

SVOJSTVA, PRIMJENA I ZAŠTITA OD INFRACRVENOG ZRAČENJA

Zorko, Petra

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:420333>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu

Odjel sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Petra Zorko

SVOJSTVA, PRIMJENA I ZAŠTITA OD INFRACRVENOG ZRAČENJA

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2020.

Karlovac University of Applied Sciences
Safety and Protection Department
Professional graduate study of Safety and Protection

Petra Zorko

**PROPERTIES, APPLICATION AND
PROTECTION AGAINST INFRARED
RADIATION**

Final paper

Karlovac, 2020.

Veleučilište u Karlovcu
Odjel sigurnosti i zaštite
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Petra Zorko

SVOJSTVA, PRIMJENA I ZAŠTITA OD INFRACRVENOG ZRAČENJA

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Anamarija Kirin, mag. ing. inf. et comm. techn.

Karlovac, 2020.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2020.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Petra Zorko

Matični broj: 0422418021

Naslov: Svojstva, primjena i zaštita od infracrvenog zračenja

Opis zadatka: U Završnom radu napisati svojstva ionizirajućeg i neionizirajućeg zračenja s posebnim naglaskom na infracrveno zračenje. Opisati primjenu i zaštitu od infracrvenog zračenja.

Koristiti se stručnom literaturom, radnim materijalima, Zakonima i Pravilnicima, ostalom stručnom literaturom i konzultirati se s mentorom. Završni rad izraditi sukladno Pravilniku VUKA.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

Ožujak, 2020.

Srpanj, 2020.

13.7.2020.

Mentor:
Anamarija Kirin

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

PREDGOVOR

Ovaj rad nastao je kao rezultat znanja stečenog tijekom školovanja i prikupljanja podataka i informacija o zračenju.

Zahvaljujem svojoj mentorici Anamariji Kirin koja me je svojim savjetima poticala i usmjeravala kako bi napisala kvalitetan diplomski rad.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima koji su mi pružili potporu tijekom studija.

Veliko hvala svima!

SAŽETAK

Infracrveno zračenje je dio spektra elektromagnetskog zračenja koji se nastavlja na crveni dio vidljivog spektra. U ovom radu se opisuju pojmovi vezani za infracrveno zračenje: ionizirajuće i neionizirajuće zračenje, toplina, emisivnost, infracrvena termografija, infracrvena kamera, detektori, zaštita. Pojašnjeno je koja su to neionizirajuća zračenja te njihove karakteristike. Radi lakšeg shvaćanja djelovanja zračenja, spomenuti su i zakoni poput Planckovog i Stefan Boltzmanovog. Opisana su svojstva infracrvene svjetlosti, vrste detektora infracrvenog zračenja, primjena infracrvenog zračenja i infracrvene termografije. Opisana je podjela i primjena u današnjem svijetu, te na kraju je objašnjeno kako se zaštititi od infracrvenog zračenja.

Ključne riječi: infracrveno zračenje, detektori, infracrvena termografija, primjena, zaštita

ABSTRACT

Infrared radiation is a part of electromagnetic radiation spectrum that extends from the red edge of the visible spectrum. This paper describes the terms related to infrared radiation: ionizing and non - ionizing radiation, heat, emissivity, infrared thermography, infrared camera, detectors. It is explained that non-ionizing radiation, and their characteristics. Laws such as Planck's and Stefan Boltzman's are also mentioned to make it easier to understand the effects of radiation. The properties of infrared light, types of infrared radiation detectors, the action of infrared radiation and infrared thermography are described. The classification and application in today's world is described, and finally it is explained how to protect yourself from infrared radiation.

Key words: infrared radiation, detectors, infrared thermography, application, protection

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Svojstva zračenja	2
2.1 Ionizirajuće zračenje	3
2.1.1 Alfa čestice	4
2.1.2 Beta čestice	4
2.1.3 Gama zračenje i X – zrake.....	5
2.2 Neionizirajuće zračenje	5
2.2.1 Ultraljubičasto zračenje	5
2.2.2 Vidljiva svjetlost	6
2.2.3 Mikrovalovi	6
2.2.4 Radiovalovi.....	7
2.2.5 Zračenje ekstremno niske frekvencije.....	8
3. Infracrveno zračenje	9
3.1 Zračenje crnog tijela	10
3.2 Svojstva infracrvenog zračenja.....	12
3.2 Interakcija infracrvenog zračenja s materijalima.....	13
3.3 Detektori infracrvenog zračenja	15
4. Primjena infracrvenog zračenja.....	18
4.1 Infracrvena termografija.....	19
4.1.1 Podjela termografije	20
4.1.2 Primjena IC termografije u medicini.....	21
4.1.3 Primjena u industriji.....	25
4.1.4 Primjena u elektrotehnici.....	26
4.2 Primjena u astronomiji	29
4.3 Infracrvena spektroskopija	30
4.4 Komunikacije	31
4.5 Primjena u sigurnosti i zaštiti	31
4.6 Primjena u meteorologiji.....	32

5. Zaštita od infracrvenog zračenja	34
6. Zaključak.....	37
LITERATURA.....	38
POPIS SIMBOLA.....	42
POPIS SLIKA	43
POPIS TABLICA.....	44

1. Uvod

Svijet u kojem danas živimo i radimo konstantno je izložen elektromagnetskim zračenjima. Elektromagnetsko zračenje je fizikalna pojava širenja električnih i magnetskih valova. Ovisno o frekvenciji, odnosno valnoj duljini spektar elektromagnetskog zračenja se dijeli na ionizirajuće i neionizirajuće zračenje. Neionizirajuće zračenje je dio spektra kojem pripadaju zračenja koja imaju zrake manje energije koje nisu dovoljno jake da ioniziraju atom. To su radiovalovi, mikrovalovi, vidljiva svjetlost, infracrvene i ultraljubičaste zrake. Zahvaljujući F.W. Herschelu koji je zapazio da u spektru Sunčeve svjetlosti područje koje se nastavlja na crveni dio spektra pokazuje najvišu temperaturu. Ljudskom oku to je zračenje nevidljivo, ali se može osjetiti putem topline na koži. Zbog toga infracrveno zračenje nazivamo još i toplinskim zračenjem. Kako bi razumjeli infracrveno zračenje nekog objekta vrlo nam je važno znati osnovne pojmove poput emisivnosti, topline, temperature. Pojam infracrvena termografija veže se uz infracrveno zračenje jer je to beskontaktna metoda za mjerenje temperature i njezine raspodjele na površini tijela te analizu dobivenih termograma. U ovom radu ćemo proći primjenu infracrvenog zračenja, njegova svojstva i zaštitu. Infracrveno zračenje ima veliku primjenu jer gotovo da i nije štetno za čovjeka i za okoliš. Na zdravlje čovjeka može utjecati samo uz dugotrajno izlaganje, ali postoje različite mjere i zaštite koje sprječavaju kako do toga nebi došlo.

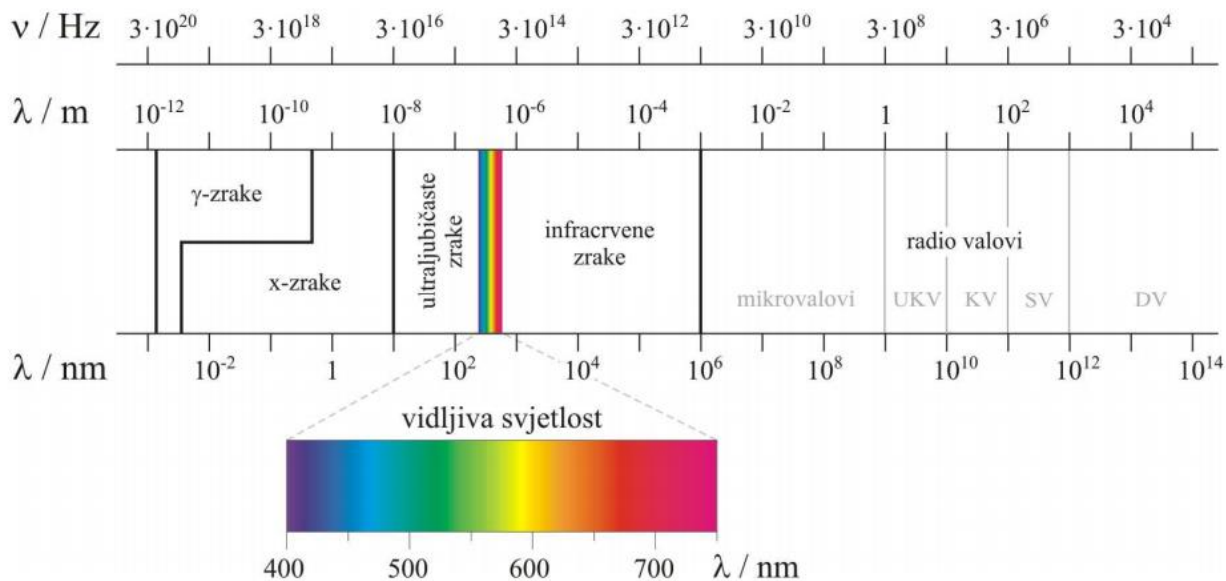
2. Svojstva zračenja

Atom se sastoji od jezgre i elektronskog omotača. Jezgra sadrži pozitivno nabijene protone i neutralne neutrone, dok elektronski omotač sadrži negativno nabijene elektrone. Nestabilne jezgre mogu emitirati određenu količinu energije u spontanom procesu koji nazivamo zračenjem. Zračenje je prijenos energije elektromagnetskim valovima ili snopovima subatomskih čestica koje se usmjereno gibaju kroz prostor [1]. Sva tijela kontinuirano emitiraju elektromagnetsko zračenje koje kroz vakuum putuje brzinom svjetlosti $c=3\cdot 10^8$ m/s. Pokusi su nedvojbeno potvrdili da se zračenje ponaša kao čestica u svojoj interakciji s tvari, a kao val kad se širi kroz prostor. Elektromagnetski valovi tako imaju dualnu prirodu: valnu i korpuskularnu. Valna je duljina zračenja λ , povezana je s frekvencijom vala ν , i brzinom širenja vala c , izrazom

$$c = \nu \cdot \lambda . \quad (1)$$

Iako na visokim temperaturama užarena tijela svijetle, vidljiva svjetlost nije jedino zračenje koje ona emitiraju. Emisijski spektri čvrstih tijela kontinuirani su i sastoje se od svih valnih duljina, od neke minimalne do maksimalne. Oblik spektra i raspored energije po pojedinim valnim duljinama ovisi o temperaturi i svojstvima površine koja zrači. Elektromagnetsko zračenje je fizikalna pojava širenja električnih i magnetskih valova, odnosno čestica zvanih fotoni. Fotoni su čestice koje se gibaju brzinom svjetlosti, nose određenu količinu energije i nemaju masu. Elektromagnetski spektar prikaz je jakosti elektromagnetskog zračenja kao funkcije njegove frekvencije, odnosno valne duljine. Obuhvaća sve vrste elektromagnetskih valova, od niskofrekventnih preko mikrovalova i područja optičkih spektara do visokofrekvencijskog rendgenskog zračenja i gama zračenja. Dio valnih duljina od 380 nanometara do 760 nanometara pripada vidljivom zračenju [2], a svakoj valnoj duljini unutar tog raspona pripada jedna boja što vidimo na slici 1. Cijeli spektar boja zastupljen je u bijeloj svjetlosti koja dolazi sa sunca. Općenito, elektromagnetski spektar možemo podijeliti na ionizirajuće i neionizirajuće zračenje. Ionizirajuće zračenje je zračenje koje ima dovoljnu energije da tijekom interakcije s atomom ukloni čvrsto vezane elektrone iz orbite atoma, uzrokujući ionizaciju atoma - atom pri sudaru s drugom česticom (fotonom, elektronom) izgubi elektron, te postaje ion. Ionizirajuće zračenje može biti produkt nuklearne fisije, nuklearne fuzije, radioaktivnih raspada, ekstremno toplih objekata i ubrzanih naboja. U ionizirajuće zrake ubrajamo rendgenske (X-zrake), gama zrake i kozmičke zrake koje mogu štetno djelovati na ljudske stanice. Zrake manje energije su

radiovalovi, vidljiva svjetlost, mikrovalovi, infracrvene i ultraljubičaste zrake koje nemaju tu jačinu da ioniziraju atom, pa ih nazivamo neionizirajućim zrakama. One mogu biti štetne uslijed dugog izlaganja.



