

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

Sveučilišni studij

**TELOS ANALIZA PRIMJENE DRONA U
ODRŽAVANJU FOTONAPONSKE ELEKTRANE**

Diplomski rad

Andrija Kristić

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. PREGLED POSTOJEĆEG ZNANJA O PRIMJENI DRONA U ODRŽAVANJU FOTONAPONSKE ELEKTRANE..... | 2 |
| 3. TELOS ANALIZA PRIMJENE DRONA U ODRŽAVANJU FOTONAPONSKE ELEKTRANE..... | 4 |
| 3.1. Tehnološka izvedivost..... | 4 |
| 3.1.1. Bepilotni zrakoplov - dron..... | 5 |
| 3.1.2. Infracrvena termografija i termografske kamere..... | 7 |
| 3.1.3. Osnove FN sustava..... | 11 |
| 3.1.4. Defekti na fotonaponskim modulima..... | 15 |
| 3.2. Ekonomska izvedivost..... | 22 |
| 3.2.1. Razdoblje povrata investicije..... | 24 |
| 3.2.2. Novčani tok..... | 26 |
| 3.2.3. Neto sadašnja vrijednost..... | 27 |
| 3.2.4. Interna stopa povrata..... | 27 |
| 3.2.5. Povrat ulaganja..... | 28 |
| 3.2.6. SWOT analiza..... | 28 |
| 3.3. Pravna izvedivost..... | 29 |
| 3.4. Operativna izvedivost..... | 33 |
| 3.4.1. Određivanje visine leta..... | 33 |
| 3.4.2. Izvođenje inspekcije..... | 36 |
| 3.4.3. Alternativne metode inspekcija FN elektrane..... | 38 |
| 3.5. Izvedivost rasporeda..... | 41 |
| 4. PREGLED SNIMKE MALE FOTONAPONSKE ELEKTRANE DRONOM KROZ SEGMENTE TELOS ANALIZE..... | 42 |
| 4.1. Tehnološka izvedivost..... | 43 |
| 4.2. Ekonomska izvedivost..... | 44 |
| 4.3. Pravna izvedivost..... | 44 |
| 4.4. Operativna izvedivost..... | 44 |
| 4.5. Izvedivost rasporeda..... | 45 |

| | |
|--|----|
| 4.6. Primjer korištenja radiometrijske kamere..... | 45 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 47 |
| LITERATURA..... | 48 |
| SAŽETAK..... | 54 |
| ABSTRACT | 54 |
| ŽIVOTOPIS..... | 55 |

1. UVOD

U svijetu postoji rastući trend proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora posljednjih nekoliko desetljeća, što dovodi do nastanka sve većeg broja fotonaponskih sustava. Kako bi se osiguralo njihovo učinkovito funkcioniranje, moraju se redovito pregledavati i održavati.

Jedan od glavnih faktora za smanjenje troškova fotonaponski sustava je poboljšanje životnog vijeka fotonaponskih modula. Stoga su potrebe metode mjerenja i nadzora za identifikaciju nedostataka fotonaponskih modula na otvorenom [1], [2]. Nadalje, brzo otkrivanje nedostataka fotonaponskih modula može jamčiti produljenje trajanja i učinkovitosti fotonaponskog sustava [2].

Tradicionalne metode inspekcija, poput električnih ispitivanja, su dugotrajne i skupe te se stalno razvijaju nove. Jedna od novih obećavajućih metoda je inspekcija korištenjem bespilotnih zrakoplova (dronova) s termografskim kamerama.

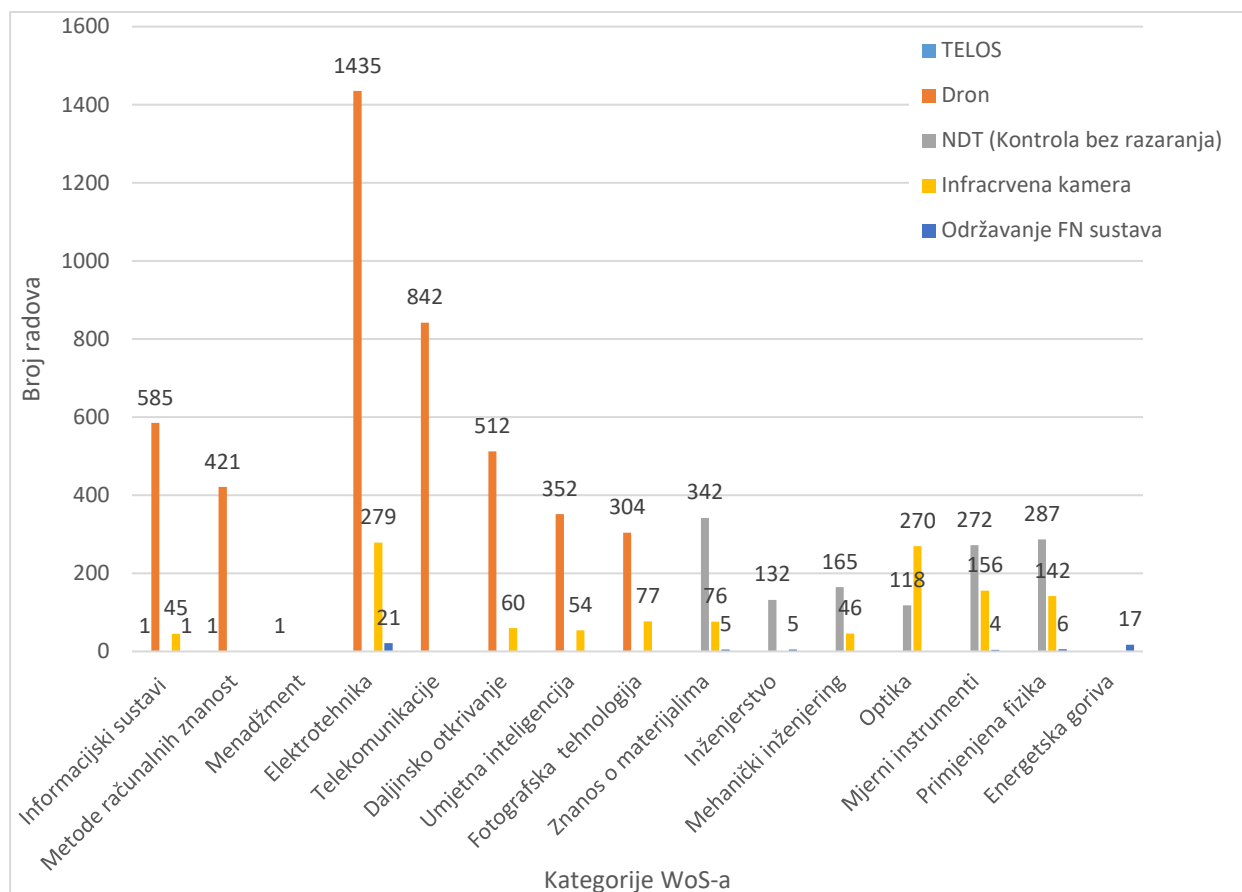
Tradicionalno je vizualni i termografski nadzor fotonaponskih sustava bio ovisan o ljudskim mogućnostima, a veći dio vremena bio pogođen greškama u provođenju zbog repetitivnosti posla koja utječe na pažnju provoditelja inspekcije. Generalno, takve inspekcije zahtijevaju dugo vremena za provođenje. S druge strane sustavi bespilotnih zrakoplova mogu otkriti defekte na modulima za manje vremena, zbog velike površine koju pokrivaju kamerama, lake težine, velike fleksibilnosti i brzine [3].

Iako postoji više različitih načina da se provjeri izvedivost nekog projekta, TELOS analiza je jedan od najboljih, jer na zadani projekt gleda iz više različitih perspektiva [4]. Korištenje dronova u svrhu održavanja fotonaponskih elektrana bit će prikazano kroz pet segmenata TELOS analize.

U drugom poglavlju ovoga rada navedeni su i opisani znanstveni i praktični dosezi vezani za područje rada. U trećem poglavlju napravljena je TELOS analiza primjene dronova u održavanju fotonaponskih elektrana na opremi koja je korištena za takav oblik inspekcija diljem svijeta, a što je vidljivo iz literature [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Svaki segment TELOS analize je odgovarajuće obrađen te je donesen zaključak o najboljem praktičnom rješenju. U četvrtom poglavlju napravljen je pregled snimke male fotonaponske elektrane kroz segmente TELOS analize i dodatno obrađen primjer iz termografske inspekcije FNE FERIT 1[5].

2. PREGLED POSTOJEĆEG ZNANJA O PRIMJENI DRONA U ODRŽAVANJU FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Web of Science (WoS) je platforma putem koje su dostupne citatne baze koje pokrivaju sva područja znanost. Baza WoS-a je pretražena po ključnim riječima ovog rada (na engleskom jeziku). Na slici 2.1. prikazan je broj radova po kategorijama WoS-a bliskih za područje ovog rada.



Sl. 2.1. Broj radova po kategorijama WoS-a pretraženih po ključnim riječima vezanim za temu rada.

Pretraživanje baze po ključnoj riječi „TELOS“ dalo je samo jedan rezultat što dodatno opravdava obrađivanje primjene drona za održavanje fotonaponske elektrane kroz TELOS analizu.

Svi autori u literaturi [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] opisuju korištenje dronova s termografskim kamerama u svrhu održavanja fotonaponskih elektrana.

Autor [6] je usredotočen na projektiranje i predispitivanje automatiziranog, integriranog i pametnog sustava, za pregled malih i velikih fotonaponskih postrojenja, tijekom njegova operativnog razdoblja.

Autor [7] zagovara korištenje dronova za termografske inspekcije fotonaponskih elektrana na krovovima kao teško pristupačnim lokacijama. Iznosi stajalište kako se neke termalne anomalije

možu otkloniti čišćenjem modula i donosi zaključak da je godišnja izlazna snaga fotonaponskog sustava za 4% veća nakon čišćenja.

Autor [8] vrši nadzor 2 velike fotonaponske elektrane. Izvodi više automatskih i manualnih pregleda dronom. Zaključuje kako je riječ o brzom metodi inspekcije pogodnoj za velike elektrane. Daje prijedloge kako sistematizirati inspekciju.

Autor [9] prikazuje i istražene različite tehnike naprednog pregleda fotonaponskih instalacija, temeljene na triangulaciji iz zraka i zemaljskom georeferenciranju termografskih/vizualnih snimaka, u smislu primjenjivosti i dijagnostičke učinkovitosti.

Autor [10] pristupa inspekcijama kroz metodu računalnog vida. Taj pristup integrira geografske informacije prikupljene iz globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS) s rezultatima algoritama računalnog vida. Svakom modulu dodjeljuje identifikator koji ostaje isti tijekom različitih sesija leta.

Autor [11] iznosi prednosti korištenja kvalitetne termografske kamere s brojnim programskim opcijama.

Autor [12] izražava zabrinutost oko korištenja termografskih kamera u održavanju fotonaponskih elektrana jer smatra da se tako mogu saznati samo okvirne informacije o stanju istih. Ipak navodi kako takva vrsta nadzora može brzo detektirati najgore oblike defekata. Iznosi zaključke kako treba zamijeniti module koji: imaju žarišta s temperaturom većom od 20°C u usporedbi s ostatkom modula, imaju 3 ili više žarišta temperature manje od 20°C, imaju kompletan red članaka promijenjene temperature (dovoljno zamijeniti premosnu diodu).

Autor [13] korištenjem vizualnih i termografskih snimaka generira preciznu ortografsku mapu i podatke za modeliranje 3D terena. Dijagnoza kvarova fotonaponskog modula provedena je ocjenjivanjem komponente fluktuacije temperature, dobivene oduzimanjem prosječne temperature sa temperaturom svakog članka, kako bi se uočili uobičajeni moduli i neispravni ili defektivni moduli.

Autor [14] koristi program QFly za provedbu inspekcije. Program pruža informacije o geometrijskim, ali i vizualnim i toplinskim svojstvima fotonaponskih elektrana prikupljanjem slika iz zraka. Autor navodi probleme prilikom sinkronizacije vizualnih i termografskih slika.

Nitko od navedenih autora nije proveo analizu primjene dronova u održavanju fotonaponske elektrane iz više segmenata, nego gotovo uvijek isključivo s tehničkog stajališta.

3. TELOS ANALIZA PRIMJENE DRONA U ODRŽAVANJU FOTONAPONSKE ELEKTRANE

TELOS analiza je studija izvedivosti. Njenim provođenjem pregledava se pet parametara izvedivosti te procjenjuje treba li prihvatiti ili odbaciti predloženi projekt. Sam naziv TELOS je akronim engleskih riječi *Technology, Economic, Legal, Operational, Schedule*. TELOS analiza obuhvaća:

- Tehnološku izvedivost - opisuje je li dani projekt tehnički izvediv,
- Ekonomsku izvedivost - dokaz da određeni projekt zadovoljava ekonomsku profitabilnost,
- Pravnu izvedivost - dokaz da je projekt usklađen s pravnim okvirom,
- Operativnu izvedivost - pokazuje koliko je projekt dobro prilagođen potrebama zadatka,
- Izvedivost rasporeda - označava je li projekt je izvediv u zadanom roku.

Na slici 3.1. prikazana je ilustracija zadatka rada.



Sl. 3.1. Ilustracija TELOS analize primjene dronova u održavanju fotonaponskih elektrana.

Iako se TELOS analiza sastoji od 5 segmenata, neispunjavanje tehnološke, ekonomske i pravne izvedivosti automatski diskvalificira studijski projekt. Ako projekt ispunjava samo TEL segmente, projekt se već može izvesti [4].

3.1. Tehnološka izvedivost

U ovom potpoglavlju napravljen je pregled svih navedenih tehnologija u zadatku rada. To su prije svega bespilotni zrakoplovi - dronovi, a zatim infracrvene odnosno termografske kamere. Naposljetku su objašnjeni fotonaponski (u daljnjem tekstu FN) sustavi te prikazani i kategorizirani defekti na FN modulima, za čiju detekciju se mogu koristiti navedene tehnologije.

3.1.1. Беспилотни зракoплов - дрон

Dron je vrsta беспилотног зракoплова који може летјети полу или потпуно аутономно. Не постоји стандардни поступак за класификацију дронова. Најчешће се класифицирају по величини и типу. По величини се дијеле на јако мале, мале (микро или мини), средње и велике дрoнове [15], а према типу се дијеле на системе с фиксним крилима или вишероторске системе. Још један начин подјеле је према домету и издржљивости.

Међу широким спектром различитих беспилотних зракoплова, вишероторски системи (системи с више од 2 ротора) су најпримјеренији за термографске инспекције. Иако имају краће вријеме летења због веће потрошње, они су најстабилнији и лаки за контролирање.

Ротокoптер је врста зракoплова који користи ротирајућа крила за подизање. Мултикoптери су обично класифицирају према броју мотора које имају, попут трикoптера, квадкoптера, хексакoптера и октокoптера, са 3, 4, 6 и 8 мотора. Одабир мултикoптера, у смислу броја ротора, диктираће рад који дрон може обавити. Тај одабир утјеће и на висину летења (што у велико смањује вријеме потребно за инспекцију), сигурност при слијетању и стабилност приликом лета. Примјер мултикoптера дан је на слици 3.2.

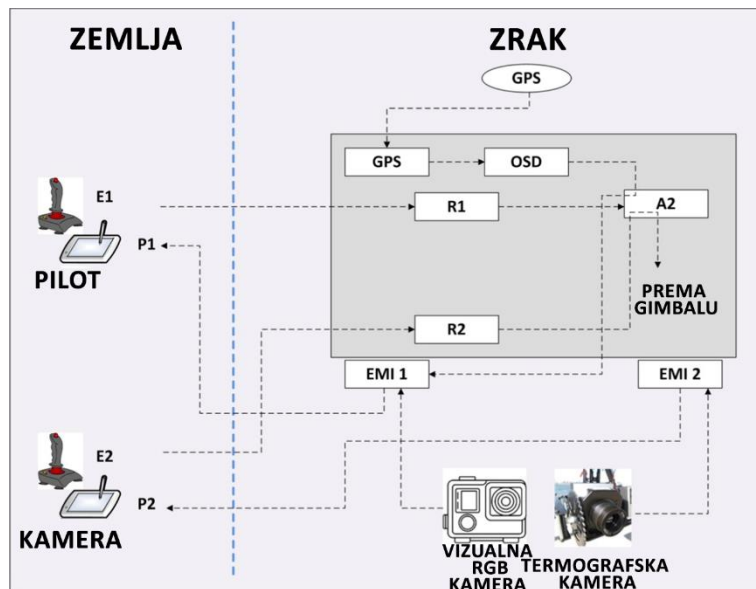


Sl. 3.2. Квадкoптер DJI Inspire 2 [16].

Најпопуларнији мултикoптери на тржишту су квадкoптери [17] јер имају више снаге од трикoптера, што омогућава обављање више рада без превеликог повећања производних трошкова, те су изузетно управљиви. Квадкoптери нису јаки као хексакoптери или октокoптери који могу преносити теже и сложене камере, друге додатке и сензоре с већом брзином и висином. Хексакoптери су сигурнији од квадкoптера јер могу сигурно слетјети у случају оштећеног или мртвог мотора, док октокoптери могу сигурно слетјети и у случају да изгубе два или три мотора. С повећањем броја мотора и пропелера

povećava se stabilnost i kontrola zrakoplova te je manji utjecaj vjetrova i kiše, ali isto tako se povećava i cijena te smanjuje trajanje baterije.

Blok dijagram različitih komponenti drona za inspekciju i njihova međusobna povezanost prikazana je na sljedećoj slici 3.3.



Sl. 3.3. Blok dijagram veza između različitih komponenti drona opremljenog vizualnom i termografskom kamerom [17].

Počevši sa zemlje odnosno tla, pilot najčešće ima 2 daljinska upravljača (E1 i E2) i 2 ekrana (P1 i P2). P1 prima i prikazuje signal s vizualne kamere i s telemetrijskog sustava (OSD). E1 kontrolira dronovo kretanje i šalje signal prijemniku R1. Drugi ekran P2 prima i prikazuje signale s pomoćnog senzora koji je u ovom slučaju termografska kamera, a E2 upravlja gimbalom što omogućuje pilotu ili operatoru fokusiranje ili pozicioniranje kamere slanjem signala na prijemnik R2.

