

Spectrografia în infraroșu. Oportunități, domenii și limite de aplicare

Infrared Spectrography. Opportunities, areas and limits of application

Claudiu JIPA¹, Mihai DIMA^{1,2}, Vlad IORDACHE¹

¹ Centrul de cercetare CAMBI, Facultatea de inginerie a instalațiilor, UTCB, Bd. Pache Protopopescu, Nr. 66, sector 2, București, Romania

² Facultatea de Pompieri, Academia de Politie Al. I. Cuza, Sos. Morarilor, Nr. 3, sector 2, Bucuresti, Romania

E-mail: claudiu.jipa@ecertificare.ro, dimamihai28@yahoo.com, viordach@yahoo.com

Rezumat. Aplicarea cu performanțe maxime a acestei procedurii depinde de înțelegerea corectă a fenomenului (legile fizice care îl guvernează, condițiile, avantajele și limitele examinării în infraroșu-IR) atât în ceea ce privește captarea imaginilor, cât mai ales în analiza și interpretarea acestora. Există riscul unor determinări cu erori de peste 150 % în cazul aplicării sau interpretării greșite. Prezenta lucrare își propune să detalieze principiile metodei și să constituie un instrument util adresat specialiștilor pentru o alegere optima a echipamentului termografic corespunzător domeniului de interes analizat.

Cuvinte cheie: Termografie, Radiație infraroșu, Echipament termografic.

Abstract. The maximum performance of this procedure depends on the correct understanding of the phenomenon, both in capturing IR images and in their analysis and interpretation. In the case of mis-application or mis-interpretation, there are risks for determinations of over 150%. This paper aims to detail the principles of the method and to be a useful tool for specialists in choosing thermographic equipment corresponding to the area of interest analyzed.

Keywords: Thermography, Infrared radiation, Thermographic equipment.

1. Introducere

Descoperirea radiației termice (William Herschel în anul 1800 [1]) urmată de apariția primelor aplicații practice pentru detectarea icebergurilor [2], [3], a primei camere sensibile la radiația infraroșie (fabricată în 1924 de fizicianul Kalman Tihany pentru armata britanică [4]), dar și evoluția continuă a tehnologiei, au reliefat imensul potențial de utilizare al termografiei IR în diverse domenii de aplicare.

Destinată inițial domeniului militar, utilizarea camerelor de termoviziune s-a extins într-o gamă vastă de domenii (pază și securitate, mentenanța sistemelor electrice și mecanice, aplicații medicale, cercetare, studiul și controlul arderii, detectarea

defectelor structurale și a umidității în construcții, etc). Criteriul principal de alegere a unei camere este *intervalul de temperatură specific fenomenului sau sistemului studiat*. Deși în general, în practică se scanează termic țintele fără a se interveni asupra lor (*termografie pasivă*), totuși pot exista situații în care contrastul termic între zonele studiate este insuficient pentru o vizualizare IR corespunzătoare, fiind necesară excitarea suprafeței examinate cu lămpi cu infraroșu, ultraviolete, laser. Această procedură (*termografia activă* [5]) este folosită în principal la studierea țintelor cu potențial termic scăzut (pentru a maximiza detectarea/localizarea defectelor structurale).

În funcție de domeniul de utilizare camerele termografice pot fi *fără răcirea detectorului* (cele cu precizie mică și medie, având domenii de temperatură cuprinse între $-20^{\circ}\text{C} \div 1500^{\circ}\text{C}$) sau *cu răcirea detectorului* (în general cu azot lichid)-camere de înaltă precizie și temperaturi ridicate ($-20^{\circ}\text{C} \div 3000^{\circ}\text{C}$) pentru cercetare. Camerele clasice cu detectori termici (cu sau fără răcire) sunt în general utilizate în mentenanța clădirilor, studiul și prevenirea incendiilor, aplicații biomedicale, transportul și distribuția energiei electrice, în timp ce camerele din generația a 3-a cu detectori de fotoni sunt destinate cercetării științifice și domeniului militar.

