

**МИНИСТАРСТВО ОДБРАНЕ**

**УНИВЕРЗИТЕТ ОДБРАНЕ**

**ВОЈНА АКАДЕМИЈА**



**МАСТЕР РАД**

**ЕМИСИВНОСТ МАТЕРИЈАЛА ЗАСТУПЉЕНИХ У  
НАОРУЖАЊУ И ВОЈНОЈ ОПРЕМИ ВОЈСКЕ СРБИЈЕ**

**МЕНТОР:**

пуковник

ред. проф. др Михаел Бучко, дипл. инж.

**КАНДИДАТ:**

поручник

Лазар Лазаревић, дипл. инж. маш.

Београд, 2025. године

## Посвета

*„Садашњост је њихова, али будућност је моја, за коју сам тако напорно радио.“ — Никола Тесла*

Овај рад посвећујем свима онима који су непоколебљиво стајали уз мене током мог школовања и веровали у моје снове.

Мом ментору упућујем посебну и дубоку захвалност за стрпљење, стручност и неуморну посвећеност на путу кроз сложене проблеме и непознанице, што је обликовало правац и дубину овог рада. Ваша посвећеност и Ваше веровање у мој потенцијал били су непроцењиви, уздижући овај рад изнад онога што бих могао постићи сам.

Мојим родитељима, чија су љубав и жртве биле темељ на којем стојим – ваша стална мотивација и бескрајна подршка оснажиле су ме да неуморно тежим својим амбицијама. Ово достигнуће је подједнако ваше колико и моје.

Заједно, сви сте учинили ово путовање не само могућим већ и истински значајним. У духу Теслине визије будућности, нека овај рад буде сведочанство истрајности, иновативности и неуморне тежње ка знању.

## Резиме

Разумевање и контрола емисивности војне опреме представљају кључни фактор у смањењу детекције у инфрацрвеним (ИЦ) системима за надзор и циљање. Емисивност, ефикасност којом површина емитује топлотно зрачење у односу на идеално црно тело, игра директну улогу у термичком потпису платформе, посебно у средњоталасним (3–5  $\mu\text{m}$ ) и дуготаласним (8–14  $\mu\text{m}$ ) ИЦ опсезима које обично користе модерни сензори.

Овај рад представља истраживање емисивности материјала НВО (наоружања и војне опреме), фокусирајући се на њену улогу у инфрацрвеној камуфлажи средстава НВО за одбрамбене примене. Користећи инфрацрвену термографију помоћу ФЛИР инфрацрвене камере, примењена је прецизна, поновљива метода за мерење вредности емисивности различитих материјала и премаза војног квалитета укључујући полиране метале, композитне материјале и камуфлажне боје под контролисаним термичким условима.

Мерења откривају варијације емисивности на које утичу састав материјала, обрада површине, оксидациона стања и температура. Поред тога, изазови као што су губици у атмосферској трансмисији, рефлектовано позадинско зрачење и ограничења пропусног опсега специфична за сензоре решавани су процедуралним корекцијама.

Овај рад пружа свеобухватан оквир за оптимизацију војне опреме кроз развој површинских третмана са ниском емисивношћу дизајнираних да сузбију видљивост у инфрацрвеном спектру без угрожавања перформанси материјала, и истиче емисивност као витални параметар у дизајну модерне одбрамбене платформе и њеној процени преживљавања на модерном бојном пољу.

**Кључне речи:** емисивност, инфрацрвена термографија

## САДРЖАЈ

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Резиме .....                                               | 3  |
| ЛИСТА ТАБЕЛА.....                                          | 5  |
| ЛИСТА СЛИКА .....                                          | 6  |
| 1. УВОД.....                                               | 8  |
| 2. Историјска позадина .....                               | 10 |
| 3. Порекло инфрацрвеног зрачења .....                      | 11 |
| 3.1 Зрачење црног тела.....                                | 13 |
| 4. Емисивност .....                                        | 15 |
| 4.1 Значај емисивности у војној примени .....              | 19 |
| 4.2 Инфрацрвена термографија.....                          | 24 |
| 4.3 Мерење емисивности помоћу FLIR инфрацрвене камере..... | 26 |
| 4.3.1 Поставка експеримента.....                           | 26 |
| 4.3.2 Поступак мерења .....                                | 29 |
| 4.3.3 Резултати мерења .....                               | 29 |
| 5. ЗАКЉУЧАК.....                                           | 44 |
| 6. ЛИТЕРАТУРА.....                                         | 45 |

## ЛИСТА ТАБЕЛА

|                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Табела 1: Подела инфрацрвеног зрачења, преузето са веб сајта <a href="https://sh.wikipedia.org/wiki/Infracrveno_zra%C4%8Denje">https://sh.wikipedia.org/wiki/Infracrveno_zra%C4%8Denje</a> ..... | 12 |
| Табела 2: Вредности емисивности за познате материјале мерене од стране фирме “FLUKE” .....                                                                                                       | 17 |
| Табела 3: Вредности емисивности за неке материјале мерене од стране фирме “ThermoWorks” .....                                                                                                    | 19 |
| Табела 4: Методе смањења ИЦ зрачења средстава НВО .....                                                                                                                                          | 21 |
| Табела 5: Примене материјала и система за смањење ИЦ одраза у свету .....                                                                                                                        | 23 |
| Табела 6: Техничке карактеристике термалне камере FLIR E40.....                                                                                                                                  | 27 |
| Табела 7: Резултати мерења .....                                                                                                                                                                 | 32 |

## ЛИСТА СЛИКА

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Слика 1:</b> <i>сер Вилијам Хершел</i> , преузета са веб сајта <a href="https://www.americanscientist.org/article/herschel-and-the-puzzle-of-infrared">https://www.americanscientist.org/article/herschel-and-the-puzzle-of-infrared</a> .....                                                                                                                         | 10 |
| <b>Слика 2:</b> <i>а) Спектар електромагнетног зрачења; б) Оптички део спектра</i> , преузето из рада “Спектралне карактеристике вештачких извора УВ зрачења, соларијуми”, Дипломски рад, Александра Перић, Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за физику, 2007. ....                                                                      | 12 |
| <b>Слика 3:</b> <i>Модел црних тела</i> , преузето из рада “Infrared Thermography Errors and Uncertainties”, Waldemar Minkina, Sebastian Dudzik Czeszochowa, University of Technology, Poland, 2009. ....                                                                                                                                                                 | 13 |
| <b>Слика 4:</b> <i>Зависност интензитета зрачења црног тела на различитим температурама од таласне дужине</i> , преузето из рада “Спектралне карактеристике вештачких извора УВ зрачења, соларијуми”, дипломски рад, Александра Перић, Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за физику, 2007. ....                                           | 14 |
| <b>Слика 5:</b> <i>Термална камера FLIR E40</i> , преузето из рада “Determination of the gun barrel walls temperature distribution and its experimental validation during multiple-shots firing process”, Walid Boukera Abaci, Nebojsa Hristov, Nabil Ziane Ahmed, Damir Jerkovic, Momir Drakulic, Универзитет одбране, Војна академија .....                             | 26 |
| <b>Слика 6:</b> <i>Лабораторијски узорак – минобацачка мина 60 mm M57 са SMB превлаком и причвршћеном траком високе емисивности</i> .....                                                                                                                                                                                                                                 | 27 |
| <b>Слика 7:</b> <i>Лабораторијска комора коришћена за загревање узорака</i> , преузето из рада “Determination of the gun barrel walls temperature distribution and its experimental validation during multiple-shots firing process”, Walid Boukera Abaci, Nebojsa Hristov, Nabil Ziane Ahmed, Damir Jerkovic, Momir Drakulic, Универзитет одбране, Војна академија ..... | 28 |
| <b>Слика 8:</b> <i>Шема експерименталне поставке</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 28 |
| <b>Слика 9:</b> <i>Узорак униформи M93 и M10 и амблема за униформу M10</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 32 |
| <b>Слика 10:</b> <i>Инфрацрвени снимци униформи M93 и M10 и амблема за униформу M10</i> ..                                                                                                                                                                                                                                                                                | 33 |
| <b>Слика 11:</b> <i>Навлака пиштоља Ц399</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 34 |
| <b>Слика 12:</b> <i>Инфрацрвени снимци навлаке пиштоља Ц399</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 34 |
| <b>Слика 13:</b> <i>Компоненте пиштоља M57</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 35 |
| <b>Слика 14:</b> <i>Инфрацрвени снимак компоненти пиштоља M57</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 35 |
| <b>Слика 15:</b> <i>Носач затварача за јуришну пушку M70</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 35 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Слика 16: Инфрацрвени снимак носача затварача за јуришну пушку М70 .....</i>             | 36 |
| <i>Слика 17: Дрвени рукохват за јуришну пушку М70.....</i>                                  | 36 |
| <i>Слика 18: Инфрацрвени снимак дрвеног рукохвата за јуришну пушку М70.....</i>             | 36 |
| <i>Слика 19: Месингана мина 60 mm М57 .....</i>                                             | 37 |
| <i>Слика 20: Инфрацрвени снимак месингане мине 60 mm М57 .....</i>                          | 37 |
| <i>Слика 21: Месингани метак М69 калибра 20 mm .....</i>                                    | 37 |
| <i>Слика 22: Инфрацрвени снимак месинганог метка М69 калибра 20 mm .....</i>                | 38 |
| <i>Слика 23: Оквир аутоматског пиштоља М84.....</i>                                         | 38 |
| <i>Слика 24: Инфрацрвени снимак оквира аутоматског пиштоља М84 .....</i>                    | 38 |
| <i>Слика 25: Навлака са предњим и задњим нишаном за пиштољ М57 .....</i>                    | 39 |
| <i>Слика 26: Инфрацрвени снимак навлаке са предњим и задњим нишаном за пиштољ М57 .....</i> | 39 |
| <i>Слика 27: Поклопац склопа за пушку М19 .....</i>                                         | 40 |
| <i>Слика 28: Инфрацрвени снимак поклопца склопа за пушку М19.....</i>                       | 41 |
| <i>Слика 29: Оквир пушке М70.....</i>                                                       | 41 |
| <i>Слика 30: Инфрацрвени снимак оквира пушке М70.....</i>                                   | 41 |
| <i>Слика 31: Оквир пушке М19.....</i>                                                       | 42 |
| <i>Слика 32: Инфрацрвени снимак оквира пушке М19.....</i>                                   | 42 |

# 1. УВОД

Развојем и усвајањем нових технологија условљен је развој наоружања и војне опреме (у даљем тексту: НВО). Употребом композитних материјала постижу се побољшане тактичко-техничке карактеристике, мања маса НВО, а такође могу се постићи и већи нивои балистичке заштите.

У арени модерног ратовања, борба између прикривања и откривања на бојном пољу је непрекидна и превазилази видљиви спектар, те се ратовање претвара у такмичење разних сигнала и сензора. Наношењем композитних превлака можемо учинити да средство буде мање видљиво у одређеним спектрима (инфрацрвени). Термална невидљивост постаје главни циљ сваке модерне војске и протеже се у инфрацрвени домен, спектралну димензију која превазилази људски вид и обликује будуће сукобе. Инфрацрвени системи за детекцију зрачења користе се на дроновима, сателитима, ракетама и у склопу војничке опреме. Топлота коју емитује оклоп тенка, крило беспилотне летелице или чак војнички шлем постаје мета за сензоре противника који раде у средњим и дугим инфрацрвеним опсезима. Наведено је јако битно имајући у виду велику заступљеност различитих осматрачких средстава, као и оружја која раде на основу наведених спектра. Подразумева се да таква средства извиђања и оружје поседују наравно сви видови савремених војски технолошки развијених земаља. Употреба наведених средства је дошла највише до изражаја почетком 90-их година прошлог века, приликом Првог и Другог заливског рата, приликом америчке војне операције под именом „Ирачка Слобода“ и ратовима на простору бивше СФРЈ (поготово приликом рата у Босни и Херцеговини у периоду од 1992-1995. године приликом дејства НАТО авијације на снаге Војске Републике Српске (ВРС), као и приликом НАТО агресије на нашу земљу 1999. године и дејствима по јединицама АРЈ ПВД ВЈ).