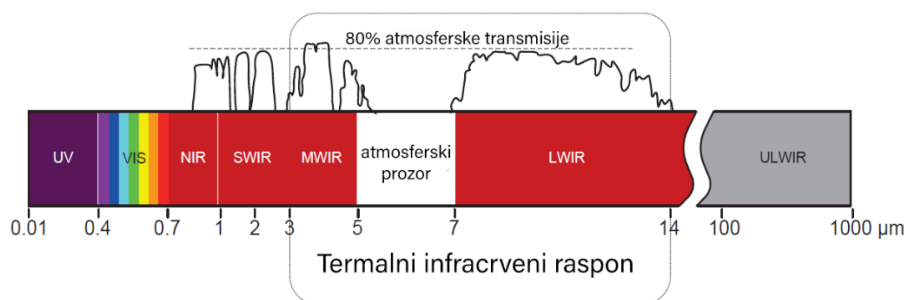
U zraku je dron opremljen s brojnim komponentama s različitim funkcijama. GPS se sastoji od antenske jedinice, koja prima satelitske signale, i unutarnje jedinice, koja šalje telemetrijske podatke (poput visine letenja i brzine), sustavu telemetrije OSD. Kontroler A2 prima sve signale iz R1, R2 i OSD-a, upravlja dronom i gimbalom i šalje telemetrijske signale transponderu EMI 1 i gimbalu. Prijemnici su spojeni na kontroler. R1 prima signale iz E1 za kontrolu drona dok R2 prima signale iz E2 za kontrolu gimbala. Gimbal je stabilizator slike kamere koji minimalizira utjecaj neželjenog pomicanja drona na snimke. U sustavu su 2 transpondera. Prvi transponder, EMI 1, prima signal iz kontrolera A2, telemetrijske jedinice (OSD) i vizualne kamere, te ih šalje na ekran P1. S ovom informacijom pilot zna gdje je dron u svakom trenutku jer ima vizualni prikaz i telemetrijske podatke. Drugi transponder, EMI 2, prima signal iz termografske kamere i šalje ih na

ekran P2 tako da pilot može vidjeti termografsku sliku. Vizualna i termografska kamera šalju signale na EMI 1 i EMI 2.

Jedan od ključnih aspekata zračnih inspekcija je trajanje baterija i vrijeme leta. Što baterije duže traju to je učinkovitost inspekcije bolja. Dronovi s litij-polimernom (Li-Po) baterijom mogu letjeti otprilike 10 – 40 minuta, što usporava inspekciju jer se baterije moraju puniti nekoliko puta [18]. Ova vrsta baterije ima visoku gustoću energije i može izdržati velika strujna opterećenja ali je teška. Raspon kapaciteta baterija u miliamper-satima iznosi od 350 mAh za dronove igračke, 2000 – 3000 mAh za trkaće dronove, 4500 – 6000 mAh za veće multirotore, do 20 000 mAh za multirotore visokog kapaciteta. U dronove se sve više ugrađuju grafenske baterije koje nude veću gustoću energije i smanjenje vremena punjenja (pune se kroz 5 minuta) te manju težinu i volumen (20-30% manju od litijske baterije) [17].

3.1.2. Infracrvena termografija i termografske kamere

Infracrvena termografija je metoda kojom se detektira distribucija topline na proučavanom mjestu. Ovom metodom mjere se karakteristike toplinskog zračenja kako bi se odredila područja ili točke s višom ili nižom razinom emisivnosti, odnosno područja koja mogu ukazivati na postojanje kvara. Sva tijela temperature više od apsolutne nule (-273°C) emitiraju infracrveno zračenje bazirano na Planckovom zakonu zračenja crnog tijela, koje ljudi ne mogu vidjeti golim okom. Valna duljina infracrvenog zračenja je između $0,7\ \mu\text{m}$ i $1000\ \mu\text{m}$. Termografske kamere rade u užem rasponu osjetljivosti, približno od $3\ \mu\text{m}$ do $14\ \mu\text{m}$, koji se još naziva termalni infracrveni raspon prikazan na slici 3.4. On obuhvaća najtipičnije temperature na Zemlji koje su otprilike između -20°C do $+350^{\circ}\text{C}$ [17].



Sl. 3.4. Infracrvena područja u elektromagnetskom spektru [19].

Optičke leće termografske kamere konvergiraju infracrvenu energiju koja dolazi iz objekta u detektor zračenja. Ovaj detektor šalje informacije elektroničkom senzoru koji obrađuje sliku te se na kraju slika prikazuje na ekranu zajedno s temperaturom. Postoje dvije vrste detektora. Termalni detektori bazirani na zagrijavanju infracrvenim zračenjem i fotonski (ili kvantni) detektori, gdje

infracrveno zračenje reagira s materijalom detektora na atomskoj razini stvarajući napon ili strujni otpor.

Glavna prednost termografskog pregleda je ta što nema doticaja između instrumenta i mjernog objekta, čime se izbjegava efekt toplinskog otpora dodira, a sama metoda je NDT (engl. *Non-Destructive Testing* – kontrola bez razaranja).

Jedna od najvažnijih karakteristika koja diferencira termografske kamere je rezolucija detektora. Ova rezolucija je izražena kao broj horizontalnih piksela u detektoru pomnožena s brojem vertikalnih. Viša rezolucija dopušta detekciju manjih objekata s većih udaljenosti s jasnijim i preciznijim slikama. Ako ova rezolucija nije dovoljno visoka, visina letenja morati će biti niža, što će usporiti proces inspekcije jer će površina pregleda biti znatno smanjena. Raspon rezolucije termalnih kamera varira od rezolucije manje od 80×60 piksela (4,8 kpiksela) do 640×512 piksela (0,327 Mpiksela), zavisno od veličine senzora. Kako bi se dobili zadovoljavajući profesionalni rezultati detektor bi trebao imati najmanje 320×240 piksela (rezolucija LCD ekrana je puno viša).

Termografske kamere se također razlikuju po termalnoj osjetljivosti – NETD, (engl. *Noise-Equivalent Temperature Difference*), koja predstavlja minimalnu temperaturnu razliku koju termografska kamera može izmjeriti u prisustvu šuma elektroničkih krugova. Niska termalna osjetljivost dopušta precizniju detekciju termalnog kontrasta. Profesionalne termografske kamere nude termalnu osjetljivost manju od 50 mK.

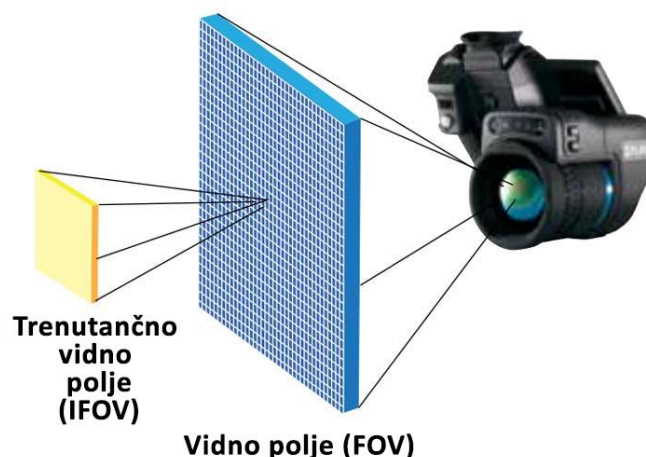
Točnost mjerenja je također bitna značajka. Ovaj atribut predstavlja razliku u izmjerenoj temperaturi, koju je detektirala kamera, i stvarnoj temperaturi. Najbolji svjetski proizvođači termografskih kamera nude točnost od $\pm 2\%$. Korisnik termografske kamere također mora prepoznati i izračunati karakteristike mjernog objekta kako bi razumio njegov utjecaj na mjerenje. Najveći uzrok mjerne pogreške je postavljanje pogrešne vrijednosti emisivnosti [20]. Stoga većina termografskih kamera sadrži opciju dodavanja i podešavanja emisivnosti i refleksije. Te vrijednosti se računaju uz pomoć tablica ili kalibriranjem očitavanja termografske kamere pomoću kontaktnog termometra [21].

Točnost mjerenja i termalna osjetljivost kamere uveliko ovise o tipu infracrvenog detektora, tj. je li on hlađen ili ne. U nehlađenim termografskim kamerama senzor radi na okolišnoj temperaturi dok su hlađeni detektori u vakuumski zatvorenom kućištu, gdje se kriogenički hlade, što sprječava detektor da utječe na izmjerene temperature. Termalna osjetljivost nehlađenih kamera je oko 0,05 K dok kod hlađenih ona iznosi 0,01 K [22]. Za zračnu termografiju većinom se koriste kamere s

nehlađenim detektorima. Višestruko su jeftinije od hlađenih i rad s njima je brži jer se ne moraju hladiti na radnu temperaturu.

Prilikom odabira termografske kamere za dron u održavanju fotonaponske elektrane bitna je stavka težina kamere. Što je kamera teža, životni vijek dronove baterije će se brže smanjivati te će biti potrebno mijenjati baterije češće, što smanjuje dnevne stope nadzora. Stoga kamere predviđene za dronove imaju do 400 g, dok ručne imaju od 500 g do 1000 g. Težina kamere ovisi uveliko o lećama koje se koriste.

Odabir odgovarajućih leća za kameru povećava efikasnost leta. Leće zajedno sa visinom letenja i senzorom određuju veličinu vidnog polja kamere, FOV (engl. *Field of View*). Veličina vidnog polja može se definirati kao najveća površina obuhvaćena slikom na određenoj udaljenosti. FOV je obično definiran s tri kuta: vodoravnim, vertikalnim i dijagonalnim. Trenutačno vidno polje, IFOV (engl. *Instantaneous Field of View*) ili prostorna rezolucija predstavlja najmanje detalje unutar FOV-a koji mogu biti detektirani ili viđeni na zadanoj udaljenosti. Vidno polje i trenutačno vidno polje prikazani su na slici 3.5.



Sl. 3.5. Trenutačno vidno polje (IFOV) i vidno polje (FOV) [23].

Trenutačno polje mjerenja, IFOV mjernog elementa ili rezolucija mjerenja, uspostavlja najmanju mjerljivu površinu s koje se može očitati točna temperatura sa zadane udaljenosti. IFOV mjernog elementa je tri do pet puta veći od IFOV-a, jer da bi se dobilo točno mjerenje, najmanji predmet koji se treba analizirati mora biti tri do pet puta veći od najmanjeg detalja koji se može detektirati (IFOV).

Kamere trenutno imaju mnoštvo različitih leća koje nude širok raspon FOV kutova. Neke od leća su: tzv. riblje oko, snimaju kutove do 180°; širokokutne, između 100° i 60°; standardne, između 50° i 25°; telefoto, između 15° i 10°; super-telefoto, između 8° i 1°.

Infracrvene leće se proizvode od materijala koji prenose infracrveno zračenje, najčešće germanija. Germanij ima odlične mehaničke karakteristike i izdržljivost, zbog svoje tvrdoće.

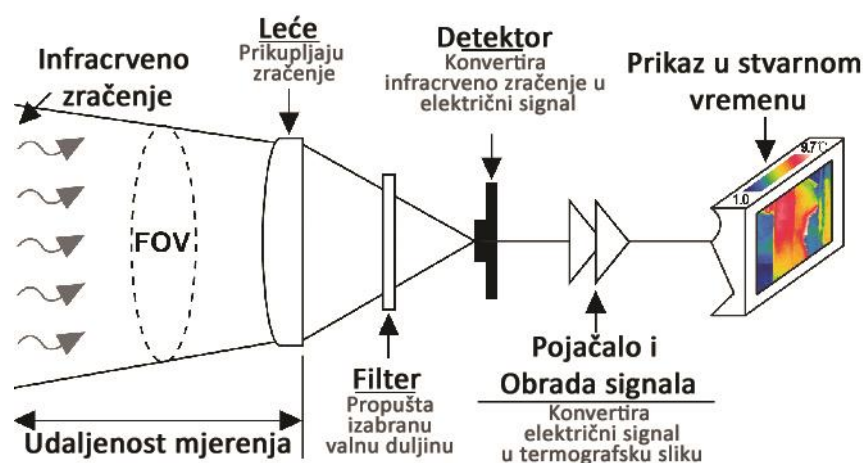
Zavisno od načina inspekcije fotonaponske elektrane, može se vršiti i odabir između radiometrijske i neradiometrijske kamere. Neradiometrijske kamere daju sliku na kojoj su temperaturne razlike prikazane različitim bojama, ali ne pružaju informaciju kolika je temperatura na svakoj željenoj točki. Većina današnjih kamera ima radiometrijske mogućnosti.

Kvaliteta programskog paketa kamere za obradu, proučavanje i format slike od velikog je značaja. Programski paket je jedan od faktora kojeg proizvođači termografskih kamera stalno poboljšavaju nudeći algoritme s većom funkcionalnošću. Programski paket za naknadnu obradu (engl. *post-processing*) obuhvaća: široku paletu olakšica za interpretaciju slike, mogućnost kombiniranja slika u panoramsku sliku ili kombiniranje termografske slike sa pripadajućom slikom vidljive svjetlosti (slika u slici), različite opcije analize temperature (točke, površine, razlike, itd.) te mogućnost izrade izvješća s termografskim slikama uz mnoge druge funkcije.

Još jedan od bitnih parametara kamere, pogotovo u zračnoj termografiji, gdje je kamera u pokretu ili „hvata“ pokretne objekte, je broj sličica po sekundi (engl. *frame rate*). On najčešće iznosi 50 Hz.

Zadnji parametar koji treba uzeti u obzir kod termografskih kamera je temperaturni raspon. On se definira kao najveća i najmanja vrijednost temperature koju kamera može izmjeriti. Tipične vrijednosti su između -20°C do $+500^{\circ}\text{C}$, a mogu se proširiti i do 1700°C korištenjem različitih filtera .

Na slici 3.6. dan je grubi shematski prikaz rada termografske kamere.



Sl. 3.6. Shematski prikaz rada termografske kamere [24].

U tablici 3.1. prikazane su termografske kamere i dronovi korišteni u svrhu zračne termografije u analiziranoj literaturi.

Tablica 3.1. Popis termalnih kamera i dronova korištenih u analiziranoj literaturi.

| <i>Reference</i> | <i>Termografske kamere</i> | <i>Dronovi</i> |
|---|------------------------------------|-----------------------------|
| „Innovative Automated Control System for PV Fields Inspection and Remote Control“ [6] | Flir A35 | NimbusPPL-610 |
| „Infrared (IR) Drone for Quick and Cheap PV Inspection“ [7] | Optris PI Lightweight PI400 | DJI S1000 |
| „About infrared scanning of photovoltaic solar plant“ [8] | Flir Tau 2 | Walkera QR-X800 |
| „Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery“ [9] | Optris PI450 | Condor AY 704 |
| „A UAV infrared measurement approach for defect detection in photovoltaic plants“ [10] | Flir Tau 2 | DJI Matrice 100 |
| „Thermo diagnosis of photovoltaic power plants“ [11] | Worskswell Wiris | DJI S900 |
| „Monitoring of Defects of a Photovoltaic Power Plant Using a Drone“ [12] | Flir A65 | <i>Nije specificirano</i> |
| „Developing Inspection Methodology of Solar Energy Plants by Thermal Infrared Sensor on Board Unmanned Aerial Vehicles“ [13] | Flir Vue pro | DJI Inspire 2 |
| „Feasibility study on the automatic detection of faults in photovoltaic plants with unmanned aerial vehicles using low resolution thermographic cameras“ [14] | DJI Mavic 2 Enterprise Dual camera | DJI Mavic 2 Enterprise Dual |

3.1.3. Osnove FN sustava

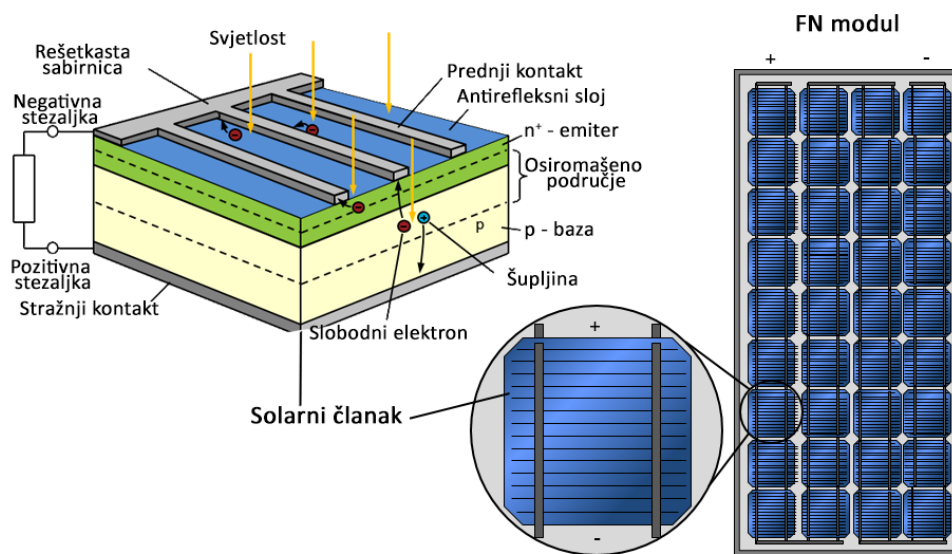
Fizikalnu osnovu fotonaponske pretvorbe čini fotoelektrični efekt. Fotoelektrični efekt je pojava apsorpcije svjetla, odnosno fotona, koja rezultira pobudom elektrona na viši energetska razinu.

$$E = h \cdot \nu \quad (3.1.)$$

Energija fotona je prikazana u formuli (3.1.) gdje je h Planckova konstanta koja iznosi $6,625 \cdot 10^{-34}$ Js, a ν frekvencija fotona (frekvencija je obrnuto proporcionalna valnoj duljini).

Razlika između fotoelektričnog efekta i fotonaponskog efekta je u tome što u prvom slučaju pobuđeni elektron iskače iz materijala dok se u drugom zadržava u materijalu.

Srž svakog FN sustava čini solarni članak (sl. 3.7.) čija je glavna gradivna komponenta poluvodički materijal. Većinom je to silicij. Ta tehnologija je baza za 90% solarnih članaka koji se koriste.



Sl. 3.7. Solarni članak i FN moduli su osnovne komponente fotonaponskog sustava [25].