2. Principiile metodei

Neregularitățile în proprietățile termice ale corpurilor se traduc în neuniformitatea pierderilor de căldură prin acestea, mai precis în variații de temperatură la suprafața lor [6] (câmpul de temperaturi). Vizualizarea acestuia la clădiri conduce la detectarea/localizarea defectelor ascunse în structură sau de izolare, a infiltrațiilor de aer prin neetanșeitățile elementelor anvelopei (rosturi de tâmplărie, fisuri), a zonelor cu umiditate în exces, sau cu intensificare a fluxului de căldură schimbat cu exteriorul (punți termice) [7]. Domeniul de interes pentru termografie este cel în IR, cu lungimi de undă cuprinse între $0,4 \mu\text{m} \div 100 \mu\text{m}$. Acesta conține sub-domeniile : *IR apropiat* ($0,75 \div 3 \mu\text{m}$) , *IR mediu* ($3 \div 6 \mu\text{m}$) , *IR îndepărtat* ($6 \div 15 \mu\text{m}$) și *IR extrem* ($15 \div 100 \mu\text{m}$). Mai precis camerele termografice actuale lucrează în intervalul de lungimi de undă $2-5 \mu\text{m}$ și $8-14 \mu\text{m}$ [8], adică între cele două domenii *IR mediu* și *IR îndepărtat* (unde lungi). Nu se utilizează la camerele termografice banda dintre domeniile *IR mediu* și *IR îndepărtat* (lungimi de undă între $5,5 \div 7,5 \mu\text{m}$) datorită absorbției atmosferice (influența CO , CO_2 și a vaporilor de apă din atmosferă reduc la zero transmisia atmosferică).

De interes în termografie este energia emisă prin radiație de corpul însuși (aceasta influențează temperatura suprafeței), problema principală în termografie fiind estimarea cât mai exactă a acesteia. Astfel devine importantă determinarea *emisivității* suprafeței corpului țintă (mărime adimensională și notată în continuare cu ϵ , $0 < \epsilon < 1$) și care reprezintă raportul dintre emitanța energetică a corpului studiat și emitanța energetică a corpului negru (absoarbe totalitatea radiațiilor incidente, $\rho = \tau = 0$). Emisivitatea este echivalentul *strălucirii* din domeniul vizibil , fiind teoretic o funcție

de material, de direcția propagării, de lungimea de undă și de temperatură (ISO 16714-2016). Puterea specifică a radiației emise de un corp cu emisivitatea egală cu cea a corpului negru, între două lungimi de undă y_1, y_2 este dată de legea lui Planck care integrată pentru lungimi de undă de la $y=0$ la $y=\infty$ conduce la expresia energiei sau puterii radiante totale a *corpului negru* (legea Stefan-Boltzman) :

$$W = \frac{2\pi^5 k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

unde σ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) este constanta Stefan-Boltzman, $\sigma=5,77 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T (K) este temperatura absoluta a corpului; h (J·s) este constanta lui Planck, $h=6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J·s}$, c (m/s) este viteza luminii, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, k (J/K) este constanta lui Boltzman, $k=1,3806 \cdot 10^{-3} \text{ J/K}$.

Pentru corpurile gri (reale) ecuatia (1) devine :

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

unde ε (-) este emisivitatea corpului.

Protocolul de măsurare și reglajele camerei IR sunt funcție de scopul urmărit—ISO 13374/2004. Pentru a avea referințe se impune examinarea atât a zonelor țintei susceptibile de a prezenta anomalii cât și a celor care nu prezintă defecte. Este foarte important ce reprezintă valorile măsurate de cameră, anume faptul că sunt înregistrate *valorile instantanee ale temperaturii suprafețelor* (în cazul clădirilor, acestea pot reprezenta temperatura unei stări din trecut – datorita inerției termice - defazaj termic).