Заједничка карактеристика за средства НВО јесте чињеница да иста поседују одређени вид радијације, односно зрачења, које се може искористити за њихово лоцирање и неутралисање, што у најблажем случају може довести до оштећења или губитка средства, а у најгорем случају до повређивања и страдања људства. Највећи број губитака људства и технике у АРЈ ПВД ВЈ десила су се услед дејства по батеријама такозваним „ALARM“ ракетама, тј. на енглеском *“Air-launched Anti-radiation Missile”*. Ваздушно лансиране ракете против зрачења користиле су зрачење радара приликом његовог рада како би га лоцирали, закључали као мету и неутралисали.

Разумевањем емисивности, наоружавамо се знањем које може да нам омогући контролу над дигиталним сенкама. Војна опрема, од наоружања, оклопних возила па до авиона, емитује топлотно зрачење које може да ода њихово присуство чак и у потпуном мраку или замраченим окружењима. Контрола емисивности је стога од највеће важности за смањење инфрацрвеног зрачења војних платформи и побољшање шансе њиховог преживљавања од непријатељског деловања.

На вредност емисивности утиче неколико фактора, укључујући врсту материјала, храпавост површине, температуру и присуство премаза или оксидационих слојева. Металне површине, често полиране и рефлектујуће, имају тенденцију да показују ниску

емисивност, чиме емитују мање инфрацрвеног зрачења, док обојене или композитне површине генерално имају веће вредности емисивности. Стратешка манипулација овим површинским својствима омогућава управљање инфрацрвеним зрачењем које може бити пасивно - путем премаза и избора материјала - или активно, путем техника термичке регулације.

На основу таквих искустава отвара се велики спектар могућности употребе композитних материјала или уопштено материјала који могу да врше изолацију средства из одређених спектра.

Материјали који се користе за заштиту од инфрацрвеног зрачења укључују метале, угљеник, керамику, за објекте који поседују уређаје везе цемент са одређеном врстом пепела, проводни полимери и композити. Композитни материјали сачињавају главну окосницу развоја материјала за заштиту од инфрацрвеног зрачења.

Овај рад се фокусира на мерење емисивности материјала војне опреме, користећи инфрацрвену термографију путем FLIR камере – широко доступан и прецизан приступ који омогућава бесконтактно, просторно мапирање емисивности. Циљ је пружити детаљну, поновљиву методологију мерења и показати како се емисивност разликује међу типичним површинама релевантним за војску. На крају, овакви увиди су неопходни за развој ИЦ стелт технологија следеће генерације које равномерно развијају перформансе материјала НВО уз сузбијање ИЦ зрачења.

## 2. Историјска позадина



Слика 1: сер Вилијам Хершел

Године 1800, сер Вилијам Хершел је открио присуство топлотног зрачења ван спектра видљиве светлости. Уз помоћ термометра постављеног изван црвеног дела спектра видљиве светлости, који производи призма, Хершел је демонстрирао присуство невидљивог зрачења чија се енергија може детектовати његовим ефектом загревања. Касније је доказао да ово зрачење, названо инфрацрвено, поштује исте законе као и видљива светлост. Међутим, тек 1830. године развијени су први детектори за ову врсту зрачења, названи термоспрег. Болометар, који се ослања на материјал чији се електрични отпор мења са температуром, појавио се 1880. године и увео је значајно побољшање осетљивости инфрацрвене детекције. Између 1870. и 1920. године, технолошки напредак је довео до развоја првих квантних детектора заснованих на интеракцији између зрачења и материје.

Процес детекције је тако престао да зависи од стварања електричног сигнала услед ефекта загревања зрачењем и уместо тога се ослањао на директно претварање зрачења у електрични сигнал. Утврђено је да фотопроводни или фотонапонски детектори имају много краће време одзива и већу осетљивост.

Даља хронологија је била следећа:

- 1930 – 1944. Развој детектора на бази олово-сулфида ( $\text{PbS}$ ), посебно за војне потребе. Ови детектори су осетљиви у опсегу од  $1,3 - 3 \mu\text{m}$ .
- 1940 – 1950. Проширење спектралног опсега на средњи инфрацрвени спектар, тј.  $3 - 5 \mu\text{m}$  употребом индијум-антимонида ( $\text{InSb}$ ).
- 1960. Истраживање далеког инфрацрвеног спектра,  $8 - 14 \mu\text{m}$ , помоћу детектора на бази жива-телуријум-кадмијум ( $\text{HgTeCd}$ ). Последњи тип детектора захтева хлађење. Због своје веће осетљивости и кратког времена одзива, ови квантни детектори су довели до развоја система термалног снимања који се ослањају на детекцију инфрацрвеног зрачења које емитује материја у опсегу од  $2 - 15 \mu\text{m}$ . [1]

### 3. Порекло инфрацрвеног зрачења

Материја континуирано емитије и апсорбује електромагнетно зрачење. Процес емисије укључује молекуларна побуђења у материјалу, која генеришу радијативне прелазе у његовим саставним честицама [1].

Фундаментални закони класичне електромагнетне теорије показују да се електрично поље  $E$  услед равномерног кретања наелектрисања  $q$  мало разликује од статичког поља:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

где је растојање  $r$  на којем се врше посматрања велико у поређењу са померањем наелектрисања, а  $\epsilon_0$  је пермитивност празног простора.

С друге стране, ако се електрично наелектрисање убрза, Максвелова једначина

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

показује да се енергија ослобађа у облику зрачења.

Пораст температуре узрокује повећање молекуларне екситације унутар материјала, што погодује убрзању одређених носилаца електричног наелектрисања и, самим тим, стварању зрачења [1].

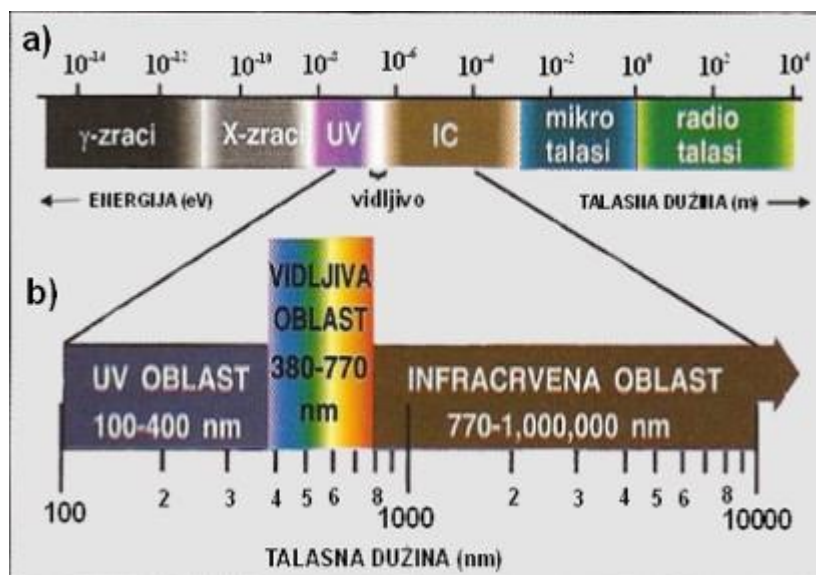
Енергија ослобођена у облику зрачења је:

$$W = \frac{hc}{\lambda}$$

где је  $\lambda$  таласна дужина,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js је Планкова константа а  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s је брзина светлости.

Таласна дужина емитованог зрачења мења се обрнуто сразмерно енергији прелаза. Важно је напоменути да су у инфрацрвеном подручју таласне дужине дугачке, а енергија зрачења ниска. Стога је јасно да ће се појавити потешкоће у детекцији инфрацрвеног зрачења.

Ако материјал дозвољава све могуће прелазе (термичко побуђивање молекула), сваки атом пружа одређену количину енергије зрачења која статистички може да узме све могуће вредности; расподела таласних дужина ће стога бити једнолика и каже се да зрачење има континуирани спектар. Одређене супстанце дозвољавају само неколико добро дефинисаних прелаза (квантни прелазни електрона у атомима). Емисија тада поприма облик дискретних таласних дужина и каже се да има линијски спектар. Апсорпција зрачења материјом резултира супротним процесом, при чему је апсорпција мање или више селективна, у зависности од таласне дужине и материјала. Спектар зрачења је произвољно подељен на одређени број региона који одговарају радним опсезима одређених извора и детектора [1].



Слика 2: а) Спектар електромагнетног зрачења; б) Оптички део спектра

Инфрацрвени спектар емитују супстанце на температурама које се нормално налазе на површини Земље. Сва тела обилно зраче на овим такозваним нормалним температурама. Објекат неће изгледати тамно у инфрацрвеном спектру осим ако се не охлади. Да би се смањила количина зрачења коју тело температуре 20 °C генерише на приближно 4  $\mu\text{m}$  за 1%, његова температура мора бити смањена за 100 °C [1].

Инфрацрвени спектар се може поделити на три велика подручја према детекторима који се користе за његово снимање. Блиско инфрацрвено зрачење се детектује посебним фотографским емулзијама (до 1  $\mu\text{m}$ ), фотоемисивним ћелијама и фотопроводљивим и фотонапонским детекторима. Средње инфрацрвено зрачење се детектује термичким, фотопроводљивим и фотонапонским детекторима. Зрачење у далеком инфрацрвеном спектру може се мерити термичким детекторима [1].

Међународна организација за стандардизацију у свом стандарду ISO 20473 дели инфрацрвено зрачење на 3 подручја [2]:

| Ознака                      | Скраћеница | Таласна дужина          |
|-----------------------------|------------|-------------------------|
| Блиско инфрацрвено подручје | NIR        | 0,78 – 3 $\mu\text{m}$  |
| Средње инфрацрвено подручје | MIR        | 3 – 50 $\mu\text{m}$    |
| Далеко инфрацрвено подручје | FIR        | 50 – 1000 $\mu\text{m}$ |

Табела 1: Подела инфрацрвеног зрачења

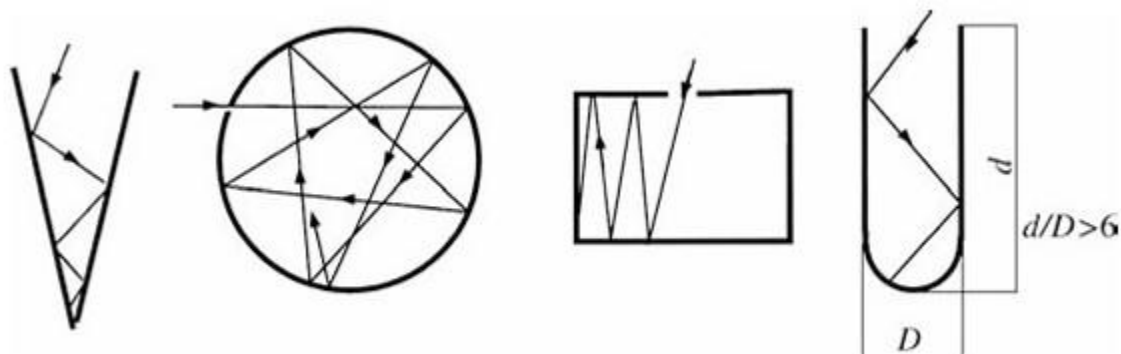
Инфрацрвене таласне дужине се обично мере у микронима ( $\mu\text{m}$ ). Таласни број се често користи, посебно у спектроскопији, и дефинише се као:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}$$

где је  $\lambda$  изражена у метрима.

### 3.1 Зрачење црног тела

Термална емисија чврстих тела се обично третира у смислу концепта црног тела, дефинисаног као објекат способан да потпуно апсорбује сво упадно зрачење, без обзира на његову таласну дужину. Потребно је разумети практичну реализацију црног тела. Постоје два могућа приступа. Прво, постоји потпуно затворена шупљина, тј. шупљина у унутрашњости чврстог тела, којој се приступа кроз отвор, чије су димензије веома мале у поређењу са димензијама шупљине. Систем се понаша као замка за зрачење. Друго, постоји савршено апсорбујућа површина. Посебни третмани површина и боја могу се користити за претварање било ког објекта у савршен апсорбер. Према Кирхофовим законима (1860), такав објекат је такође емитер зрачења свих таласних дужина. Он преноси енергију у околину док се не постигне стање термодинамичке равнотеже [1,3]. Концепт савршено црног тела игра веома важну улогу у мерењу инфрацрвене термографије. Неколико модела црних тела приказано је на слици 3.