Uvođenjem stranih atoma (dopiranje) u poluvodič, generira se p-n spoj u članku što stvara električno polje u kristalnoj strukturi. Fotonaponska pretvorba u članku prikazana je na slici 3.7. Na dnu članka je p-baza, a na vrhu n⁺-emiter. Ako svjetlost padne na solarne članke, svaki apsorbirani foton stvara elektron-šupljina par. Elektroni i šupljine napuštaju osiromašeno područje i miču se prema kontaktima: šupljine kroz bazu na stražnji kontakt, a elektroni kroz emiter na prednji kontakt. Rezultat na kontaktima članka je stvaranje napona od približno 0,5 V. Nastala struja varira zavisno od ozračenosti površine članka i iznosi između 0 i 10 A. Kako bi se postigao korisni napon u području od 20 do 50 V, više članaka je povezano u seriju te zajedno čine FN modul (slika 3.7.) [25]. Osim toga, solarni članci su zatvoreni u modul za zaštitu od mehaničkih i okolinskih utjecaja. Brtvljenje se obično sastoji od staklene prednje ploče s vrlo niskom apsorpcijom u odgovarajućem spektralnom rasponu između 380 i 1100 nm. Još jedna važna komponenta je prenosna dioda. Spojena je paralelno sa solarnim člancima kako bi pružila put struji u slučaju da članak ili modul postane defektivan.

Operatoru FN energetskeg sustava od posebne su važnosti dvije karakteristične vrijednosti. To su maksimalna izlazna snaga sustava i količina energije koja se može ubaciti u mrežu tijekom godine.

Snaga FN modula mjeri se prema standardnim testnim uvjetima (engl. *Standard Test Conditions* – *STC*) i definira trima uvjetima:

1. Puno sunčevo zračenje (sunčevo zračenje $G = G_{STC} = 1000 \text{ Wm}^{-2}$)
2. Temperatura FN modula: $\vartheta_{Modula} = 25^\circ\text{C}$
3. Standardni svjetlosni spektar AM 1,5

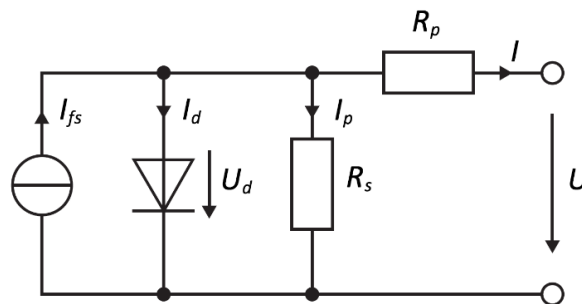
Snaga FN modula u ovim uvjetima je nazivna ili nominalna snaga modula. Označava se u Wp (engl. *watt-peak*) jer opisuje vrhunac snage modula u optimalnim uvjetima.

Stupanj učinkovitosti η_{Modula} FN modula omjer je isporučene električne nazivne snage P_{STC} (maksimalne snage - P_{MPP}) i sunčevog zračenja G na površinu A modula, što je prikazano u formuli (3.2.).

$$\eta_{Modula} = \frac{P_{STC}}{G \cdot A} \cdot 100 \quad (3.2.)$$

Učinkovitost silicijskih FN modula kreće se u rasponu od 15 – 22%, zavisno od kristalne strukture. Osim silicija postoje i drugi materijali poput kadmij-telurida ili bakra-indij-selendia koji se nazivaju tehnologijama tankog filma. Ovi moduli dosežu učinkovitost od 7 – 15%.

Nadomjesna shema FN članka prikazana je na slici 3.8.



Sl. 3.8. Nadomjesna shema FN članka [25].

$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkt}} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \quad (3.3.)$$

U formuli (3.3.) izlazna struja I je definirana kao fotostruja I_{fs} (struja koju proizvodi sunčeva svjetlost) umanjena za iznos struje diode I_d i struje kroz paralelni otpor tzv. šant I_p gdje je:

U – napon,

R_p – paralelni otpor FN članka,

I_0 – struja zasićenja, e – elementarni naboj, $e = 1,602176462 \cdot 10^{-19} \text{ As}$,

R_s – serijski otpor FN članka,

m – parametar FN članka, $m = 1$,

k – Boltzmanova konstanta, $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ J/K,

T – apsolutna temperatura K.

U idealnom FN članku serijski R_s otpor je nula, a paralelni R_p beskonačan.

Tri karakteristične točke I-U karakteristike solarnog članka na slici 3.9. su:

1) Struja kratkog spoja I_{ks}

Struja kratkog spoja nastaje kada su stezaljke FN članka kratko spojene, tj. kada je napon $U = 0$.

$$I_{ks} = I_{fs} - I_d = I_{fs} - I_0[e^0 - 1] = I_{fs} \quad (3.4.)$$

Rezultat jednadžbe (3.4.) pokazuje da je I_{ks} jednaka fotostruji I_{fs} .

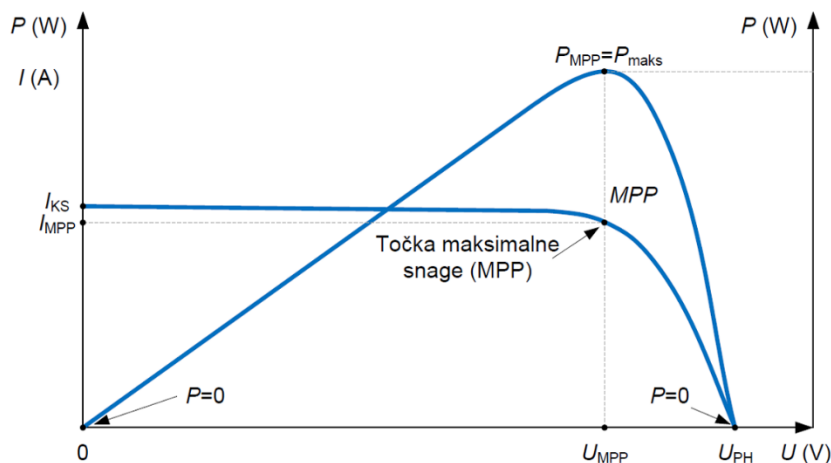
2) Napon praznog hoda U_{PH}

Napon praznog hoda nastaje kada je iznos struje nula. Kako bi se utvrdio, koristi se jednadžba (3.5.), prilikom čega je $I=0$.

$$U_{PH} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{ks}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.5.)$$

3) Točka maksimalne snage MPP

Izlazna snaga članka ovisi o trenutnoj radnoj točki. Radna točka pri kojoj se isporučuje najveća snaga naziva se točka maksimalne snage. Izračunava se množenjem vrijednosti struje i napona I_{MPP} i U_{MPP} . Osim toga slika 3.9. prikazuje krivulju snage $P = f(U)$ koja doseže svoj maksimum na MPP .



Sl. 3.9. Karakteristika solarnog članka s MPP (točkom maksimalne snage) i F [26].

Faktor punjenja F (3.6.) opisuje omjer između P_{MPP} i produkta napona praznog hoda U_{PH} i struje kratkog spoja I_{KS} te predstavlja mjeru kvalitete članka. Za silicijske članke iznosi između 0,75 i 0,85, a za materijale tankog filma između 0,6 i 0,75.

$$F = \frac{P_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} \quad (3.6.)$$

3.1.4. Defekti na fotonaponskim modulima

U literaturi su pojmovi defekt i kvar različito definirani. Definicija defekta je vrlo općenita i opisuje sve moguće karakteristike i stanja FN modula koji se razlikuju od savršenog [27]. Stoga defekt može prouzrokovati kvar na FN modulu, ali i ne mora.

Kvar FN modula prilično je specifičan i opisuje pojavu koja degradira snagu modula koja se (1) ne može poništiti normalnim radom ili (2) stvara sigurnosni problem. Čisto estetski problem koji nema posljedice (1) i (2) ne smatra se kvarom FN modula.

Neki od najčešćih defekata, odnosno oblika degradacije su:

1) Optička degradacija

Optička degradacija uključuje mjehuriće, puknuće stakla, raslojavanje i promjenu boje. Takvi oblici degradacije povezani su sa starošću i utjecajem okoliša [28]. Na slici 3.10. prikazano je puknuće stakla kao jedan od najčešćih defekata na FN modulima. Može imati različite duljine i orijentacije i može se pojaviti u različitim periodima životnog vijeka modula: tijekom proizvodnje, prijenosa, povezivanja, izloženosti vremenskim neprilikama.



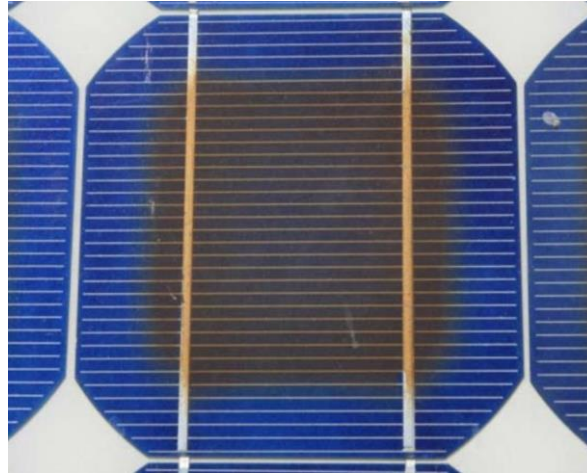
Sl. 3.10. Puknuće stakla uzrokovano elementarnim nepogodama [29].

Optičke defekte mogu prouzročiti unutarnji ili vanjski čimbenici. Unutarnji čimbenici uključuju, na primjer, kvalitetu enkapsulanta ili lošu/nepravilnu laminaciju, a vanjski čimbenici uključuju visoku temperaturu ili vlagu [30]. Primjer raslojavanja (delaminacija), kojem je uzrok prodor vlage u članak, zbog lošeg enkapsulanta, dan je na slici 3.11.



Sl. 3.11. Raslojavanje [31].

Na slici 3.12. prikazana je promjena boje enkapsulanta na članku FN modula. Promjene boje mogu nastati zbog unutarnjih i vanjski faktora poput korištenja nekvalitetnih polimera u sklapanju članaka ili izloženosti visokim temperaturama i velikoj vlazi. Mjesta s promijenjenom bojom smanjuju količinu svjetlosti koja ulazi u članak.

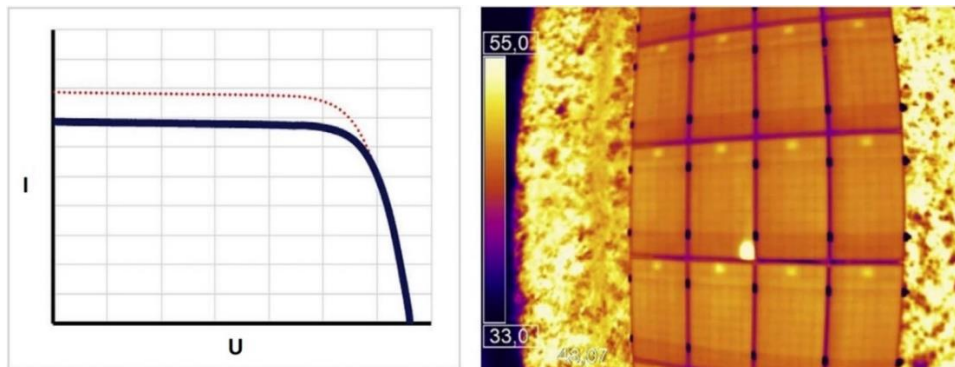


Sl. 3.12. Promjena boje enkapsulanta [32].

Svaki od ovih defekata utječe na optička svojstva modula, što dovodi do povećanih refleksija i smanjenog sunčevog zračenja na FN modul, što može dovesti do gubitaka snage. Svi se oni otkrivaju primjenom optičke/vizualne inspekcije [27].

Zbog smanjenog sunčevog zračenja, struja kratkog spoja I_{KS} opada, a time je smanjena i izlazna snaga (P_{max}) što je vidljivo na slici 3.13. lijevo.

Istodobno, smanjeni izlazni napon optički degradiranih modula vodi do efekta žarišta (engl. *Hot-Spot*), kao što je vidljivo na slici 3.13. desno. Temperaturna razlika između nedirnutih članaka i defektivnih članaka je $\Delta T < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili viša [28].



Sl. 3.13. Tipična I-U izlazna karakteristika (lijevo) i termografska fotografija FN modula s defektom (desno) [28].

2) Električna nepodudarnost i degradacija

Električna nepodudarnost može biti povezana s različitim nedostacima. Oni uključuju pukotine na člancima, tzv. puževe tragove (engl. *snail trails*), oštećene spojeve, oštećene povezujuće vrpce

i sabirnice, loše lemljenje. Ovakve vrste nedostataka nije uvijek moguće pronaći običnom vizualnom inspekcijom kao što je to slučaj s optičkim degradacijama [28].

Električna nepodudarnost nastaje kada članci rade s izmijenjenim fizikalnim svojstvima ili u izmijenjenim uvjetima [33]. Bez obzira jesu li članci spojeni u seriju ili paralelu, oni ne rade zasebno, nego zajednički. Stoga defekt na jednom članku ima utjecaj na cijeli modul. Nepodudarnost u radu i pokvarena premosna dioda mogu dovesti do stvaranja žarišta. To će rezultirati promjenom boje članka, tragovima gorenja ili pojavom plamena u najgorem slučaju [34].

Pukotine na člancima su jedan od najčešćih defekata na FN modulima te se razlikuju po veličini, geometriji, topologiji i orijentaciji [34]. Gubitak snage zbog pukotina na člancima ovisi o strukturi pukotine. Pukotina na članku ne vodi nužno do gubitka snage ili neprirodne distribucije temperature, ali manja pukotina može propagirati u veću zbog utjecaja okoline [35].

Diskoloracija srebrenih linija mreže na površini kristalnih silicijskih članaka često se naziva puževim tragovima. Oni se obično javljaju kod mikropukotina ili uz rubove članaka [36]. Najčešće se pojavljuju u periodu od 3 do 12 mjeseci nakon instalacije modula, a šire se zavisno od vanjskih uvjeta [27]. Izlazna snaga na takvim modulima je 20% manja [37].

Primjeri pukotina na člancima i puževih tragova dani su na slici 3.14.



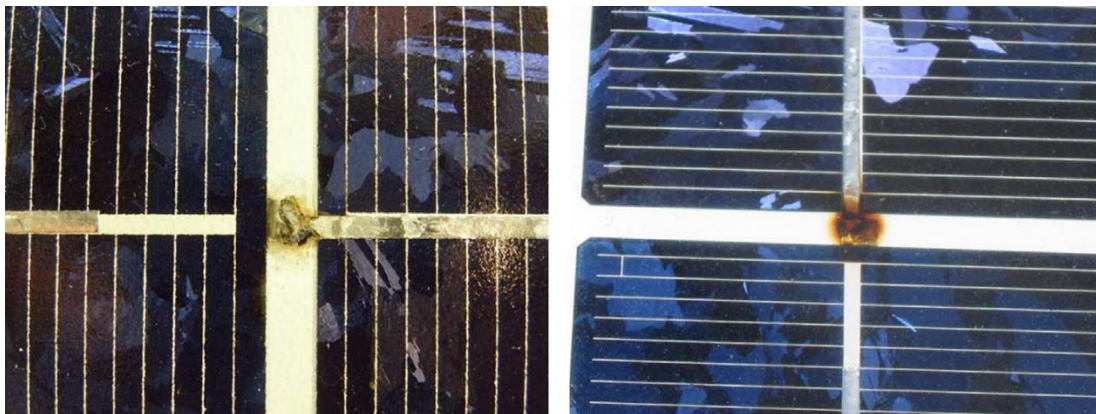
Sl. 3.14. Pukotina na članku (lijevo) i puževi tragovi (desno) [28].

Eksperimentalna istraživanja pokazala su da napukli FN moduli mogu biti identificirani s I-U karakteristikama. I-U karakteristika može imati oblik stepenice ili izraženo smanjene I_{KS} kao što je vidljivo na slici 3.15. U oba slučaja dolazi do smanjenja P_{max} i faktora punjenja F . Također može doći do pojave žarišta. Povišenje temperature ΔT ovisi o više faktora, poput topologije i karakteristika pukotina, vanjskim uvjetima itd.

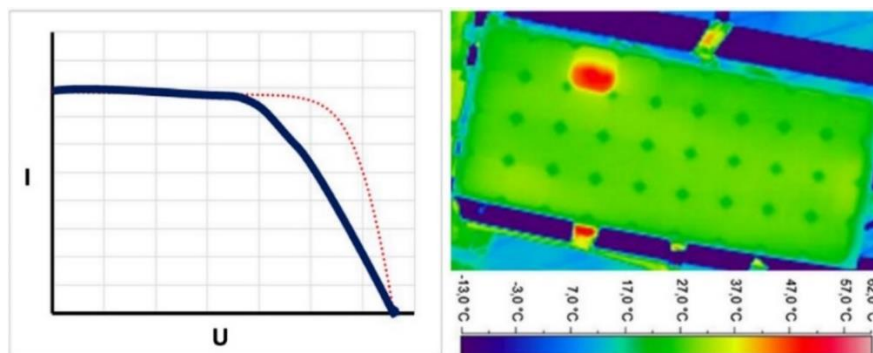


Sl. 3.15. Tipična I-U izlazna karakteristika (lijevo/sredina) i termografska fotografija FN modula s električnom nepodudarnosti [28].

Odspojени članci i slomljene ili degradirane povezujuće vrpce ili sabirnice tipični su oblik defekata interkonekcijskih materijala u članku ili nizu članaka i mogu se kategorizirati kao oblici električne nepodudarnosti. Ove vrste defekata mogu biti uzrokovane fizičkim stresom tijekom transporta ili ugradnje, termomehaničkim naprezanjima, lošim lemljenjem i/ili žarištima nakon dugog rada FN opreme[38]. Primjeri modula s degradiranim lemlim spojevima i/ili prekinutim povezujućim vrpčama dan je na slici 3.16., a tipična I-U izlazna karakteristika i termografska fotografija električne nepodudarnosti uzrokovane prekinutom vrpcom za povezivanje na slici 3.17.



Sl. 3.16. Moduli s degradiranim lemlim spojevima i/ili prekinutim vrpčama za povezivanje (odspojeni članci) [28]



Sl. 3.17. Tipična I-U izlazna karakteristika (lijevo) i termografska fotografija (desno) električne nepodudarnosti uzrokovane prekinutom vrpcom za povezivanje[28].

3) Neklasificirani defekti

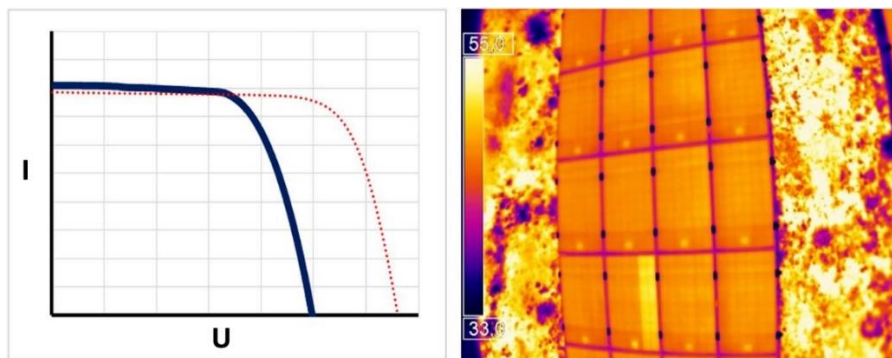
Ove vrste defekata ne mogu se apsolutno pripisati i kategorizirati odgovarajućim I-U karakteristikama ili toplinskim uzorkom. U njih se ubrajaju potencijalno inducirana degradacija (PID) ili defektivna (kratko spojena) premosna dioda.