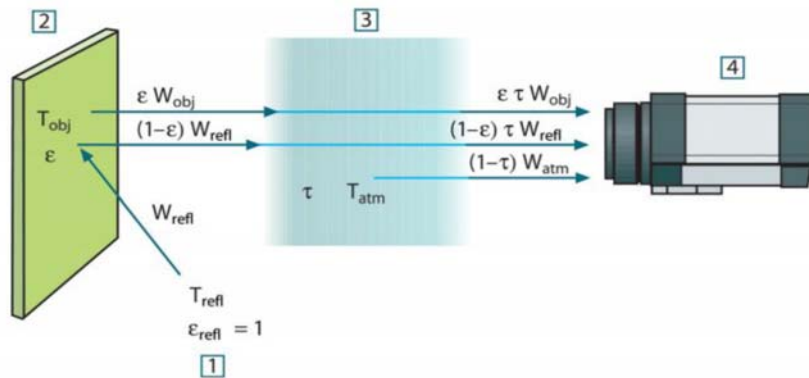


Fig. 1. Schema a procesului general al măsurărilor termografice

1] Mediul inconjurator; 2] Obiectul analizat; 3] Atmosfera; 4] Camera IR [9], $\tau_{obj} = 0$

În Fig. 1 se observă componenta energiei radiante totale incidentă pe o cameră IR. Astfel dacă scopul examinării este determinarea temperaturii obiectului țintă (T_{obj}), având emisivitatea ε , energia/puterea captată de cameră va fi :

$$W = \varepsilon \tau W_{obj} + (1-\varepsilon) \tau W_{refl} + (1-\tau) W_{atm} \quad (\text{W}) \quad (3),$$

unde ε (-) și $(1 - \varepsilon)$ (-) reprezintă emisivitatea și respectiv reflectanța țintei; τ (-) și $(1 - \tau)$ (-) reprezintă transmitanța și respectiv emitanța atmosferică, în ipoteza că reflectanța acesteia este neglijabilă; W_{obj} (W) este puterea radiantă totală evacuată de țintă; W_{refl} (W) este puterea radiantă reflectată pe țintă emisă de sursele exterioare aflate în fața țintei; W_{atm} (W) este puterea radiantă totală evacuată de atmosferă (funcție de temperatura atmosferică T_{atm}).

Puterea totală W din ecuația (3) este citită de camera IR, iar pentru determinarea primului termen (cel care cf. legii lui Planck da valoarea T_{obj}) trebuie cunoscuți și setați cu acuratețe următorii doi termeni: $(1 - \varepsilon)\tau W_{refl}$, respectiv $(1 - \tau)W_{atm}$ (a doua cea mai mare influență asupra măsurătorii după setarea/măsurarea emisivității țintei).

Ca regulă general valabilă în practica termografică : la corpurile cu emisivitate mare (apropiată de 1) întotdeauna temperatura aparentă este apropiată de temperatura reală a țintei (putem avea încredere în ceea ce vedem pe cameră), în timp ce la corpurile țintă cu emisivități mici (aproprate de 0) temperatura aparentă este apropiată de temperatura aparentă a mediului înconjurător (informația afișată de cameră nu este credibilă, fiind posibile erori majore de interpretare) [9]. Cu cât o suprafață este mai rugoasă cu atât emisivitatea ei este mai mare. Geometria obiectului țintă (cavitățile, unghiurile, găurile) generează, prin reflexie multiplă și implicit prin creșterea absorbției condiții similare corpurilor negre. La scanarea corpurilor cilindrice întotdeauna zonele din axa corpului apar în imagini mai calde decât cele de la extremități, deși ele au aceeași temperatură (datorită unghiului de vizare camera primește mai multă radiație din zona aflată în centrul corpului, perpendicular pe cameră, decât de la zonele extreme).

Gradientul termic (schimbarea graduală de temperatură cu distanța) are o importanță majoră în analiza imaginii termice, indicând direcția fluxului de căldură.