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja [3]

2.1 Ionizirajuće zračenje

Periodni sustav elemenata sadrži kemijske elemente od kojih neki mogu imati različiti broj neutrona. Tvari koje sadrže atome s nestabilnim jezgrama nazivamo radioaktivnim tvarima, a raspadom takvih atoma nastaje ionizirajuće zračenje. Ionizirajuće zračenje se pojavljuje u obliku čestica ili fotona visokih energija. Ono ima sposobnost ionizacije molekula neke tvari. Ionizirajuće zračenje predaje energiju ozračenoj tvari pri čemu se mijenjaju svojstva ozračenog tvari. Posljedice ionizirajućeg zračenja mogu biti korisne, ali ukoliko se ne koriste ispravno mogu biti vrlo štetne. Izvori ionizirajućeg zračenja mogu biti prirodni i umjetni. U prirodne ubrajamo prirodna zračenja radioaktivnih tvari, odnosno radioaktivne tvari koje nalazimo u tlu, zraku, vodi,

te svemirska zračenja odnosno čestice sa Sunca. Umjetni izvori su svi oni nastali od strane čovjeka. Glavne vrste ionizirajućeg zračenja su:

- Alfa čestice
- Beta čestice
- Gama zrake
- X-zrake

2.1.1 Alfa čestice

Alfa-čestica (α -čestica), jezgra atoma helija sastoji se od dvaju protona i dvaju neutrona. Zato je njezina masa ($6,644 \cdot 10^{-27}$ kg, relativna atomska masa 4,001 506) približno četiri puta veća od mase protona, električni naboj pozitivan, a po iznosu jednak naboju dvaju elektrona. Izbacivanjem brzih alfa-čestica iz atomske jezgre (pri radioaktivnom raspadu) atomi nekih elemenata prelaze (s vremenom poluraspada u rasponu od 10^{-7} sekundi do 10^{10} godina) u atome kojima je atomski broj umanjen za dva, a maseni broj za četiri [4]. Alfa raspad je pretvaranje jedne atomske jezgre u drugu uz zračenje alfa-čestica. Kad je omjer neutrona i protona u jezgri određenih atoma prenizak, oni emitiraju alfa česticu kako bi uspostavili ravnotežu. Alfa zračenje brzo gubi kinetičku energiju zbog ionizirajućeg djelovanja, i ne prodire duboko u tvar (može se blokirati listom papira, kožom). Međutim, materijali koji emitiraju alfa čestice mogu biti potencijalno opasni ako ih se udiše ili proguta.

2.1.2 Beta čestice

Beta-čestica je brzi elektron emitiran u beta-minus radioaktivnom raspadu ili brzi pozitron emitiran u beta-plus radioaktivnom raspadu. Njezina je masa jednaka masi elektrona, električni naboj može biti pozitivan ili negativan. Izbacivanjem beta-čestica iz atomske jezgre maseni broj atoma ne mijenja se, a atomski broj promijeni se za jedan. U beta-minus raspadu atomski broj povećava se za jedan, a u beta-plus raspadu atomski broj smanji se za jedan [5]. Emisija beta čestice događa se kada je omjer neutrona i protona u jezgri prevelik. Beta čestice imaju veću sposobnost prodiranja u druge tvari. One mogu putovati nekoliko metara u zraku i mogu prodrijeti kroz kožu, dok će tanki metal ili plastika spriječiti prodiranje.

2.1.3 Gama zračenje i X – zrake

Gama-zračenje (γ -zrake) su elektromagnetski valovi vrlo visoke frekvencije i energije, koji nastaju prilikom kvantnih prijelaza atomskih jezgri s pobuđenih stanja. Energija gama-zračenja je u području od 10 keV do 17,6 MeV, što odgovara valnim duljinama od 10^{-9} do 10^{-12} cm. Pri radioaktivnom raspadanju, npr. nakon alfa-zračenja ili beta-zračenja, jezgre često emitiraju gama-zračenje [6]. Do gama zračenja dolazi kada jezgra radioaktivnog atoma ima previše energije, nakon emisije beta čestice. X-zrake su elektromagnetsko zračenje slično svjetlosti, ali s višom energijom. Čine ih valovi kratkih valnih duljina od 10^{-10} do 10^{-13} m. Imaju veliku sposobnost prodiranja u druge tvari. Koriste se najčešće u medicini. One također mogu napraviti veliku štetu, ali nekoliko centimetara olova može spriječiti prodiranje ovih zraka.

2.2 Neionizirajuće zračenje

Neionizirajuće zračenje je svuda oko nas. To je zračenje koje se odnosi na bilo koju vrstu elektromagnetskog zračenja koje nema dovoljno energije da može izazvati ionizaciju. Ne može ukloniti elektron iz atoma ili molekule već samo može prilikom prolaska u materiju prenijeti elektron na više energetska stanja.

U neionizirajuće zračenje ubrajamo:

- Ultraljubičasto (*eng. Ultraviolet, UV*)
- Infracrveno (*eng. Infrared, IR*)
- Vidljiva svjetlost (*eng. visible light*)
- Mikrovalovi (*eng. Microwave, MW*)
- Radiovalovi (*eng. radio frequency, RF*)
- Zračenje ekstremno niskih frekvencija (*eng. extremely low frequency, ELF*)

2.2.1 Ultraljubičasto zračenje

Ultraljubičasto zračenje je elektromagnetsko zračenje valnih duljina od približno 10 do 400 nm, koje se nalazi između rendgenskog zračenja i ljubičastog dijela vidljive svjetlosti. Taj dio spektra sunčevog zračenja ljudsko oko opaža kao ljubičasti dio sunčeve svjetlosti. Ono se emitira kada

pobuđeni atomi prelaze iz višeg u niže energetske stanje, otpuštajući pri tom energiju. Glavni izvori ultraljubičastog zračenja su sunčeva svjetlost, fluorescentne lampe, zavarivanje električnim lukom, ultraljubičasti laseri. Spektar ultraljubičastog zračenja je podijeljen u tri glavna područja koja su prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Spektar ultraljubičaste svjetlosti [7]

Područje	Valna duljina (nm)	Opasnosti
UV-A	315-400	Najmanje opasno, prerano starenje i naboravanje kože, moguć uzrok raka kože
UV-B	280-315	Opasnije je od UV-A, glavni uzrok raka kože, izgaranja na suncu i katarakta
UV-C	100-280	Izuzetno opasno, ali ne dopire do zemljine površine, uslijed apsorpcije ozonom u atmosferu

2.2.2 Vidljiva svjetlost

Sve elektromagnetsko zračenje je svjetlo, ali ljudsko oko može vidjeti samo mali dio. Vidljiva svjetlost je vidljivo elektromagnetsko zračenje u rasponu valnih duljina od 380 do 780 nm koje ljudsko oko razlikuje kao boje (Slika 1.). Ljubičasta boja odgovara najmanjoj valnoj duljini, a crvena najvećoj. Konaste stanice u ljudskom oku djeluju kao prijemnici podešeni na valne duljine u uskom pojasu spektra. Ostali dijelovi spektra imaju ili prevelike ili premale valne duljine. Prekomjerno vidljivo zračenje može oštetiti oči i kožu.

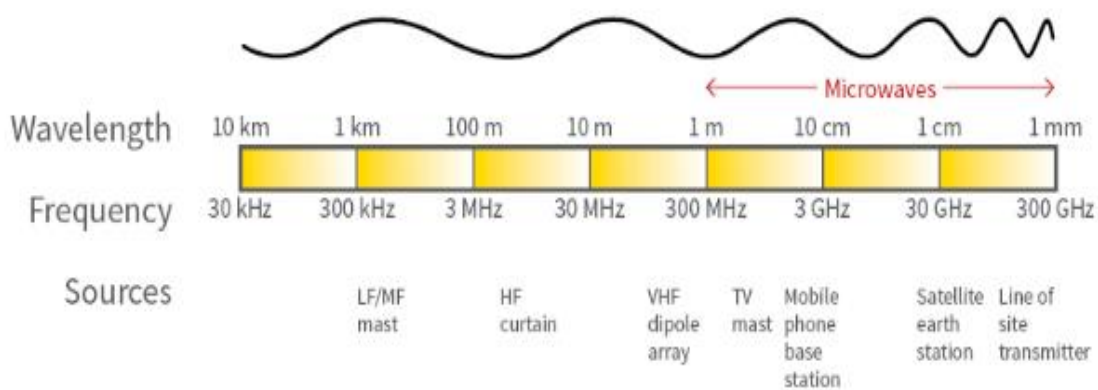
2.2.3 Mikrovalovi

Mikrovalovi su elektromagnetski valovi koji obuhvaćaju dio spektra s valnim duljinama od 0,3 m do 0,1 mm. Frekvencije mikrovalova bliske su onima kojima titraju atomi i molekule u tvarima,

pa se upotrebljavaju za proučavanje atomske strukture tvari. Ako se u prostoru kojim prolazi mikroval nađe naelektrizirana čestica, ona će se pokrenuti pod djelovanjem mikrovala na račun njegove energije, a val će oslabiti za toliko izgubljene energije. Energija koju mikroval posjeduje može u biološkome tkivu pokrenuti slobodne naelektrizirane čestice (elektrone i ione) i polarizirane čestice, ali ne može sam izvršiti ionizaciju, niti razbiti molekule i time promijeniti kemijski sastav sredine kroz koju prolazi. Zbog toga se mikrovalovi svrstavaju u neionizirajuće elektromagnetsko zračenje [8]. To su valovi kojima je izvor neki elektronski uređaj. Glavni primjer su mikrovalne pećnice i antene.

2.2.4 Radiovalovi

Radiovalovi obuhvaćaju dio spektra između 3 kHz i 300 GHz (Slika 2.). Nemaju dovoljno energije za uklanjanje elektrona iz atoma. U radarskim odašiljačima je energija radiovalova vrlo jaka te oni mogu vrlo brzo zagrijati dijelove i uzrokovati ozljede kao što su opekline. Energija radiovalova slabi udaljavanjem od odašiljača. Današnja tehnologija, mobiteli i bežične veze proizvode radiovalove znatno manje energije. Nema još nikakvih dokaza da su oni štetni za naše zdravlje, iako ima sve više istraživanja na tu temu, ali ništa još nije utvrđeno. Svi poznati prijenosni sustavi djeluju u rasponu radiofrekvencijskog spektra, uključujući analogni radio, zrakoplovnu navigaciju, brodski radio, amaterski radio, TV emisiju, mobilne mreže i satelitske sustave.



Slika 2. Radiofrekventni spektar zračenja [9]

2.2.5 Zračenje ekstremno niske frekvencije

Zračenje ekstremno niskih frekvencija rezultat je električno nabijenih čestica. Električna i magnetska polja ekstremno niske frekvencije postoje gdje god se prenosi ili proizvodi električna energija ili koristi u raznim električnim uređajima ili iz prirodnih izvora kao što su grmljavinske oluje i munje. Električno polje posljedica je električnog naboja, a magnetsko polje struje, odnosno električnog naboja koji se giba. U elektromagnetskom spektru ta polja zauzimaju donji dio u frekvencijskom rasponu od 0 do 300 Hz. Mjerenja tih frekvencija provode se zbog karakterizacije emisija izvora i izloženosti osoba. Ne postoje utvrđeni dokazi da je zračenje ekstremno niske frekvencije povezano s dugoročnim učincima na zdravlje.

3. Infracrveno zračenje

Za otkriće infracrvenog zračenja, zaslužan je William Herschel koji ga je otkrio 1800. godine. Tijekom eksperimentiranja zapazio je kako svjetlo koje prolazi kroz različito obojene filtere različito zagrijava stvari. Kako bi mu eksperiment dao što bolje rezultate, optičkom prizmom je razlučio bijelu svjetlost u boje spektra. Postavio je termometre na dio bez utjecaja svjetla i na jednu od razlučenih boja. Mjerenjem u jednakim vremenskim razmacima primijetio je da su dobivene vrijednosti sve veće kako se ide prema crvenoj svjetlosti. Maksimalnu vrijednost postigao je stavivši termometar izvan razlučenog spektra uz crvenu boju, te zaključio kako postoji zračenje koje je oku nevidljivo, te ga nazvao infracrveno zračenje.