Слика 3: Модели црних тела

Спектар зрачења црног тела зависи само од његове температуре и дат је Планковом формулом [4]:

$$I_{\lambda T} = C \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

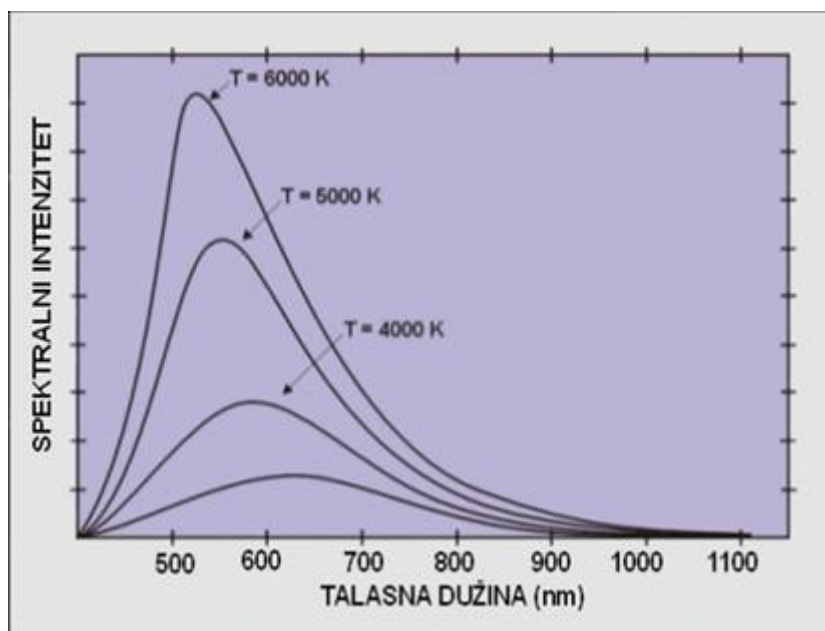
где је:  $I_{\lambda T}$  спектрални интензитет зрачења (интензитет зрачења које тело загрејано до температуре  $T$  емитује на одређеној таласној дужини  $\lambda$ ),  $k$  Болцманова константа,  $h$  Планкова константа,  $C$  константа пропорционалности која износи  $\frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3}$ . Планкова формула заправо даје зависност спектралног интензитета зрачења црног тела од његове температуре  $T$  [4].

На слици 4 је графички представљена зависност интензитета зрачења црног тела на различитим температурама од таласне дужине. Укупан интензитет зрачења које емитује

црно тело на свим таласним дужинама сразмеран је површини испод криве за одговарајућу температуру  $T$ . Са графика се види да ова површина, односно укупан интензитет зрачења, расте са повећањем температуре црног тела. Према Штефан-Болцмановом закону, укупан интензитет зрачења, односно енергија коју црно тело емитује са јединице површине у јединици времена, је сразмеран четвртој степену његове апсолутне температуре [4]:

$$I = \sigma T^4$$

где је  $\sigma$  Штефан-Болцманова константа  $5,71 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .



Слика 4: Зависност интензитета зрачења црног тела на различитим температурама од таласне дужине

Са графика се такође види да се максимуми интензитета зрачења са повећањем температуре померају ка областима краћих таласних дужина. Таласну дужину која одговара максимуму спектралног интензитета црног тела на посматраној температури, можемо одредити на основу Виновог закона померања, који управо даје везу између температуре црног тела  $T$  и положаја максимума  $\lambda_{\max}$  његовог спектралног интензитета [4]:

$$T\lambda_{\max} = b$$

где је  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$ . Из поменуте једначине следи да је:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Из коначне једначине закључујемо да је таласна дужина која одговара максимуму спектралног интензитета црног тела обрнуто сразмерна његовој апсолутној температури.

## 4. Емисивност

Појам емисивности је врло важан за разумевање инфрацрвеног зрачења неког објекта. За војну опрему, емисивност је кључни фактор у управљању термалним трагом, посебно у инфрацрвеном (ИЦ) спектру, јер утиче на то колико је објекат видљив системима за термално снимање, као што су инфрацрвене камере, трагачи ракета или сензори за ноћно гледање.

Емисивност површине материјала је однос енергије коју зрачи материјал на температури  $T$  и енергије коју зрачи црно тело на истој температури. Топлотно зрачење је електромагнетно зрачење које најчешће укључује и видљиво зрачење (светлост) и инфрацрвено зрачење, које није видљиво људском оку. Део топлотног зрачења са веома врућих предмета је лако видљив оком [1,2,5].

Емисивност површине зависи од њеног хемијског састава и геометријске структуре. Однос варира од 0 до 1 [5]. Површина савршено црног тела (са емисивношћу од 1,0) емитује топлотно зрачење од приближно  $448 \text{ W/m}^2$  на собној температури од  $25^\circ\text{C}$  ( $298 \text{ K}$ ;  $77^\circ\text{F}$ ). Објекти који имају емисивност мању од 1,0 емитују зрачење у одговарајуће мањој мери [5].

Спектрална емисивност се споро мења са таласном дужином у случају чврстих објеката, али брзо флукутира у случају гасова и течности. Штавише, емисивност површине у видљивом опсегу често нема никакве везе са њеном инфрацрвеном емисивношћу. На пример, снег има веома ниску видљиву емисивност, али је одлично црно тело у инфрацрвеном спектру. Ово својство омогућава прилично споро топљење истог и повратак воде у течно стање, чак и под излагањем сунчевој светлости. Уствари, већина видљивог сунчевог зрачења се дифузује и рефлектује; већа инфрацрвена емисивност омогућава поновну емисију апсорбоване инфрацрвене енергије. Генерално, метали имају релативно високу емисивност која брзо расте са температуром, док се на површини топлог метала не формира оксид. Други материјали имају високе емисивности које имају тенденцију да се смањују са температуром. У свим случајевима, емисивност зависи од површине материјала [1].

Вредности емисивности различитих површина на одређеној температури дате су у табели 2, а преузете са веб сајта фирме “FLUKE процесни инструменти”.

\* Емисивности скоро свих материјала мериле су се на  $0^\circ\text{C}$  и не разликују се значајно на собној температури [6].

\*\* Емисивност боје, сребрна завршна обрада, мерена је на  $25^\circ\text{C}$ , а емајла на  $27^\circ\text{C}$  [6].

Емисивност материјала заступљених у НВО

| Материјал                        | Емисивност | Материјал                      | Емисивност |
|----------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| Алуминијум, полирани             | 0,05       | Гвожђе, ковано, полирано       | 0,28       |
| Алуминијум, храпава површина     | 0,07       | Лак, бакелит                   | 0,93       |
| Алуминијум, јако оксидиран       | 0,25       | Лак, црни, мат                 | 0,97       |
| Азбестна плоча                   | 0,96       | Лак, црни, сјајни              | 0,87       |
| Азбестна тканина                 | 0,78       | Лак, бели                      | 0,87       |
| Азбестни папир                   | 0,94       | Чађ                            | 0,96       |
| Азбестни шкриљац                 | 0,96       | Олово, сиво                    | 0,28       |
| Месинг, мат, потамнео            | 0,22       | Олово, оксидовано              | 0,63       |
| Месинг, полиран                  | 0,03       | Олово, црвено, у праху         | 0,93       |
| Цигла, обична                    | 0,85       | Олово, сјајно                  | 0,08       |
| Цигла, глазирана, груба          | 0,85       | Жива, чиста                    | 0,10       |
| Цигла, ватростална, груба        | 0,94       | Никл, на ливеном гвожђу        | 0,05       |
| Бронза, порозна, груба           | 0,55       | Никл, чисти полирани           | 0,05       |
| Бронза, полирана                 | 0,10       | Боја, сребрна завршна обрада** | 0,31       |
| Угљеник, пречишћен               | 0,80       | Боја, уљана, просечна          | 0,94       |
| Ливено гвожђе, грубо ливено      | 0,81       | Папир, црн, сјајан             | 0,90       |
| Ливено гвожђе, полирано          | 0,21       | Папир, црн, мат                | 0,94       |
| Угаљ, прашкаст                   | 0,96       | Папир, бели                    | 0,90       |
| Хром, полиран                    | 0,10       | Платина, чиста, полирана       | 0,08       |
| Глина, печена                    | 0,91       | Порцелан, глазиран             | 0,92       |
| Бетон                            | 0,54       | Кварц                          | 0,93       |
| Бакар, полиран                   | 0,01       | Гума                           | 0,93       |
| Бакар, комерцијално полиран      | 0,07       | Шелак, црн, мат                | 0,91       |
| Бакар, оксидован                 | 0,65       | Шелак, црн, сјајан             | 0,82       |
| Бакар, оксидован у црно          | 0,88       | Снег                           | 0,80       |
| Изотермична трака, црна пластика | 0,95       | Челик, поцинкован              | 0,28       |
| Емајл **                         | 0,90       | Челик, јако оксидиран          | 0,88       |
| Формика                          | 0,93       | Челик, свеже ваљани            | 0,24       |

Емисивност материјала заступљених у НВО

|                                     |      |                        |      |
|-------------------------------------|------|------------------------|------|
| Замрзнуто земљиште                  | 0,93 | Челик, хрпава површина | 0,96 |
| Стакло                              | 0,92 | Челик, рђаво црвен     | 0,69 |
| Стакло, матирано                    | 0,96 | Челик, лим, никлован   | 0,11 |
| Злато, полирано                     | 0,02 | Челик, лим, ваљани     | 0,56 |
| Лед                                 | 0,97 | Катрански папир        | 0,92 |
| Гвожђе, топло ваљано                | 0,77 | Калај, полиран         | 0,05 |
| Гвожђе, оксидовано                  | 0,74 | Волфрам                | 0,05 |
| Гвожђе, поцинковани лим, полиран    | 0,23 | Вода                   | 0,98 |
| Гвожђе, поцинковани лим, оксидовано | 0,28 | Цинк, лим              | 0,20 |
| Гвожђе, сјајно, нагризано           | 0,16 |                        |      |

Табела 2: Вредности емисивности за познате материјале мерене од стране фирме “FLUKE”

Вредности емисивности различитих површина дате су и у табели 3, а преузете са веб сајта фирме “ThermoWorks”.

| Материјал                            | Емисивност  | Материјал                          | Емисивност  |
|--------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| Алуминијум: анодизирани              | 0,77        | Угљеник: графит, обрађена површина | 0,98        |
| Алуминијум: полиран                  | 0,05        | Угљеник: пречишћен                 | 0,80        |
| Азбест: табла                        | 0,96        | Цемент                             | 0,54        |
| Азбест: тканина                      | 0,78        | Дрвени угаљ: прах                  | 0,96        |
| Азбест: папир                        | 0,93        | Иверица: необрађена                | 0,90        |
| Азбест: шкриљац                      | 0,96        | Хром: полирани                     | 0,10        |
| Месинг: високо полиран               | 0,03        | Глина: печена                      | 0,91        |
| Месинг: оксидован                    | 0,61        | Бетон                              | 0,92        |
| Цигла: обична                        | 0,81 - 0,86 | Бетон: сув                         | 0,95        |
| Цигла: обична, црвена                | 0,93        | Бетон: груб                        | 0,92 - 0,97 |
| Цигла: фасадна, црвена               | 0,92        | Бакар: полиран                     | 0,05        |
| Цигла: шамотна глина                 | 0,75        | Бакар: оксидован                   | 0,65        |
| Цигла: зидарска                      | 0,94        | Емајл: лак                         | 0,90        |
| Цигла: црвена                        | 0,90        | Тканина: јута, зелена              | 0,88        |
| Угљеник: чађ од свеће                | 0,95        | Тканина: јута, необојена           | 0,87        |
| Фиберглас                            | 0,75        | Пунило: бело                       | 0,88        |
| Влакнаста плоча: порозна, необрађена | 0,85        | Влакнаста плоча: тврда, необрађена | 0,85        |