3. Particularități constructive ale camerelor de termoviziune

Principalele componente ale unei camere sunt: sistemul optic (lentile care preiau și focalizează radiația pe detector, la camerele obișnuite lentila principală fiind din germaniu), detectorul, sistemul de procesare a datelor (transformă semnalul termic în semnal electric și apoi în imagini prin tehnologia RGB), ecranul LCD (afișează informații ca: temperatura, data, spectrul de culori, la camerele moderne tehnologia MSX permitând suprapunerea imaginii termice peste cea fotografică-vizibilă), butoane de reglare și control, memoria de stocare, software de gestiune și generare rapoarte. Orice cameră are trei funcții importante pentru îmbunătățirea capacității de identificare a amprentei termice: *reglarea focalizării termice* (alegerea optimă a culorilor unei imagini pentru maximizarea contrastului), *izoterma* (înlocuiește câteva culori din cadrul domeniului de temperatură al imaginii-span cu o culoare de mare contrast, marcând un interval de temperaturi aparente egale și punând astfel în evidență zona de interes), *paleta de culori* (stabilește culorile de marcarea a nivelurilor specifice de temperaturi aparente— se utilizează palete cu contrast mare pentru ținte cu contrast mic și palete cu contrast mic pentru ținte cu contrast mare) și uneori *funcția PROFIL*

(generează profilul de temperatură de-a lungul unei linii trasate într-o imagine termică) și *funcția SPOT* (stabilește punctele de maxim și de minim de temperatură din imaginea termică). O importanță majoră o are verificarea *calibrării camerei*, procedură ce necesită o țintă cu emisivitate mare și cunoscută, temperatură cunoscută și diferită de cea a mediului înconjurător (se folosește apă cu gheață sau apă în fierbere). Trebuie efectuate verificări în minim două puncte. Dacă instrumentul este decalibrat, abaterea de la calibrare este de regula mare (recalibrările nu se fac decât în fabrică sau la producător). Camerele IR uzuale au ca *detector* microbolometrul (inventat în 1880 de Langley consta dintr-o lamelă de platină conectată la o punte Wheatstone și un galvanometru), iar la cele de înaltă precizie *detectorii* sunt din InGaAs, InSb (3...5 μm) și HgTeCd (8...12 μm) răciți cu azot lichid (77 K). Limitările în cazul *detectorilor* se datorează nu atât performanțelor ansamblului detector-preamplificator, cât zgomotului radiației incidente, adică a fluctuației debitului de fotoni.

4. Domenii de aplicație

Medicina. Avansul tehnologic rapid al camerelor de termoviziune în ultimii ani a condus la folosirea intensă a lor în domeniul medical. Termografia medicală este non invazivă, precisă, cuantificabilă, cu multiple aplicații (monitorizarea temperaturii corpului – hărți de temperatură, evaluarea cardio-vasculară, identificarea tumorilor și a zonelor cu sângerare, imagistica creierului, etc).

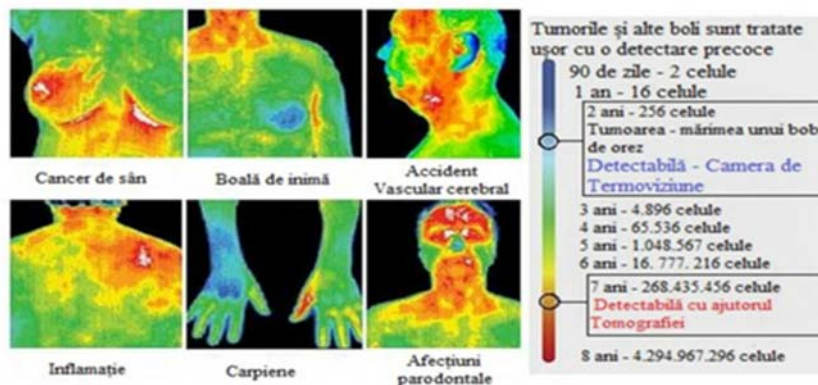
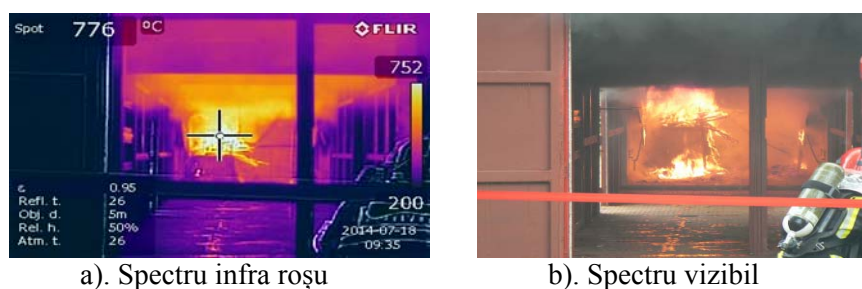