PID efekt se smatra jednim od najvažnijih degradacijskih mehanizama u visokonaponskim FN sustavima. Laboratorijska ispitivanja silicijskih fotonaponskih panela su pokazala da je više od 67% ispitanih FN modula osjetljivo na PID efekte [39].

PID nastaje kada električni potencijal i struja curenja FN modula pokreću ione između poluvodičkog materijala i drugih elemenata modula (npr. staklo, nosač i okvir), što uzrokuje pad izlazne snage.

Defektivna premosna dioda također spada u kategoriju koja nema izravan utjecaj na performanse FN modula. Dizajnirana je tako da smanji gubitak snage uslijed zasjenjenja. Uz to premosna dioda štiti od reverznog napona. Teško je rano detektirati defektivnu premosnu diodu te se obično detektira uslijed težeg kvara.

Ovisno o broju defektivnih/kratko-spojenih premosnih dioda u povezanom modulu, takav kvar rezultira tipičnim toplinskim uzorkom, gdje se jedan ili više redova solarnih članaka na modulu više zagrijava od ostalih. Na slici 3.18. je prikazana tipična I-U karakteristika i termografska fotografija FN modula s jednim neaktivnim redom članaka zbog defektivne premosne diode.



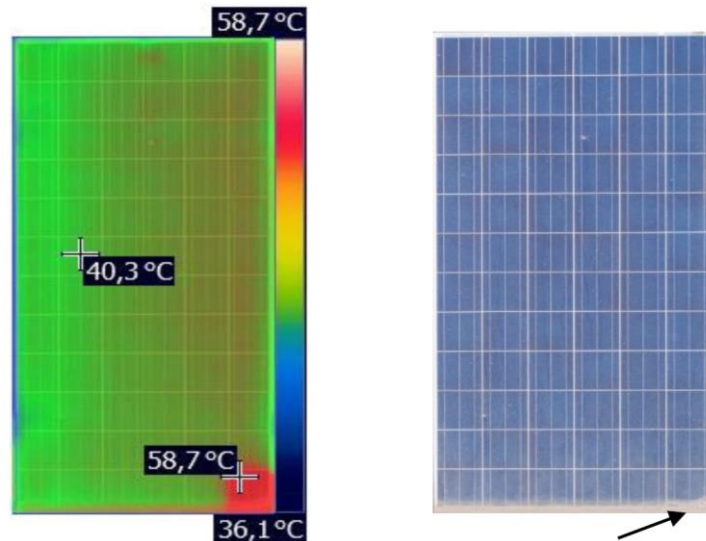
Sl. 3.18. Tipična I-U karakteristika i termografska fotografija FN modula s jednim neaktivnim podmodulom zbog defektivne premosne diode [28].

4) Prljanje

Prljanje je nakupljanje prljavštine na površini fotonaponskog modula. Uzrokuju ga različiti čimbenici poput prašine, zagađenja, ptica, biljaka itd. Godišnji gubitci zbog nakupljanja

sedimenata iznose od 1% do 7%, a u suhim regijama i do 10% [40]. Prljanje može pojačati efekte strujne nepodudarnosti zbog različito zaprljanih dijelova FN modula što uzrokuje iste probleme kao i zasjenjenje.

Prilikom termografske inspekcije prljav fotonaponski modul može dovesti do pogrešnog identificiranja ove nepravilnosti kao električne anomalije. Termografska i obična fotografija FN modula s prljavim člankom prikazana je na slici 3.19.



Sl. 3.19. Termografska i obična fotografija FN modula s prljavim člankom [14].

Tipične korelacije između najčešćih defekata, njihovih termalnih uzoraka, I-U karakteristika i degradacije električnih performansi prikazane su u tablici 3.2.

3.2. Klasifikacija defekata i kvarova ilustrativnim termalnim uzorkom, I-U karakteristikom i degradacijom električnih performansi FN modula [28].

| Tip defekta | Termalni uzorak | I-U karakteristika | Električna degradacija |
|---|-----------------|--------------------|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Optička degradacija | | | $I_{KS}, I_{MPP} \downarrow$ $P_{IZL} \downarrow$ (<0,5%/god) |
| <ul style="list-style-type: none"> Pukotine na člancima Mikropukotine Puževi tragovi | | | $I_{KS}, I_{MPP} \downarrow$ $F \downarrow$ $P_{IZL} \downarrow$ |

| | | | |
|---|--|------------------|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Puknuti članci | | | $F \downarrow$ $R_s \uparrow$ $P_{IZL} \downarrow$ |
| <ul style="list-style-type: none"> Potencijalom inducirana degradacija (PID) | | | $U_{PH}, U_{MPP} \downarrow$ $F \downarrow$ $P_{IZL} \downarrow$ |
| <ul style="list-style-type: none"> Kratko spojeni članci Zasjenjenje | | | $R_p \downarrow, R_s \uparrow$ $F \downarrow$ $U_{PH}, U_{MPP} \downarrow$ $P_{IZL} \downarrow$ |
| <ul style="list-style-type: none"> Puknute povezujuće vrpce Loše ili pogrešno lemljenje | | | $F, P_{IZL} \downarrow$ |
| <ul style="list-style-type: none"> Defektivna premosna dioda | | | $U_{PH}, U_{MPP} \downarrow$ $P_{IZL} \downarrow$ |
| <ul style="list-style-type: none"> Sve premosne diode kratko spojene | | Nije primjenjivo | $U_{PH}, U_{MPP} \downarrow \downarrow$ $P_{IZL} \downarrow \downarrow \downarrow$ |
| <ul style="list-style-type: none"> Modul u praznom hodu | | Nije primjenjivo | Nije primjenjivo |

3.2. Ekonomska izvedivost

U poglavlju tehničke izvedivosti navedene su prednosti multirotorskih sustava. Stoga će u ovom poglavlju biti razmatrani samo dronovi s 4 ili više motora. U tablici 3.3. navedeni su dronovi iz

kategorija kvadrokoptera, heksakoptera i oktokoptera te njihove specifikacije i cijena. Svaki od njih je korišten za svrhu zračne termografije u analiziranoj literaturi, a izabrani su zbog dostupnosti na hrvatskom tržištu.

Tablica 3.3. Specifikacije dronova dostupnih na hrvatskom tržištu.

| Dron | DJI Mavic 2 Enterprise Dual | DJI Inspire 2 | DJI S900 | DJI S1000 |
|--|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Tip | kvadrokopter | kvadrokopter | heksakopter | oktokopter |
| Težina [kg] | 0,899 | 3,44 | 3,3 | 4,2 |
| Baterija | LiPo: 4S, 3950 mAh | LiPo: 2S, 6000 mAh | LiPo: 6S, 10000 do 15000 mAh | LiPo: 6S, 10000 do 20000 mAh |
| Vrijeme trajanja leta [min] | 25 | 23 | 18 | 15 |
| Podržana okolišna temperatura leta [°C] | -10 do 40 | -20 do 40 | -10 do 40 | -10 do 40 |
| Najveća dozvoljena masa na polijetanju [kg] | 1,1 | 4,250 | 4,7 ~ 8,2 | 6,0 ~ 11 |
| Dimenzije [mm] | 322×242×84 | 427×317×425 | 460×450×360 | 460×511×305 |
| Cijena [kn] | 20.499,00 [41] | 25.799,00 [42] | 14.800,00 [43] | 19.760,00 [44] |

Iz tablice 3.3. vidljivo je da dron DJI S900 ima najnižu cijenu od 14.800,00 kn. No važno je napomenuti da DJI Mavic 2 Enterprise Dual u svojoj cijeni uključuje termografsku te vizualnu kameru što ga čini daleko najjeftinijim rješenjem za 20.499,00 kn.

Tablica 3.4. Specifikacije termalnih kamera dostupnih na hrvatskom tržištu.

| Termografska kamera | DJI Mavic 2 Enterprise Dual | Worskswell Wiris | Flir Vue pro | DJI Zenmuse XT Thermal Camera |
|-------------------------------|--|------------------|--|---|
| Rezolucija [pikseli] | 160×120 | 640×512 | 640×512 | 640×512 |
| FOV (horizontalni) | 57° | 45° | 32° | 32° |
| Termalna osjetljivost [mK] | <50 | <50 | <50 | <50 |
| Težina [g] | / | 390 | 113,4 | 270 |
| Točnost | ± 5°C ili 5% na mjerjenja od -10°C do +140°C; 10% na mjerjenja od -10°C do +400°C | ± 2% ili ± 2°C | ± 5°C do 5% na mjerjenja od -25°C do +135°C; ± 20°C ili 20% na mjerjenja od -40°C do +550°C | +/-5°C ili 5% na mjerjenja od -25°C do +135°C ; |
| Temperaturni raspon [°C] | -10 do 140 | -40 do 550 | -25 do 135 | -25 do 135 |
| Žarišna duljina [μm] | 8 – 14 | 7,5 – 13,5 | 7,5 – 13,5 | 7,5 – 13,5 |
| Cijena [kn] | / | 103.125,00 [45] | 36.550,00 [46] | 81.320,00 [47] |

U tablici 3.4. prikazane su termografske kamere korištene u analiziranoj literaturi te dostupne na hrvatskom tržištu, te kamera DJI Zenmuse XT Thermal Camera, koja svojim specifikacijama odgovara kameri Flir Tau 2 te joj je adekvatna zamjena.

Težina termografske kamere DJI Mavic 2 drona nije navedena jer je ona integrirani dio težine samog drona, a isto važi i za cijenu. Može se primijetiti kako je cijena termografskih kamera višestruko veća od cijene samih dronova.

Kod ostalih troškova potrebno je još zaračunati cijenu osiguranja od odgovornosti koje iznosi od 500 – 1500 kn, a mora biti osigurano na iznos potencijalne štete do 750,000 SDR. Idući troškovi su troškovi osposobljavanja pilota bespilotnog zrakoplova. Oni iznose 430 kn za liječničko uvjerenje o zdravstvenoj sposobnosti i 70 kn za polaganje ispita za udaljene pilote koji planiraju izvoditi operacije u „otvorenoj kategoriji“. Svim dronovima težim od 3 kg potreban je padobran čija je cijena od 3345 kn [48], što za razmatrane dronove nije slučaj.

3.2.1. Razdoblje povrata investicije

Cijena jednog radnog sata drona prilikom termografske inspekcije je oko 200 kn (A. Bačan, Odjel za obnovljive izvore energije, klimu i zaštitu okoliša, Energetski institut Hrvoje Požar, osobna komunikacija, velj. 10, 2021.). Pretpostavljeno je da će navedeni dronovi izvršavati inspekcije na području Osijeka prilikom povoljnih uvjeta za let. Prosječni broj vedrih dana u Osijeku je 69 prema podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske [49]. Iduća pretpostavka je da je, u osmosatnom radnom vremenu, potreban jedan sat za pripremu i dolazak na mjesto inspekcije te jedan sat za spremanje opreme po završetku iste. To dovodi zaključka da će dron na kojemu se naizmjenice koriste napunjene baterije biti u letu 6 sati prilikom 69 dana godišnje. Potrebno je još uvažiti da je porez na dohodak u Republici Hrvatskoj 20%.

Razdoblje povrata (rok otplate) investicije predstavlja dio razdoblja korištenja investicije nakon kojeg se očekuje vraćanje uloženog kapitala iz ostvarene razlike primitaka i izdataka, kao i iz godišnje amortizacije. Drugim riječima, broj godina nakon kojih iznos uloženog kapitala i zbroj kumuliranih neto primitaka postaju izjednačeni [50].

Izračunavanje broja godina razdoblja otplate V radit će se po formuli (3.7.) gdje je I ukupno investirani kapital, P_t prosječni godišnji neto primitak, a A amortizacija. Ukupno investirani kapital I iznosit će cijenu drona i termografske kamere zbrojenu s iznosom liječničkog uvjerenja o zdravstvenoj sposobnosti i s cijenom polaganja ispita za udaljene pilote.

$$V = \frac{I}{P_t + A} \quad (3.7.)$$

$$P_t = C_{Rada} \cdot h_{Rada} \cdot br_{vd} \cdot t \quad (3.8.)$$

$$A = O + b_p \cdot C_p \quad (3.9.)$$

Prosječni godišnji neto primitak P_t je izračunat u formuli (3.8.) umnoškom cijene radnog sata drona C_{Rada} s dnevnim brojem sati rada h_{Rada} , godišnjim brojem vedrih dana br_{vd} i faktorom poreza t koji iznosi 0,8 za porez na dohodak od 20%. Za troškove amortizacije u formuli (3.9.) zbrojeni su troškovi godišnjeg osiguranja O od 1500 kn te troškovi zamjene propelera dronova koji iznose oko 20 kn po propeleru C_p , a b_p predstavlja broj propelera [48].

3.5. Razdoblje otplate za DJI Mavic 2 Enterprise Dual i njegovu termografsku kameru.

| DJI Mavic 2 Enterprise Dual | |
|--|------------------------------------|
| Termografska kamera | DJI Mavic 2 Enterprise Dual Camera |
| Ukupno investiran kapital [kn] | 20.999,00 |
| Prosječni godišnji neto primitak [kn] | 66.240,00 |
| Prosječni godišnji iznos amortizacije [kn] | 1580,00 |
| Broj godina razdoblja otplate | 0,31 |

3.6. Razdoblje otplate za DJI Inspire 2 i sve termografske kamere.

| DJI Inspire 2 | | | |
|--|------------------|--------------|-------------------------------|
| Termografska kamera | Worskswell Wiris | Flir Vue pro | DJI Zenmuse XT Thermal Camera |
| Ukupno investiran kapital [kn] | 129.424,00 | 62.849,00 | 107.619,00 |
| Prosječni godišnji neto primitak [kn] | 66.240,00 | 66.240,00 | 66.240,00 |
| Prosječni godišnji iznos amortizacije [kn] | 1580,00 | 1580,00 | 1580,00 |
| Broj godina razdoblja otplate | 1,91 | 0,93 | 1,59 |

3.7. Razdoblje otplate za DJI S900 i sve termografske kamere.

| DJI S900 | | | |
|--|------------------|--------------|-------------------------------|
| Termografska kamera | Worskswell Wiris | Flir Vue pro | DJI Zenmuse XT Thermal Camera |
| Ukupno investiran kapital [kn] | 118.425,00 | 51.850,00 | 96.620,00 |
| Prosječni godišnji neto primitak [kn] | 66.240,00 | 66.240,00 | 66.240,00 |
| Prosječni godišnji iznos amortizacije [kn] | 1620,00 | 1620,00 | 1620,00 |
| Broj godina razdoblja otplate | 1,75 | 0,76 | 1,42 |

3.8. Razdoblje otplate za DJI S1000 i sve termografske kamere.

| DJI S1000 | | | |
|--|------------------|--------------|-------------------------------|
| Termografska kamera | Worskswell Wiris | Flir Vue pro | DJI Zenmuse XT Thermal Camera |
| Ukupno investiran kapital [kn] | 123.385,00 | 56.810,00 | 101.580,00 |
| Prosječni godišnji neto primitak [kn] | 66.240,00 | 66.240,00 | 66.240,00 |
| Prosječni godišnji iznos amortizacije [kn] | 1660,00 | 1660,00 | 1660,00 |
| Broj godina razdoblja otplate | 1,82 | 0,84 | 1,50 |

Dron DJI Mavic 2 Enterprise Dual ima najmanji broj godina razdoblja otplate koji iznosi 0,31 kao što je vidljivo iz tablice 3.5., što je malo više od tri i pol mjeseca. Razlog je taj što je proizvođač u sam dron ugradio termografsku kameru, pa ju nije potrebno zasebno kupovati. Najduže razdoblje otplate od 1,91 godinu ima DJI Inspire 2 u kombinaciji s Worskswell Wiris termografskom kamerom u tablici 3.6.

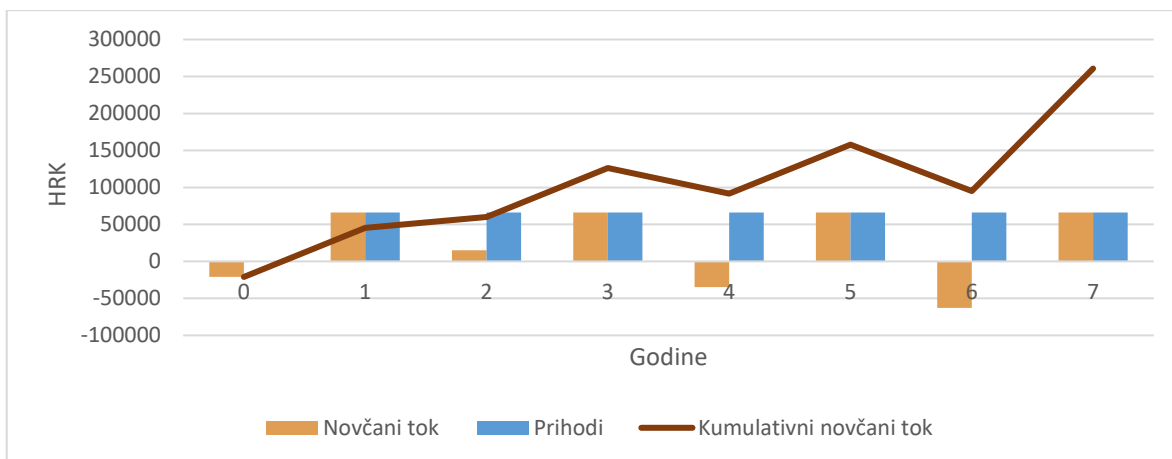
3.2.2. Novčani tok

Novčani tok (engl. *Cash Flow, CF*) je razlika između priljeva i odljeva novca u danom vremenskom razdoblju. Novčani tok biti će prikazan u periodu od 7 godina pod pretpostavkom da je za izvođenje termografskih inspekcija korištena najjeftinija oprema, a nakon toga je svake 2 godine investirano u skuplju. Za prikaz novčanog toka koristi će se tablica 3.9.