Infracrveno zračenje je vrsta elektromagnetskog zračenja koje nastaje kada atomi apsorbiraju, a zatim oslobađaju energiju. Ova vrsta zračenja je nevidljiva ljudskom oku, ali je čovjek može osjetiti kao toplinu. Infracrveno zračenje se u elektromagnetskom spektru smjestilo ispod vidljive svjetlosti i iznad mikrovalova. Valna duljina je između 1000 μm i 760 nm. Crvena boja kod vidljive svjetlosti ima najveću valnu duljinu, odnosno najnižu frekvenciju.

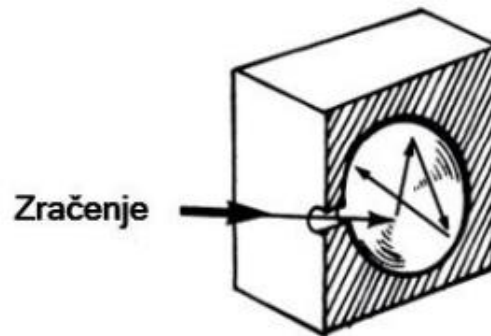
Infracrveno zračenje primjenjuje se u različite svrhe. Najpoznatiji su senzori topline, termičko snimanje, oprema za noćni vid, spektroskopija, meteorologija, komunikacije.

Tablica 2. Podjela infracrvenog područja prema ISO 20473 [10]

Naziv	Valna duljina (μm)	Izvor
Blisko	0,78 – 3	Prijelazi između elektronskih stanja niskih energija
Srednje	3 – 50	Molekulske vibracije
Daleko	50 – 1000	Molekulske rotacije

3.1 Zračenje crnog tijela

Toplinska emisija krutih tijela obično se tretira u smislu koncepta crnog tijela. Crno tijelo je pogodno za istraživanje zakona zračenja. To je tijelo koje potpuno apsorbira vidljivu svjetlost. Ima nekoliko teorija koje govore o zračenju crnog tijela. Jedna od njih je ta koja govori o okruglom, šupljem, zatvorenom tijelu. Radi na principu da zadrži svjetlost unutar svoje šupljine. (Slika 3.)



Slika 3. prikaz crnog tijela [11]

Kirchhoffov zakon zračenja je zakon prema kojemu su emisija i apsorpcija elektromagnetskog zračenja nekog tijela jednake na svim temperaturama, u svim uvjetima i na svim valnim duljinama. To je zračenje u kojem tijelo emitira onoliko zračenja koliko i apsorbira. Najviše zračenja emitira i apsorbira idealno crno tijelo. Tijelo koje je u toplinskoj ravnoteži s okolinom mora, istodobno s apsorpcijom, energiju i emitirati. Intenzitet emitiranog zračenja prikazuje se

$$I = \frac{\Phi_e}{S} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad \varepsilon = \frac{\Phi_e}{\Phi_{up}}, \quad (2)$$

gdje je Φ_e emitirani tok zračenja, Φ_{up} je upadni tok zračenja, ε je faktor emisije.

U toplinskoj ravnoteži vrijedi da je faktor emisije jednak faktoru apsorpcije, pa za crno tijelo vrijedi:

$$\Phi_{up} = \Phi_a^{CT} = \Phi_e^{CT}; \quad a=1. \quad (3)$$

Stefan Boltzmannov zakon govori da je ukupna energija koju zrači užareno tijelo proporcionalna četvrtoj potenciji temperature.

$$Q = \sigma \cdot S \cdot T^4 \cdot t, \quad (4)$$

gdje je Q emitirana toplinska energija, σ je Stefan Boltzmannova konstanta koja iznosi $5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ WK}^{-4} \text{ m}^{-2}$, S je površina tijela koje zrači i t je vrijeme tijekom kojeg tijelo zrači toplinsku energiju.

Wienov zakon govori da se porastom temperature maksimum u spektralnoj raspodjeli pomiče prema kraćim duljinama vala, tako da je umnožak valne duljine na kojoj je maksimalno zračenje i temperature konstantan.

$$\lambda_{max} \cdot T = k, \quad (5)$$

gdje λ_{max} označava maksimalno zračenje, T je temperatura, a k je konstanta koja iznosi

$$k = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}.$$

Klasična fizika nije uspjela objasniti spektralnu gustoću zračenja crnog tijela, ali ju je uspješno objasnio Max Planck. Došao je do zaključka da spektralnu gustoću savršeno opisuje izraz:

$$f_{ct}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\frac{hc}{e\lambda kT} - 1}, \quad (6)$$

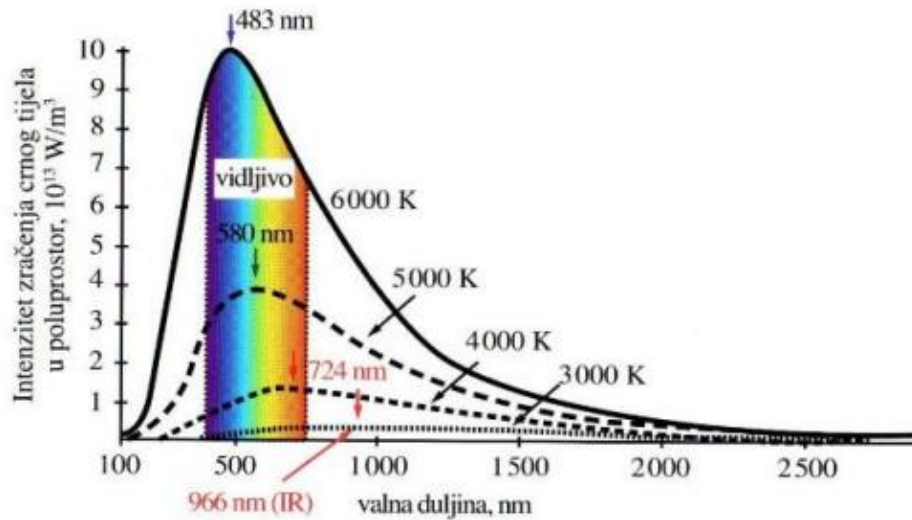
gdje c označava brzinu svjetlosti u vakuumu, k je Boltzmannova konstanta, h je Planckova konstanta.

Max Planck, da bi imao ispravnu formula za zračenje crnog tijela, uveo je hipotezu o kvantima kojom energija postaje diskretna varijabla točno određene vrijednosti. Energiju kvanta prikazuje formulom

$$E = h \cdot \nu, \quad (7)$$

gdje je E energija, ν označava frekvenciju zračenja, a h je Planckova konstanta koja iznosi $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Max Planck je pretpostavio kako su izvori zračenja atomi u stanju oscilacije i da vibracijska energija svakog oscilatora može imati bilo koju od niza diskretnih vrijednosti, ali nikad između njih. Planck je pretpostavio da kad se oscilator promjeni iz stanja energije E_1 u stanje niže energije E_2 , diskretna količina energije $E_1 - E_2$ je jednaka umnošku frekvencije zračenja, ν i Planckove konstante h . Planckovo zračenje je toplinsko zračenje koje je ovisno o temperaturi tijela. Što je viša temperatura tijela ono više zračenja vraća na svakoj valnoj duljini. Na slici 5. vidljivo je da s porastom temperature raste i intenzitet emitiranog zračenja.

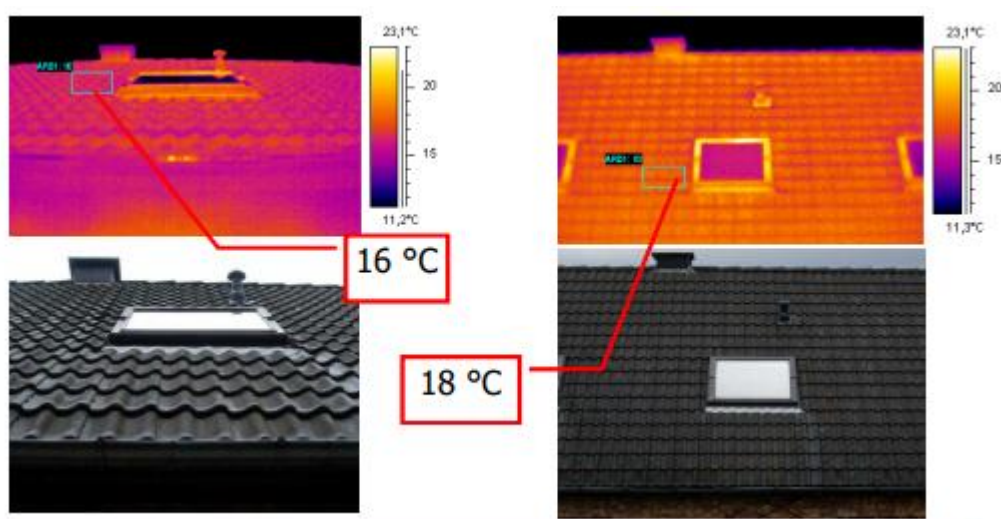


Slika 4. Ovisnost zračenja o valnoj duljini [12]

3.2 Svojstva infracrvenog zračenja

Infracrvena svjetlost može postojati i kao val i kao čestica. Poput zračenja vidljive svjetlosti, infracrveno zračenje se može apsorbirati ili reflektirati, ovisno o prirodi tvari u koju udara. Vodena para, ugljični dioksid i ozon učinkovito apsorbiraju infracrveno zračenje. Pri međudjelovanju infracrvenog zračenja i tvari predana energija zračenja očituje se obično u povišenju temperature tvari. To povišenje uzrokuje sekundarne pojave, promjenu mnogih svojstava tvari: obujma tijela, tlaka, indeksa loma, dielektričnosti, električne vodljivosti i kemijskih svojstava. Moguća je i pojava sekundarnog zračenja. Te se promjene događaju u

različitim vremenima nakon početka ozračivanja, od nekoliko nanosekunda pa do nekoliko sati, mogu trajati samo za vrijeme ozračivanja, neko vrijeme nakon prestanka ozračivanja ili se mogu trajno zadržati. Emisivnost je ključna u određivanju koliko će se površina apsorbirati i emitirati. Emisivnost ovisi o temperaturi, kutu emisije i valnoj duljini izračene elektromagnetske energije. Na slici 5. dan je primjer dvaju mjerenja za isti krov iz dvaju kutova dok je koeficijent emisije u oba primjera jednak.



Slika 5. Utjecaj kuta na emisivnost [13]

3.2 Interakcija infracrvenog zračenja s materijalima

Svaki materijal ima svoj koeficijent emisije ovisno o stanju površine i vrijednosti temperature te se očitava iz tablica. Materijali za optičke sustave, predviđene za rad u infracrvenom području, moraju imati ili veliku propusnost (za leće i prizme) ili veliku reflektivnost (za zrcala). Ta svojstva, nadalje, moraju biti stabilna, te moraju biti prikladna za obradu. Za sve te optičke sustave upotrebljavaju se posebne vrste stakala, prirodni i sintetski kristali, sintetski (plastični) materijali i slično.

Obična optička stakla, predviđena za svjetlo, mogu se upotrijebiti i u bližem infracrvenom području, do $\lambda \sim 2,7 \mu\text{m}$. Kremen (kvarc) se upotrebljava za izradbu prizama u spektroskopskim uređajima do $\lambda \sim 3,5 \mu\text{m}$, te za izradu prozora do $\lambda \sim 5 \mu\text{m}$. Dodavanjem oksida teških metala silikatnim i baritnim staklima povećava se propusnost takvih stakala do $\lambda \sim 2 \mu\text{m}$. Tako, npr., propusnost stakla $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ i $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}/\text{ZnO}$ za infracrveno zračenje $\lambda = 4 \mu\text{m}$ iznosi 60-80 %. Još je bolja propusnost stakla $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}/\text{MgO}$, koje za isto zračenje ima propusnost 80%, a staklo $\text{BeF}_2/\text{KF}/\text{AlF}_3$ čak 95%. Nadalje, sulfoselenidna stakla za zračenje $\lambda \sim 1,5-10 \mu\text{m}$ imaju propusnost $\sim 70 \%$. U području tzv. atmosferskih prozora za infracrveno zračenje $\lambda = 3-5 \mu\text{m}$ i $\lambda = 8-14 \mu\text{m}$ upotrebljavaju se stakla $\text{Si}/\text{As}/\text{Te}$, a stakla $\text{Ge}/\text{P}/\text{S}$ propusna su za područje $\lambda \sim 5-7 \mu\text{m}$, te se odlikuju temperaturnom stabilnošću do $T \sim 800 \text{K}$. Zbog svojih mehaničkih svojstava stakla i kremen su prikladni za izrađivanje optičkih elemenata za infracrveno zračenje.