Fig.2 Aplicații medicale ale spectrografiei în infraroșu [9]

Paza și stingerea incendiilor (PSI), supravegherea frontierelor. Intervențiile pompierilor devin mai eficiente (detectarea rapidă a focarelor), mai sigure (crește siguranța personalului implicat) [10], rezultând pagube materiale și consum de substanțe de stingere mai reduse. În fazele incipiente ale incendiului apar degajări de produse de ardere invizibile (fără fum și fără flacără) și degajări crescânde de căldură, urmate de declanșarea fazei de ardere activă localizată (detectabilă de camera IR). Etapa următoare în evoluția incendiului este descompunerea materialelor expuse la temperaturi apropiate de cea de autoaprindere în gaze volatile și inflamabile (proces asemănător pirolizei) cu degajare masivă de fum, urmată brusc (la aproximativ 600°C) de trecerea la incendierea generalizată a tuturor materialelor din încăpere, însoțită de

degajări mari de căldură (peste 20 kW/m^2) și creșterea temperaturii chiar și la 1000°C - fenomenul *flash-hover* care pune în pericol viața personalului de intervenție.

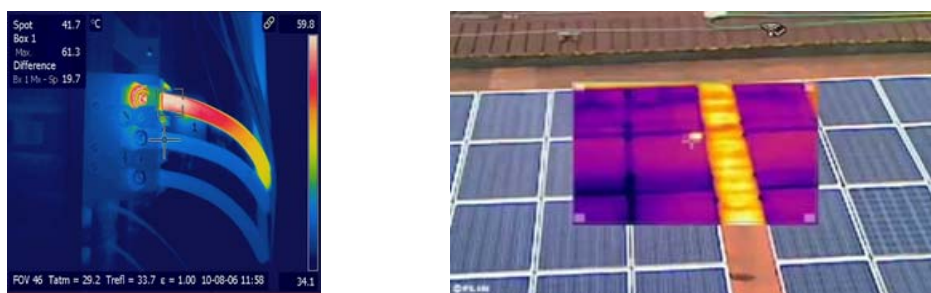


a). Spectru infra roșu

b). Spectru vizibil

Fig. 3 Fenomenul Flash-hover

Inspecția și întreținerea instalațiilor electrice. Camerele IR pot identifica anomaliile în funcționarea instalațiilor electrice (care se traduc prin creșterea temperaturii zonelor cu probleme), cum ar fi : contacte slabe sau imperfecte- Fig. 4a), supraîncălziri ale lagărelor motoarelor electrice sau ale transformatoarelor etc.



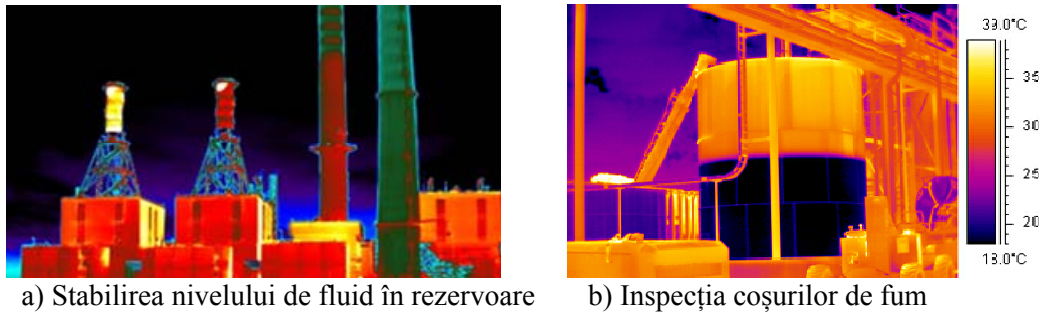
a) Verificarea instalațiilor electrice

b) Inspecția panourilor fotovoltaice

Fig.4 Inspecția și întreținerea instalațiilor electrice

În ultimii ani a luat o amploare deosebită inspecția și supravegherea turbinelor eoliene și a rețelilor de distribuție/transport a energiei electrice cu ajutorul camerelor termografice montate pe drone (identificarea conexiunilor supraîncălzite).

