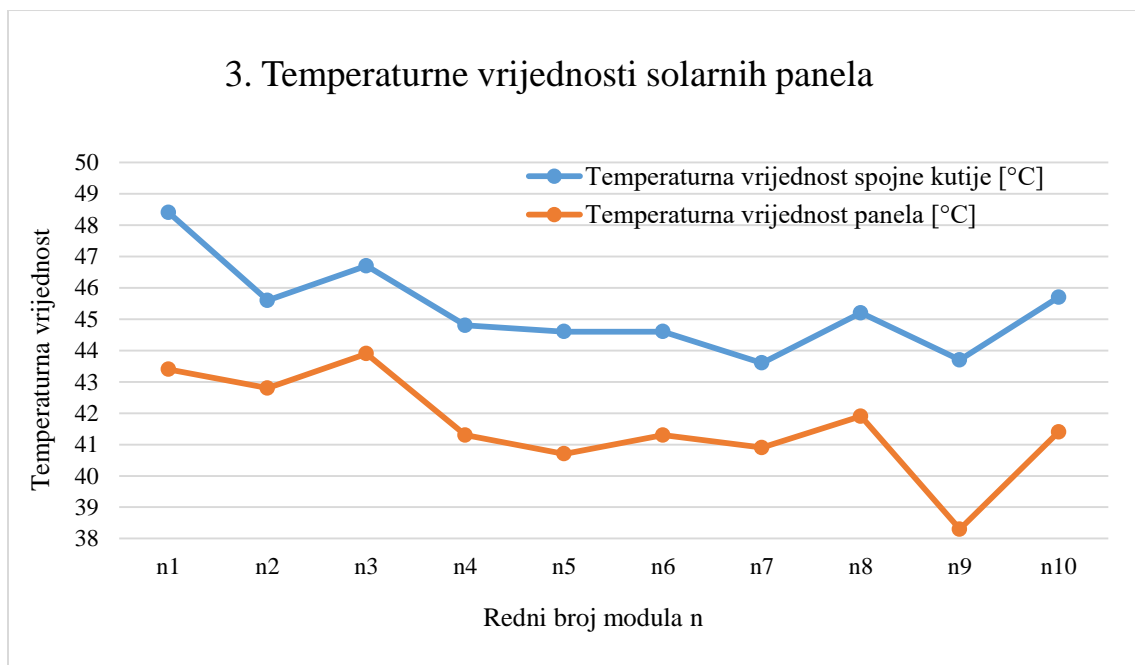
5.17. Infracrveni termografski zapis grupe 3

Tablica vrijednosti grupe 3 pokazuje tablica 5.3.

**Tablica 5.3.** Temperaturne vrijednosti spojne kutije i panela grupe 3

Redni broj modula n	Temperaturna vrijednost spojne kutije [°C]	Temperaturna vrijednost panela [°C]	Temperaturna razlika -delta vrijednost [°C]
n1	48,4	43,4	5,0
n2	45,6	42,8	2,8
n3	46,7	43,9	2,8
n4	44,8	41,3	3,5
n5	44,6	40,7	3,9
n6	44,6	41,3	3,3
n7	43,6	40,9	2,7
n8	45,2	41,9	3,3
n9	43,7	38,3	5,4
n10	45,7	41,4	4,3

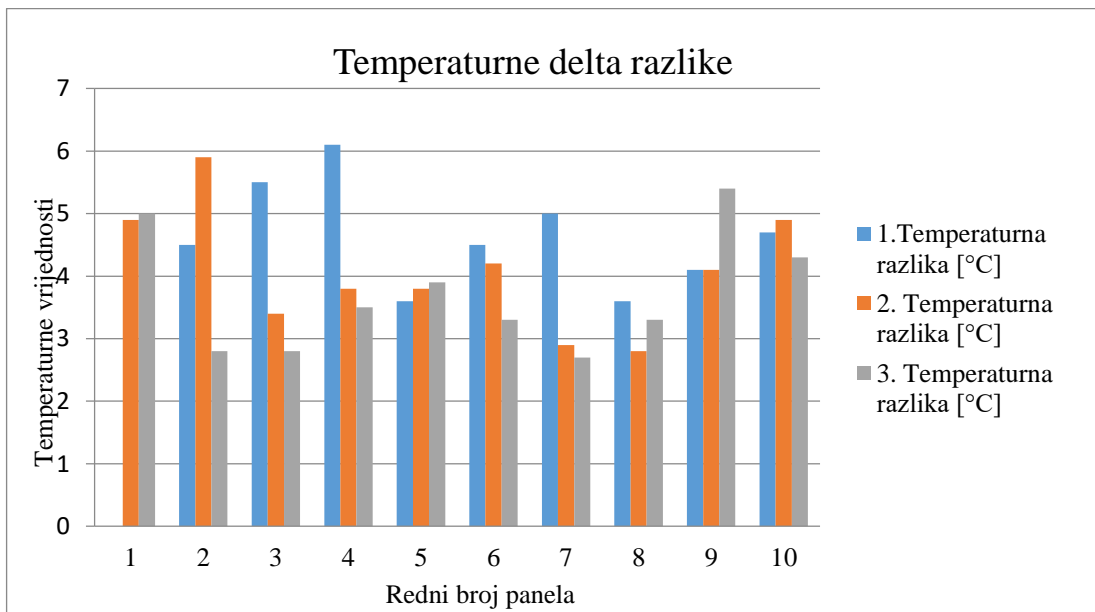
Prosjek temperaturne razlike – delta vrijednosti je 3,7 °C.