Емисивност материјала заступљених у НВО

|                                                          |             |                                                      |             |
|----------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------|-------------|
| Шамотна цигла                                            | 0,68        | Графит: прах                                         | 0,97        |
| Прехрамбени и органски материјали                        | 0,95 - 0,97 | Шљунак                                               | 0,28        |
| Формика                                                  | 0,94        | Гипс                                                 | 0,85        |
| Поцинкована цев                                          | 0,46        | Тврдо дрво: попречна влакна                          | 0,82        |
| Стакло                                                   | 0,92        | Тврдо дрво: дуж влакана                              | 0,68 - 0,73 |
| Стакло: хемијски производи (делимично провидно)          | 0,97        | Лед                                                  | 0,97        |
| Стакло: матирано                                         | 0,96        | Гвожђе: јако зарђало                                 | 0,91 - 0,96 |
| Стакло: матирано                                         | 0,70        | Лак: бакелит                                         | 0,93        |
| Стакло: полирана плоча                                   | 0,94        | Лак: мат црни                                        | 0,97        |
| Гранит: природна површина                                | 0,96        | Црна лампа                                           | 0,96        |
| Кречњак: природна површина                               | 0,96        | Боја: уљана, разне боје                              | 0,94        |
| Малтер                                                   | 0,87        | Боја: пластична, црна                                | 0,95        |
| Малтер: сув                                              | 0,94        | Боја: пластична, бела                                | 0,84        |
| ПВЦ                                                      | 0,91 - 0,93 | Папир: црни                                          | 0,90        |
| Боја: ЗМ, црни сомотски премаз, серија 9560 оптички црна | 1,00        | Папир: црни, мат                                     | 0,94        |
| Боја: алуминијум                                         | 0,45        | Папир: црни, сјајни                                  | 0,90        |
| Боја, уљана: просек од 16 боја                           | 0,94        | Папир: картонска кутија                              | 0,81        |
| Боја: уљана, црна, мат                                   | 0,94        | Папир: зелени                                        | 0,85        |
| Боја: уљана, црна, сјајна                                | 0,92        | Папир: црвени                                        | 0,76        |
| Боја: уљана, сива, мат                                   | 0,97        | Папир: бели                                          | 0,68        |
| Боја: уљана, сива, сјајна                                | 0,94        | Папир: бели картон                                   | 0,93        |
| Папир: жути                                              | 0,72        | Пластика: црна                                       | 0,95        |
| Папир: катран                                            | 0,92        | Пластика: бела                                       | 0,84        |
| Цеви: глазиране                                          | 0,83        | Пластични папир: црвени                              | 0,94        |
| Гипс                                                     | 0,86 - 0,90 | Пластични папир: бели                                | 0,84        |
| Гипс: груби премаз                                       | 0,91        | Плексиглас: перспекс                                 | 0,86        |
| Гипсане плоче: необрађене                                | 0,90        | Шперплоча                                            | 0,83 - 0,98 |
| Пластика: акрил, провидна                                | 0,94        | Шперплоча: комерцијална, глатка завршна обрада, сува | 0,82        |

|                                     |      |                                     |             |
|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-------------|
| Шперплоча: необрађена               | 0,83 | Гума: чеп, црна                     | 0,97        |
| Полипропилен                        | 0,97 | Песак                               | 0,90        |
| Порцелан: глазиран                  | 0,92 | Кожа, људска                        | 0,95 - 0,98 |
| Кварц                               | 0,93 | Снег                                | 0,80        |
| Црвено дрво: ковано, необрађено     | 0,83 | Земљиште: суво                      | 0,92        |
| Црвено дрво: необрађено             | 0,84 | Земљиште: замрзнуто                 | 0,93        |
| Гума                                | 0,95 | Земљиште: засићено водом            | 0,95        |
| Нерђајући челик                     | 0,59 | Вода                                | 0,95        |
| Нерђајући лим                       | 0,34 | Вода: дестилована                   | 0,95        |
| Челик: поцинковани                  | 0,28 | Вода: лед, глатки                   | 0,96        |
| Челик: свеже ваљани                 | 0,24 | Вода: кристали мраза                | 0,98        |
| Стиропор: изолациони                | 0,60 | Вода: снег                          | 0,85        |
| Трака: електрична, изолациона, црна | 0,97 | Дрво: рендисано                     | 0,90        |
| Трака: маскирајућа                  | 0,92 | Дрво: панели, светла завршна обрада | 0,87        |
| Плочице: подне, азбестне            | 0,94 | Дрво: смрча, полирано, суво         | 0,86        |
| Плочице: глазиране                  | 0,94 | Лак: равни                          | 0,93        |
| Калај: полирани                     | 0,05 | Тапета: благо шарена, светло сива   | 0,85        |
| Калај: комерцијални калајисани лим  | 0,06 | Тапета: благо шарена, црвена        | 0,90        |

Табела 3: Вредности емисивности за неке материјале мерене од стране фирме "ThermoWorks"

## 4.1 Значај емисивности у војној примени

- Ниска емисивност = ниска детекција: нпр. облога авиона, тела ракета
- Висока емисивност = термални мамци: нпр. инфрацрвене бакље, топлотне замке
- Емисивност утиче на пригушивање термичког потписа, контра-надзор и обману циља.

Измерени подаци о емисивности могу се укључити у алате за термално моделирање како би се предвидео инфрацрвени потпис платформе у оперативним условима. Ово омогућава избор материјала и оптимизацију обраде површине како би се смањила инфрацрвена детекција. На пример, наношење премаза са ниском емисивношћу или инжењерских текстура површине може смањити термички контраст у односу на природну позадину, што компликује детекцију непријатељских сензора (Табела 4).

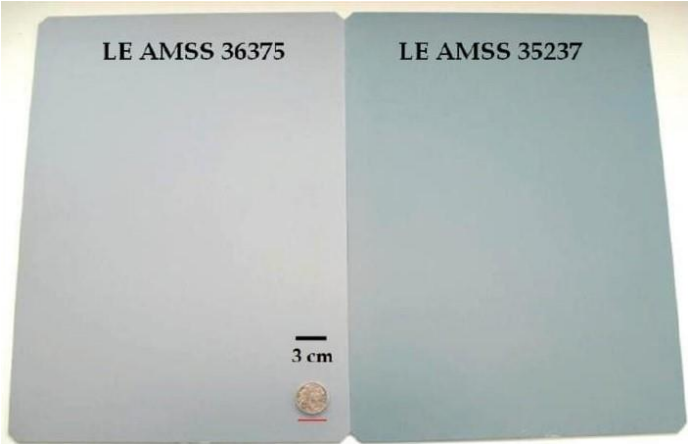
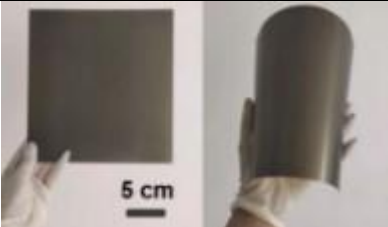
| НВО                                   | Методe смањења ИЦ зрачења                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Тенкови и оклопни транспортери</b> | користе боје за сузбијање инфрацрвеног зрачења (металне љуспице (нпр. алуминијум, никл) дисперговане у полимерној матрици, спектрално селективна својства, што значи да емитују мање у инфрацрвеним опсезима од 3–5 $\mu\text{m}$ и 8–12 $\mu\text{m}$ које користи већина термалних камера, стабилне у широким температурним опсезима), изолацију за маскирање топлоте мотора (користе влакна и фолије са ниском инфрацрвеном емисијом, разбија топлотну силуету, стварање ваздушних канала), методу ублажавања загревања од терена и околине (паркирање у хладу, влажне или рефлектујуће цераде, коришћење природног термалног “нереда” - мешавина камења и лишћа за боље уклапање у средину), процедуралне методе (смањење времена рада мотора у месту како би се смањило загревање мотора и издувних гасова, избегавање дугог излагања сунцу кад год је то могуће, планирање покрета током хладнијих временских периода) итд.                                                        |
| <b>Авиони</b>                         | користе премазе са ниском емисијом (RAM - radar-absorbent material), управљање издувним гасовима мотора (мешање хладног ваздуха са издувним гасовима (концепт турбовентилатора), коришћење геометрије млазница које подстичу брзо мешање топлих и хладних токова ваздуха ради смањења температуре издувног млаза), оперативне методе (избегавање дугих надзвучних летова који изазивају прекомерно аеротермално загревање, периоди хлађења на земљи пре мисија) итд.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Морнарички бродови</b>             | користе системе за дисперзију топлоте, боје сузбијање инфрацрвеног зрачења (направљене да издрже слану воду, излагање УВ зрачењу и абразију), композитне панеле са ниском емисијом (модерни ратни бродови све више користе стаклена влакна, угљенична влакна или хибридне композите, који омогућавају строжу контролу емисивности, глатке спољне облоге омогућавају премазима да одрже уједначена својства емисивности), геометрију која смањује термални контраст (велике, равне, уједначене површине смањују температурне контрасте, угаони панели могу преусмерити емисију инфрацрвеног зрачења даље од праваца претње), оперативне методе (смањење оптерећења мотора како би се избегли велики термални млазеви, прање палуба ради уклањања соли и смањења соларног загревања), термичке камуфлажне мреже или панели (лучка/статичка употреба - цераде или панели за пригушивање инфрацрвеног зрачења могу се поставити преко кључних подручја током одржавања или складиштења) итд. |
| <b>Дронови и беспилотне летелице</b>  | Термална видљивост дронова и БПЛ потиче од површинске емисивности, вишка топлоте из електронике, батерија и мотора, аеродинамичког загревања (при већим брзинама) и врућих издувних гасова (ако се користе мотори са унутрашњим сагоревањем). Методе за смањење емисивности су коришћење боја за сузбијање инфрацрвеног зрачења (сличне онима које се користе на авионима и сателитима - отпорне на УВ зрачење, влагу и ерозију услед протока ваздуха), изоловање компоненти које стварају топлоту (термичка ћебад или                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

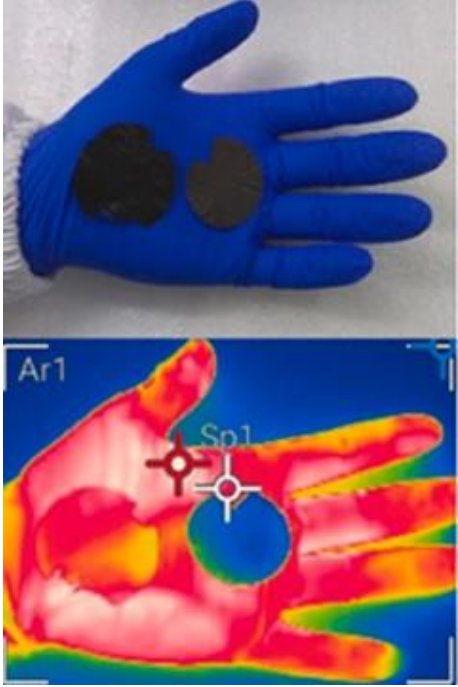
| НВО           | Методe смањења ИЦ зрачења                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|               | штитови око мотора, изоловање одељака за батерије ради смањења проводљивости топлоте до облоге, коришћење унутрашњих преграда за одвајање врућих компоненти од спољашњих површина), термална контрола батерије (термо подлоге између хелија и унутрашњих хладњака, осигуравање да спољни омотачи не апсорбују топлоту батерије директно, постојање канала за хлађење унутар структура трупа), оперативне методе (минимизирањем лебдења или режима лета са великим оптерећењем, коришћењем атмосферских услова (облачност, температура околине), искоришћавањем природно ниског термичког потписа електричних беспилотних летелица током крстарења) итд                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Ракете</b> | трагачи ракета често циљају објекте са високом емисијом (као што су млазнице мотора), па се користи заштита или усмерење издувних гасова, боја за сузбијање инфрацрвеног зрачења (које морају да издрже високо аеродинамичко загревање, криогене термичке циклусе, изложеност УВ зрачењу и атомском кисеонику (у горњој атмосфери)), термално управљање унутрашњим изворима топлоте (смањење топлоте која допире до спољашњег омотача смањује детектабилно инфрацрвено зрачење а ракете доживљавају топлотна оптерећења од криогених резервоара, боца са хелијумом, пумпи и авионике), унутрашња изолација и термичке баријере (изолација криогених резервоара (пена итд), парне баријере, одвојива изолација у врућим одељцима), активно хлађење авионике или сензора (течни расхладни кругови одводе топлоту у унутрашње структуре тј. сензорски невидљиве области, термичке траке усмеравају топлоту даље од танких спољних омотача, канали за проток ваздуха унутар оклопа смањују локализовано површинско загревање), оперативне методе (лансирање током хладнијих амбијенталних услова, коришћење белих или рефлектујућих премаза за смањење апсорпције сунчеве светлости) итд |