3.9. Tablica novčanog toka.

| Godina | Novčani priljevi [kn] | Prvotna investicija / Novčani odljevi [kn] | Novčani tok [kn] | Kumulativni novčani tok [kn] |
|--------|-------------------------|--|--------------------|------------------------------|
| 0 | 0,00 | 20.999,00 | -20.999,00 | -20.999,00 |
| 1 | 66.240,00 | 0,00 | 66.240,00 | 45.241,00 |
| 2 | 66.240,00 | 51.350,00 | 14.890,00 | 60.131,00 |
| 3 | 66.240,00 | 0,00 | 66.240,00 | 126.371,00 |
| 4 | 66.240,00 | 101.080,00 | -34.840,00 | 91.531,00 |
| 5 | 66.240,00 | 0,00 | 66.240,00 | 157.771,00 |
| 6 | 66.240,00 | 128.924,00 | -62.684,00 | 95.087,00 |
| 7 | 66.240,00 | 0,00 | 66.240,00 | 260.687,00 |
| | Ukupni novčani priljevi | Ukupni novčani odljevi | Ukupni novčani tok | |
| | 463.680,00 | 302.353,00 | 161.327,00 | |

Na samom početku novac je investiran u DJI Mavic 2 Enterprise Dual dron. Tijekom druge godine kupljeni su DJIS900 i Flir Vue pro, na četvrtoj DJIS1000 i DJI Zenmuse XT Thermal Camera, a na šestoj DJI Inspire 2 i Worskswell Wiris. Prikaz novčanog toka nalazi se na slici 3.20.



Sl. 3.20. Grafički prikaz novčanog toka nabave dronova i termografskih kamera od najjeftinije do najskuplje kombinacije.

Mjesto na kojem linija kumulativnog novčanog toka presijeca apscisu predstavlja trenutak otplate investicije.

3.2.3. Neto sadašnja vrijednost

Neto sadašnja vrijednost *NPV* (engl. *Net Present Value*) predstavlja izračun budućih novčanih tokova diskontiranih diskontnom (eskontnom) stopom. Ova vrsta analize uzima u obzir projekciju poslovne aktivnosti tijekom vijeka trajanja imovine. Diskontiranjem se smanjuje utjecaj budućih ulaganja na sadašnju vrijednost, tj. na vrijednost razdoblja ulaganja [4]. *NPV* je jedna od najboljih pokazatelja analize investicije jer predstavlja sadašnju razliku između vrijednosti novčanih odljeva i novčanih priljeva. To znači da bilo koja novčana jedinica zarađena u budućnosti, neće biti jednako vrijedna kao ona zarađena danas, zbog promjene vrijednosti novca s vremenom.

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (3.10.)$$

NPV je prikazan u formuli (3.10.) gdje je C_t novčani tok u vremenu, r diskontna stopa a t vremenski period. *NPV* projekta izračunat za vrijeme od 7 godina, novčanim tokom iz tablice 3.9. uz diskontnu stopu od 3% (eskontna stopa HNB-a) iznosi 145.512,55 kn.

3.2.4. Interna stopa povrata

Interna stopa povrata *IRR* (engl. *Internal Rate of Return*) je diskontna stopa koja se treba primijeniti na buduću zaradu projekta kako bi se izjednačili investicijski troškovi. Prilikom izračuna *IRR*, *NPV* ulaganje iz određenog projekta jednako je nuli. Što je interna stopa profitabilnosti viša, to je poželjnije provesti projekt. Vrijednosti *IRR*-a prikazuju se u postocima.

$$0 = NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1 + IRR)^t} \quad (3.11.)$$

IRR se računa iz formule (3.11.) gdje je *IRR* predstavlja diskontnu stopu, odnosno internu stopu povrata. *IRR* projekta izračunat za vrijeme od 7 godina, novčanim tokom iz tablice 3.9. iznosi 257,84%. Važno je napomenuti da se *IRR* računa u iteracijama dok *NPV* ne postane 0.

3.2.5. Povrat ulaganja

Povrat ulaganja *ROI* (engl. *Return on investment*) ocjenjuje učinkovitost ulaganja. Za izračun *ROI*-a, prihodi ulaganja se dijele s troškom ulaganja. Ako projekt nema pozitivan *ROI*, ulaganje ne bi trebalo provesti.

$$ROI(\%) = \frac{\text{Ukupni novčani tok}}{\text{Ukupni novčani odljevi}} \quad (3.12.)$$

ROI se računa iz formule (3.12.) s podacima iz tablice 3.9. te iznosi 53,36%.

3.2.6. SWOT analiza

SWOT je engleski akronim za prednosti (engl. *Strengths*), slabosti (engl. *Weaknesses*), prilike (engl. *Opportunities*) i prijetnje (engl. *Threats*).

SWOT analiza je alat strateškog planiranja za analizu konkurentne pozicije. Kvalitativna analitička metoda kojom se stupnjevanjem elemenata u okviru 4 polja analize – mogućnosti, ograničenja, prednosti, nedostaci – procjenjuju jake i slabe strane, pogodnosti i problemi razmatranog predmeta ili pojave. Radi se o subjektivnoj procjeni stupnjevanja elemenata analize, bez korištenja potrebnog analitičkog i metodološkog instrumentarija [51]. SWOT analiza primjene dronova u održavanju fotonaponskih elektrana prikazana je u tablici 3.10.

3.10. SWOT analiza primjene dronova u održavanju fotonaponskih elektrana.

| Prednosti (S) | Slabosti (W) | |
|--|---|------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • beskontaktna metoda inspekcije (sigurnija za ispitivača i ispitivanu opremu FN elektrane) • brzina i točnost • mogućnost korištenja postojeće opreme za druge poslove termografskih pregleda | <ul style="list-style-type: none"> • promjene u očitanjima podataka pri promjeni kuta snimanja (detaljnije u potpoglavlju 3.4.2.) • osjetljivost analize i postupka inspekcije na vremenske (ne)prilike • preveliki troškovi za inspekciju malih FN elektrana [52] | ← Unutrašnji čimbenici |
| Prilike (O) | Prijetnje (T) | |
| <ul style="list-style-type: none"> • stabilan rast globalnog kapaciteta FN elektrana u posljednjih 10 godina [53], čime je povećan opseg posla • životni vijek FN modula od 25 do 30 godina, s garancijom proizvođača na 20 | <ul style="list-style-type: none"> • promjenjiva zakonska regulativa • osjetljivost opreme na vremenske (ne)prilike • visoki materijalni troškovi u slučaju nezgoda | ← Vanjski čimbenici |

| | |
|---|--|
| <p>godina, tipičnog smanjenja nazivne snage od 1% godišnje [27] garantira potrebu za inspekcijom istih</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1229 FN elektrana u sustavu poticaja HROTE-a do 31. prosinca 2020. | |
|---|--|

↓
Pozitivno

↓
Negativno

3.3. Pravna izvedivost

Letenje sustavom bespilotnih zrakoplova mora se izvoditi sukladno primjenjivim propisima za korištenje zračnog prostora Republike Hrvatske i odredbama Pravilnika o sustavima bespilotnih zrakoplova [54].

Na upravljanje i korištenje sustava bespilotnih zrakoplova u Republici Hrvatskoj primjenjuju se sljedeći propisi:

1. Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova
2. Pravilnik o letenju zrakoplova
3. Provedbena uredba Europske komisije br. 923/2012
4. Zakon o zračnom prometu

Prema navedenim propisima, operator sustava bespilotnog zrakoplova se mora pridržavati narednih pravila:

1. „Bespilotnim zrakoplovom dopušteno je letenje:
 - a) danju (Pravilnik o letenju zrakoplova nema definiciju dana, ali definira noć kao vremensko razdoblje od završetka večernjeg građanskog sumraka do početka jutarnjeg građanskog sumraka. Građanski sumrak uvečer završava kada je središte Sunca 6 stupnjeva ispod horizonta, a ujutro počinje kada je središte Sunca 6 stupnjeva ispod horizonta)
 - b) u nekontroliranom zračnom prostoru na visini do 120 m iznad razine tla ili do 50 m iznad prepreke, ovisno što je više,
 - c) u kontroliranom zračnom prostoru izvan prostora polumjera 5 km od referentne točke aerodroma na visini do 50 m iznad razine tla,
 - d) na udaljenosti od najmanje 3 km od rubova i pragova uzletno-sletne staze (USS) nekontroliranog aerodroma osim kada su posebno predviđene procedure za letenje bespilotnih zrakoplova definirane napatkom za korištenje aerodroma,

- e) na način da horizontalna udaljenost bespilotnog zrakoplova od skupine ljudi nije manja od 50 m, osim kada se bespilotnim zrakoplovom sudjeluje na zrakoplovnoj priredbi,
 - f) na način da horizontalna udaljenost od ljudi koji nisu uključeni u operacije nije manja od visine leta i nije manja od:
 - a. 5 m kada je na bespilotnom zrakoplovu uključen način rada na maloj brzini i kada je najveća dopuštena brzina podešena na 3 m/s, ili
 - b. 30 m u ostalim slučajevima,
 - g) unutar vidnog polja pilota na daljinu, i
 - h) uz uspostavu ad hoc strukture u skladu s primjenjivim propisom o upravljanju zračnim prostorom.
2. Pilot na daljinu mora:
- a) upravljati bespilotnim zrakoplovom na siguran način, da ne predstavlja opasnost po život, zdravlje ili imovinu na tlu i u zraku te da ne narušava javni red i mir,
 - b) upravljati bespilotnim zrakoplovom sukladno primjenjivim propisima, letačkom priručniku ili uputama za upotrebu i operativnom priručniku kada je primjenjivo,
 - c) prije leta provjeriti ispravnost sustava bespilotnog zrakoplova,
 - d) provjeriti da li je bespilotni zrakoplov označen u skladu s člankom 3. Pravilnika o sustavima bespilotnih zrakoplova
 - e) osigurati područje uzlijetanja i slijetanja,
 - f) prikupiti sve potrebne informacije za planirani let i uvjeriti se da meteorološki i ostali uvjeti u području leta osiguravaju sigurno izvođenje leta,
 - g) osigurati da je sva oprema ili teret na bespilotnom zrakoplovu odgovarajuće pričvršćen na način da ne dođe do njegovog ispadanja,
 - h) upravljati na način da bespilotni zrakoplov tijekom uzlijetanja ili slijetanja sigurno nadvisuje sve prepreke,
 - i) stalno promatrati zračni prostor u području letenja bespilotnog zrakoplova kako ne bi doveo u opasnost druge zrakoplove, i
 - j) dati prednost zrakoplovu s posadom.
3. Pilot na daljinu ne smije upravljati:
- a) istovremeno s više bespilotnih zrakoplova, i/ili
 - b) unutar područja gdje se izvodi hitna intervencija.“ [54].

Operator smije izvoditi letačke operacije u skladu s uvjetima iz tablice 3.11.

3.11. Kategorizacija i pravo izvođenja letačkih operacija [54].

| Kategorija letačkih operacija | BESPILOTNI ZRAKOPLOV | | IZVOĐENJE LETAČKIH OPERACIJA | | ZAHTJEVI ZA PILOTA NA DALJINU | | ZAHTJEVI ZA OPERATORA | |
|-------------------------------|--|---|------------------------------|--------------------------------------|--|---|---|-------------------------|
| | Operativna masa bespilotnog zrakoplova | Najveća brzina bespilotnog zrakoplova prema tehničkim specifikacijama proizvođača | Dio dana | Područje izvođenja operacija | Minimalna dob | Polaganje teorijskog/praktičnog ispita | Obaveza evidentiranja/odobrenja operatora | Dokumentacija operatora |
| A | OM < 250 g | < 19 m/s | Danu i/ili noću | Naseljeno i/ili nenaseljeno područje | Nije primjenjivo | Nije primjenjivo | Nije primjenjivo | Nije primjenjivo |
| B1 | 250 g ≤ OM ≤ 900 g | < 19 m/s | Danu | Nenaseljeno područje | 14 godina starosti, ili manje od 14 godina starosti, pod nadzorom punoljetne osobe | Nije primjenjivo | Nije primjenjivo | Nije primjenjivo |
| B2 | OM < 5 kg | Nije primjenjivo | Danu i/ili noću | Naseljeno i/ili nenaseljeno područje | 16 godina | Nije primjenjivo | Evidencija | Nije primjenjivo |
| C1 | 5 kg ≤ OM < 25 kg | Nije primjenjivo | Danu | Nenaseljeno područje | 18 godina | Položen teorijski ispit iz poznavanja primjenjivih zrakoplovnih propisa koji provodi Agencija | Evidencija | Nije primjenjivo |

| | | | | | | | | |
|----|-------------------------|------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------|--|-----------|--|
| C2 | 5 kg ≤ OM ≤ 150kg | Nije primjenjivo | Danj u i/ili noću | Naseljeno i/ili nenaseljeno područje | 18 godina | a) Položen teorijski ispit iz poznavanja primjenjivih zrakoplovnih propisa koji provodi Agencija b) Demonstracija pripreme leta i letenja | Odobrenje | a) Operativni priručnik b) Zapisi o letu c) Upravljanje rizicima |
|----|-------------------------|------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------|--|-----------|--|

Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo (u daljnjem tekstu: Agencija) može izdati različita odobrenja za izvođenje letačkih operacija koja odstupaju od Pravilnika. Tako je moguće letjeti noću pod uvjetom da je bespilotni zrakoplov opremljen svjetlima koja također naznačuju njegovu orijentaciju te omogućuju pilotu na daljinu njihovu vidljivost tijekom cijelog leta. Odobrenje Agencije se također može dobiti i za letenje u nekontroliranom zračnom prostoru na visini većoj od 120 m iznad tla, izvođenje letačkih operacija na udaljenosti manjoj od 50 m od skupine ljudi, letenje izvan vidnog polja pilota, te istodobno upravljanje s više sustava bespilotnih zrakoplova. Ukoliko ima potrebe za izvođenje letačkih operacija u kontroliranom zračnom prostoru unutar polumjera 5 km od referentne točke aerodroma i na visinama većim od 50 m, operatoru je potrebno dobiti odobrenje nadležne kontrole zračnog prometa, a ako se leti na udaljenosti manjoj od 3 km od rubova i pragova uzletno-sletne staze nekontroliranog aerodroma potrebno je odobrenje operatora nekontroliranog aerodroma.

Operator sustava bespilotnog zrakoplova mora osigurati da se letačke operacije izvode sukladno promjenjivim propisima. Operator se brine da se letačke operacije izvode na siguran način koji neće predstavljati opasnost po život, zdravlje i materijalnu imovinu te vodi računa da let ne narušava javni red i mir. Pilotu na daljinu daje pravilne upute te se brine o njegovoj sposobnosti izvođenja letačkih operacija i svjesnosti njegovih odgovornosti.

„Operator mora uspostaviti sustav vođenja i čuvanja zapisa o letu koji sadrži sljedeće podatke:

- a) identifikacijsku oznaku,
- b) datum leta,
- c) vrijeme početka i završetka izvođenja letačkih operacija i trajanje leta,
- d) ime i prezime pilota na daljinu,
- e) lokacija izvođenja letačkih operacija, i

f) napomene o značajnim događajima nastalim pri izvođenju letačkih operacija.

Zapisi o letu moraju se čuvati najmanje dvije godine od datuma leta.“ [54].

3.4. Operativna izvedivost

Za male fotonaponske elektrane (10 – 100 modula), kojima je lako pristupiti, upotreba bespilotnih zrakoplova nije opravdana zbog troška i vremena potrebnog za nabavljanje dozvola [52]. Vizualna inspekcija može se obaviti izbliza vidom, a termografska ručnom termografskom kamerom. Za male fotonaponske elektrane locirane na teško pristupačnim mjestima, kao što su zgrade, krovovi ili fasade, bespilotni zrakoplovi su u prednosti zbog svoje manevarabilnosti. Srednje i velike fotonaponske elektrane sastoje se od tisuća modula. Prilikom inspekcije takvih elektrana sustavi bespilotnih zrakoplova su u prednosti zbog svoje izdržljivosti, brzine i mogućnosti da pokriju veliku površinu. Usporedba tradicionalnog načina inspekcije ljudskom radnom snagom sa inspekcijom daljinskim nadzorom prikazana je u tablici 3.12.

3.12. Usporedba ljudske radne snage i daljinskog nadzora [55].

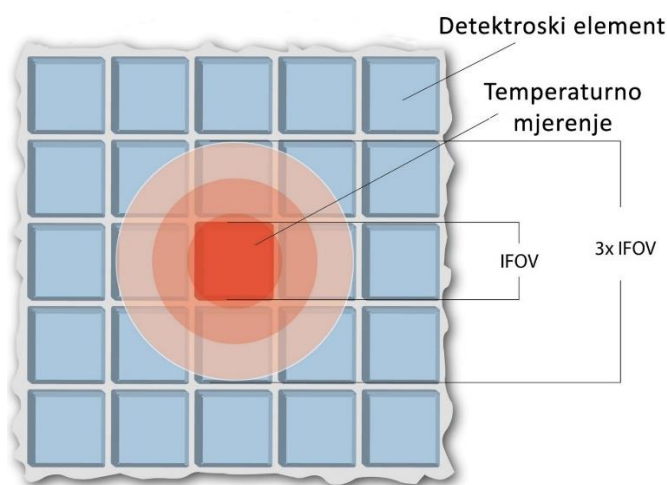
| | Fizička inspekcija ljudskom radnom snagom | | Inspekcija daljinskim nadzorom | |
|----------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| | Male FN elektrane | Velike FN elektrane | Male FN elektrane | Velike FN elektrane |
| Kvaliteta inspekcije | Umjerena | Loša | Bolja | Bolja |
| Trajanje inspekcije | Umjereno | Vrlo dugo | Vrlo kratko | Kratko |
| Pouzdanost inspekcije | Umjerena | Vrlo loša | Vrlo visoka | Visoka |
| Učestalost prikupljanja podataka | Moguća na satnoj skali | Moguća na dnevnoj / mjesečnoj skali | Moguća na minutnoj skali | Moguća na minutnoj skali |
| Točnost nadziranih parametara | Umjerena | Vrlo loša | Vrlo visoka | Visoka |
| Utvrđivanje uzroka kvarova | Lako i oduzima malo vremena | Teško i oduzima vrijeme | Vrlo lako | Lako |
| Troškovi inspekcije | Vrlo mali | Visoki | Visoki | Vrlo visoki |

3.4.1. Određivanje visine leta

Prije izvođenja zračne inspekcije potrebno je odrediti odgovarajuću visinu leta. Kako bi se ona mogla odrediti, mora se znati veličina najmanjeg promatranog objekta. Pretpostavljena veličina fotonaponskog članka je 156 mm × 156 mm i on ujedno predstavlja najmanji detalj u FOV-u koji bi se trebao uspješno detektirati odnosno IFOV. IFOV se obično mjeri u miliradianima (mRad) uz pomoć relacije (3.13.)

$$IFOV = \left(\frac{FOV}{broj\ piksela} \right) \cdot \frac{\pi \cdot 1000}{180} \quad (3.13.)$$

IFOV mjernog elementa ili rezolucija mjerenja je najmanji detalj koji može biti izmjeren kako bi se dobilo točno temperaturno mjerenje s određene udaljenosti. Zbog fenomena optičke disperzije, radijacija s izuzetno male površine neće dati dovoljno energije jednom detektorskom elementu kamere za prikaz točne vrijednosti kao što je prikazano na slici 3.21. Stoga je potrebno da IFOV mjernog elementa bude tri do pet puta veći od IFOV-a.