Industria. Există o gamă foarte extinsă de utilizare la: inspecția rezervoarelor de apă (stabilirea nivelului sau depunerea de sedimente)- Fig.5a), inspecția rezervoarelor de gaze lichefiate (formarea de gheață în izolația acestora), mentenanța echipamentelor în mișcare ale instalațiilor mecanice (lagărele pompelor sau ale benzilor transportoare, funcționarea defectuoasă a cilindrilor motoarelor cu ardere internă, lipsa lubrifierii, funcționarea transmisiilor prin curele), depistarea defectelor ascunse în electronică (plăci cu semiconductori) sau micro-electronică (asocierea camerei IR cu un microscop), scanarea țevilor și arzătoarelor, identificarea defectelor de izolație refractară la cuptoare sau coșuri de gaze arse-Fig.5b), identificarea defectelor de etanșare la rezervoare sub presiune, inspecția schimbătoarelor de căldură (vizualizarea zonele blocate), inspecția panourilor fotovoltaice (supraîncălzirea contactelor)-Fig.4b), etc.



a) Stabilirea nivelului de fluid în rezervoare b) Inspecția coșurilor de fum

Fig.5 Utilizarea camerelor de termoviziune în industrie

Instalații pentru cladiri. Termografia este utilă la inspecția și detectarea instalațiilor pentru cladiri: inspecția cazanelor (detectia defectelor de izolație sau de etanșare), a centralelor termice și a instalațiilor de climatizare, eficiența arderii combustibililor, controlul flăcării, identificarea și controlul traseelor rețelelor de încălzire/răcire –Fig. 6).



Fig.6 Identificare traseu încălzire prin pardoseala

Construcții. Performanțele foarte bune ale camerelor de termoviziune raportate la dimensiunile foarte mici la care ajung cele actuale, le recomandă ca instrument util în aprecierea și analiza performanțelor energetice ale clădirilor [11] (ISO 6781/1983 [12] și SR EN 13187/2000), aprecierea gradului de izolare termică [13]- Fig. 7a), identificarea punților termice (zone de intensificare a schimbului de căldură prin anvelopa clădirii [14] -Fig. 7b), măsurarea temperaturilor superficiale ale pereților în zone cu risc de condens și implicit de mușcări (ISO 10211 [15]), determinarea conductivității termice ale materialelor din componența anvelopei (ISO 14683 [16], evidențierea defectelor structurale ale clădirilor–greu sau imposibil de descoperit cu alte metode [17], controlul montajului tâmplăriei [18] și a infiltrațiilor de aer [19]- Fig.8a), detectarea umidității în structuri și a infiltrațiilor de apă-Fig.8b), etc.

Știința și Cercetarea beneficiază din plin de avantajele metodei (studiul arderii, a exploziilor–prin captarea până la 62000 imagini/s, analiza termică și dinamică a jetului prin palele turbinelor la motoare cu reacție, a proiectilelor, studiul semiconductorilor, studiul aderenței, în agricultură-analiza culturilor, etc.