Različiti kristali veoma su prikladni za izradu optičkih elemenata za infracrveno zračenje. Prizme spektroskopa izrađuju se od kristala NaCl , KCl , i KBr , propusnih za područje $\lambda \sim 20-30 \mu\text{m}$, ali su takvi kristali lako topljivi u vodi. Kristal LiF služi za izradbu prozora i leća do $\lambda \sim 9 \mu\text{m}$ i slabo je topljiv u vodi, CaF_2 do $\lambda \sim 9 \mu\text{m}$, netopljiv je u vodi, a može se dobiti i sintetski. Kristal Al_2O_3 upotrebljava se u području do $\lambda \sim 5,5 \mu\text{m}$, netopljiv je u vodi, a zbog velike mehaničke otpornosti i dobrih toplinskih svojstava služi za izradu prozora na uređajima i instrumentima za infracrveno zračenje. Bromidi i jodidi (npr. CsBr i CsI) propusni su do $\lambda \sim 40 \mu\text{m}$, vrlo su higroskopični, te se mogu upotrebljavati samo u laboratorijskim uvjetima rada.

Kristali germanija i silicija potpuno su neprozirni u vidljivom dijelu spektra. Germanij je propustan za zračenje $\lambda > 1,8 \mu\text{m}$, a silicij za $\lambda > 1 \mu\text{m}$. Propusnost im ovisi o čistoći. Zbog kemijske otpornosti i netopljivosti u vodi germanij i silicij upotrebljavaju se za izradu prozora, filtara i leća za infracrveno zračenje. Posebno su prikladni za upotrebu polikristali Irtran (*eng. Infrared Transmitter*) zbog njihovih dobrih mehaničkih svojstava, temperaturne otpornosti i netopljivosti u vodi.

Visoku reflektivnost imaju tanki slojevi odgovarajućih materijala, nanoseni na osnovnu površinu. Srednji koeficijent refleksije zlata, srebra, aluminija i bakra u bližem infracrvenom području veći je od 95 %. Najbolja fizikalna i kemijska svojstva ima zlato, srebro vremenom tamni, a najviše se upotrebljava aluminij koji se lako nanosi i zaštićuje slojem kvarca. Za selektivnu refleksiju upotrebljavaju se interferencijski filtri.

Pri prolazu infracrvenog zračenja kroz atmosferu dolazi do selektivne apsorpcije u molekulama plinova i vodene pare. Dušik, kisik i plemeniti plinovi prozirni su za infracrveno zračenje, a ugljični dioksid, ozon i vodena para jaki su apsorberi u pojedinim područjima valnih duljina. Za $\lambda=0,8-4,0$ μm najveći apsorber je vodena para. Apсорpcijske linije vode su 0,92, 1,13, 1,40, 1,88, 2,7, 3,2 i 6,3 μm . Voda i ugljik-dioksid apсорbiraju $\lambda\sim 4-8$ μm . Ugljikov dioksid je izraziti apсорber za zračenje valnih duljina 2,7, 4,3 i 14,5 μm . Najizraženija apсорpcijska linija ozona jest 9,6 μm , ali njegov se utjecaj zbog malih količina u atmosferi može zanemariti. Propusnost atmosfere raste s visinom zbog manje gustoće zraka i manje količine pare. Za $\lambda\sim 14-600$ μm uglavnom je kontinuirana apсорpcija vodenom parom. Voda u tekućem stanju, u sloju debljem od milimetra, neprozirna je za infracrveno zračenje $\lambda>2$ μm . Magla dobro propušta infracrveno zračenje, bolje nego svjetlost, a to je posljedica uzajamnog djelovanja raspršenja i apсорpcije na kapljicama vode u zraku. Po kiši, snijegu i tuči infracrveno zračenje jednako se raspršuje i apсорbira kao i svjetlost [14].

Tablica 3. Koeficijenti emisije materijala [15]

Materijal	Stanje površine	Temperatura	Koeficijent emisije - ϵ_n
Čelik	Ploča, hrapava, oksidirana	40°C	0,94 – 0,97
Željezo	Lijevano, oksidirano	100°C	0,64
Drvo	Hrastovina	38°C	0,9
Staklo	Glatko, ravno	0°C-100°C	0,92 – 0,97
Guma	Tvrda, crna	40°C	0,95

3.3 Detektori infracrvenog zračenja

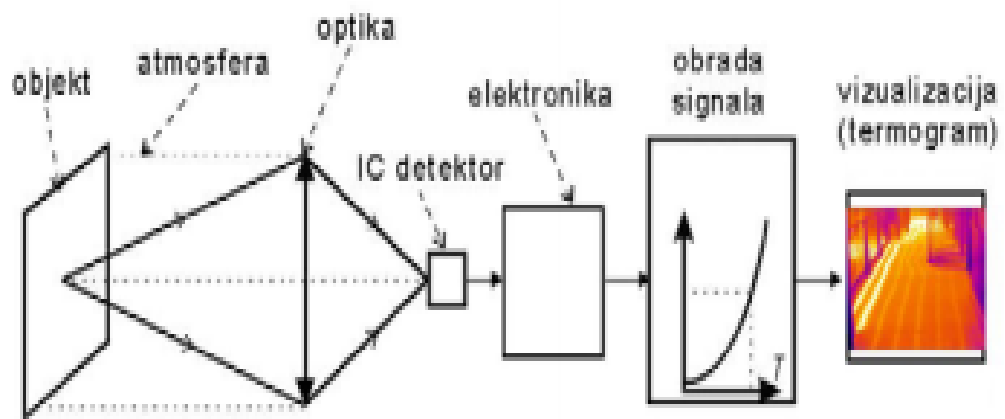
Detektori infracrvenog zračenja nazivaju se prema pojavama koje zračenje pobuđuje u tvari, koje se indiciraju ili mjere. Za detektore infracrvenog zračenja navode se karakteristike kao i za detektore drugih vrsta zračenja: osjetljivost, spektralna osjetljivost, detektivnost, responzivnost ili odgovor, moć razlučivanja i dr. Termički detektori infracrvenog zračenja osnivaju se na

indiciranju ili mjerenju fizikalnih svojstava tvari ovisnih o temperaturi. Osjetljivi su u cijelom području infracrvenog zračenja

Termometri su spori i nepraktični detektori, ali se zbog točnosti koja se može s njima postići i podjednake osjetljivosti u cijelom području upotrebljavaju za baždarenje mjernih uređaja. Termoelementi, koji toplinsku energiju direktno pretvaraju u električnu, znatno su brži nego termometri. Pri mjerenju mogu termometri biti u direktnom ili indirektnom kontaktu s mjerenim tijelom. Pri kontaktnom mjerenju povratno se utječe na stanje mjerenog tijela. Pri nekontaktnom mjerenju mjeri se infracrveno zračenje i posredno određuje temperatura mjerenog tijela

Princip rada bolometra se zasniva na mjerenju promjene neke električne veličine koja nastaje zbog promjene temperature električno osjetljivog elementa. Bolometri su jednako osjetljivi na infracrveno zračenje svih valnih duljina; frekvencijski su neselektivni. Bolometar s metalom sastoji se od dviju tankih vrpce platine, postavljenih jedna uz drugu. Spojene su kao dvije grane mosta za električno mjerenje, pa sve male promjene temperature u okolini ne narušavaju ravnotežu mosta. Ako se samo jedna od tih vrpce izloži infracrvenom zračenju, promjena temperature te jedne vrpce, a time i električnog otpora, narušava ravnotežu mjernog mosta. Tako se mogu konstatirati promjene temperature od samo 10^{-4} K.

Jedan od načina detektiranja infracrvenog zračenja jest pretvaranje infracrvenog zračenja u vidljivo. Najčešće se to postiže fluorescencijom. Dva su bitno različita načina pretvaranja infracrvene slike u vidljivo. Na slici 6. infracrveni konvertor pretvara infracrvenu sliku izravno u vidljivu sliku, a infracrveni vidikon pretvara infracrvenu sliku u električni video-signal, koji se, analogno kao pri običnom televizijskom prijenosu, na katodnoj cijevi pretvara u vidljivu sliku.



Slika 6. Shematski prikaz ICT uređaja [15]

4. Primjena infracrvenog zračenja

Poslije Drugog svjetskog rata počinje se primjenjivati infracrveno zračenje. Najviše se koristilo u vojne svrhe radi noćnog snimanja. Termalne kamere su se pokazale kao značajne u medicini, industriji, astronomiji, te otkrivanju vlage i ostalih mana u građevini. Termografska ili infracrvene kamera je uređaj koji stvara sliku koristeći infracrveno zračenje. Za vrijeme Drugog svjetskog rata upotrebljavale su se za snimanje terena iz aviona ili umjetnih satelita, te u industrijskim postrojenjima. Infracrvena kamera daje monokromatsku sliku. Prve takve kamere bile su vrlo jednostavne sa jednim senzorom koji prati jednu valnu duljinu infracrvenog zračenja. Termalnom kamerom topli predmeti se ističu u odnosu na hladniju pozadinu. Toplokrvna bića postaju lako vidljiva u odnosu na okoliš, stoga se znatno primjenjuje u vojne svrhe. Na slici 7. je fotografija dobivena termalnom kamerom, snimljena iz helikoptera. Tamniji dio predstavlja čovjek, osumnjičenog za bombaške napade u Bostonu, koji se skrivao u čamcu prekriven ceradom.



Slika 7. Čovjek (tamniji dio) prekriven ceradom snimljen termalnom kamerom [16]

4.1 Infracrvena termografija

William Herschel je znanstvenik koji je otkrio postojanje infracrvenog zračenja te koji je započeo razvoj infracrvene termografije. Dokazao je da se vidljiva svjetlost lomi i reflektira na isti način kao i sunčeva svjetlost iza crvenog dijela spektra, ali nije vidljiva ljudskom oku već samo uz uporabu termografske kamere koja je prikazana na slici 8.



Slika 8. Prikaz termografske kamere [17]

Infracrvena termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela koja se temelji na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s površine promatranog tijela. Mjerenje temperature se temelji na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja određene valne duljine koje se emitira s površine promatranog tijela i koje se uz pomoć IC kamere pretvara u vidljivu sliku u obliku temperaturnog polja korištenjem Stefan-Boltzmannovog zakona za realna tijela

$$W_{uk} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4,$$

gdje je

W_{uk} – ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina realnog tijela [W/m^2]

ε – koeficijent emisije realnog tijela

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$]

T – apsolutna temperatura tijela [K]

4.1.1 Podjela termografije

Kada je u pitanju tehnika ispitivanja infracrvenom termografijom, postoji nekoliko mogućnosti.

- Pasivna termografija: Ova tehnika ispitivanja uključuje snimanje toplinskih slika dok stroj radi ili neposredno nakon rada. To omogućuje prikupljanje podataka bez vanjskog izvora energije ili isključivanja stroja izvan mreže. Pasivna termografija u većini slučajeva je kvalitativna što znači da daje ograničen broj informacija u kratkom vremenu, te daje okvirne informacije o promatranom objektu u pogledu raspodjele temperature po njegovoj površini.
- Aktivna termografija: Ova tehnika zahtijeva vanjski izvor energije za stvaranje temperaturnih odstupanja u komponenti na koje utječu unutarnji materijali i oštećenja. Koristi se za prikazivanje kako toplina teče kroz komponentu i za pronalaženje nepravilnosti u komponentama tijekom uporabe. Aktivna termografija se koristi u kvantitativne svrhe što znači da daje preciznije rezultate iako je potrebno preračunati podatke dobivene na termografu. Ovisno o termičkim svojstvima materijala termofizička svojstva testiranog objekta mogu pojačavati ili sprječavati protok topline, te se na taj način razvija aktivna termografija.