**Slika 5.18.** Temperaturne vrijednost solarnih panela grupe 3

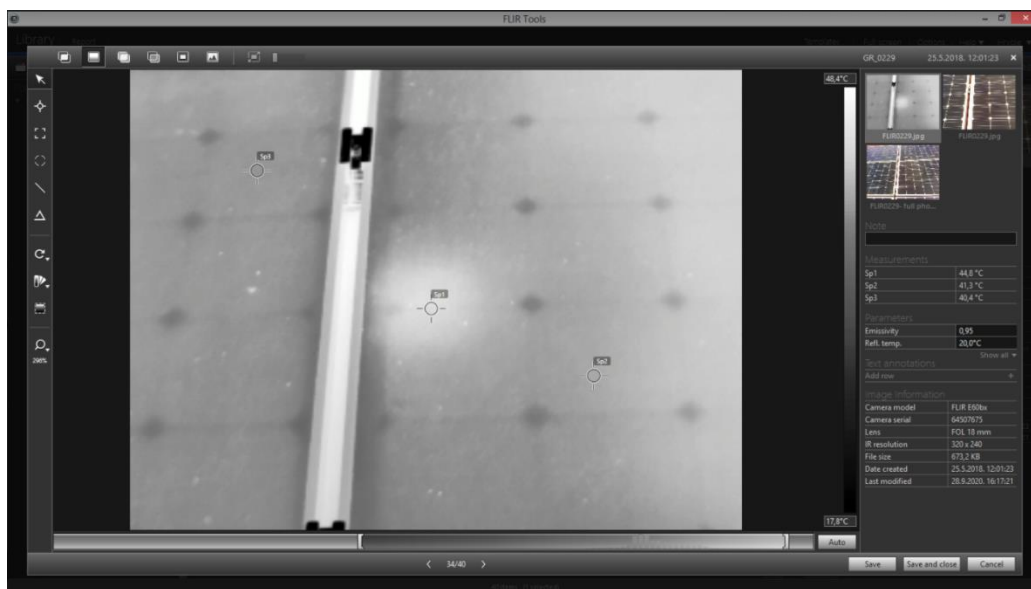
Može se zaključiti kako se sa većom udaljenošću snimanja dobije manja temperaturna razlika. Slika 5.19. pokazuje graf temperaturnih razlika - delta vrijednosti za svaku skupinu. To

zagrijavanje je normalna pojava uslijed povećanog toplinskog otpora. Iz grafa se može vidjeti da niti jedna kutija nije problematična jer u praksi ukoliko je razlika viša od 4 °C na veći dio panela tada je potrebno provjeriti spojnu kutiju da nije došlo do korozije, loših spojeva ili nešto drugo.