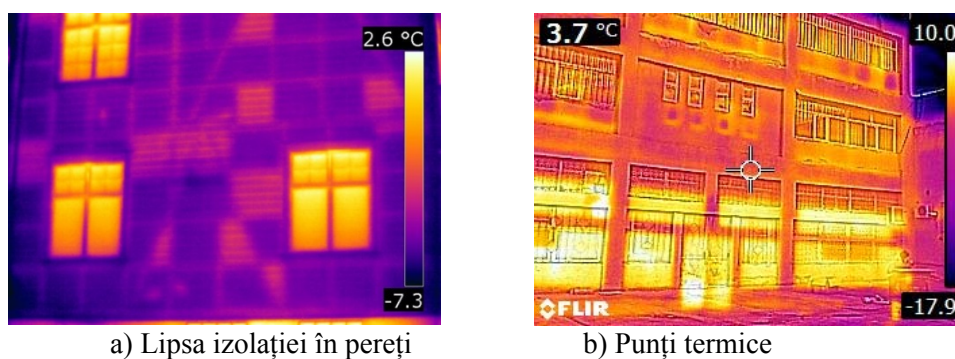


Fig. 7 Verificarea termografică a cladirilor

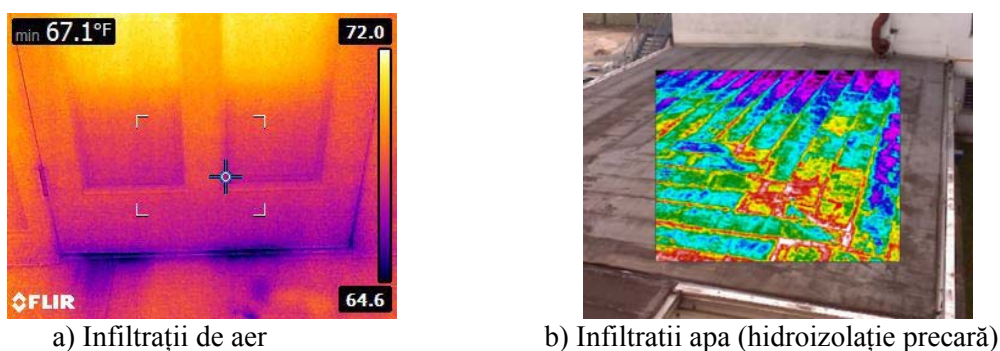


Fig. 8 Aplicații ale camerelor IR în detectarea infiltrațiilor

5. Analiza comparativă

O prezentare generală a camerelor IR pe domenii de aplicare, domenii de temperatură, sensibilitate și câmp de vizualizare este prezentată în Tabel 1.

Din punct de vedere al intervalului de temperatură pentru care camerele de termoviziune sunt utilizate, aceste intervale variază destul de mult, funcție de aplicațiile deservite. În general se observă că variațiile în industrie și cele medicale au intervalul cel mai restrâns de variație, în timp ce aplicațiile în domeniul securității la incendiu au domeniul de variație cel mai larg (Fig. 9a).

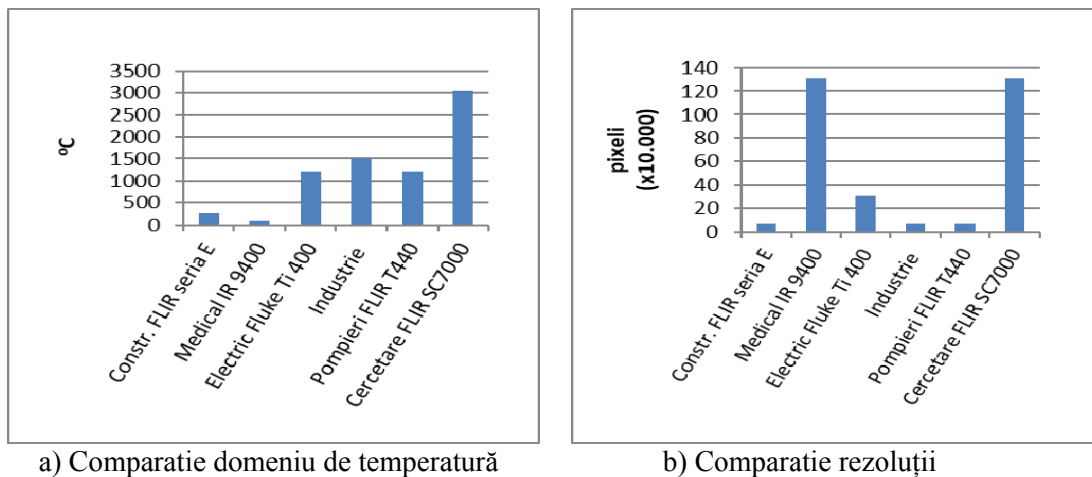
Deși din punct de vedere al dimensiunilor acestora, aparatele de termoviziune sunt comparabile, totuși din punct de vedere al rezoluției, camerele folosite în domeniul medical și la nivel de cercetare folosesc rezoluții mult mai performante comparativ cu alte domenii (Fig. 9b).