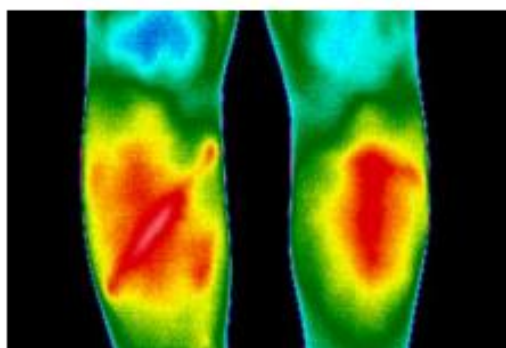
Podjela aktivne termografije:

- Impulsna termografija: Ova tehnika koristi svjetlosne impulse za pronalaženje praznina, inkluzija ili drugih prepreka koje blokiraju protok topline u komponenti. S obzirom da valu treba neko vrijeme da prođe do materijala te pošalje impuls, impulsna termografija nije najbolji odabir za mjerenje vrlo slabih temperaturnih signala.
- Vibrotermografija: Uvođenjem akustičkih valova u stroj ili komponentu, vibrotermografija može odrediti gdje se u materijalu mogu stvoriti pukotine. Smetnje uzrokovane energijom zvuka stvaraju trenje između dva gruba ruba s obje strane pukotine. Periodični valovi uzrokuju povećanje temperature na mjestima koncentracije naprezanja. Tako nastaje toplina koju detektira infracrvena kamera.

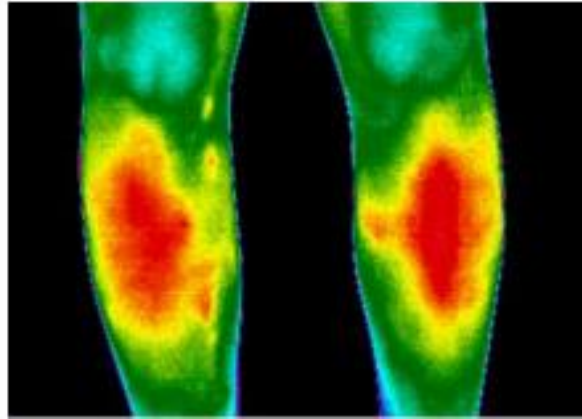
- *Lock-in* termografija: Kao i mnoge druge tehnike, *lock-in* termografija zahtijeva da se na površinu komponente primijeni vanjski izvor energije (svjetlost, zvuk, toplina itd.) kako bi se otkrile nepravilnosti ispod površine. Važno je znati dubinu, veličinu i mjesto abnormalnosti, kao i svojstva materijala kako bi ova tehnika bila točna. Iako traje duže od ranije objašnjenih tehnika, ova metoda može probiti komponente s debljim zidovima [18].

4.1.2 Primjena IC termografije u medicini

Infracrvena termografija često se koristi za otkrivanje bolesti u medicini. Radi se o beskontaktnom i neinvazivnom procesu koji je prilagođen pacijentu i pomoću kojeg se lociraju i otkrivaju toplinske nepravilnosti. U medicini se puno bolesti može dijagnosticirati postupkom termografije jer daje detaljnu sliku raspodjele temperature pacijenata, a ne samo precizno mjerenje temperature. Često se koristi u sportskoj medicini. Sportaši se često naprežu, prekomjerno koriste određeni mišić ili kost za određenu radnju u određenom sportu što dovodi do raznih upala, oteklina, istegnuća i puknuća (slika 9. i 10.). Dinamikom raspodjele površinske temperature upravlja više faktora, npr. protok krvi u površinskom sloju, provođenje topline iz dubljih krvnih žila i isparavanje znoja s površine.

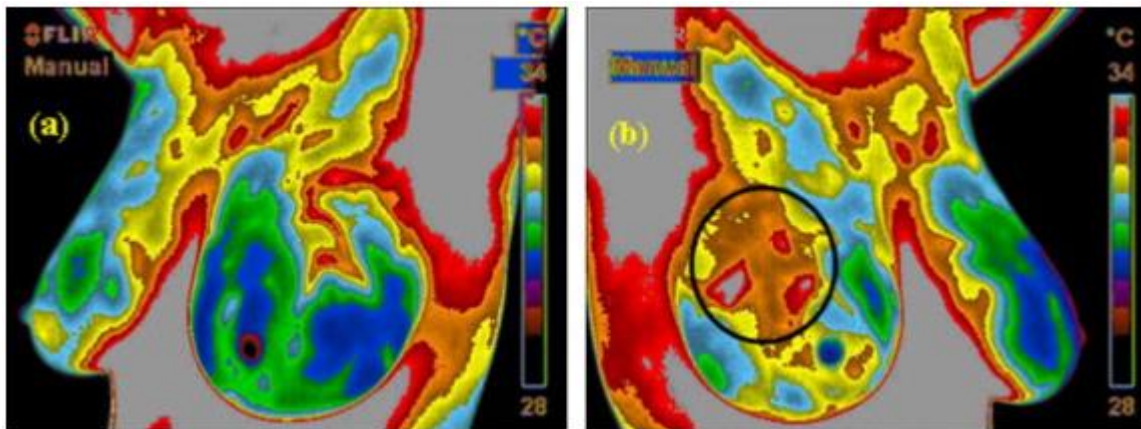


Slika 9. Termogram prijeloma na desnoj nozi [19]



Slika 10. Termogram nakon operavka na desnoj nozi [19]

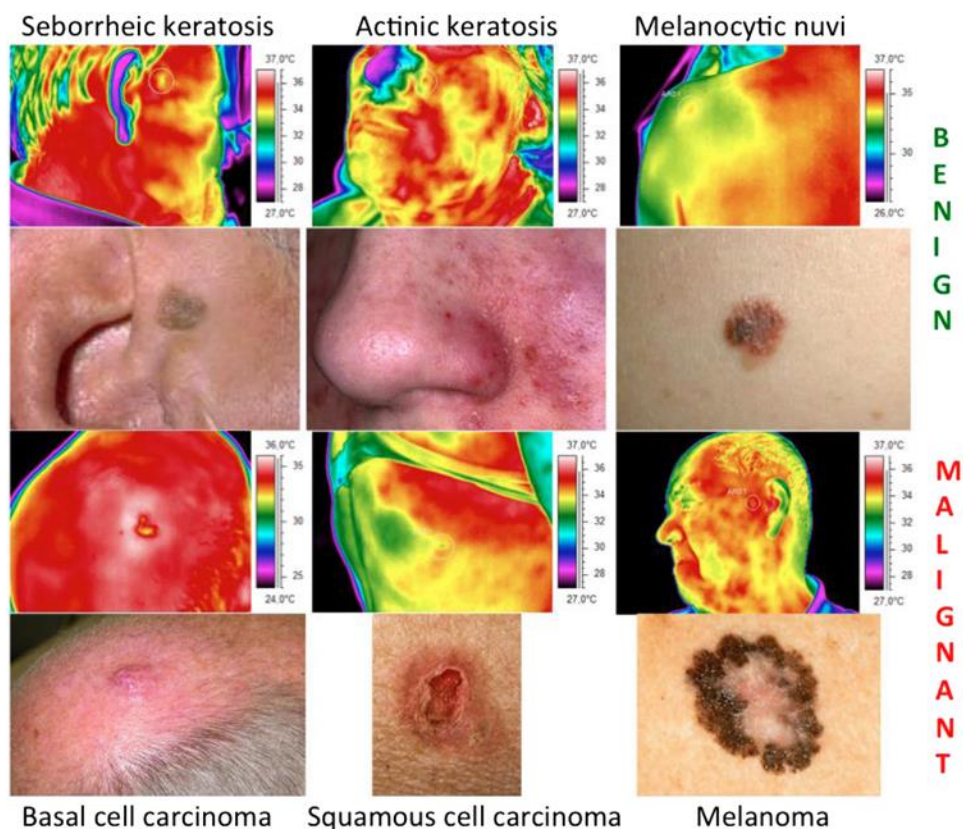
Termografija je najznačajnija u otkrivanju raka dojke. Tumori općenito imaju povećanu opskrbu krvlju i povećanu brzinu metabolizma što dovodi do visokih temperature na tim područjima zbog čega ih infracrvena termografija može prepoznati (slika 11.).



Slika 11. Okruženo područje prikazuje višu temperaturu u odnosu na ostala područja [20]

Koža je najveći organ ljudskog tijela i služi kao prepreka između okruženja i unutarnjih organa tijela. Neravnoteža u sustavu ili vanjski utjecaji mogu dovesti do raznih kožnih oboljenja uključujući osip, svrbež, alergije i karcinom. Kožne bolesti općenito izazivaju upalu što izaziva nenormalan temperaturni obrazac na površini kože. Infracrvena termografija služi kao alat za

ranu identifikaciju onkoloških stanja kože. Melanin je jedan od važnih endogenih kromofora, koji ima ulogu u mnogim dobroćudnim i zloćudnim kožnim poremećajima poput melanoma. Njegova autofluorescencija pod bliskom infracrvenom ekscitacijom korištena je za otkrivanje melanoma na koži (slika 12.).

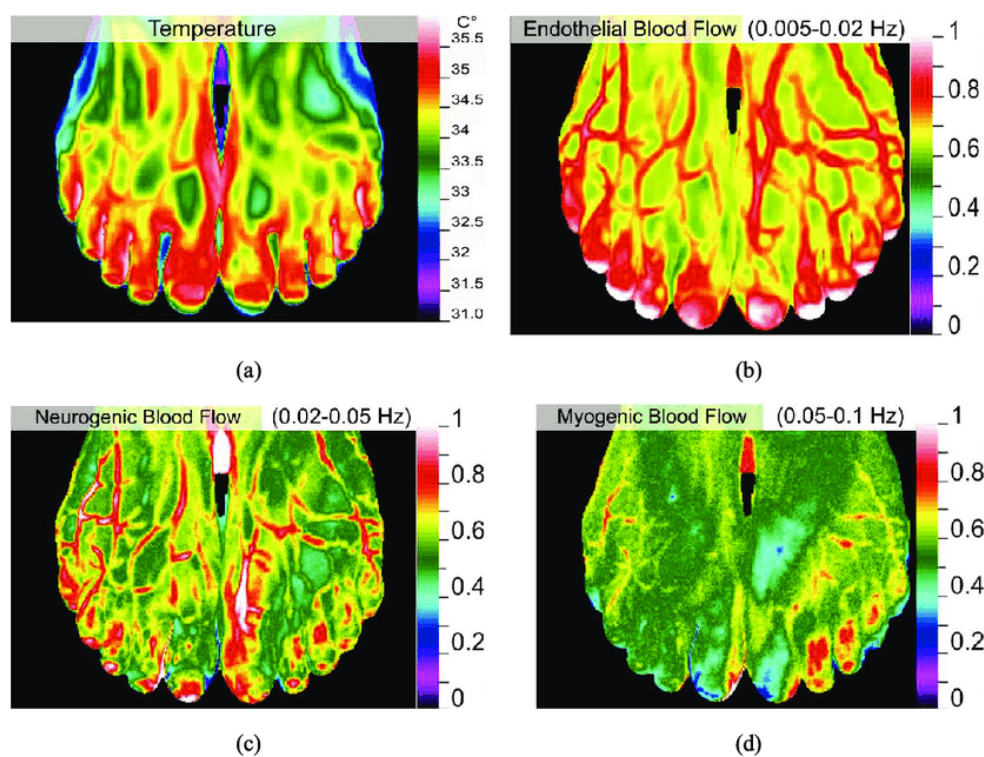


Slika 12. Prikaz melanoma [20]

Daleko-infracrveno snimanje, koje se naziva i termičko infracrveno snimanje, koristi detektore kao što su bolometri za otkrivanje infracrvenih emisija iz predmeta koji se ispituju. Ova promjena temperature uzrokuje promjenu električne snage kao rezultat nekog fizičkog svojstva materijala senzora, kao što je otpor ovisan o temperaturi. Dubina prodora za snimanje ovisi o interakciji svjetlosti sa kromoforima (biološki aktivne molekule) poput vode i hemoglobina koji su prisutni u koži. Prigušenje svjetla zbog vode u bliskom IC području je minimalno, pa nudi veću dubinu prodora; međutim, visoka apsorpcija svjetlosti u srednjem IC području zbog sadržaja vode u

tkivu rezultira značajnim prigušivanjem svjetlosti. Uz to, zbog nedostatka prilagodljivih izvora, sustava za optičko vlakno i osjetljivih detektora, u srednjem IC području radi vrlo malo tehnika snimanja. Zbog toga, većina biomedicinskih IC metoda snimanja koristi bliski IC spektar za strukturno i funkcionalno snimanje. Snimanje u dalekom infracrvenom području je pretežno emisijsko i usredotočeno je na bilježenje toplinskih emisija tkiva. Zapaženo je da su melanomske lezije toplije od okolnog zdravog tkiva