Табела 4: Методe смањења ИЦ зрачења представа НВО

Да би се супротставиле инфрацрвеној детекцији, разне војске света користе (Табела 5):

- Специјалне премазе (нпр. полиуретанске или на бази силикона)
- Мултиспектралну камуфлажу (визуелну + инфрацрвену)
- Издувне системе са каналима
- Активне системе хлађења

| Систем /<br>Материјал                                                   | Примена материјала за смањење емисивности                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Накидка</b><br/>(Руска термална<br/>мрежа и<br/>камуфлажа)</p>    |  <p>Смањује инфрацрвени потпис руских тенкова Т90М 2 до 3 пута, а<br/>радарски потпис чак 6 пута</p>                              |
| <p><b>Премази ниске<br/>емисивности<br/>аустралијске<br/>војске</b></p> |  <p>Смањене ИЦ емисије у опсезима од 3 – 14 <math>\mu\text{m}</math> на возилима која користе<br/>завршне премазе AMSS36375</p> |
| <p><b>Пасивни<br/>премази на<br/>бази <math>\text{VO}_2</math></b></p>  |  <p>Обезбеђују самоадаптивну контролу емисивности без електронике</p>                                                           |

| Систем /<br>Материјал                                                          | Примена материјала за смањење емисивности                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Au-VO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-<br/>Au<br/>метаматеријал</b> | Прилагодљива ИЦ камуфлажа са могућношћу подешавања емисивности за различита термална окружења                                                                                                                                  |
| <b>Материјали од<br/>графена</b>                                               |  <p>Лабораторијски прототипови дебљине &lt; 50μm показују подударање боја/температуре у реалном времену са позадином посматране слике</p>   |
| <b>BAE Systems<br/>“Adaptiv”</b>                                               |  <p>Термални „плашт“ за м/в. Практични проблеми као што су потребе за напајањем и прецизност сензора ограничили су даљи развој система</p> |

Табела 5: Примене материјала и система за смањење ИЦ одраза у свету

Кључни изазови у мерењу емисивности су:

- Зависност од угла - Емисивност варира у зависности од угла емисије; мора се интегрисати или мерити на релевантним угловима.
- Селективност таласне дужине - ИЦ камере виде само одређене опсеге (нпр. 8 – 12  $\mu\text{m}$ ); емисивност ван тог опсега остаје непримећена.
- Текстура површине - Грубе, оксидоване или прашњаве површине емитују другачије од чистих лабораторијских узорка.
- Утицаји температуре - Неки материјали (нпр.  $\text{VO}_2$ ) имају температурно зависне вредности  $\epsilon$ .
- Амбијеталне рефлексије - Рефлектовани ИЦ зраци из околине могу искривити резултате - посебно на површинама са ниским вредностима  $\epsilon$ .

## 4.2 Инфрацрвена термографија

Термографија, или термално снимање, је метода одређивања просторне расподеле топлоте у објектима који се испитују и њене временске зависности. Инфрацрвена термографија може се дефинисати и као наука о прикупљању и анализи података из бесконтактних уређаја за термовизијско снимање. Термографија је бесконтактна, недеструктивна техника. Термографија дословно значи „писање топлотом“, баш као што фотографија подразумева „писање светлошћу“ [1,2,7,10].

Како инфрацрвено зрачење емитују сва тела зависно од њихове температуре, према закону зрачења црног тела, термографија омогућава „гледање“ околине без видљивог осветљења. Количина зрачења се повећава с температуром, стога термографија омогућава праћење промене температуре (отуда и име термографија). Систем који се користи у ову сврху мора бити у стању да трансформише инфрацрвену слику у видљиву слику. Његова функција је дакле да створи видљиву слику са расподелом зрачења која је пропорционална расподели инфрацрвеног зрачења објекта, тј. његовој просторној расподели температуре  $T(y, z)$  или расподели емисивности  $\epsilon(y, z)$ . Ова конверзија се обично постиже брзим секвенцијалним скенирањем објекта помоћу елемента поља радиометра површине  $S$ . Расподела инфрацрвеног зрачења скенираног објекта  $L(y, z)$  производи сигнал детектора  $s(t)$  чија зависност од времена представља расподелу зрачења преко објекта (видео сигнал). Сигнал  $s(t)$  се појачава и доводи до визуелне јединице за приказ чији је сноп усмерен на скенер, а видљива слика произведена на овај начин је пропорционална инфрацрвеном зрачењу објекта [1,2,7].

Гледани термографском камером, топли предмети се добро истичу у односу на хладнију позадину; људи и друге топлокрвне животиње постају лако видљиви у односу на околину, дању и ноћу. Стога се широка употреба термографије историјски везује за војне примене [2].

Термографија користи термалне инфрацрвене камере за мерење температуре објекта или његове емисивности. Јасно је да ће скоро црна тела дати одличан резултат јер измерено зрачење тада практично у потпуности настаје из самоемисије. Планков закон тако

омогућава израчунавање одговарајуће температуре. Резултати су много лошији када је емисивност посматраног предмета/материјала ниска. Прво, на једнаким температурама, енергија коју зрачи објекат са ниском емисивношћу је мања од енергије коју зрачи црно тело. Овај феномен сам по себи није превише узнемирујући јер познавање емисивности, у комбинацији са добром осетљивошћу детекције, омогућава израчунавање температуре објекта. Друго, и много штетније за мерење, је рефлексија материјала која је висока када је емисивност ниска, доприносећи паразитском зрачењу из амбијенталног простора. Стога је веома тешко разликовати зрачење услед самоемитовања од зрачења услед рефлексије. Међутим, и даље је могуће добити валидне резултате када је температура објекта знатно виша од температуре околне средине. Паразитна енергија је тада ниска, чак и за објекат просечне рефлексије. Коначно, вреди напоменути да ниједно мерење није могуће за високо рефлектујуће материјале чија је самоемисија практично нула. Да резимирамо, кад год је то могуће, мерења треба вршити на „црним“ површинама или површинама које су вештачки поцрњене бојом или третманима који производе високу емисивност [1,7].

До сада је инфрацрвена термографија увелико доказала своју корисност, што је довело до ширења инфрацрвених уређаја који испуњавају жеље мноштва корисника у широком спектру примена. Уствари, систем инфрацрвеног снимања може се прилагодити специфичним захтевима. И стога, имамо на располагању широк избор инфрацрвених уређаја, који се разликују по тежини, димензијама, облику, перформансама и наравно трошковима.

Након правилног избора: инфрацрвеног система, поступка испитивања и узастопне анализе података, могуће је користити инфрацрвену термографију у многим областима примене и за многе различите сврхе. На пример, ИЦТ се може користити за дијагнозу (у медицини, архитектури, одржавању), или за разумевање сложених феномена динамике флуида (нестабилност протока, одвајање протока и поновно спајање), или за карактеризацију материјала и процену поступака што може помоћи у побољшању дизајна и израде производа. Међутим, инфрацрвени уређај се може искористити и за контролу процеса и планирање одржавања са смањењем нежељених застоја у производњи и последичном уштедом новца [8].

Војска је била међу првима која је предвидела занимљиве могућности за инфрацрвене системе током два светска рата, а главна идеја је била да се има систем надгледања способан да открије присуство потенцијалних мета у лошим условима видљивости (нпр. ноћу или у магли). То није изненађујуће, јер је топлота која се ослобађа у околини деградирани облик енергије са великом ентропијом: то је нуспроизвод. Уствари, механичко трење и сагоревање не могу да избегну расипање топлоте. Топлота је стога верни сведок људских (и непријатељских) активности. Данас су многа истраживања инфрацрвеног зрачења и даље усмерена у овом правцу, уз додатак синтезе инфрацрвених слика, што омогућава моделирање и предвиђање потписа циљева у одређеним условима (Барнард и Бореман 1990), а такође и инфрацрвеног сателитског надзора који омогућава, на пример, да се тактичке мисије у току открију са писта које остају вруће дуго након полетања авиона (ова техника је примењена у Заливском рату 1991. године). Још једна важна војна примена инфрацрвеног зрачења је у распоређивању контрамера (Вагонер 1991). На пример, детекција непријатељских ракета или авиона у ваздуху из њихових врућих издувних гасова. У овом случају, инфрацрвени системи за снимање и интерпретацију се преносе ваздухом у ракети-пресретачици. Ракета AIM-9 са бочним

навођењем и ракета са терминално вођеном подмуницијом (TGSM) усмерена на уништавање тенкова су примери таквих „интелигентних“ уређаја за противмере који детектују „тачке убице“ непријатељске мете током фазе навођења, на основу унапред снимљених термалних потписа, као што је у Систему библиотеке мета и позадине (TABILS). Треба напоменути да такви системи нису увек пасивни, јер ће у неким случајевима мета бити континуирано осветљена ласерским зраком док се вектор пресретака фокусира на рефлектовано зрачење [9].

### 4.3 Мерење емисивности помоћу FLIR инфрацрвене камере

ФЛИР камере детектују дуготаласно инфрацрвено зрачење (типично 8 – 14  $\mu\text{m}$ ), претварајући зрачење у читавања температуре путем уграђене Планкове калибрације.

Инфрацрвена термографија функционише тако што детектује топлотно зрачење које емитују површине. Сензор камере бележи зрачење у специфичном спектралном опсегу, које се затим преводи у читавање привидне температуре на основу претпостављене вредности емисивности. Међутим, пошто се емисивност разликује између материјала, прецизно мерење температуре захтева познавање или процену стварне емисивности.

За мерење емисивности, уобичајени приступ је коришћење референтног материјала са познатом емисивношћу, упоређивање привидних температура и учестало подешавање параметра емисивности на камери док се температуре не поклопе. Ова метода користи директну везу између емисивности и детектоване радијације, јер емисивност ефикасно скалира интензитет емитованог зрачења.

#### 4.3.1 Поставка експеримента

- Опрема: За мерења користимо FLIR термалну камеру опремљену средњоталасним или дуготаласним IR сочивом, калибрисаним за радиометријско мерење температуре у опсегу од 7,5 – 13  $\mu\text{m}$ . Важно је да видно поље камере садржи довољан број пиксела по области мерења (најмање 10×10 пиксела) како би се смањио шум.



Слика 5: Термална камера FLIR E40

|                                  |                                               |
|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>IR резолуција</b>             | 160 x 120 пиксела                             |
| <b>MSX резолуција</b>            | 320 x 240 пиксела                             |
| <b>Термичка осетљивост/NETD</b>  | <0,07 °C на +30 °C (+303,15 °K) / 70 mK       |
| <b>Фреквенција слике</b>         | 60 Hz                                         |
| <b>Радни температурни опсег</b>  | -15 °C до +50 °C (-258,15 °K до + 395,15 °K)  |
| <b>Опсег температуре објекта</b> | -20 °C до +120 °C (-269,15 °K до + 521,15 °K) |
| <b>Тачност</b>                   | ±2 °C (±2 °K) или ±2 % читавања               |
| <b>Спектрални опсег</b>          | 7,5–13 μm                                     |

Табела 6: Техничке карактеристике термалне камере FLIR E40

- Припрема узорка: Припремљени су репрезентативни панели који симулирају површине војне опреме. То укључује полиране метале (алуминијум, челик), мат и камуфлажне боје, композитне материјале. Сваки узорак има мали део референтне траке високе емисивности (приближна емисивност 0,95) причвршћен да служи као калибрациони стандард.