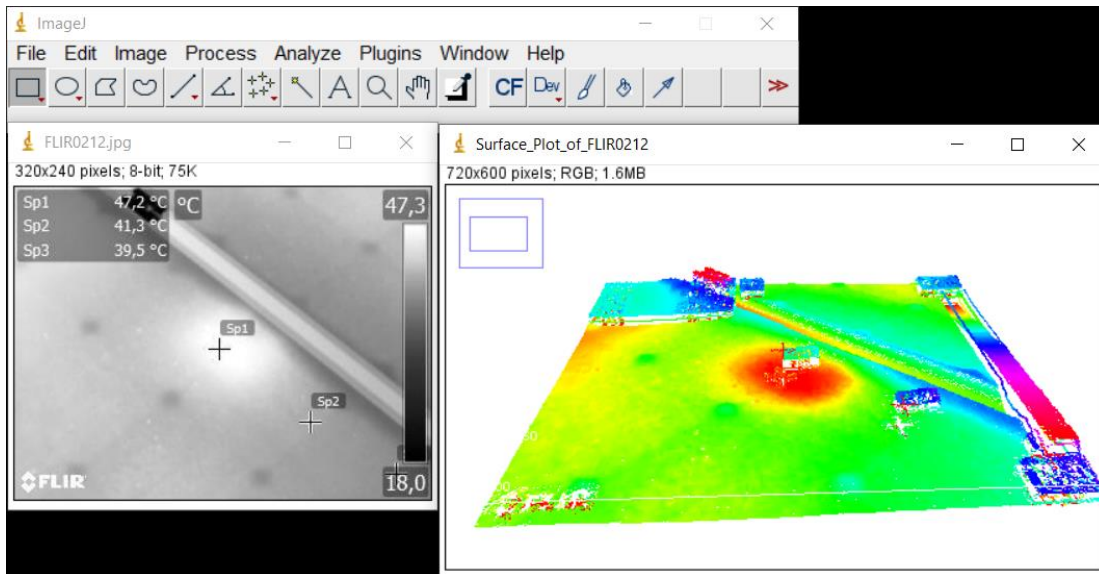
Slika 5.19. Temperaturne delta vrijednosti za svaku analiziranu spojnu kutiju i panel

Pomoću originalnog softvera na slici se mogu odabirati točke koje nas zanimaju te dobiti temperaturne vrijednosti. Slika 5.20. nam pokazuje izgled FLIR softvera.



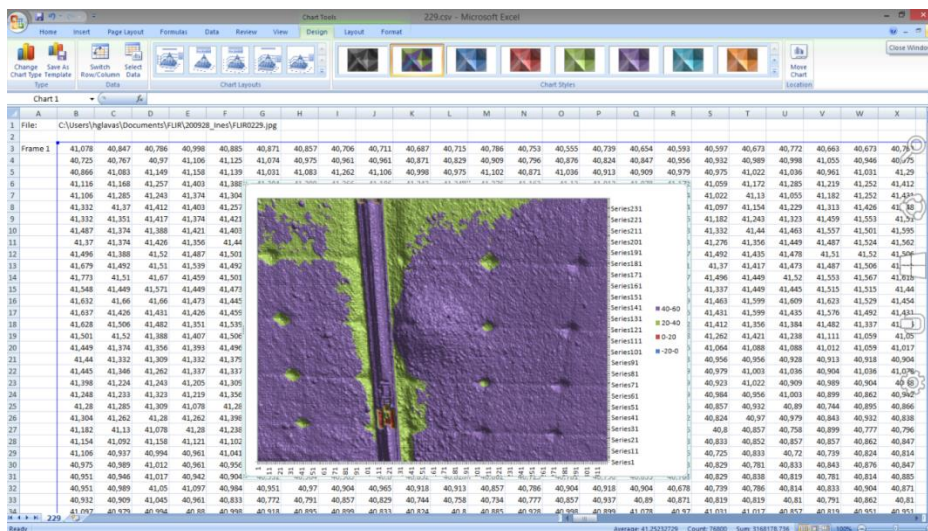
Slika 5.20. Analiza termograma u FLIR programskom sučelju

Termografski zapis u sebi ima numeričke podatke na tri decimale gdje se temperature mogu naknadno analizirati u drugim programskim podrškama. S obzirom da se radi o slici 320x240 pixelsa, to predstavlja veliku količinu podataka. Za znanstvene potrebe istraživanja i razvoja može se koristiti 3D model. Na jednom primjeru je pokazano kako izgleda analiza u softveru ImageJ. Slika 5.21. pokazuje termogram i njegov 3D model.



Slika 5.21. Analiza termograma u programu ImageJ

Također slika se može izvesti u excel dokument sa ekstenzijom .csv za svaki pixel, i dalje se analizirati u bilo kojem softveru. Takav zapis u sebi ima vrijednosti sa tri decimalna iznosa iz kojeg se također može dobiti 3D model koji je vidljiv na slici 5.22.