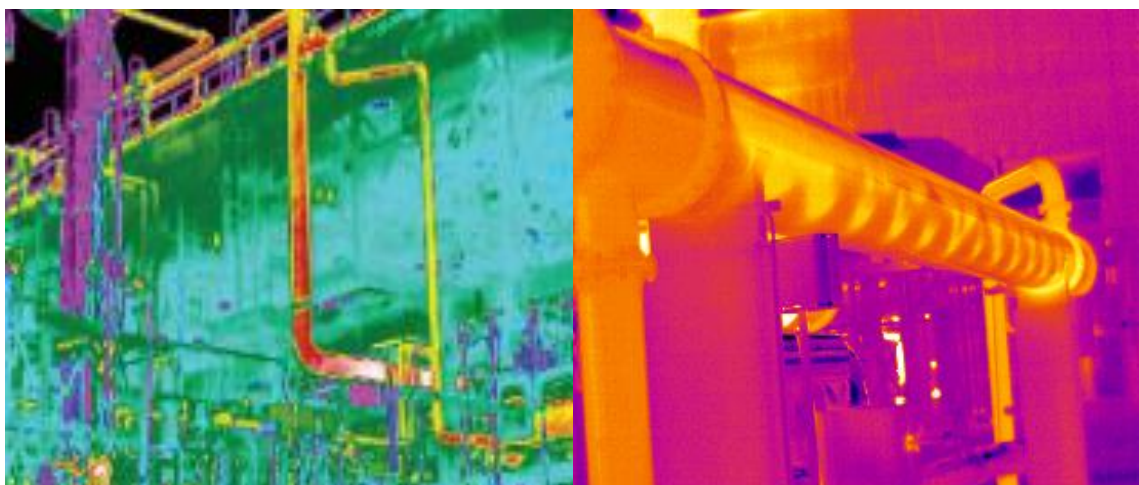
Pomoću termografije možemo provesti tehniku slikanja vaskularne mreže. Njome se određuje odnos između razlike u temperaturi kože i protoka krvi. Oscilacije u protoku krvi izvor su toplinskih valova koji se šire od žila prema površini kože. Pomoću termografije razvijena je tehnika spektralnog filtriranja pomoću koje se obrađuje krvotok. Razvijena tehnika provjerena je u rasponu od 0,005-0,1 Hz, uključujući endotelne, neurogene i miogene frekvencijske pojave oscilacija protoka krvi. Ilustrirani su primjeri snimanja protoka krvi stopala tijekom zagrijavanja leđa (Slika 13.).



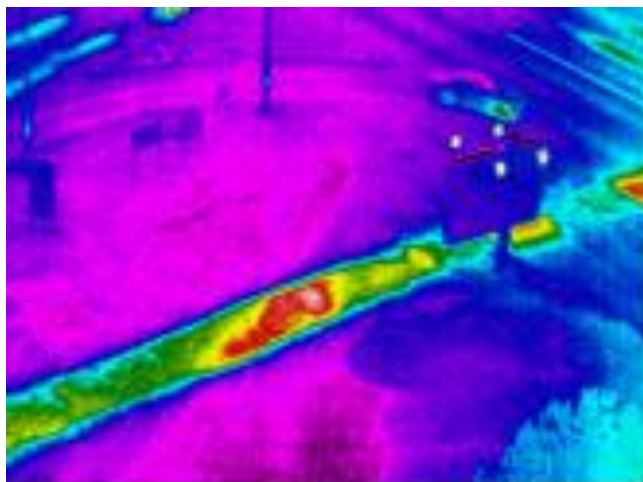
Slika 13. Protok krvi stopala tijekom zagrijavanja leđa [21]

4.1.3 Primjena u industriji

Primjenom infracrvene tehnike dijagnosticiraju se kvarovi i provjeravaju zahvati koji su poduzeti kako bi se spriječio nastanak kvara ili nezgode, samim time se povećava osiguranje i štedi energija na raznim pogonima. Sustavi infracrvene kamere detektiraju propuste na cijevima i izolacijama te uočavaju začepjenosti cijevi. Mnoge cijevi su izolirane temperaturnim vatrostalnim kamenom, pa se i tu može primijeniti infracrvena tehnologija da se potvrdi je li izolacija još uvijek postojana. Električna i mehanička pitanja se postavljaju zbog vruće točke koje ukazuju na labave električne veze, neispravne komponente, nepravilnu instalaciju komponenata, preopterećene motore ili pumpe, neusklađivanje spojeva i druga nepoželjna stanja. Može se primijetiti stanjivanje materijala budući da se toplina brže odvodi od površine s debljim dijelovima. Nedostaci se mogu otkriti jer na tok topline s površine krute tvari utječu unutarnji nedostaci, poput raspada, praznina ili inkluzija.



Slika 14. Izolacija na cjevovodima [22]



Slika 15. Pogled iz helikoptera na propust magistralnog vrelovoda [23]

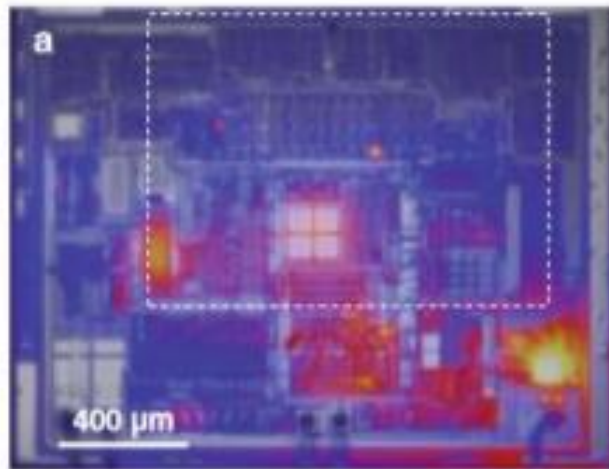


Slika 16. Pregrijavanje osigurača [23]

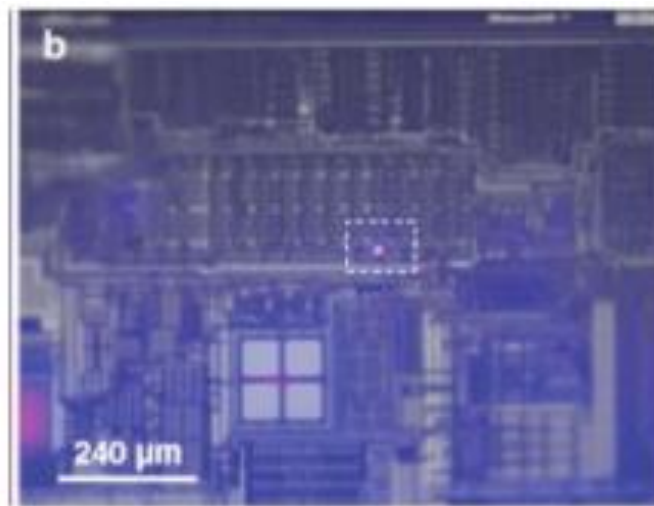
4.1.4 Primjena u elektrotehnici

Područje elektrotehnike je relativno zahtjevno jer ne postoji jedinstveni tehnički standard procjene ispravnosti elektroenergetskih instalacija na osnovu termograma. Postoji više organizacija koje su tijekom godina razvile svoju metodologiju održavanja.

Integrirani krug (*eng. Integrated circuit, IC*) je mikroelektronički sklop koji se sastoji od međusobno spojenih tranzistora i raznih ostalih elektroničkih komponenata. Integrirani krug je mali čip koji može funkcionirati kao pojačalo, oscilator, mikroprocesor ili računalna memorija. Obično je izrađen od silicija i može sadržavati stotine do milijune tranzistora, otpornika i kondenzatora. Ova izuzetno mala elektronika može izvoditi matematičke proračune i pohranjivati podatke koristeći digitalnu i analognu tehnologiju. Standardni dijagnostički alat za pregled integriranih krugova je mikroskopski termički pregled ili inspekcija. Pogreške poput odvodne struje, kratkih spojeva i stvaranja niske impedancije kod MOSFET tranzistora dovode do izvora topline. Također, normalan rad integriranog kruga može dovesti do karakterističnog lokalnog grijanja, obično slabijeg, koje se može koristiti za analizu ispravnosti kruga. Za analizu ispravnosti kruga koristi se metoda mikrotermografije. Svaka analiza kvara integriranog kruga započinje slikom niskog uvećanja kako bi se otkrilo mjesto dominantnog, traženog izvora topline na cijelom čipu. Kao što je već rečeno, osjetljivost koju nudi aktivna termografije daje mogućnost da nijedno oštećenje nije premalo da bi se otkrilo pa ni pri malom povećanju. Sljedeće mjerenje koristi puno veće uvećanje, pri visokoj frekvenciji, koje daje detalje oko prostora povećane topline. Konačno, moguća je uporaba SIL leća koje se koriste za otkrivanje položaja greške što je moguće bolje. Ova procedura je prikazana u sljedećem primjeru gdje se analizira čip pomoću tehnike *lock-in* termografije. Na slici 17. dan je primjer korištenja frekvencije od 10 Hz s objektivom kojima ima uvećanje 2,5 puta. Greška u ovome uređaju je točkasti izvor u uokvirenom dijelu. Na slici 18. je primjer korištenja objektivna s uvećanjem od 5 puta i s frekvencijom povećanom na 25 Hz.



Slika 17. Prikaz cijelog čipa (objektiv s uvećanjem 2,5 puta) [24]



Slika 18. Uvećan prikaz čipa (objektiv s uvećanjem 5 puta) [24]

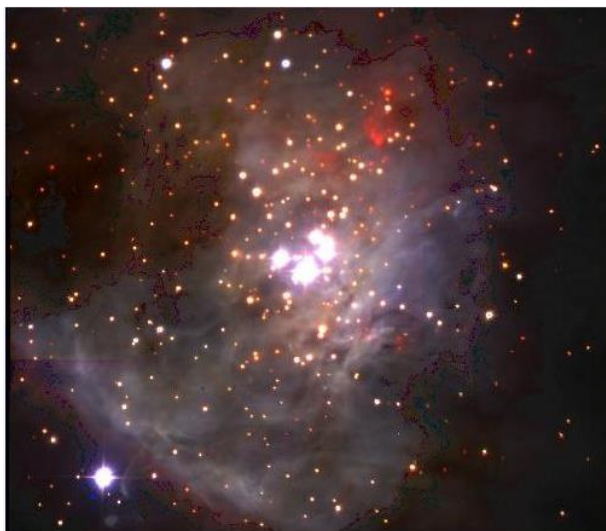
4.2 Primjena u astronomiji

Makroskopsko termografsko snimanje olakšava istraživanja u astronomiji. Daleko infracrveno područje proteže se do submilimetarskih valnih duljina koje promatra teleskop. U svemiru slike infracrvenih teleskopa mogu postići veću razlučivost jer ne trpe zamagljivanje uzrokovano Zemljinom atmosferom, a također ih ne apsorbira Zemljina atmosfera. U infracrvenom stanju možemo proučavati predmete skrivene plinom i prašinom koju ne možemo vidjeti u vidljivom svjetlu. Primjer je vidljiv na slici 19. Gornji red prikazuje ova područja na vidljivom crvenom svjetlu. Na ovoj valnoj duljini vidimo svjetlost milijardi zvijezda, posebno najvećih i najsvjetlijih, uz tamne pojaseve gdje ogromni oblaci prašine blokiraju pogled. Srednji red prikazuje iste regije u blizini infracrvenog zračenja. Prašina je postala djelomično prozirna. Slike na dnu prikazuju te regije daleko u infracrvenom. Tu zvijezde ne emitiraju nikakvu svjetlost, već sve što vidimo generiraju sami oblaci prašine.