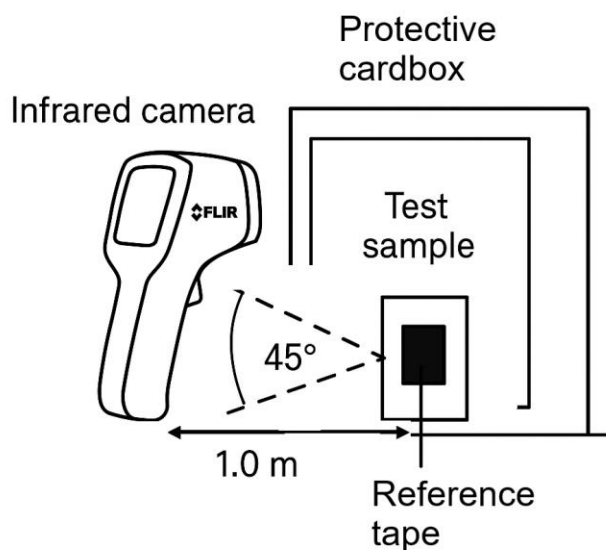
Слика 6: Лабораторијски узорак – минобацачка мина 60 mm M57 са SMB превлаком и причвршћеном траком високе емисивности

- Термичко кондиционирање: Узорци се загревају на температуру 20°C већу од амбијенталне, помоћу коморе. Комора потврђује да су узорци достигли уједначену површинску температуру како би се осигурала валидна читавања емисивности. Ово одражава типичне оперативне температуре површине у теренским условима.



Слика 7: Лабораторијска комора коришћена за загревање узорака

- Контрола околине: Прецизан унос параметара - температура околине, влажност, угао мерења и удаљеност од камере се пажљиво бележе и уносе у FLIR камеру како би се избегли рефлектовани извори топлоте из околине и кориговала апсорпција или расејање инфрацрвеног зрачења у атмосфери.



Слика 8: Шема експерименталне поставке

### 4.3.2 Поступак мерења

Калибрација и загревање камере: FLIR камера се укључује најмање 30 минута пре мерења како би се осигурала стабилност сензора.

Постављање референтне траке: Користи се трака или боја са вредношћу емисивности 0,95. Трака се поставља на видљиву и што је могуће равнију површину.

Мерење референтне траке: Параметар емисивности на камери је подешен на 0,95. Камера је фокусирана на референтну траку, а читавање привидне температуре ( $T_{ref}$ ) се бележи када се иста стабилизује.

Подешавање параметара камере: Уносимо параметре за емисивност, рефлектовану температуру, даљину мерења, влажност ваздуха.

Мерење површине узорка: Усмеравамо камеру ка површини узорка. Подешавање емисивности се постепено мења у интерфејсу камере док се измерена температура не поклопи са  $T_{ref}$ . Вредност емисивности у овој тачки се бележи као емисивност узорка ( $\epsilon_{sample}$ ).

Вишеструка читавања: Овај процес се понавља на најмање пет различитих подручја на сваком узорку како би се узела у обзир хетерогеност површине. Израчунавају се просечна емисивност и стандардна девијација.

Валидација података: За калибрацију, користимо зрачење најприближније црном телу (референтна трака или боја).

### 4.3.3 Резултати мерења

| Материјал                       | Измерена емисивност ( $\epsilon$ ) | Просечна измерена емисивност ( $\epsilon$ ) | Температура изолит траке ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Дрвени сандук за муницију       | 0,82                               | 0,85                                        | 46                                              |
|                                 | 0,87                               |                                             | 37.7                                            |
|                                 | 0,87                               |                                             | 34.5                                            |
| Униформа М10                    | 0.85                               | 0.87                                        | 51                                              |
|                                 | 0.87                               |                                             | 47                                              |
|                                 | 0.82                               |                                             | 41.7                                            |
|                                 | 0.9                                |                                             | 40                                              |
|                                 | 0.9                                |                                             | 36.6                                            |
| Чичак за амблем на униформи М10 | 0.78                               | 0.81                                        | 51                                              |
|                                 | 0.8                                |                                             | 47                                              |
|                                 | 0.77                               |                                             | 43                                              |

Емисивност материјала заступљених у НВО

| Материјал                  | Измерена емисивност (ε) | Просечна измерена емисивност (ε) | Температура изолир траке (°C) |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
|                            | 0.8                     |                                  | 41.7                          |
|                            | 0.83                    |                                  | 40                            |
|                            | 0.84                    |                                  | 37.7                          |
|                            | 0.83                    |                                  | 36.6                          |
| Униформа М93               | 0.78                    | 0.83                             | 51                            |
|                            | 0.8                     |                                  | 47                            |
|                            | 0.8                     |                                  | 41.7                          |
|                            | 0.87                    |                                  | 40                            |
|                            | 0.87                    |                                  | 37.7                          |
|                            | 0.87                    |                                  | 36.6                          |
| Амблем ВС                  | 0.69                    | 0.71                             | 51                            |
|                            | 0.73                    |                                  | 43                            |
|                            | 0.7                     |                                  | 40                            |
|                            | 0.73                    |                                  | 36.6                          |
| Оквир пушке М70            | 0.6                     | 0.64                             | 52.7                          |
|                            | 0.65                    |                                  | 48.5                          |
|                            | 0.64                    |                                  | 46                            |
|                            | 0.68                    |                                  | 42.5                          |
| Оквир пиштоља Ц399         | 0.7                     | 0.72                             | 43.5                          |
|                            | 0.73                    |                                  | 41.3                          |
|                            | 0.74                    |                                  | 40.6                          |
| Оквир пиштоља М57          | 0.78                    | 0.78                             | 40                            |
|                            | 0.79                    |                                  | 39.1                          |
| Поклопац сандука пушке М70 | 0.69                    | 0.75                             | 46.2                          |
|                            | 0.76                    |                                  | 38.8                          |
|                            | 0.79                    |                                  | 35.2                          |
| Носач затварача пушке М70  | 0.45                    | 0.51                             | 47.7                          |
|                            | 0.5                     |                                  | 43.5                          |
|                            | 0.54                    |                                  | 42.6                          |
|                            | 0.55                    |                                  | 41.5                          |
| Поклопац сандука пушке М20 | 1 (t = 42.7)            | 1                                | 40.2                          |
|                            | 1 (t = 40)              |                                  | 36.8                          |
| Оквир пушке М20            | 1 (t = 50.9)            | 1                                | 49.7                          |
|                            | 1 (t = 48.3)            |                                  | 47.3                          |

Емисивност материјала заступљених у НВО

| Материјал                                           | Измерена емисивност (ε) | Просечна измерена емисивност (ε) | Температура изолир траке (°C) |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
|                                                     | 1 (t = 46.1)            |                                  | 45.7                          |
| Дрвени рукохват<br>пушке М70                        | 0.95                    | 0.93                             | 51.2                          |
|                                                     | 0.95                    |                                  | 46.7                          |
|                                                     | 0.91                    |                                  | 45.3                          |
|                                                     | 0.92                    |                                  | 43.7                          |
| Навлака са<br>затварачем за<br>пиштољ М57           | 0.53                    | 0.54                             | 51.1                          |
|                                                     | 0.53                    |                                  | 48.3                          |
|                                                     | 0.54                    |                                  | 46.1                          |
|                                                     | 0.57                    |                                  | 43.3                          |
| Оквир пиштоља<br>М57                                | 0.55                    | 0.56                             | 51.8                          |
|                                                     | 0.56                    |                                  | 49.9                          |
|                                                     | 0.56                    |                                  | 48.8                          |
| Рукохват<br>пиштоља М57<br>(резбарен део)           | 0.88                    | 0.88                             | 47.2                          |
|                                                     | 0.88                    |                                  | 46.5                          |
|                                                     | 0.87                    |                                  | 45.5                          |
| Рукохват<br>пиштоља М57<br>(храпава<br>површина)    | 0.84                    | 0.84                             | 44.3                          |
|                                                     | 0.83                    |                                  | 43.5                          |
|                                                     | 0.84                    |                                  | 41.9                          |
| Поклопац<br>пиштоља Ц399                            | 0.68                    | 0.67                             | 47.9                          |
|                                                     | 0.67                    |                                  | 46.1                          |
| Месинг, метак 20<br>mm М69                          | 0.59                    | 0.61                             | 48.7                          |
|                                                     | 0.6                     |                                  | 44.4                          |
|                                                     | 0.63                    |                                  | 44.3                          |
|                                                     | 0.62                    |                                  | 43.1                          |
| Месинг, метак 76<br>mm за топ М58                   | 0.72                    | 0.73                             | 44.5                          |
|                                                     | 0.74                    |                                  | 43.5                          |
|                                                     | 0.74                    |                                  | 42.6                          |
|                                                     | 0.73                    |                                  | 41.9                          |
| ВМРУД мина,<br>СМБ, пластика                        | 0.92                    | 0.92                             | 50.3                          |
|                                                     | 0.92                    |                                  | 47.9                          |
|                                                     | 0.92                    |                                  | 47                            |
| Мина за<br>минобацач 60<br>mm, М57, СМБ<br>превлака | 0.93                    | 0.93                             | 54.3                          |
|                                                     | 0.93                    |                                  | 53.2                          |
|                                                     | 0.92                    |                                  | 52.2                          |

# Емисивност материјала заступљених у НВО

| Материјал                  | Измерена емисивност (ε) | Просечна измерена емисивност (ε) | Температура изолир траке (°C) |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Прикључница ЕЛМОС, СМБ     | 0.86                    | 0.89                             | 44.9                          |
|                            | 0.9                     |                                  | 42.4                          |
|                            | 0.91                    |                                  | 40.4                          |
| Челик, сјајан              | 0.7                     | 0.75                             | 42.2                          |
|                            | 0.77                    |                                  | 37.7                          |
|                            | 0.8                     |                                  | 35.2                          |
| Слушалица телефонска, црна | 0.83                    | 0.85                             | 44.3                          |
|                            | 0.87                    |                                  | 39.9                          |
| Картон                     | 0.6                     | 0.62                             | 41.7                          |
|                            | 0.65                    |                                  | 37.7                          |
| Алуминијумска фолија       | 0.32                    | 0.35                             | 41.7                          |
|                            | 0.39                    |                                  | 37.7                          |
| Бели папир за штампу       | 0.77                    | 0.74                             | 41.7                          |
|                            | 0.71                    |                                  | 41.7                          |
| Челик                      | 0.69                    | 0.69                             | 41.2                          |

Табела 7: Резултати мерења

Да би се минимизирале рефлексије, експерименти су спроведени у замраченом окружењу без директне сунчеве светлости или вештачких инфрацрвених извора. Тачност методе је процењена на  $\pm 0,05$  за емисивност, што је прихватљиво за војне примене где прагови детекције зависе од релативних, а не апсолутних разлика. [12]

Ови резултати илуструју значајан утицај површинске обраде на емисивност, при чему металне површине показују константно нижу емисивност од фарбаних или премазаних композита.



Слика 9: Узорак униформе M93 и M10 и амблема за униформу M10



Слика 10: Инфрацрвени снимци униформи M93 и M10 и амблема за униформу M10

Припадници оружаних снага се камуфлирају користећи униформе, прекриваче или чаршаве направљене од тканих материјала, плетених материјала, нетканог текстила или комбинацијом наведених материјала. Напредак у технологији смањења емисивности који укључује разне премазе и наноматеријале, кључан је за побољшање камуфлаже јединица у бројним војним операцијама [13,14,15].

Примарни циљ модерне камуфлажне тканине је да спречи откривање тако што се беспрекорно стапа са околином. Ефикасност ових материјала против непријатељских уређаја за детекцију зависи од њихове спектралне рефлексије у различитим спектрима: видљивом спектру (400 nm–800 nm) и блиском инфрацрвеном подручју (750 nm–1200 nm) [16,17].

Камуфлажа у визуелном спектру постиже се смањењем контраста објекта у односу на околну окружење. Визуелна камуфлажна одећа користи шаре и боје да би визуелно сакрила објекат посматрања унутар овог спектра. Међутим, уз помоћ технологије детекције, визуелно камуфлиране јединице су и даље изложене детекцији у проширеним таласним дужинама, укључујући инфрацрвено (ИЦ) подручје. Уређаји за ноћно гледање појачавају амбијентално светло, отежавајући војницима да остану слабо уочљиви у ноћним условима. Уређаји за ноћно гледање побољшавају видљивост у условима слабог осветљења или ноћу појачавањем расположиве светлости, укључујући амбијентално светло и инфрацрвено зрачење [18,19,20].