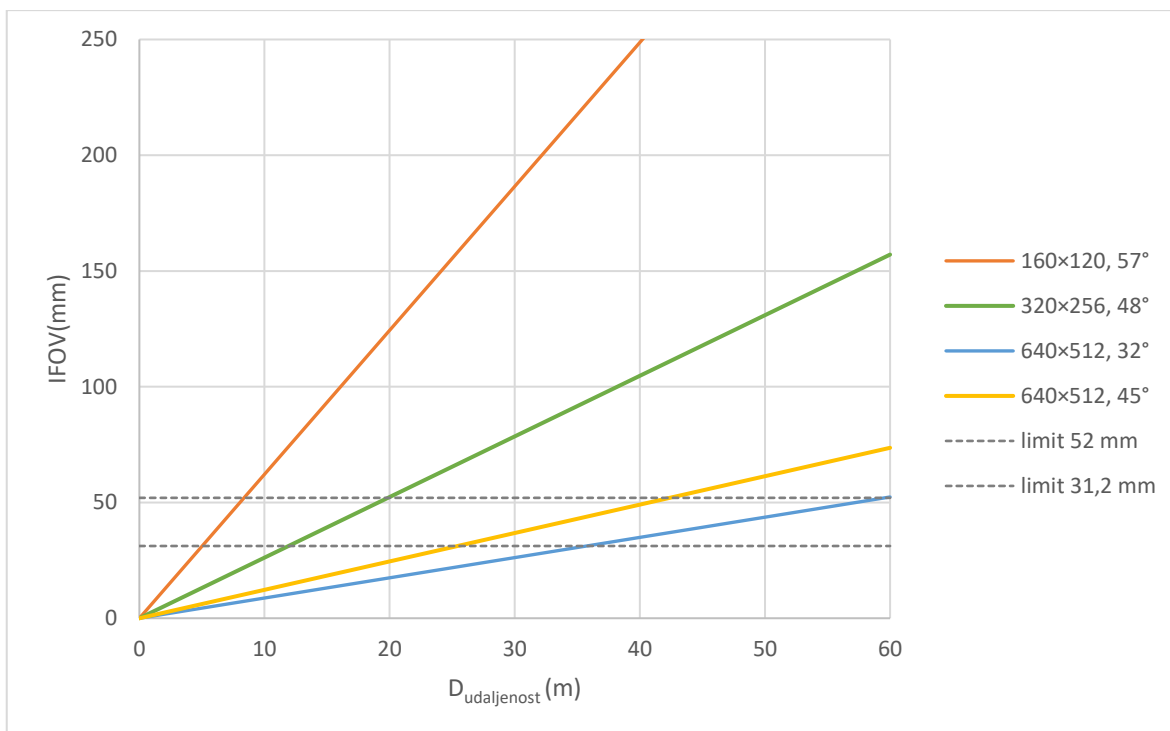


Sl. 3.21. Detektorski element, temperaturno mjerenje, IFOV i 3×IFOV [56].

Kut promatranja jednog detektorskog elementa je dosta mal, pa se IFOV može izračunati u milimetrima relacijom (3.14.).

$$IFOV(mm) = \left(\frac{IFOV(rad)}{1000} \right) \cdot D_{udaljenost} \quad (3.14.)$$

Na slici 3.22. prikazan je IFOV(mm) za rezolucije termografskih kamera koje su analizirane, a izračunat je uz pomoć formula (3.13.) i (3.14.), u ovisnosti od udaljenosti mjernog objekta. Također je prikazan IFOV(mm) za kameru rezolucije 320×256 zbog česte pojave kamera te rezolucije (FLIR A35 termografska kamera [6]). Zbog dimenzija fotonaponskog članka 156 mm × 156 mm, rezolucija mjerenja je 52 mm za trostruku i 31,2 mm za peterostruku vrijednost IFOV-a (vidjeti formule (3.15.) i (3.16.)).



Sl. 3.22. IFOV u ovisnosti o visini leta za rezolucije 160×120 , FOV 57° ; 320×256 , FOV 48° ; 640×512 , FOV 32° ; 640×512 , FOV 45° ; te najdalja moguća udaljenost objekta $D_{udaljenost}$ za IFOV = 52 mm i 31,2 mm.

$$IFOV_{max} = \frac{IFOV_{Mjerenog\ elementa}}{3} = \frac{156}{3} = 52\text{ mm} \quad (3.15.)$$

$$IFOV_{max} = \frac{IFOV_{Mjerenog\ elementa}}{5} = \frac{156}{5} = 31,2\text{ mm} \quad (3.16.)$$

Iz grafa 3.22. se može zaključiti sljedeće:

- Niža rezolucija kamere uvjetuje nižu visinu leta.
- Niža rezolucija utječe na vrijeme trajanja leta jer se snima manja površina.
- Visina leta i rezolucija su linearno ovisni.
- U slučaju istih rezolucija viša visina leta je potrebna za kameru manjeg FOV-a.

U radu su analizirane tri termografske kamere rezolucije 640×512 . To su Flir Vue pro, DJI Zenmuse XT Thermal Camera i Worskswell Wiris. Flir Vue pro je više nego dvostruko jeftinija i lakša kamera od DJI Zenmuse XT kamere, a više nego trostruko jeftinija i lakša od Worskswell Wiris kamere. Iako ima manju točnost, Flir Vue pro kamera je dovoljno dobra za poslove održavanja FN elektrana. Zajedno s dronom DJI S900 predstavlja optimalnu kombinaciju drona i termografske kamere od svih navedenih.

3.4.2. Izvođenje inspekcije

Nakon utvrđivanja opravdanosti izvođenja zračne inspekcije i određivanja potrebne visine leta, poželjno je odraditi inspekciju po međunarodnom standardu za vanjsko termografsko ispitivanje FN elektrana – IEC 62446-3.

IEC 62446-3 opisuje važnost okolišnih uvjeta u vrijeme izvođenja inspekcije. Oni uključuju sunčevo zračenje, temperaturu i radno stanje postrojenja.

Prema IEC 62446-3 inspekcija bi se trebala izvoditi pod uvjetima iz tablice 3.13.

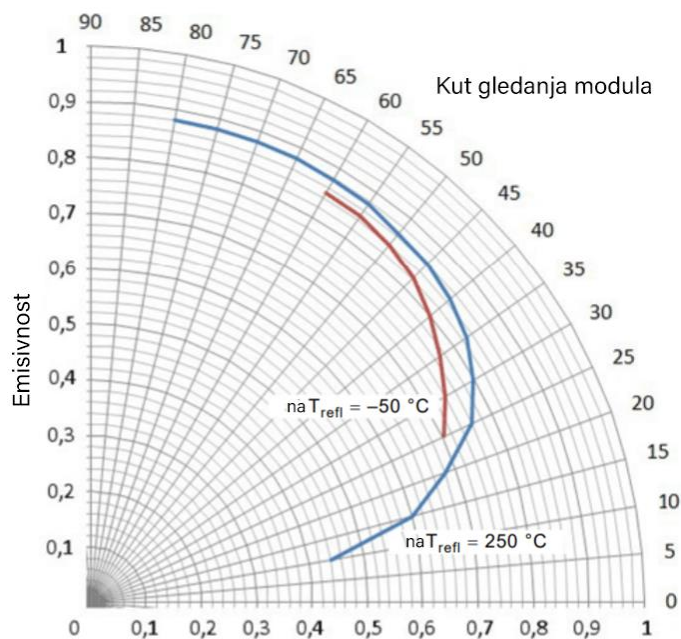
3.13. Potrebni uvjeti inspekcije.

| Parametri | Ograničenja |
|------------------|---|
| Sunčevo zračenje | <ul style="list-style-type: none">• Minimum od 600 W/m^2 na površini FN modula za inspekciju• Izmjerena radna struja mora biti najmanje 30% od nazivne struje sustava |
| Brzina vjetra | Najviše 28 km/h |
| Oblačnost | Najviše 2 okta neba pokriveno kumulnim oblacima |
| Prljanje | Nikakvo ili malo. Preporučeno čišćenje. |

Uz okolišne uvjete, pravilno pozicioniranje potrebno je, ne samo u kontekstu razlučivosti, nego i zbog drugih fizičkih uvjeta.

Emitirano toplinsko zračenje s objekta zavisi od stanja njegove površine i kuta. Na slici 3.23. je prikazana ovisnost emisivnosti o kutu gledanja termografske kamere. T_{refl} predstavlja ekvivalentnu temperaturu neba za crno tijelo (okolišna temperatura). Slika 3.23. pokazuje da se emisivnost smanjuje sa smanjenjem kuta gledanja. Iz tog razloga je važno uslikati termografske slike FN sustava pri konstantnom kutu kako bi se osigurala dobra usporedivost pojedinih termografskih slika.

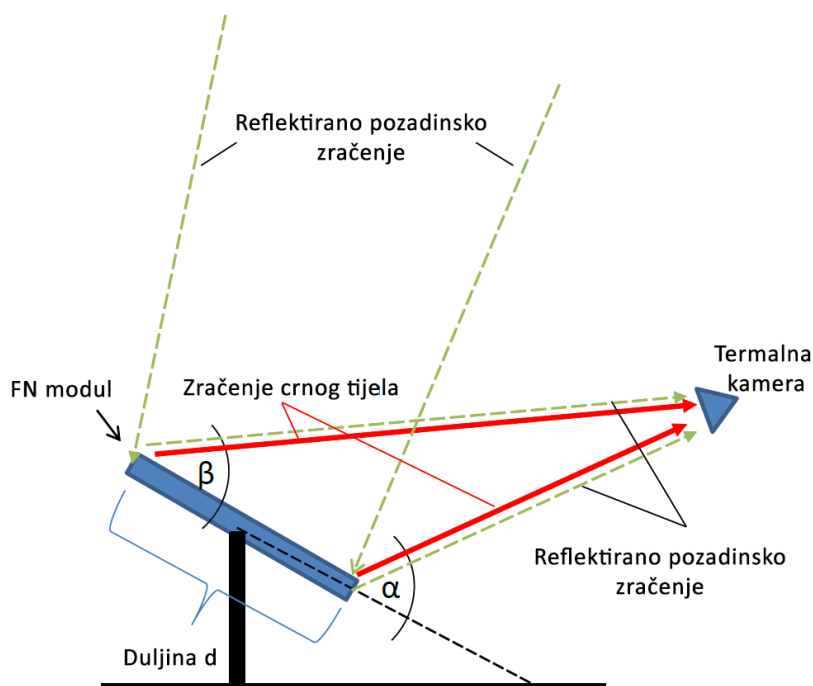
Na staklu bez udjela željeza emisivnost se smanjuje s kutom gledanja, pa je pri 45° emisivnost oko $\varepsilon = 0,8$, a na 30° oko $\varepsilon = 0,75$ ili manja.



Sl. 3.23. Ovisnost emisivnosti stakla i kuta gledanja [57].

Slika 3.24. ilustrira tipičnu postavu tijekom snimanja termografske slike FN modula. Kut gledanja α i β kamere između modula i detektora kamere varira. Ovisno o kutovima i duljini objekta d , efekt na zabilježenu temperaturu na termografskoj slici može biti značajan.

Razlog je taj što termografska kamera uvijek prima zračenje iz najmanje dva izvora. Unutar termografske slike FN modula sadržana je radijacija crnog tijela modula (crvene strelice) te reflektirano pozadinsko zračenje (zelene isprekidane strelice) [58].



Sl. 3.24. Zračenje crnog tijela i reflektirano pozadinsko zračenje[14].

Istodobno treba izbjegavati samorefleksiju osobe ili drona koji nose termografsku kameru. Također treba izbjegavati refleksiju zagrijanih objekata poput sunca, obližnjih zgrada ili drveća. Kako bi se minimizirao efekt reflektivne okoline preporučuje se da su α i $\beta > 30^\circ$.

U području elektrotehnike ne postoji sporazumni standard procjene sigurnosti opreme na temelju infracrvenog snimanja, a najčešće se koristi ΔT kriterij. Trenutačno postoji više od 30 organizacija koje imaju vlastite metodologije održavanja na osnovu ΔT kriterija [59]. Najpoznatija je metodologija Međunarodne udruge za električna testiranja NETA (Inter National Electrical Testing Association). U tablici 3.14. predložene su radnje temeljene na temperaturnim razlikama između sličnih komponenti i temperaturnim razlikama između komponenti i zraka.

3.14. Preporučene radnje na temelju temperaturnih razlika [60].

| Temperaturna razlika (ΔT) sličnih komponenti pod sličnim opterećenjem | Temperaturna razlika (ΔT) komponenti i zraka | Preporučene radnje | Prioritet |
|---|--|--|-----------|
| 1° C - 3° C | 1° C - 10° C | Moguć defekt; zahtjeva istragu | 4 |
| 4° C - 15° C | 11° - 20° C | Ukazuje na vjerojatan defekt; korektivne radnje poduzeti kada raspored dopusti | 3 |
| ----- | 21° - 40° C | Pratiti sve dok korektivne mjere ne mogu biti ostvarene | 2 |
| > 15° C | > 40° C | Velika odstupanja; odmah popraviti | 1 |

3.4.3. Alternativne metode inspekcija FN elektrane

- Vizualna inspekcija

Vizualna inspekcija se provodi tako što se svaki dio FN modula pregleda i dokumentira zasebno. Standardi za vizualnu inspekciju IEC 61215 i 61646 zahtijevaju osvjetljenje veće od 1000 lx tijekom vizualnog pregleda, a uzimaju se u obzir samo defekti koji se mogu otkriti golim okom. Uvjeti defekata prikazani su u tablici 3.15.

3.15. Tipični defekti i kvarovi koji se mogu pronaći tijekom vizualnog pregleda IEC 61215, 61646.

| Komponenta FN modula | Defekti i kvarovi FN modula |
|--------------------------|--|
| Prednja strana FN modula | Mjehurići, delaminacija, promjena boje |
| FN članak | Slomljen članak, napuknut članak |
| Metalizacija članaka | Spaljena, oksidirana |

| | |
|------------------------|---|
| Okvir | Savinut, slomljen, izguban, krivo poravnan |
| Stražnja strana modula | Mjehurići, delaminacija, promjena boje, ogrebotine, tragovi gorenja |
| Razvodna kutija | Neučvršćena, oksidirana, korozivna |
| Žice - konektori | Odspojeni, lomljivi, otkriveni električni dijelovi |

- I-U mjerenja

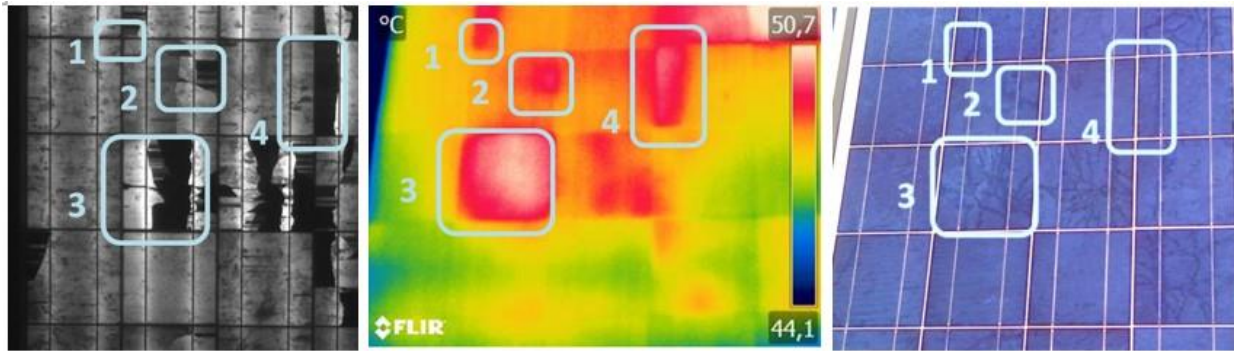
I-U mjerenja se koriste za određivanje I-U karakteristike FN modula. Proučavanjem karakteristika može se otkriti promjena u načinu rada FN modula uzrokovana vremenskim uvjetima i/ili zbog postojanja defekata poput delaminacije, električne nepodudarnosti, defektivne prenosne diode itd. Provjeravaju se devijacije između dobivene I-U karakteristike i referentne koju u dokumentaciji osigura proizvođač. I-U karakteristike najčešćih defekata prikazane su u poglavlju 3.1. u tablici 3.2.

- Elektroluminiscencija (EL)

Fotonaponski moduli dizajnirani su tako da optimiziraju apsorpciju sunčeve svjetlosti i pretvaraju je u električnu energiju. Stoga, na temelju reciprociteta, mogu emitirati fotone nakon stimuliranja, a to je princip elektroluminiscencije. Ova tehnika se sastoji od primjene istosmjerne struje na modul i mjerenje rezultirajuće fotoemisije korištenjem infracrvene kamere. U principu, mračna područja odgovaraju oštećenim zonama uzrokovanim raznim defektima, dok svjetla i bistra odgovaraju nedirnutim zonama.

EL snimanje vrši se u mračnom okruženju jer je količina infracrvenog zračenja blizu 1150 nm, koje emitira FN modul, mala u usporedbi s emitiranim zračenjem pozadinskog osvjetljenja.

Usporedba EL, termografske i vizualne slike defektnog FN modula prikazana je na slici 3.25.