Slika 19. Zvijezde gledane kroz infracrvenu svjetlost [25]

Predmeti koji su u svemiru previše hladni i slabi da bi ih se otkrilo u vidljivoj svjetlosti mogu se otkriti infracrvenom vezom. Njom se otkrivaju razne galaksije, maglice, međuzvezdane molekule i planeti. Na slici 20. prikazano je infracrveno snimanje zvjezdanih nakupina Trapezija u magli Orion tijekom kojih je otkriveno preko 100 objekata male mase.



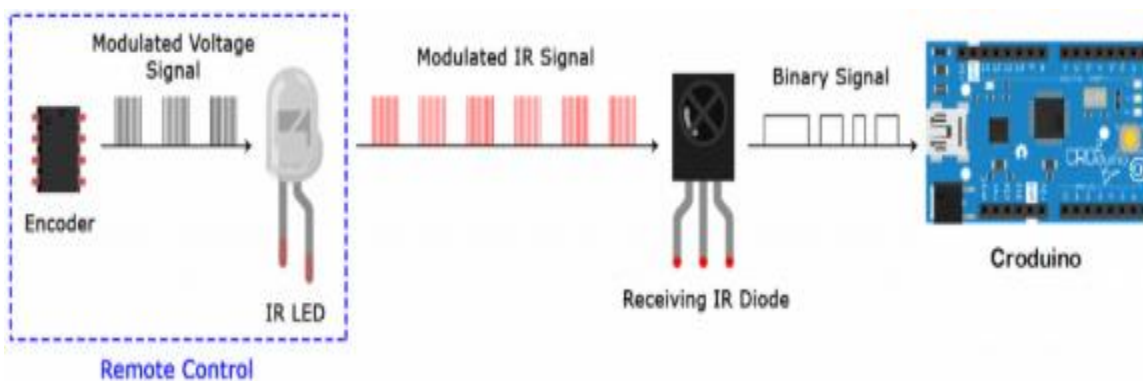
Slika 20. Infracrveno snimanje zvjezdanih nakupina [25]

4.3 Infracrvena spektroskopija

Infracrvena spektroskopija je spektroskopija koja se bavi infracrvenim područjem elektromagnetskog spektra. Infracrvena spektroskopija je instrumentalna metoda za detekciju, odnosno prepoznavanje funkcionalnih skupina prisutnih u molekuli. Kako svaka molekula ima različiti infracrveni spektar, infracrvena spektroskopija se koristi pri identifikaciji tvari. Kako je toplinska energija molekula veća od energije vibracija, infracrveno zračenje emitiraju objekti zahvaljujući svojoj toplinskoj energiji. Valna duljina emitiranog zračenja ovisi o temperaturi prema zakonu crnog tijela. Kad molekula apsorbira infracrveno zračenje njezine kemijske veze vibriraju. Veze se mogu rastezati, skraćivati i savijati. Zato se ta tehnika naziva još vibracijskom spektroskopijom. Molekule vibriraju na različitim frekvencijama jer su njihove strukture različite. Ova tehnika se primjenjuje u organskoj i anorganskoj kemiji, petrokemijskom inženjrstvu, farmaceutskoj industriji i analizi hrane.

4.4 Komunikacije

Infracrvena komunikacija se primjenjuje u današnjoj tehnologiji, npr. u robotima kojima se daju naredbe. U to su uključeni i uređaji bez kojih ne možemo u kućanstvu. U svakom uređaju smješteni su infracrveni predajnik i prijemnik. Preko tog prijemnika uređaj prima signal od nekog daljinskog upravljača. Kako bi naredba bila uspješno izvršena dok se izvodi ta komunikacija između ne bi trebala biti nikakva zapreka koja bi spriječila tu komunikaciju. Infracrveni prijemnik je fotodioda koja pretvara infracrvenu svjetlost u električni signal. LED odašiljač pretvara modularni električni signal u modularni infracrveni signal koji je zapravo niz infracrvenih svjetlosnih impulsa pri visokoj frekvenciji. Frekvencija odašiljača je najčešće 38 kHz jer je rijetka u prirodi pa se ne može zamijeniti s okolinom. Prijemna dioda detektira sve frekvencije infracrvenog svjetla, ali omogućuje prolaz samo kroz 38 kHz. Nakon toga pojačava modularni signal i pretvara ga u binarni signal koji prenosi podatke na pločicu. (Slika 21.)

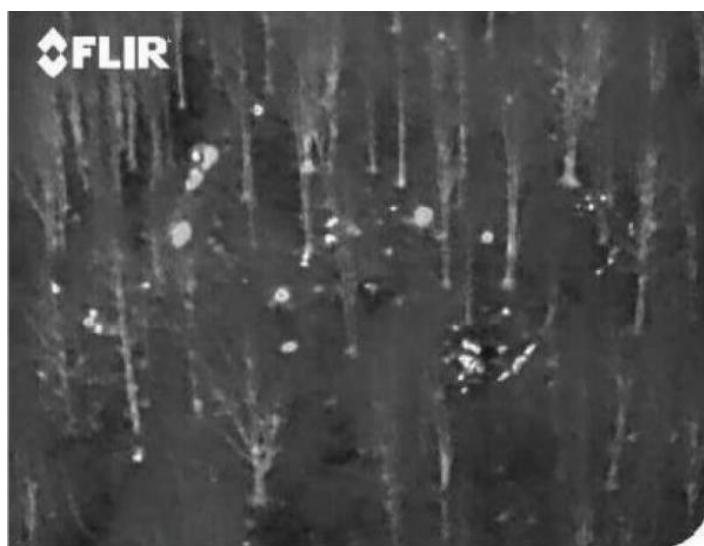


Slika 21. Prikaz infracrvene komunikacije [26]

4.5 Primjena u sigurnosti i zaštiti

Zaštita na radu postaje sve bitniji pojam u svijetu. Što je manje ozljeda na radu, manje je i uzimanja bolovanja i godišnjih na radnom mjestu. Samim time je i veća učinkovitost na poslu, te tvrtka uspješnija i bolja, a zaposlenici zadovoljniji. Mnoge fizičke, ali i ostale poslove je u današnjem svijetu zamjenio robot, stroj ili uređaj. Neki od njih rade na principu infracrvenih zraka, odnosno robotima se daju naredbe daljinskim upravljačima. Korisno je što osoba ne mora raditi fizički posao već to radi robot umjesto nje. Uz infracrveno zračenje moguće je saznati gdje

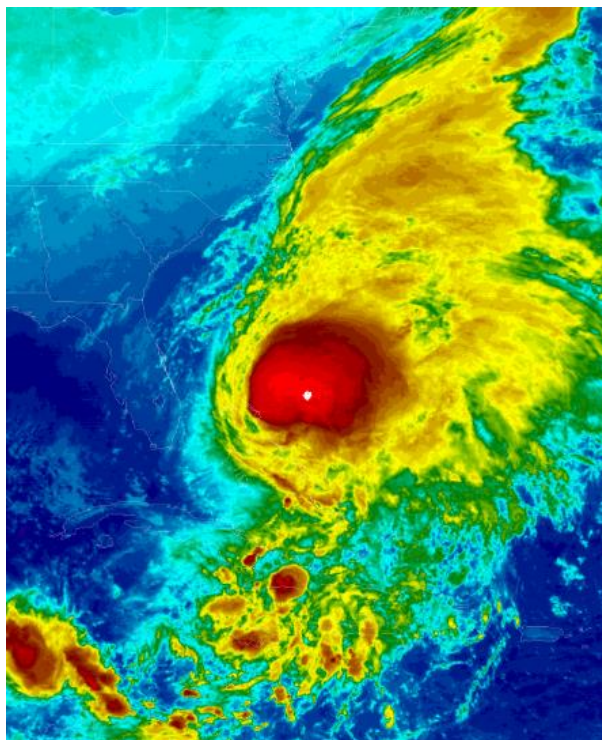
nastaju gubici energije iz pogonskih postrojenja, cjevnih instalacija i elemenata. Pomoću infracrvene kamere, te uz računalne infracrvene analize usporedno uz tehničku dokumentaciju može se utvrditi točno mjesto propusta, puknuća. To se često primjenjuje kod podzemnih cijevi. Često je temperatura bitan parameter proizvodnih procesa pa se na taj način može pratiti proizvodnja. Primjena termografije se pojavljuje i u protupožarnoj zaštiti gdje se snimanjem iz zraka mogu otkriti požari ili nadzirati požarišta. Prilikom kretanja kroz zadimljene prostore koristi se termografija.



Slika 22. Prikaz žarišnih točaka termalnom kamerom [27]

4.6 Primjena u meteorologiji

Da bi dobili što točniju i precizniju vremensku prognozu meteorolozi dobivaju infracrvene snimke meteoroloških satelita koji su opremljeni radiometrima. Prema tim snimkama meteorolozi mogu odrediti vrstu i visinu oblaka, temperature vodenih površina i kopna, te odrediti dugoročne i kratkoročne vremenske prognoze i predviđanja. Prednost infracrvene slike je što se i noću mogu vidjeti oblaci. Atmosfera postaje hladnija s visinom pa su i viši oblaci hladniji.



Slika 23. Uragan Noel 2007. [28]

Ova tehnologija bitna je i na moru i na kopnu. U pomorstvu jer može precizno pratiti morske struje putem promatranja miješanja morske vode različitih temperatura te vidjeti razne nepravilnosti poput uragana. Također je bitna u poljoprivredi za koju su meteorološke prognoze ključne kako bi poljoprivrednici mogli isplanirati radove.

5. Zaštita od infracrvenog zračenja

Svakodnevno doživljavamo infracrveno zračenje u obliku topline jer su infracrveni valovi toplinski. Većinu tog zračenja emitira Sunce, ali s napretkom tehnologije umjetni uređaji doprinose proširenju zračenja. Najčešća bolest koju uzrokuje infracrveno zračenje je katarakta ili mrena. Dugotrajno izlaganje dovodi do nepovratne neprozirnosti leće. Niska razina infracrvenog zračenja može uzrokovati simptome poput iritacije, crvenila očiju, oticanje očiju ili krvarenja. Oboljenje od katarakta je zabilježeno kod puhača stakla i radnika u peći zbog dugotrajnog izlaganja zračenju. Zračenje je najvjerojatnije odgovorno za porast temperature u samoj leći zbog karakteristika spektralne apsorpcije. Na slici 24. je prikazano zdravo oko i oko s kataraktom. Osim što šteti ljudskom oku infracrveno zračenje može imati značajne učinke i na ljudsku kožu. Slobodni radikali su opasni za stanice kože i dovode do pojave bora, te ubrzanog starenja kože. Osim toga intenzivno zračenje može izazvati opekline ili pojavu mjehura na koži. Koža kod svjetloputih osoba je osjetljivija te su promjene kod njih izraženije. Učinak na kožu ovisi o ukupnoj dozi zračenja, koja ovisi o intenzitetu, trajanju izloženosti zračenja i valnoj duljini zračenja.



Slika 24. Usporedba oka s kataraktom i bez katarakta [29]

Kako bi se onemogućilo da radnika dođe u kontakt s opasnostima, u ovom slučaju infracrvenim zračenjem, potrebno je postaviti filter ekrane, zavjese i namjenske sobe. Prilikom postavljanja barijera i usmjeravanja zraka inženjer mora imati na umu da se infracrvene zrake mogu odraziti

od sjajnih površina pa bi mjesto u koje se zrake usmjeravaju trebalo biti mat, a ne sjajno. Na radno mjesto bi se trebali postaviti znakovi upozorenja i opasnosti koji su prikazani na slici 25.