Видљива и инфрацрвена камуфлажна својства тканине у блиском ИЦ подручју могу се постићи површинским бојењем и технологијом пигментације. Могућа је и употреба нанотехнологије, као што је уградња инфрацрвених нано или микрочестица у влакна тканине [21,22,23].

Познате вредности емисивности за тканину крећу се између 0,90 и 0,98, за црну гуму су у распону од 0,94 до 0,95, а за кожу 0,95 до 0,98. Стога су измерене вредности емисивности за војне униформе у нашем експерименту (M10, M93) (0,83 – 0,87) константно ниже од референтног распона емисивности за генеричке тканине. Ова разлика се може приписати присуству хидрофобних или ватроотпорних премаза, специфичним процесима бојења

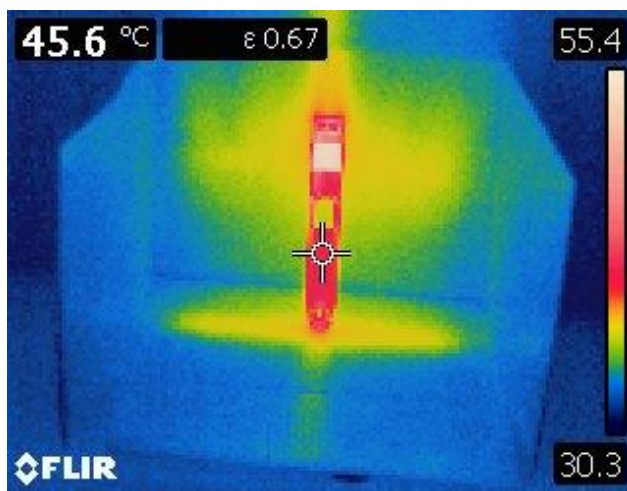
(маслинасто сива нијанса у односу на црне тканине у литератури), хабању површине и употреби на терену, што мења инфрацрвену рефлективност [12].

Чичак и ознаке показују смањену емисивност (0,71 – 0,81) у поређењу са текстилним стандардима, што одражава њихове површине на бази пластике и делимично рефлектујуће. Ово потврђује да се додаци за униформе требају третирати као засебне категорије од саме тканине [12].

Да би се смањио термички потпис војника, може се смањити емисивност тканине униформе или је подесити да емитује у опсегу од 5 до 8  $\mu\text{m}$ , што апсорбује атмосфера. Као што је поменуто, текстилне тканине обично имају вредности емисивности од 0,92 до 0,96, док метали попут нерђајућег челика и алуминијума показују вредности од 0,04 до 0,12. Емисивност униформе се стога може смањити додавањем сјајног или металног рефлектујућег слоја, мада то може утицати на визуелну камуфлажу [12].



Слика 11: Навлака пиштоља ЦЗ399



Слика 12: Инфрацрвени снимак навлаке пиштоља ЦЗ399



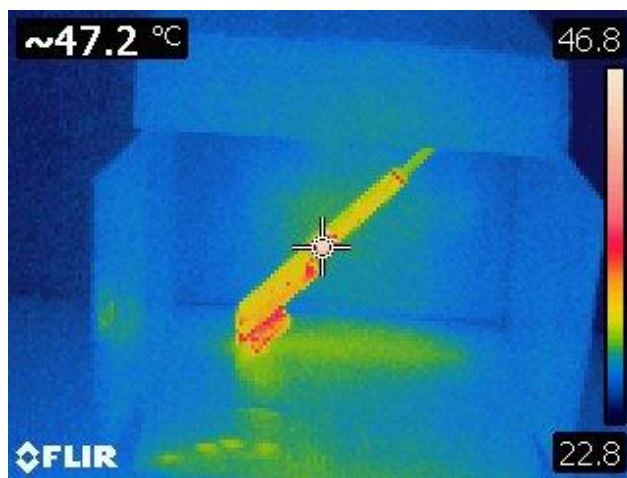
Слика 13: Компоненте пиштоља М57



Слика 14: Инфрацрвени снимак компоненти пиштоља М57



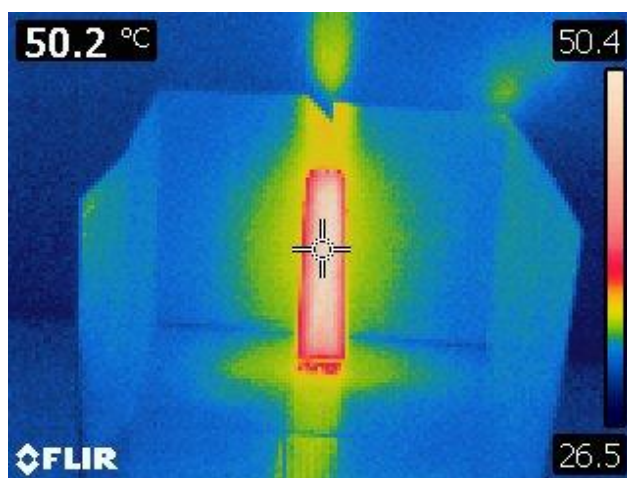
Слика 15: Носач затварача за јуришну пушку М70



Слика 16: Инфрацрвени снимак носача затварача за јуришну пушку М70



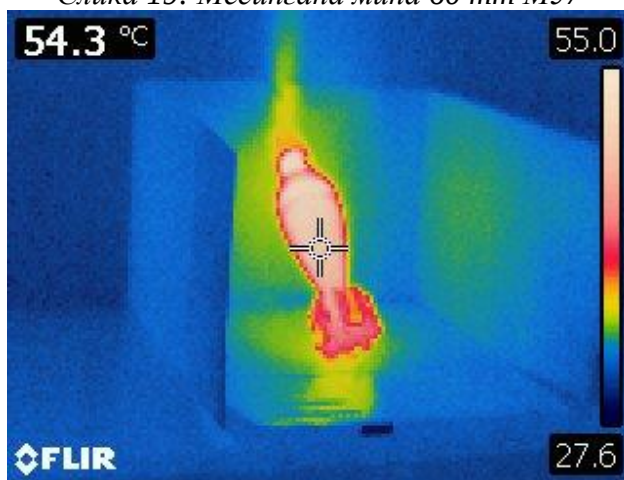
Слика 17: Дрвени рукохват за јуришну пушку М70



Слика 18: Инфрацрвени снимак дрвеног рукохвата за јуришну пушку М70



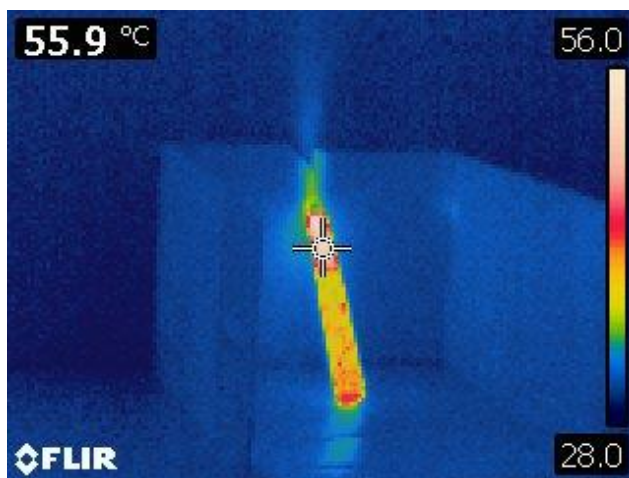
Слика 19: Месингана мина 60 mm M57



Слика 20: Инфрацрвени снимак месингане мине 60 mm M57



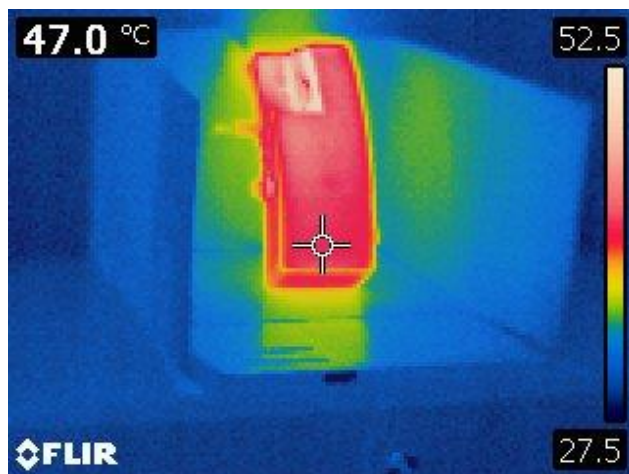
Слика 21: Месингани метак M69 калибра 20 mm



Слика 22: Инфрацрвени снимак месинганог метка М69 калибра 20 мм



Слика 23: Оквир аутоматског пиштоља М84



Слика 24: Инфрацрвени снимак оквира аутоматског пиштоља М84



Слика 25: Навлака са предњим и задњим нишаном за пиштољ М57



Слика 26: Инфрацрвени снимак навлаке са предњим и задњим нишаном за пиштољ М57

Измерене вредности емисивности за металне компоненте генерално се налазе унутар или мало испод опсега наведеног у литератури. Измерена емисивност носача затварача М70 ( $\epsilon = 0,51$ ) је у складу са вредностима из литературе за неполирани/груби челик ( $\epsilon \approx 0,30 - 0,60$ ), што указује на машински обрађену или благо оксидовану површинску завршну обраду, а не на третман сјајног сјаја. Месингане компоненте показују средње вредности које се добро поклапају са подацима из литературе [12].

Измерене вредности емисивности за полиране компоненте српског малокалибарског оружја, укључујући склоп затварача са затварачем за пиштољ М57 ( $\epsilon = 0,54$ ), поклопац затварача за пиштољ CZ99 ( $\epsilon = 0,67$ ), поклопац пријемника за јуришну пушку М70 ( $\epsilon = 0,75$ ) и разне одвојиве кутијасте магazine ( $\epsilon = 0,64 - 0,72$ ), генерално су ниже од емисивности наведене у литератури за слично обрађене челичне површине. Према подацима компаније Fluke Process Instruments, површине оксидованог челика показују вредности емисивности близу 0,95, док за полирани челик може бити и до 0,07 (Fluke Process Instruments, 2025). Слично томе, Omega Engineering извештава о емисивности

плављеног челика од око 0,79, у зависности од дебљине оксидног слоја и храпавости површине (Omega Engineering, 2025). Ове референтне вредности указују на то да су наши измерени резултати систематски нижи, вероватно због експерименталних фактора као што су амбијенталне рефлексије, коначни угао инфрацрвене детекције и могуће локалне варијације у оксидном слоју [12].

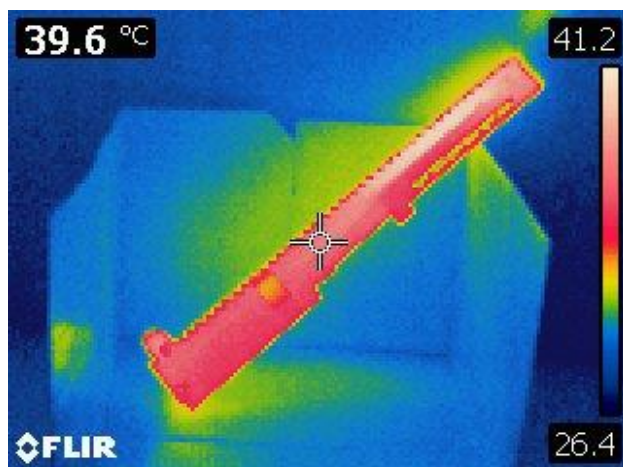
Варијација примећена међу мереним деловима:  $\varepsilon = 0,54$  за клизач М57 наспрам  $\varepsilon = 0,75$  за поклопац пријемника М70 - може одражавати разлике у завршној обради површине, обради или поступцима оксидације. Компоненте са глаткијим или тањим оксидним слојевима имају тенденцију да показују нижу емисивност, док грубље или темељније оксидоване површине имају веће вредности [12].