Slika 5.22. Prikaz mjernih rezultata u Excelu

## 6. ZAKLJUČAK

Infracrvena termografija pokazala se kao koristan alat koji se može primijeniti u različitim područjima ljudskog djelovanja. Prednost korištenja infracrvene termografije je u njezinoj lakoći primjene te mogućnostima koje nam se pružaju u dobivanju traženih rezultata provođenjem različitih ispitivanja. Teorijska podloga rada bazirana je na Plancovom zakonu zračenja crnog tijela. Također je objašnjena emisivnost, fizikalno je objašnjen rad fotonaponskog panela, postupak proizvodnje, te su analizirani paneli u eksploataciji. Nakon toga proveden je i praktičan zadatak mjerenja fotonaponske elektrane na zgradi fakulteta. Kako bi termografska analiza bila uspješna operater mora proći osnovnu edukaciju rada infracrvenom termografskom kamerom i poznavati sustav koji pregledava. Sama provedba ispitivanja pokazala je veliki potencijal korištenja fotonaponskih elektrana te je ujedno ustanovljeno kako je potrebno stalno održavanje i briga radi što boljeg i stabilnijeg funkcioniranja elektrane. Na fotonaponskim panelima uočeni su hotspotovi koja su posljedica zaprljanja. Također hotspotovi spojnih kutija su normalna pojava i na njima je temperaturna razlika otprilike 4 °C što ne predstavlja trajnu ugrozu, ali predstavlja jednu pojavu koju osoba koja provodi mjerenje mora imati na umu. Zagrijavanje zbog utjecaja prašine mora se prepoznati, i panele bi se trebalo oprati kako nebi zbog temperaturnih razlika došlo do prijevremenog starenja panela. Stalno održavanje je potrebno iz razloga što su solarni paneli pod stalnim utjecajem onečišćenja kao npr, ptičji izmet, nakupine prašine i pijeska, atmosferskim nepravilnostima. Također može se reći kako se uz pomoć termografije jednostavnim putem mogu odrediti i lokalizirati kritične točke na panelima. Zaključak je kako loše održavanje solarnih elektrana tj. panela dugoročno gledano može oštetiti materijal i umanjiti kvalitetu rada same fotonaponske elektrane. Iz toga razloga redovito održavanje mora biti uspostavljeno kako bi se omogućio duži vijek trajanja samih panela.

## LITERATURA

- [1] Povijest razvoja termografije, dostupno na: <https://www.nachi.org/history-ir.htm>, pristup ostvaren: 11.siječnja 2020.
- [2] H. Glavaš, T. Barić, M. Stojkov, Zbornik radova, 15. Skup o prirodnom plinu, toplini i vodi. Primjena infracrvene termografije u tehničkim sustavima: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Osijek, 2017
- [3] Hrvoje Glavaš, Marko Vukobratović, Mario Primorac, Daniel Muštran: "Infrared Thermography in Inspection of Photovoltaic Panels", International Conference on Smart Systems and Technologies, SST 2017.
- [4] V. Henč-Burtolić, P. Kulišić, Valovi i optika, Školska knjiga, Zagreb, 2004.
- [5] Generalić, Eni. "Ultraljubičasto svjetlo." *Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar*. 20. listopada 2018. KTF-Split.
- [6] A. Rogalski, Infrared detectors, 2nd ed., CRC Press 2014.
- [7] Temperature dependence of the total, normal emissivity of selected materials, dostupno na: <https://www.slideserve.com/ion/temperature-dependence-of-the-total-normal-emissivity-e-n-of-selected-materials>, pristup ostvaren: 21. rujna 2020.
- [8] Danko Barbara, „Fotonaponski sustavi i sklopovi energetske elektronike za fotonaponske sustave“, Diplomski rad, mentor doc.dr.sc. Tomislav Barić, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2016.
- [9] Ljubomir Majdandžić: „Fotonaponski sustavi“, 2010.
- [10] Ante Perić, „Izvedba upravljačkog sustava hibridnog naponsko-toplinskog sunčanog modula“, Diplomski rad br. 1444, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, veljača 2017.
- [11] Tihomir Pehar, „Smjernice za izradu projektne dokumentacije fotonaponskog sustava spojenog na elektroenergetsku mrežu“, Diplomski rad br. 2295, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009.