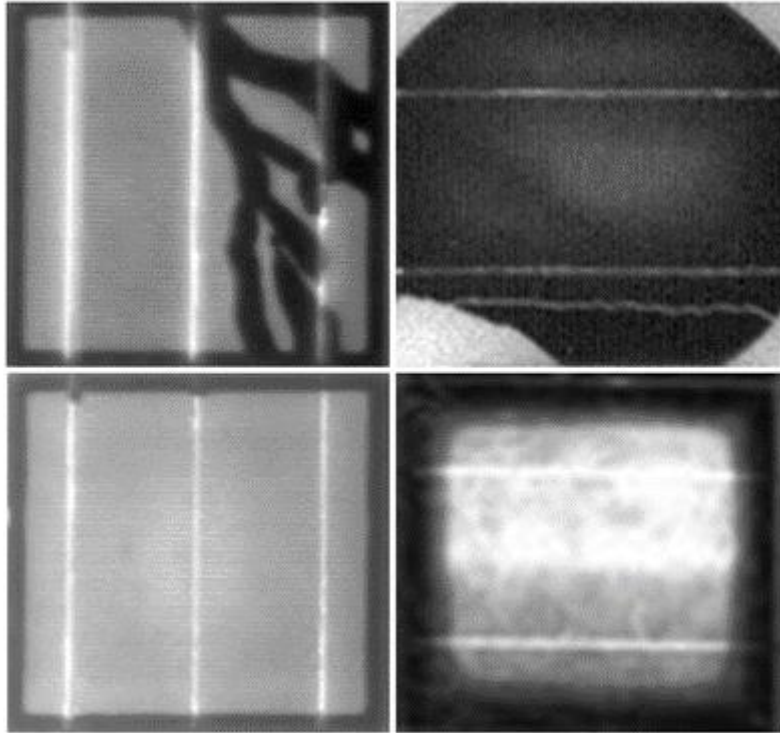
Sl. 3.25. EL, termografska i vizualna slika defektnog dijela FN modula [61].

- UV fluorescencija (FL)

UV fluorescencija se oslanja na efekte fluorescencije polimernog materijala za laminiranje u FN modulu. To je tipično etilen-vinil acetat (EVA) pomiješan s raznim dodacima poput stabilizatora oksidacije, UV apsorbera i umreživača molekula. Zbog izloženosti sunčevoj svjetlosti molekule u enkapsulatnu se razgrađuju u luminofore. Fluorescencija je oblik luminiscencije, koja je emisija svjetlosti aktiviranog materijala, koji je upio svjetlost ili ostalo elektromagnetsko zračenje [62]. Ovom metodom moguće je otkriti pukotine na fotonaponskim člancima i one će biti prikazane kao tamne trake na FL slici te će biti lakše za identifikaciju od EL slike.

Za FL snimanje, može se koristiti niz izvora crne svjetlosti za pobuđivanje luminofora u EVA-u. Crna svjetiljka treba emitirati svjetlost valne duljine u rasponu od 310 nm do 400 nm. Većina fotona valne duljine veće od 350 nm apsorbirati će se u prednjem staklu većine modula i neće doći do materijala za lamiranje. Izvor svjetlosnog zračenja stvara na površini modula svjetlosno zračenje od oko 10 do 100 W/m². Materijal enkapsulanta fluorescira u intervalu valnih duljina od 400 nm do približno 800 nm [2].

Primjer FL slika prilikom inspekcije članaka FN modula prikazan je na slici 3.26.



Sl. 3.26. FL slike članka FN modula; redom: puknuće članka, izolirani dio članka, ispravan članak, odspojene veze članka[27].

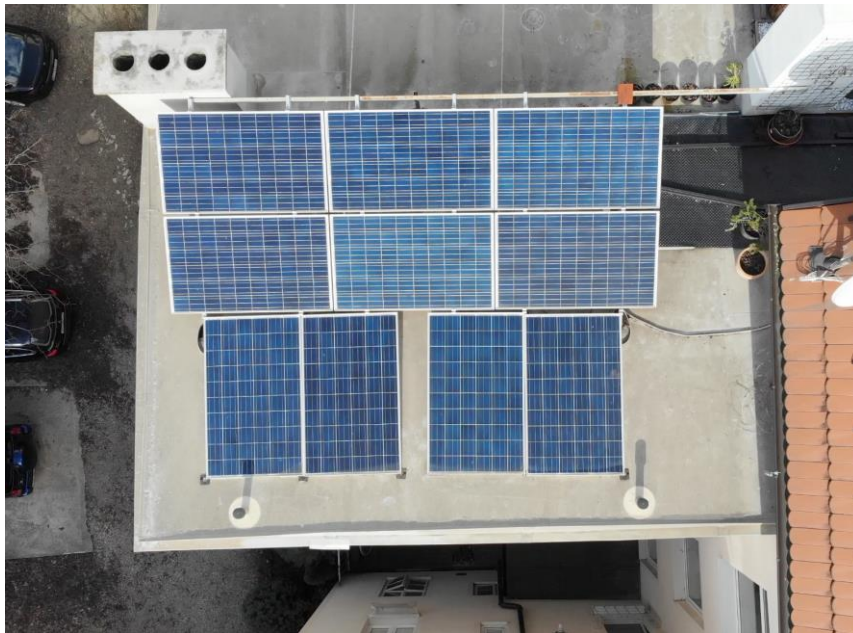
3.5. Izvedivost rasporeda

Izvedivost rasporeda je zadnji aspekt TELOS analize. On analizira vjerojatnost da se projekt izvede u nekom vremenskom roku.

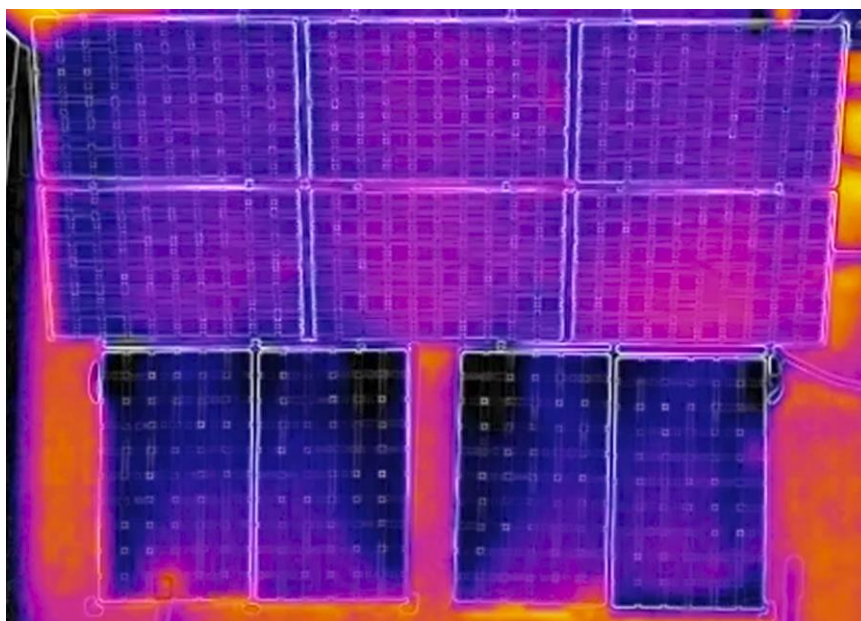
S izvođenjem projekta se praktički može početi odmah jer se dron i termografska kamera mogu naručiti putem internetskih trgovina s dostavom na područje cijele Hrvatske unutar par radnih dana. U slučaju da se ne može zadovoljiti vremenski rok same inspekcije, moguća su rješenja poput slanja još jednog bespilotnog zrakoplova s termografskom kamerom, ili, ako to uvjeti dopuštaju, termografski pregled sa zemlje. Također je potrebno obratiti pažnju na vremensku prognozu jer je inspekciju moguće vršiti samo ako vremenski uvjeti dopuštaju siguran let dronu.

4. PREGLED SNIMKE MALE FOTONAPONSKE ELEKTRANE DRONOM KROZ SEGMENTE TELOS ANALIZE

Za izradu ovog diplomskog rada tvrtka HexaWorx ustupila je vizualnu i termografsku snimku male FN elektrane upotrebom drona. U svrhu zaštite prava naručitelja usluge, nisu dostupne informacije o maloj FN elektrani, osim onih vidljivih na ustupljenom videozapisu. Snimka je izvršena 12. veljače 2019. u nepoznato vrijeme na nepoznatoj lokaciji u Zagrebu. Mala FN elektrana koja je snimljena prikazana je na slici 4.1., a njena termografska slika na slici 4.2.



Sl. 4.1. Mala FN elektrana.



Sl. 4.2. Termografska slika male FN elektrane.

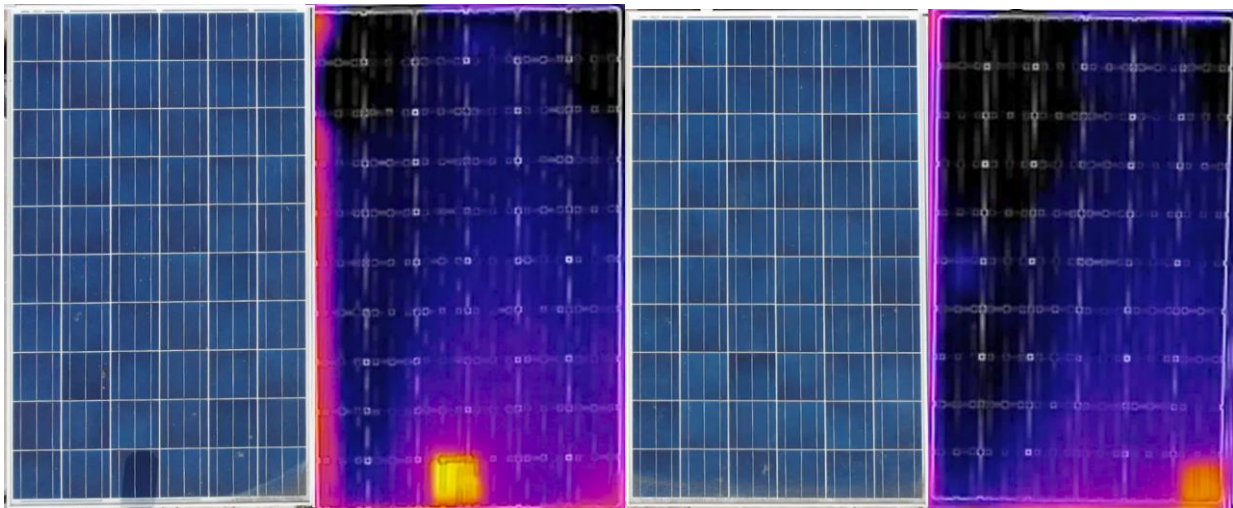
4.1. Tehnološka izvedivost

Za izvođenje snimanja korišten je dron DJI Mavic 2. Isti je prikazan na slici 4.3.



Sl. 4.3. Kvadkopter DJI Mavic 2 Enterprise Dual [63].

Dron DJI Mavic 2 Enterprise Dual ima integriranu termografsku kameru rezolucije 160×120 piksela, horizontalnog vidnog polja 57° i temperaturnog raspona od -10°C do $+140^\circ\text{C}$. Ostale specifikacije prikazane su u potpoglavlju 3.2. u tablici 3.4.



Sl. 4.5. FN moduli s efektom žarišta. Prvi u trećem redu (lijevo) i treći u trećem redu (desno).

Na slici 4.5. prikazani su FN moduli na kojima su vidljiv efekt žarišta. Termografska kamera korištena za snimanje male FN elektrane nije radiometrijska, što znači da temperaturne razlike prikazuje različitim bojama, ali ne pruža informaciju kolika je temperatura na svakoj željenoj točki.

Na lijevom FN modulu sa slike 4.5. uzrok žarišta je lako ustanoviti. Fotonaponski članak je zasjenjen stupićem koji se jasno vidi na slici 4.1. Termalni uzorak odgovara termalnom uzorku zasjenjenja iz tablice 3.2. Zasjenjene će dovesti do smanjenja otpora šanta R_p i povećanja otpora serije R_s . Napon praznog hoda U_{PH} i napon U_{MPP} će se smanjiti, kao i izlazna snaga P_{IZL} .

Desni FN modul sa slike 4.5. također ima žarište. Za razliku od lijevog FN modula, uzrok žarišta nije moguće identificirati. Vidljivo je da desni ima određenu razinu prljanja, ali imaju ga i svi ostali moduli s tim da kod njih nisu zabilježena žarišta. Nisu vidljivi tragovi optičke degradacije i mehaničkih oštećenja. Preostali mogući uzroci su mikropukotine koje se zbog rezolucije ne vide na slici ili kratko spojeni članci. Idealno rješenje bi bilo provesti I-U mjerenja na FN modulu, te bi se nakon toga, proučavanjem I-U karakteristike, mogao utvrditi točan uzrok defekta.

4.2. Ekonomska izvedivost

Prilikom inspekcije korišten je dron DJI Mavic 2. Njegova cijena na hrvatskom tržištu je 20.499,00 kn [41]. Videozapis inspekcije traje nekoliko minuta i pretpostavka je da je cijena iznosila 200,00 kn. Iz tablice 3.5. vidljivo je da je vrijeme povrata investicije 0,31 godine pri korištenju odabranog drona, što je malo više od 3 i pol mjeseca.

4.3. Pravna izvedivost

Pregledom potpoglavlja 3.3 vidljivo je da je let drona prilikom inspekcije izveden prema svim važećim propisima Republike Hrvatske za korištenje zračnog prostora bespilotnim zrakoplovima. Dron je letio danju na dovoljnoj udaljenosti od najbližeg aerodroma. Horizontalna udaljenost od ljudi koji nisu uključeni u operacije nije bila manja od visine leta i dron je bio u načinu rada pri maloj brzini. Nalazio se unutar vidnog polja pilota na daljinu tijekom cijele inspekcije. Uzimajući u obzir težinu drona iz tablice 3.3., pregledom tablice 3.11., vidljivo je da je kategorija letačkih operacija B1. Ako je dron imao neku dodatnu opremu, čime bi mu težina prešla 900g, tada bi kategorija letačkih operacija bila B2.

4.4. Operativna izvedivost

Sa slike male FN elektrane 4.1. vidljivo je da je riječ o elektrani koja se nalazi na krovu građevine od par katova. Budući da je riječ o teško pristupačnom mjestu, korištenje drona je opravdano.

Preporučena visina leta drona DJI Mavic 2 je maksimalno 5,02 m za peterostruku, a 8,36 m za trostruku vrijednost IFOV-a, računanjem udaljenosti iz relacije (3.14.) u potpoglavlju 3.4.

Nije vidljivo je li inspekcija potpuno izvedena prema uvjetima IEC 62446-3, iz tablice 3.13. Brzina vjetra je vjerojatno zadovoljavajuća jer na snimci nije vidljivo pomjeranje grana biljaka ili nekih drugih indikatora vjetra. Prljanje FN modula je malo, ali postojeće. Sunčevo zračenje i oblačnost nije moguće prepoznati iz dobivene snimke.

Za oba modula nije moguće poduzeti preporučene radnje iz tablice 3.14. jer se iz snimke ne mogu utvrditi razlike u temperaturama komponenata, čime se ovaj videozapis ne može samostalno koristiti u svrhu održavanja FN elektrane.

4.5. Izvedivost rasporeda

Dobivene video snimke inspekcije traju 1 minutu i 10 sekundi. Iz tako kratkog videozapisa očitane su okvirne informacije o stanju 10 različitih FN modula. Korištenje radiometrijske kamere oduzelo bi jednako vremena što bi ovaj oblik inspekcije činilo vrlo vremenski efikasnim i potvrdilo tvrdnje iz tablice 3.12.

4.6. Primjer korištenja radiometrijske kamere

Kako dobivena snimka nije snimljena radiometrijskom kamerom koja bi omogućila detaljniju inspekciju FN elektrane, prikazat će se primjer korištenja radiometrijske kamere na FNE FERIT 1 iz diplomskog rada Bićanić Ines [5].

Inspekcija je izvedena 25. svibnja 2018. u 11:28 h. Uređajem za mjerenje sunčevog zračenja Seaward Solar Survey 200 utvrđeno je zračenje od 1030 W/m^2 koje je dovoljno za provođenje inspekcije prema uvjetima iz tablice 3.13. Izgled neba i sam uređaj prikazani su na slici 4.4.

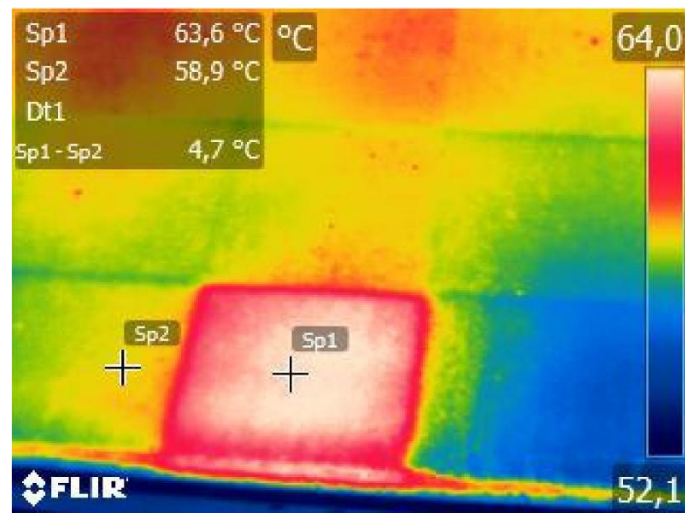


Sl. 4.4. Izgled neba pri dozračenosti od 1030 W/m^2 [5]

Nije zadovoljen uvjet o maksimalnoj prekrivenosti neba kumulativnim oblacima iz tablice 3.13., ali je inspekciju bilo moguće provesti u periodima kada se sunce probijalo kroz oblake i sučevo zračenje bilo dovoljno jako.

Za izvođenje same inspekcije korištena je termografska kamera FLIR E6, rezolucije 160×120 piksela, vidnog polja 45°×34°, temperaturnog raspona od -20°C do +250°C, termalne osjetljivosti <50 mK i točnosti ± 2% ili ± 2°C.

Inspekciji se pristupilo tako što se pregledala veća površina elektrane s ciljem lociranja anomalija, a potom je urađena inspekcija modula na kojima su primijećene. Na jednom je zabilježeno žarište koje je prikazano na slici 4.5.



Sl. 4.5. Uočeno žarište na FN modulu FNE FERIT 1 [5].

Na termografskoj slici žarišta prikazana je razlika u temperaturi, a usporedbom s tablicom 3.14., zaključuje se da je riječ o kategoriji trećeg prioriteta u održavanju s ΔT od 4° C do 15° C. Korektivne radnje je bilo potrebno poduzeti kada raspored dopusti, što je naposljetku i učinjeno. Provođitelji inspekcije su nakon vizualnog pregleda donijeli pretpostavku da je uzrok žarišta kontaminacija površine pijeskom. Njihova sumnja je bila opravdana jer termalni uzorak prljanja (zasjenjenja) iz tablice 3.2. odgovara onom sa slike 4.5. Tada su proveli čišćenje ispiranjem vodom nakon čega se razlika u temperaturama smanjila na neznatnu, a termalni uzorak nestao.