Slika 25. Znakovi sigurnosti [30]

Djelovanje infracrvenog zračenja na ljudski organizam je termalno. Djeluje na površini ljudskog tijela jer nema dovoljnu energiju da proдре unutar tijela. Uz dugotrajno izlaganje, može imati i štetne učinke na oko odnosno vid. Kako bi se to spriječilo uvedene su mjere. Mjere zaštite od infracrvenog zračenja se odnose na mjere koje su napisane u članku Zakona o zaštiti od neionizirajućeg zračenja. Mjere zaštite od neionizirajućeg zračenja donesene su u članku 7. Zakona o zaštiti od neionizirajućeg zračenja, a one su sljedeće:

1. propisivanje graničnih razina i kontrola izloženosti ljudi neionizirajućem zračenju,
2. proračun i procjena razina zračenja u okolišu izvora neionizirajućeg zračenja,
3. mjerenje razine zračenja u okolišu izvora neionizirajućeg zračenja,
4. vremensko ograničavanje izloženosti ljudi neionizirajućem zračenju,
5. označivanje izvora neionizirajućeg zračenja i prostora u kojima su smješteni,
6. uporaba zaštitne opreme pri radu s izvorima neionizirajućeg zračenja ili radu u prostorima s neionizirajućim zračenjem,
7. određivanje uvjeta za smještaj, nabavu i uporabu izvora neionizirajućeg zračenja,

8. obrazovanje i stručno usavršavanje rukovatelja vezano uz zaštitu od neionizirajućeg zračenja,
9. utvrđivanje i praćenje zdravlja osoba koje su na radnim mjestima izložene neionizirajućem zračenju,
10. osobna i uzajamna zaštita ljudi od izlaganja neionizirajućem zračenju,
11. osiguranje stručnih radnika, tehničkih, finansijskih i drugih uvjeta za provedbu mjera zaštite od neionizirajućeg zračenja,
12. vođenje evidencije o izvorima neionizirajućeg zračenja i o izloženosti rukovatelja izvorima neionizirajućeg zračenja,
13. nadzor nad izvorima neionizirajućeg zračenja i nad primjenom mjera zaštite [31]

Ukoliko se ne može kontrolirati izloženost infracrvenom zračenju, treba se koristiti osobna zaštitna oprema i osobna zaštitna sredstva koja je dana na slikama 26. i 27. Za smanjenje izloženosti svjetlosti koriste se zaštitne naočale, vizir i zaštitna odjeća.



Slika 26. Zaštitne naočale [32]



Slika 27. Zaštitna maska [32]

6. Zaključak

Neionizirajuće zračenje je još uvijek jedna velika nepoznanica u našem društvu. Ovaj rad bavi se uglavnom infracrvenim zračenjem. Infracrveno zračenje ima sve veću primjenu. Objasnjena su svojstva koja nisu štetna u malim količinama na čovjeka i okoliš, ali dugoročno bez zaštite i ona su štetna. Primjena infracrvenog zračenja je rasprostranjena. Infracrvene zrake koristimo u spektroskopiji, komunikaciji, meteorologiji, te najčešće u infracrvenoj termografiji. Infracrvena termografija radi na principu topline. U medicini ju primjenjujemo u otkrivanju raznoraznih bolesti, u građevini i industriji za uočavanje nedostataka koji mogu biti vrlo važni za daljnji nastavak rada pogona. Infracrveno zračenje može pomoći u učinkovitosti i ekonomičnosti neke tvrtke uočavanjem grešaka prilikom proizvodnje. Primjenjujući mjere koje su zakonom propisane i korištenjem osobnih zaštitnih sredstava te postavljanjem zaštita na radnom mjestu, osobe koje rade sa infracrvenim zračenjem se nebi trebale dovesti u opasnost. Razvojem tehnologije, razvija se i primjena infracrvenog zračenja, a samim time se i sve više istražuju i proučavaju svojstva infracrvenih zraka, te se pokušava smanjiti loš utjecaj zračenja na biološko tkivo.

LITERATURA

- [1] - zračenje. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=67437> , pristupljeno 20.04.2020.
- [2] - spektar. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57368>, pristupljeno 20.04.2020.
- [3] - Generalić, Eni. "Literatura." *Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar*. 20 Oct. 2018. KTF-Split, <https://glossary.periodni.com/rjecnik.php?hr=elektromagnetski+spektar>, pristupljeno 20.04.2020.
- [4] - alfa-čestica. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=1636> , pristupljeno 20.04.2020.
- [5] - beta-čestica. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=70391> , pristupljeno 20.04.2020.
- [6] - gama-zračenje. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=21168> , pristupljeno 20.04. 2020.
- [7] – M. Martinis, Lj.Škovrlj, B.Mijović, Zaštitni faktor od unutarnjeg ultraljubičastog zračenja,2011. [file:///C:/Users/HT-ICT/Downloads/Martinis_i_suradnici%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/HT-ICT/Downloads/Martinis_i_suradnici%20(1).pdf) , pristupljeno 24.04.2020.
- [8] - Pozar, David M., Microwave Engineering, USA, John Wiley & Sons, 2012. <https://repozitorij.fizika.unios.hr/islandora/object/fizos%3A34/datastream/PDF/view>, pristupljeno 24.04.2020.
- [9] -Commonwealth of Australia as represented by the Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/non-ionising-radiation/radiofrequency-radiation> , pristupljeno 27.04.2020.

- [10] - ISO 20473:2007", publisher= ISO, 2007.,
https://hr.wikipedia.org/wiki/Infracrveno_zra%C4%8Denje, pristupljeno 04.05.2020.
- [11] - G.Gaussorgues, Infrared Thermography: Springer Netherland, 1994.
<https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A2318/datastream/PDF/view>, pristupljeno 05.05.2020.
- [12] - Z. Fridel, Kontrola termografskih uzoraka i postupnici za provedbu termografskih mjerenja : Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009,
<https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A2318/datastream/PDF/view>, pristupljeno 05.05.2020.
- [13] - [file:///C:/Users/HT-ICT/Downloads/924759.IC_termografija-REA_Sjever%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/HT-ICT/Downloads/924759.IC_termografija-REA_Sjever%20(4).pdf), pristupljeno 06.05.2020.
- [14] – Prostiranje infracrvenog zračenja, M.Žaja, A.Peršin
https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/infracrveno_zracenje.pdf, pristupljeno 06.05.2020.
- [15] - M. Andrassy, I. Boras, S.Švaić, Osnove termografije s primjenom: Kigen, Zagreb, 2008.,
<https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A2318/datastream/PDF/view>, pristupljeno 06.05.2020.
- [16] - Camera found Dzhokhar Tsarnaev on boat under tarp, Andre Mayer, CBC News, Posted: Apr 22, 2013 2:59 PM ET, <https://www.cbc.ca/news/technology/how-infrared-cameras-helped-end-boston-manhunt-1.1352618>, pristupljeno 06.05.2020.
- [17] - <https://proluft.hr/savjeti-i-blog/savjeti/kucanstvo/termografija-i-gradevinarstvo-61/>, pristupljeno 06.05.2020.
- [18] - 1328 E. 43rd Court, Tulsa, OK 74105 © 2020 Noria Corporation,
<https://www.reliableplant.com/infrared-thermography-31572>, pristupljeno 07.05.2020.
- [19] - Sensors (Basel). 2010; 10(5): 4700–4715,
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3292141/>, pristupljeno 12.05.2020.
- [20] - Breast Thermography, in: W.C. Amalu (Ed.), Redwood City, California 94063, 2011.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449512000308>, pristupljeno 12.05.2020.
- [21] - Andrey Sagaidachnyi, Thermography-based blood flow imaging in human skin of the hands and feet: A spectral filtering approach, *in* Physiological Measurement 38(2):272-

288 · January 2017, https://www.researchgate.net/figure/Thermography-based-imaging-of-instantaneous-blood-flow-in-feet-during-heating-of-the-back_fig5_312531182, pristupljeno 12.05.2020.

[22] – K.Petrović, Infracrvena (IC) termografija –pravi izbor za redovito održavanje (II.dio) [file:///C:/Users/HT-ICT/Downloads/Mjerna_228_231%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/HT-ICT/Downloads/Mjerna_228_231%20(3).pdf), pristupljeno 15.05.2020.

[23] – Krešimir Petrović, Infracrvena termografija (termovizija) pravi izbor za redovno održavanje,2010. <http://www.odrzavanje.unze.ba/zbornici/2010/047-O10-056.pdf>, pristupljeno 15.05.2020.

[24] - O. Breitenstein, W. Warta, M.Langenkamp, Lock-in Thermography,Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, <https://repositorij.unios.hr/islandora/object/etfos:2318/datastream/PDF>, pristupljeno 01.06.2020.

[25] – What is infrared?, 2013, http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/importance.html, pristupljeno 01.06.2020.

[26] - 2020 e-radionica.com., https://e-radionica.com/hr/blog/2019/05/06/kkm-daljinski-upravljac-ir-receiver/_a-leca/, pristupljeno 01.06.2020.

[27] -_2020 [Vatrogasci.hr](http://vatrogasci.hr) – Powered by Pinko Design., <https://www.vatrogasci.hr/product/flir-aerial-first-responder-osnovni-kit/>, pristupljeno 01.06.2020.

[28] - <https://haysvillelibrary.files.wordpress.com/2010/06/hurricane-noel-2007-noaa.jpg>, pristupljeno 03.06.2020.

[29] - <https://bilicvision.hr/hr/operacija-sive-mrene/siva-mrena-ili-katarakta-ugradnja-razlicitih-vrst> , pristupljeno 03.06.2020.

[30] - ZIRS 2003.- 2020., <https://www.zirs.hr/znakovi-sigurnosti.aspx>, pristupljeno 06.06.2020.

[31] – Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja, čl.7.7, <https://www.zakon.hr/z/347/Zakon-o-za%C5%A1titi-od-neioniziraju%C4%87eg-zra%C4%8Denja>, pristupljeno 06.06.2020.

[32] - <https://ehs.lbl.gov/resource/documents/radiation-protection/non-ionizing-radiation/light-and-infrared-radiation/>, pristupljeno 10.06.2020.

POPIS SIMBOLA

λ – valna duljina

v – brzina

c – brzina svjetlosti

UV – ultraviolet

IC – infracrveno

MW – microwave

RF – radio frequency

ELF – extremely low frequency

I – intenzitet emitiranog zračenja

Φ_e – emitirani tok zračenja

Φ_{up} – upadni tok zračenja

ε – koeficijent emisivnosti

S – površina

Q – toplinska energija

σ – Stefan Boltzmanova konstanta

T – temperatura

t – vrijeme

h – Planckova konstanta

f – frekvencija zračenja

E – energija

POPIS SLIKA

Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja [3].....	3
Slika 2. Radiofrekventni spektar zračenja [9].....	7
Slika 3. prikaz crnog tijela [11].....	10
Slika 4. Ovisnost zračenja o valnoj duljini [12].....	12
Slika 5. Utjecaj kuta na emisivnost [13].....	13
Slika 6. Shematski prikaz ICT uređaja [15].....	17
Slika 7. Čovjek (tamniji dio) prekriven ceradom snimljen termalnom kamerom [16]	18
Slika 8. Prikaz termografske kamere [17]	19
Slika 9. Termogram prijeloma na desnoj nozi [19].....	21
Slika 10. Termogram nakon oporavka na desnoj nozi [19].....	22
Slika 11. Okruženo područje prikazuje višu temperaturu u odnosu na ostala područja [20]	22
Slika 12. Prikaz melanoma [20]	23
Slika 13. Protok krvi stopala tijekom zagrijavanja leđa [21].....	24
Slika 14. Izolacija na cjevovodima [22]	25
Slika 15. Pogled iz helikoptera na propust magistralnog vrelovoda [23].....	26
Slika 16. Pregrijavanje osigurača [23].....	26
Slika 17. Prikaz cijelog čipa (objektiv s uvećanjem 2,5 puta) [24].....	28
Slika 18. Uvećan prikaz čipa (objektiv s uvećanjem 5 puta) [24].....	28
Slika 19. Zvijezde gledane kroz infracrvenu svjelost [25]	29
Slika 20. Infracrveno snimanje zvjezdanih nakupina [25]	30
Slika 21. Prikaz infracrvene komunikacije [26].....	31
Slika 22. Prikaz žarišnih točaka termalnom kamerom [27].....	32
Slika 23. Uragan Noel 2007. [28]	33
Slika 24. Usporedba oka s kataraktom i bez katarakta [29].....	34
Slika 25. Znakovi sigurnosti [30].....	35
Slika 26. Zaštitne naočale [32].....	36
Slika 27. Zaštitna maska [32].....	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Spektar ultraljubičaste svjetlosti [7].....	6
Tablica 2. Podjela infracrvenog područja prema ISO 20473 [10]	9
Tablica 3. Koeficijenti emisije materijala [15]	15