- [12] Light deal shop – Solar solution, 17. travanj 2019., dostupno na: <https://lightdealshop.com/blogs/wiki>, pristup ostvaren: 21. rujna 2020.
- [13] Schrack – Osnove o fn ćeliji i modulu, dostupno na: <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/osnove-o-fn-celiji-i-modulu/>, pristup ostvaren 27. Siječnja 2020.
- [14] 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
- [15] Eliosys, Electroluminescence, 1. Prosinac 2011., dostupno na: <http://www.eliosys.eu/?p=481&lang=en>, pristup ostvaren: 21. rujna 2020.
- [16] Sunkauf – Module mit demanation, dostupno na: <https://www.sunkauf.de/module-mit-delamination/>, pristup ostvaren 21. rujna 2020.
- [17] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K.A. Berger, K.Kato, Th. Friesen, Haitao Liu, M. Van Iseghem, „Review on Failures od Photovoltaic Modules“ IEA PVPS Task 13, External final report IEA-PVPS, Ožujak 2014.
- [18] Wohlgemuth, J. H., Hacke, P., Bosco, N., Miller, D. C., Kempe, M. D., & Kurtz, S. R. „. Assessing the causes of encapsulant delamination in PV modules“, IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference, 2016., doi: [10.1109/PVSC.2016.7749589](https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7749589)
- [19] Maoyi Chang, Chienyu Chen, Hsueh, C. H., Hsieh, W. J., Yen, E., Ho, K. L., ... Haomin Chen., „The reliability investigation of PV junction box based on 1GW worldwide field database“ IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, 2015., doi: [10.1109/pvsc.2015.7356130](https://doi.org/10.1109/pvsc.2015.7356130)
- [20] M. Köntges et al., “Assessment of photovoltaic module failures in the field, IEA PVPS Task 13,” Int. Energy Agency Photovoltaic Power Syst. Programme, Ursen, Switzerland, Subtask 3 Report IEA-PVPS T13, 2017.
- [21] Solar Module Quality / Snail Trails, dostupno na: <https://pveducation.com/solar-module-quality/snail-trails/>, pristup ostvaren: 22. rujna 2020.



- [22] F. J. Pern, "Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) encapsulants for photovoltaic modules: Degradation and discoloration mechanisms and formulation modifications for improved photostability", *Angewandte Makromolekulare Chemie* 252(1):195 - 216, ožujak 2003., DOI: 10.1002/apmc.1997.052520114
- [23] Sinovoltaics – Eva Browning, dostupno na: <https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/eva-browning/>, pristup ostvaren: 22. rujna 2020.
- [24] Residencestyle – How to know when your solar panels need repairing, dostupno na: <https://www.residencestyle.com/how-to-know-when-your-solar-panels-need-repairing/>, pristup ostvaren: 22. rujna 2020.
- [25] H. Glavaš, I. Bićanić, E. Desnica, „Infracrvena termografija u održavanju fotonaponske elektrane „ETFOS 1““, Zbornik radova, 17. Skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, Slavonski brod, 2017.

## **SAŽETAK**

Naslov: Infracrvena termografija u održavanju fotonaponske elektrane

Ključne riječi: infracrvena termografija, infracrvena kamera, emisivnost, fotonaponski paneli, održavanje,

U ovom radu detaljnije se ide u ispitivanje rada fotonaponske elektrane. Tijekom pisanja ovog rada navedene su bitne stvari kao što su opće informacije o tome što je to infracrvena termografija i njezine primjene. Nadalje, kroz rad možemo vidjeti koje su to osnove rada samih fotonaponskih elektrana, što su to fotonaponski paneli, od čega su načinjeni, te načini kako se takve elektrane i održavaju. Kao primjer svega navedenog u radu, na kraju rada imamo prikaz provedenog istraživanja koje je praktični primjer na koji način se vrši nadzor solarnih panela, tj. fotonaponske elektrane. U samom radu određene stvari dodatno su objašnjene putem tablica, slika i formula.

## **ABSTRACT**

Title: Infrared thermography in the maintenance of photovoltaic plant

Key words: Infrared Termography, Infrared Thermal Camera, Emissivity, Photovoltaic Panels, Maintenance

Through this paper we will see detailed view of how the photovoltaic plant works. During writing of this paper important things like basic information about infrared thermography and its use are placed and explained. Also, we can see what are the basis of work process of photovoltaic powerplant, what are photovoltaic panels and ways of maintenance of those kind of plants. For real example in this paper at the end we have possibility to see one research which is made as example for how to manage and control photovoltaic panels, photovoltaic plants. In whole paper some of written informations are in detail explained with usage of tables, pictures and formulas.

## ŽIVOTOPIS

Ines Bićanić rođena je 1991. godine u Županji. Školovanje započinje 1998. godine u osnovnoj školi Ivane Brlić Mažuranić u Andrijaševcima. Srednju školu upisuje 2006. godine u Vinkovcima, Tehnička škola Ruđera Boškovića, smjer Tehničar za mehatroniku. Nakon toga 2010. upisuje Elektrotehnički fakultet stručni studij, 2015. godine razlikovnu, a 2017. upisuje diplomski studij. Od 2012. godine zaposlena kao student u Hrvatskom telekomu, a od 2016. godine zaposlena kao stalni djelatnik. U slobodno vrijeme rekreacijski se bavi trčanjem i odlazi na utrke, skuplja poštanske markice i ima zavidnu kolekciju biljaka koju želi još više proširiti.