Provođitelji inspekcije na FNE FERIT 1 su iznijeli stajalište da je termografska inspekcija najjednostavnija, a nekad i jedino moguća upotrebom drona što opravdava izradu ovog diplomskog rada.

5. ZAKLJUČAK

Jedan od načina dokazivanja održivosti nekog projekta je implementacija TELOS analize izvedivosti. Tri dijela TELOS analize se moraju zadovoljiti, a to su tehnička, ekonomska i pravna izvedivost. Iz tehničke perspektive, sve tehnologije, koje se koriste prilikom održavanja fotonaponske elektrane dronom, dobro su poznate. Infracrvena termografija je korisna za otkrivanje defekata na FN elektranama jer se njome problemi lako lokaliziraju i klasificiraju. Združivanjem infracrvene termografije s dronom dobiva se snažan alat za brze, pouzdane i sigurne inspekcije, pogotovo jer su svi eventualni defekti otprije poznati i analizirani, te će uzrokovati očekivana ponašanja FN sustava. Tehnička struka često koristi jednostavan proračun razdoblja povrata investicije koji pokazuje kada se novčani tok mijenja iz negativnog u pozitivan. Računanjem neto sadašnje vrijednosti, interne stope povrata i povrata ulaganja upotpunjuje se ekonomska izvedivost. S aspekta pravne izvedivosti potrebno je poznavati propise o upravljanju i korištenju bespilotnih zrakoplova u Republici Hrvatskoj koji su podložni promjenama. Operativna izvedivost predstavila je uvjete za izvođenje inspekcije po IEC 62446-3 standardu, te dala prijedloge reagiranja na uočene temperaturne razlike po metodologiji Međunarodne udruge za električna testiranja. Također su razmotrene opcije vizualne i I-U inspekcije, te korištenje elektroluminiscencije i UV fluorescencije. Sve potrebno za provođenje termografskih inspekcija dronom dostupno je na hrvatskom tržištu, čime je zadovoljena vremenska izvedivost jer projekt može početi s izvođenjem odmah po kupovini opreme.

Prilikom analiziranja termografskog videozapisa male FN elektrane dronom, koji je ustupila tvrtka HexaWorks za izradu ovog rada, utvrđeno je da je snimljen neradiometrijskom kamerom. Samim time nije dovoljno dobar da se koristi u svrhe održavanja FN elektrane, jer nije moguće utvrditi razlike u temperaturi, a potom poduzeti konkretne korektivne radnje. Ipak, moguće je pretpostaviti o kojim defektima je riječ prepoznavanjem termalnih uzoraka. Moguće rješenje je kombinirati saznanja iz neradiometrijske snimke sa I-U mjerenjima, čime bi se dobio bolji uvid u defekte na modulima. Naposljetku se stvorila potreba prikazati primjer inspekcije radiometrijskom kamerom, prilikom čega su korišteni materijali iz diplomskog rada Bićanić Ines gdje je analizirana FNE FERIT 1.

LITERATURA

- [1] C. Paravalos, E. Koutroulis, V. Samoladas, T. Kerekes, D. Sera, i R. Teodorescu, „Optimal Design of Photovoltaic Systems Using High Time-Resolution Meteorological Data“, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, sv. 10, izd. 4, str. 2270–2279, stu. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2322814.
- [2] M. Köntges i ostali, *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. International Energy Agency 2014.
- [3] F. Grimaccia, M. Aghaei, M. Mussetta, S. Leva, i P. Quater, „Planning for PV plant performance monitoring by means of unmanned aerial systems (UAS)“, *Int. J. Energy Environ. Eng. IJEEE Springer J. Open Access*, stu. 2014, doi: 10.1007/s40095-014-0149-6.
- [4] B. Šerman, H. Glavaš, M. Vukobratović, i Z. Kraus, „TELOS Feasibility Analysis of Photovoltaic Power Plant“, *Appl. Eng. Lett.*, sv. 2, izd. 3, str. 91–97, 2017.
- [5] I. Bićanić, „Infracrvena termografija u održavanju fotonaponske elektrane“, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2020.
- [6] M. Aghaei, F. Grimaccia, C. A. Gonano, i S. Leva, „Innovative Automated Control System for PV Fields Inspection and Remote Control“, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, sv. 62, izd. 11, str. 7287–7296, stu. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2475235.
- [7] M. Lanz, E. Schüpbach, i U. Muntwyler, „Infrared (IR) Drone for Quick and Cheap PV Inspection“, *31st Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, str. 1804–1806, stu. 2015, doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-5CO.15.6.
- [8] T. Kauppinen, P.-E. Panouillot, S. Siikanen, E. Athanasakou, P. Baltas, i B. Nikopoulous, „About infrared scanning of photovoltaic solar plant“, *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*, svi. 2015, doi: 10.1117/12.2180165.
- [9] J. A. Tsanakas, L. D. Ha, i F. Al Shakarchi, „Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery“, *Renew. Energy*, sv. 102, str. 224–233, ožu. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.10.046.
- [10] P. Addabbo i ostali, „A UAV infrared measurement approach for defect detection in photovoltaic plants“, u *2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, lip. 2017, str. 345–350. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999594.
- [11] „Workswell-WIRIS_photovoltaic.pdf“. Pristupljeno: lip. 15, 2021. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.drone-thermal-camera.com/wp-content/uploads/2018/05/Workswell-WIRIS_photovoltaic.pdf

- [12] M. Libra, M. Daneček, J. Lešetický, V. Poulek, J. Sedlacek, i V. Beránek, „Monitoring of Defects of a Photovoltaic Power Plant Using a Drone“, *Energies*, sv. 12, str. 795, velj. 2019, doi: 10.3390/en12050795.
- [13] D. H. Lee i J. H. Park, „Developing Inspection Methodology of Solar Energy Plants by Thermal Infrared Sensor on Board Unmanned Aerial Vehicles“, *Energies*, sv. 12, izd. 15, Art. izd. 15, sij. 2019, doi: 10.3390/en12152928.
- [14] V. Harwardt, „Feasibility study on the automatic detection of faults in photovoltaic plants with unmanned aerial vehicles using low resolution thermographic cameras“, Friedrich-Alexander University Erlangen-Nuremberg Faculty of Engineering, Bayreuth, 2020.
- [15] P. G. Fahlstrom i T. J. Gleason, *Introduction to UAV Systems, Fourth Edition: Fahlstrom/Introduction to UAV Systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. doi: 10.1002/9781118396780.
- [16] wpj.cz, „DJI Inspire 2“, *Xtreme.eu*. https://www.xtreme.eu/dji-inspire-2_z1628/ (pristupljeno kol. 25, 2021).
- [17] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, i O. Duque-Perez, „Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 93, str. 566–579, lis. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.027.
- [18] J. Kim, J. Lee, J. Jeong, H. Kim, J. Park, i T. Kim, „SAN: Self-Adaptive Navigation for Drone Battery Charging in Wireless Drone Networks“, ožu. 2016, str. 248–251. doi: 10.1109/WAINA.2016.103.
- [19] H. Glavaš, M. Vukobratović, M. Primorac, i D. Muštran, „Infrared thermography in inspection of photovoltaic panels“, u *2017 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, lis. 2017, str. 63–68. doi: 10.1109/SST.2017.8188671.
- [20] „ReliabilityWebPresentation.pdf“. Pristupljeno: lip. 14, 2021. [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.laseralignment.net/images/ReliabilityWebPresentation.pdf>
- [21] Testo SE & Co. KGaA, *Thermography Pocket Guide*. Lenzkirch, Germany, 2017.
- [22] S. Cui, B. Sun, i X. Sun, „A method for improving temperature measurement accuracy on an infrared thermometer for the ambient temperature field“, *Rev. Sci. Instrum.*, sv. 91, izd. 5, str. 054903, svi. 2020, doi: 10.1063/1.5121214.
- [23] „ifov.png (712×408)“. <https://www.flir.com/globalassets/industrial/discover/professional-tools/ifov.png> (pristupljeno ruj. 06, 2021).
- [24] Y. Jo, C. Lee, i J. H. Yoo, „Study on Applicability of Passive Infrared Thermography Analysis for Blistering Detection of Stone Cultural Heritage“, *J. Korean Conserv. Sci. Cult. Prop.*, sv. 29, ožu. 2013, doi: 10.12654/JCS.2013.29.1.06.

- [25] K. Mertens, *Photovoltaics : fundamentals, technology and practice*. Nashville, TN: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [26] D. Šljivac, „Fotonaponski Sustavi“, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2019.
- [27] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, i K. Kato, *Performance and reliability of photovoltaic systems: subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules: IEA PVPS task 13: external final report IEA-PVPS*. Sankt Ursen: International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme, 2014.
- [28] J. A. Tsanakas, L. Ha, i C. Buerhop, „Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules: A review of research and future challenges“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 62, str. 695–709, ruj. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.079.
- [29] „Shattering-02-Solar-Review.jpg (1920×1200)“. <https://g7solar.vn/image/catalog/tin-tuc/come-lap-dien-mat-troi/Shattering-02-Solar-Review.jpg> (pristupljeno srp. 15, 2021).
- [30] S. Djordjevic, D. Parlevliet, i P. Jennings, „Detectable faults on recently installed solar modules in Western Australia“, *Renew. Energy*, sv. 67, str. 215–221, srp. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.11.036.
- [31] „Solar-Panel-Delamination-11-Solar-Review-1024x640.jpg (1024×640)“. <https://review.solar/wp-content/uploads/2018/10/Solar-Panel-Delamination-11-Solar-Review-1024x640.jpg> (pristupljeno srp. 15, 2021).
- [32] J. Wohlgemuth, M. Kempe, i D. Miller, „Discoloration of PV encapsulants“, lip. 2013, str. 3260–3265. doi: 10.1109/PVSC.2013.6745147.
- [33] A. Peled i J. Appelbaum, „Minimizing the current mismatch resulting from different locations of solar cells within a PV module by proposing new interconnections“, *Sol. Energy*, sv. 135, str. 840–847, lis. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.016.
- [34] E. Forniés, F. Naranjo, M. Mazo, i F. Ruiz, „The influence of mismatch of solar cells on relative power loss of photovoltaic modules“, *Sol. Energy*, sv. 97, str. 39–47, stu. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.08.004.
- [35] M. Köntges, S. Kajari-Schröder, i I. Kunze, „Crack Statistic for Wafer-Based Silicon Solar Cell Modules in the Field Measured by UV Fluorescence“, *IEEE J. Photovolt.*, sv. 3, izd. 1, str. 95–101, sij. 2013, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2208941.
- [36] S. Meyer *i ostali*, „Snail Trails: Root Cause Analysis and Test Procedures“, *Energy Procedia*, sv. 38, str. 498–505, sij. 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.309.

- [37] P. B. Quater, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta, i M. Aghaei, „Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Cooperative Inspection of PV Plants“, *IEEE J. Photovolt.*, sv. 4, izd. 4, str. 1107–1113, srp. 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2323714.
- [38] J. Muñoz, E. Pigueiras, F. Martínez-Moreno, L. Marroyo, i M. García, „An Investigation into Hot-Spots in Two Large Grid-Connected PV Plants“, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, sv. 16, str. 693–701, pros. 2008, doi: 10.1002/pip.844.
- [39] M. Ebert, „Research Group ‚Reliability of Solar Modules and Systems‘- R&D Competencies“, stu. 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.1328.3280.
- [40] H. Pedersen, J. Strauss, i J. Selj, „Effect of Soiling on Photovoltaic Modules in Norway“, *Energy Procedia*, sv. 92, str. 585–589, kol. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.07.023.
- [41] „DJI Mavic 2 Enterprise Dual Universal Edition“, *DRONOVISHOP - DJI, YUNEEC i AUTEL dronovi i oprema*. <https://www.dronovishop.hr/dji-mavic-2-enterprise-dual/> (pristupljeno lip. 21, 2021).
- [42] V. S. C. Pro+, „DJI Inspire 2 without gimbal profesionalni dron quadcopter“, *CANOSA trgovina profesionalne fotografske i video opreme*. <https://www.canosa.com.hr/dji-inspire-2-without-gimbal-profesionalni-dron-quadcopter-108kmh-25-27min/6958265121944/product/> (pristupljeno lip. 21, 2021).
- [43] V. S. C. Pro+, „DJI Spreading Wings S900 + A2 Flight Controller Combo“, *CANOSA trgovina profesionalne fotografske i video opreme*. <https://www.canosa.com.hr/dji-spreading-wings-s900-a2-flight-controller-combo-dron-professional-aircraft-multi-rotor-hexacopter/03013566/product/> (pristupljeno lip. 21, 2021).
- [44] V. S. C. Pro+, „DJI Spreading Wings S1000+ A2 Flight Controller Combo“, *CANOSA trgovina profesionalne fotografske i video opreme*. <https://www.canosa.com.hr/dji-spreading-wings-s1000-a2-flight-controller-combo-octocopter-dron-professional-aircraft-multi-rotor/03013527/product/> (pristupljeno lip. 21, 2021).
- [45] „Workswell WIRIS Gen.2“ thermal imaging camera for drones, 640 x 512 pixels, 13mm“. <https://www.aviteh.hr/workswell-wiris-gen-2.html> (pristupljeno lip. 22, 2021).
- [46] „FLIR Vue Pro R 640 19 mm 9Hz“. <https://www.aviteh.hr/flir-vue-pro-r-640-19-mm-9hz.html> (pristupljeno lip. 22, 2021).
- [47] „DJI Zenmuse XT Thermal Camera ZXTA13SP 640x512 9Hz (Slow frame) Lens 13mm objektiv termovizijska kamera (point temperature measurement model)“. <https://www.canosa.com.hr/dji-zenmuse-xt-thermal-camera-zxta13sp-640x512-9hz-slow-frame-lens-13mm-objektiv-termovizijska->

- kamer/ZXTA13SP/product/?utm_source=jefciniye&utm_medium=products&utm_campaign=jefciniye_products&utm_content=pp_16 (pristupljeno lip. 22, 2021).
- [48] I. Pavrišek, „Primjena drona u energetskom pregledu“, završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2018.
- [49] Državni hidrometeorološki zavod, „Srednje mjesečne vrijednosti i ekstremi“. https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci¶m=k1&Grad=osijek (pristupljeno srp. 11, 2021).
- [50] I. Mikić, „Ekonomika investicija“, Veleučilište u Požegi, Požega, 2011.
- [51] „SWOT analiza“, *Zagrebački inovacijski centar*. <https://www.zicer.hr/Poduzetnicki-pojmovnik/SWOT-analiza> (pristupljeno srp. 20, 2021).
- [52] Y. Zefri, A. ElKettani, I. Sebari, i S. Ait Lamallam, „Thermal Infrared and Visual Inspection of Photovoltaic Installations by UAV Photogrammetry—Application Case: Morocco“, *Drones*, sv. 2, str. 41, stu. 2018, doi: 10.3390/drones2040041.
- [53] REN21, „RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT“. <https://www.ren21.net/gsr-2021> (pristupljeno srp. 20, 2021).
- [54] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture Republike Hrvatske, „Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova“, *Narodne Novine 104/2018*, Zagreb, stu. 28, 2018.
- [55] N. M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano, i V. Jayaseelan, „On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants“, *Procedia Comput. Sci.*, sv. 133, str. 585–593, sij. 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.07.087.
- [56] „Temperature Guns Versus Thermal Imaging Technology“. <https://www.flir.eu/discover/rd-science/temperature-guns-versus-thermal-imaging-technology/> (pristupljeno lip. 24, 2021).
- [57] „Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography. IEC TS 62446-3“, *Int. Electrotech. Comm.*, lip. 2017.
- [58] B. Jaeckel, B. Weinreich, C. Buerhop, i U. Jahn, „OUTDOOR NON-DESTRUCTIVE INFRARED THERMOGRAPHY OF PHOTOVOLTAIC MODULES AND PLANTS FOR INSPECTION: IEC 62446-3“, lip. 2016.
- [59] H. Glavaš, L. Józsa, i T. Barić, „Infrared thermography in energy audit of electrical installations“, *Tehnički vijesnik* sv. 23, str. 1533–1539, lis. 2016, doi: 10.17559/TV-20150702185559.
- [60] InterNational Electrical Testing Association, *Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems i*. InterNational Electrical Testing

Association 3050 Old Centre Road, Suite 101 Portage, MI 49024: InterNational Electrical Testing Association, 2019.

- [61] A. Dolara, G. C. Lazaroiu, S. Leva, G. Manzolini, i L. Votta, „Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production“, *IEEE J. Photovolt.*, sv. 6, izd. 5, str. 1269–1277, ruj. 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2576682.
- [62] M. Köntges, A. Morlier, G. Eder, E. Fleiß, B. Kubicek, i J. Lin, „Review: Ultraviolet Fluorescence as Assessment Tool for Photovoltaic Modules“, *IEEE J. Photovolt.*, sv. 10, izd. 2, str. 616–633, ožu. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2961781.
- [63] „dji-mavic2-enterprise-dual-01.png (650×650)“. <https://www.dronovishop.hr/wp-content/uploads/2019/02/dji-mavic2-enterprise-dual-01.png> (pristupljeno srp. 11, 2021).

SAŽETAK

Ključne riječi: TELOS (izvedivost), dron, NDT (kontrola bez razaranja), infracrvena kamera, održavanje FN sustava

U ovom diplomskom radu objašnjeni su osnovni principi TELOS analize kroz primjer primjene drona u održavanju fotonaponske elektrane. Za navedeni primjer je odrađena studija tehnološke, ekonomske, pravne, organizacijske i rasporedne izvedivost. Po završetku studije pregledana je snimka male fotonaponske elektrane snimljena dronom, te je za istu retrospektivno provedena okvirna TELOS analiza.

ABSTRACT

Title: TELOS analysis of drone application in photovoltaic power plant maintenance

Key words: TELOS (feasibility), drone, NDT, infrared camera, PV system maintenance

The basic principles of TELOS analysis are explained in this master thesis through the example of drone application in the maintenance of photovoltaic power plant. A study of technological, economic, legal, organizational and scheduling feasibility was conducted for this example. After the completion of the study, the recording of a small photovoltaic power plant taken by drone was examined, and a preliminary TELOS analysis was carried out retrospectively.

ŽIVOTOPIS

Andrija Kristić završio je Osnovnu školu Kiseljak 2011. i iste godine upisuje Franjevačku klasičnu gimnaziju u Visokom. Srednju školu završava 2015. godine i upisuje se na sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Diplomski studij elektrotehnike, smjer energetika, a izborni blok elektroenergetskih sustava upisuje 2018. na istom fakultetu.

Potpis autora