Полирање, такође познато као плављење или премаз црним оксидом, је конверзијски третман који формира танак слој магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) на челику, побољшавајући отпорност на корозију и дајући карактеристичан тамни изглед. Важно је напоменути да су термална радијациона својства таквих премазаних метала у великој мери зависна од стања површине. Оксидиране или површине третиране црним оксидом показују знатно већу емисивност у поређењу са својим полираним или необрађеним панданима, првенствено због повећане храпавости површине и карактеристика апсорпције. Овај однос је добро документован у студијама које истражују утицај површинских третмана на емисивност метала [12].

Уопштено, ова мерења истичу да, иако полирани челик значајно повећава топлотну емисију у поређењу са полираним челиком, наши резултати указују на умерено потцењивање у односу на вредности из литературе. За будућа мерења, разматрање корекција емисивности зависних од угла и узимање у обзир амбијенталних инфрацрвених рефлексија могло би побољшати тачност. Упркос овим ограничењима, измерене вредности емисивности остају у складу са очекиваним понашањем за тамне челичне површине и могу информисати детекцију засновану на инфрацрвеном зрачењу или термичку анализу сличне војне опреме [12].



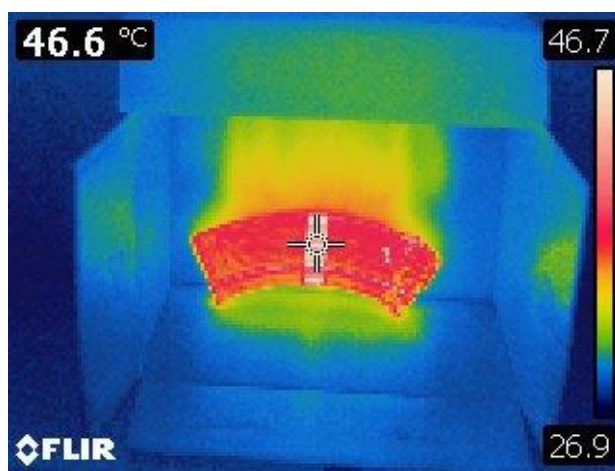
Слика 27: Поклопац склопа за пушку М19



Слика 28: Инфрацрвени снимак поклопца склопа за пушку М19



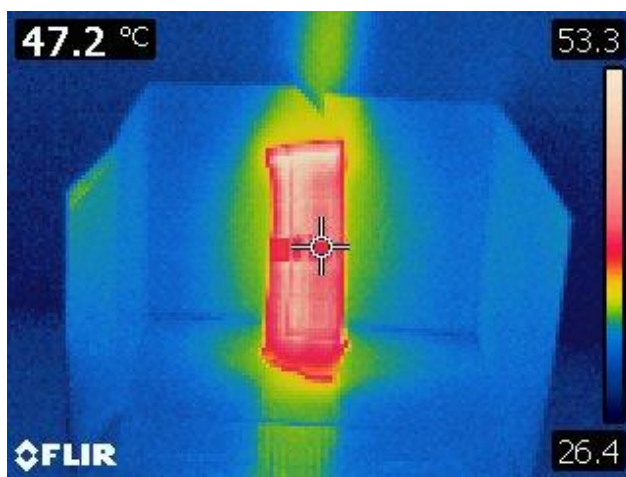
Слика 29: Оквир пушке М70



Слика 30: Инфрацрвени снимак оквира пушке М70



Слика 31: Оквир пушке M19



Слика 32: Инфрацрвени снимак оквира пушке M19

Пластика, полимери и тамно обојени органски премази показују генерално високе вредности емисивности, типично у распону између 0,80 и 0,95 (FLUKE, 2025; ThermoWorks, 2025), и наши резултати се тачно уклапају у овај опсег. Занимљиво је да је емисивност измерена на полимеру пушке M19 била чак и већа од оне код црне изолационе траке која се користи као референтни стандард у нашим експериментима. Вероватно објашњење за ово запажање лежи у текстури површине: изолациона трака има глатку завршну обраду, док црни полимер на пушци показује благо храпаву површину. Добро је познато да микроскопска храпавост површине повећава ефективну емисивност побољшавајући апсорпцију и расејање топлотног зрачења, чиме се смањује рефлексија [12].

Ради визуелног поређења, слика 11 приказује термалне слике два оквира са различитим емисивностима ( $\epsilon = 0,99$  за пушку M19 и  $\epsilon = 0,64$  за пушку M70), сваки прекривен црном траком високе емисивности ( $\epsilon = 0,95$ ). Визуелно се може приметити, чак и без нумеричке анализе, да трака изгледа тамније од подлоге са високом емисивношћу и светлије од

подлоге са ниском емисивношћу. То се дешава зато што површине са високом емисивношћу ефикасније емитују топлотно зрачење и стога се чине ближим својој стварној температури на инфрацрвеним сликама, док површине са ниском емисивношћу емитују мање зрачења и рефлектују више хладније околине, што узрокује да изгледају вештачки хладније у поређењу са траком [12].

Са практичне тачке гледишта, ова висока емисивност има импликације на термички потпис и инфрацрвену детекцију. Површине са емисивношћу ближом савршеном црном телу ефикасније емитују топлотно зрачење, што их може учинити уочљивијим под инфрацрвеним посматрањем, јер би ове компоненте изгледале релативно „вруће“ под инфрацрвеним посматрањем. Стога, иако механичка и заштитна својства полимера могу бити предност, његова повишена емисивност може бити ограничавајући фактор за термичку камуфлажу у оперативним окружењима. Ово истиче компромис у избору материјала између издржљивости, естетике и управљања инфрацрвеним потписом у војним применама [12].

## 5. ЗАКЉУЧАК

Циљ овог рада био је да се испита емисивност материјала релевантних за Војску Србије и оцени њихова улога у управљању инфрацрвеним потписом и ефективности камуфлаже. Емисивност је критичан параметар који утиче на термичку детектабилност објеката, јер површине са већом емисивношћу емитују више инфрацрвеног зрачења и самим тим постају видљивије за термовизијске системе. У овој студији, вредности емисивности текстила, дрвета, метала и полимерних компоненти измерене су FLIR (*FLIR - forward looking infrared*) термографском методом.

Примењени приступ се показао брзим и поузданим, са резултатима који су у складу са утврђеним референтним подацима. Разлике између класа материјала биле су очигледне: текстил и полимери генерално показују високу емисивност, метали имају ниже вредности јакко зависне од обраде површине, док дрвене компоненте остају високо емисивне и самим тим више изложене детекцији. Ови резултати потврђују да емисивност зависи од типа материјала, завршне обраде површине и премаза. Резултати пружају свеобухватан скуп података за материјале релевантне за војну употребу и наглашавају практичну важност карактеризације емисивности у развоју ефективних камуфлажних стратегија.

Интегрисањем прецизних података о емисивности у моделовање инфрацрвеног потписа, постаје могуће оптимизовати дизајн камуфлаже, продужити оперативну употребу и значајно побољшати преживљавање и одбрану војних платформи и опреме смањењем вероватноће детекције на бојном пољу у односу на све софистицираније групе инфрацрвених сензора.

У будућности, даља истраживања требало би да се фокусирају на интеграцију ИЦ сензора са вештачком интелигенцијом за управљање инфрацрвеним потписом у реалном времену, развој и тестирање адаптивних материјала способних да динамички модулирају емисивност као одговор на промене у окружењу или оперативне захтеве и материјала са прилагођеним премазима ниске емисивности који могу смањити топлотно зрачење без угрожавања структурног интегритета или оперативних перформанси.. Нове технологије попут разних нанокомпозита и метаматеријала представљају обећавајућа решења за контролу инфрацрвеног зрачења у реалном времену. Поред тога, проширење спектралног опсега мерења емисивности изван стандардних инфрацрвених оквира могло би открити нове могућности за мултиспектралну интеграцију камуфлаже.

Будућа истраживања требало би такође да истраже дугорочну издржљивост и еколошку стабилност премаза са ниском емисивношћу у условима бојног поља, укључујући излагање абразији, корозији и екстремним температурама.

Бојно поље сутрашњице се не само види или чује, већ се и осећа. Савладавање емисивности је савладавање тишине у термалном свету.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Infrared Thermography, G. Gaussorgues, 1994.
- [2] [https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%80%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BE\\_%D0%B7%D1%80%D0%B0%D1%87%D0%B5%D1%9A%D0%B5](https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%80%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BE_%D0%B7%D1%80%D0%B0%D1%87%D0%B5%D1%9A%D0%B5)
- [3] Infrared Thermography Errors and Uncertainties, Waldemar Minkina, Sebastian Dudzik Czestochowa, University of Technology, Poland, 2009.
- [4] Спектралне карактеристике вештачких извора УВ зрачења, соларијуми, дипломски рад, Александра Перић, Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за физику, 2007.
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Emissivity>
- [6] <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us>
- [7] Infrared thermography in the evaluation of aerospace composite materials, Carosena Meola, Simone Boccardi and Giovanni Maria Carlomagno, 2017.
- [8] Infrared thermography recent advances and future trends, Department of Aerospace Engineering University of Naples Federico II, Italy, Carosena Meola, 2012.
- [9] Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography, Xavier P. V. Maldague, 1993.
- [10] Infrared Thermography, Raghu V. Prakash, 2012.
- [11] Determination of the gun barrel walls temperature distribution and its experimental validation during multiple-shots firing process, Walid Boukera Abaci, Nebojsa Hristov, Nabil Ziane Ahmed, Damir Jerkovic, Momir Drakulic, Универзитет одбране, Војна академија
- [12] Experimental Determination of Surface Emissivity for Military Equipment Components and Comparison with Reference Data, Lazar Z. Lazarević, Nebojša P. Hristov, Damir D. Jerković, Darko R. Latinkić, Mihael M. Bučko, Универзитет одбране, Војна академија, 2025.
- [13] Degenstein LM, Sameoto D, Hogan JD, et al. Smart textiles for visible and IR camouflage application: state-of-the-art and microfabrication path forward. Micromachines 2021; 12(7): 773. DOI: 10.3390/mi12070773.
- [14] Li Z, Chao X, Balilonda A, et al. Scalable van der Waals graphene films for electro-optical regulation and thermal camouflage. InfoMat 2023; 5(6): e12418. DOI: 10.1002/inf2.12418.

- [15] Zhang R, Hu H, Li Z, et al. Nanomaterial-based textiles for personal thermal management: perspectives of the fabrications and properties. *Materials Today Communications* 2024; 40: 109818. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.10981.
- [16] Su Y, Yu B and Zhao X. Research status and development of infrared camouflage textile materials. *Textil Res J* 2023; 93(21–22): 5047–5082. DOI: 10.1177/00405175231170323.
- [17] Akerlind C and Akerlind C. Optical studies of bio-inspired materials for camouflage. Linköping studies in science and technology dissertation No. 2069. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2020.
- [18] Bishop JL. In: Bishop JL and Moersch JE (eds). *Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy Laboratory Spectra of Geologic Materials*. (1st ed.). Cambridge University Press, 2019.
- [19] Akerlind C, Fagerstrom J, Hallberg TKH, et al. Evaluation criteria for spectral design of camouflage. In: Stein KU, Ric HandSchleijpen MA(eds). *SPIE Security + Defence*, 2015, vol 9653, pp. 965303–965313. DOI: 10.1117/12.2194828.
- [20] Gupta KK, Nishkam A and Kasturiya N. Camouflage in the non-visible region. *J Ind Text* 2001; 31(1): 27–42. DOI: 10.1106/LMQ5-X8LK-27RJ-URPL.
- [21] Steffens F, Gralha SE, Ferreira ILS, et al. Military textiles - an overview of new developments. *Key Eng Mater* 2019; 812(July): 120–126.
- [22] Samolov AD, Simi DM, Fidanovski BZ, et al. Improvement of VIS and IR camouflage properties by impregnating cotton fabric with PVB / IF-WS 2. *Def Technol* 2021; 17: 2050–2056. DOI: 10.1016/j.dt.2020.10.008.
- [23] Development and characterisation of near-infrared camouflage fabrics for military combat uniform, Yahaya R, Shaiful Bahri Zainal Abidin, Wan Fadilah Wan Abdullah, Wan Elyn Amira Wan Adnan, Muhammad Nur Annuar Mohd Yunus, Abbas Zubir, Norhayaty Zahari and Mohammad Ridzuwan Mohd Rahimi, 2025, <https://doi.org/10.1177/15280837251319055>