Din punct de vedere al masei acestor camere de termoviziune se disting camerele cu aplicații în medicină, caracterizate de o masă de peste 4 ori mai mare decât cele din domeniul construcției sau securității la incendiu.

Câmpul de vizualizare este o altă caracteristică importantă. În acest caz se disting camerele de termoviziune din domeniul construcției, unde pentru captarea unei imagini a întregii fațade a unei clădiri se folosesc lentile speciale, numite superangular, caracterizate de deschideri spre 45° (variante profesionale ajung la deschideri de 80°), în timp ce pentru alte aplicații deschiderea câmpului de vizualizare nu depășește 25°.

Tabel 1. Analiză comparativă a caracteristicilor camerelor în domeniile prezentate [20, 21]

Domeniu	Construcții		Medical	Electrice	Industrie	PSI
Caracteristici	Flir E8	Testo 875i	Image IR 9400 (INFRATEC)	Fluke Ti 400	GasFindl R-LW	Flir T440
Rezoluție	320 x 240	320 x 240	1.280 x 1.024	640 x 480	320 x 240	320 x 240
Interval temperatură	(-20 to 250 °C)	(-20°C - +100°C) (0°C - +280°C)	(-40...70)°C (-20...50)°C	(-20- 1.200 °C)	(-15°C - +40°C) (-30°C - +50°C)	(-20- 1.200 °C)
Acuratețe	±2°C	±2°C	±1°C	±2°C	±2°C	±2°C
Masa	0,55 Kg	0,90 Kg	4 Kg	1,04 Kg	2 Kg	0,88 Kg
Autonomie Baterie	240 min	240 min	-	4 h	-	4 h
Câmp de vizualizare	45° x 34°	32° x 23°	-	24° x 17°	22° x 11° 5,5	25° x 19°
Dimensiuni (mm)	(385 x 165 x 315)	(152 x 108 x 262)	(235 x 120 x 160)	(277 x 122 x 167)	(300 x 132 x 152)	(106 x 201 x 125)



a) Comparatie domeniu de temperatură

b) Comparatie rezoluții

Fig. 9 Analiza comparativă a șase camere de termoviziune functie de domeniul de aplicare

6. Concluzii

Deși evoluția tehnologică a condus la apariția de camere IR specializate aproape pentru orice domeniu, cu rezoluții, sensibilități și precizii de măsurare în continuă creștere, totuși datorită complexității fenomenului și a multitudinii de factori care pot influența acuratețea măsurării este absolut necesară o foarte bună documentare pentru formarea specialiștilor în domeniu. Având în vedere că, aparatura de detectie în infraroșu este destul de scumpă, pentru maximizarea rezultatelor acestei metode, se impune pe lângă baza teoretică absolut necesară și o alegere corectă a tipului de camera utilizat funcție de fenomenul sau domeniul analizat. Se evita astfel situațiile deloc placute în care după achiziția unei camere (cu un buget considerat inițial optim), pe parcursul cercetării sau evaluării în infraroșu a fenomenului, se constată o totală inadvertență între rezultatele așteptate și posibilitățile tehnice ale camerei.

Astfel in acest articol se trec in revista pe langa cateva elemente de teorie ale termoviziunii in infrarosu, cateva dintre domeniile de aplicabilitate si principalele caracteristici ale camerelor de termoviziune specifice acestor domenii.

Referințe

- [1] ‘*W. Herschel*, „Experiments on the refrangibility of the visible rays of the sun”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 90, pp. 284–292, 1800.’
- [2] ‘*L. Bellingham*, „Means for detecting the presence at a distance of icebergs, steamships, and other cool or hot objects,” US patent no. 1,158,967.’
- [3] ‘*Parker (R.D.)*, „Thermic balance or radiometer”, U.S. Patent No 1,099,199 June 9, 1914.’
- [4] ‘*Naughton, Russell*, „Monash University”, Archived from the original on 24 October 2003’, .
- [5] *C. Lerma, E. Barreira, and R. M. S. F. Almeida*, ‘A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration’, *Energy Build.*, vol. 168, pp. 56–66, 2018.
- [6] *H. Heinrich and K. Dahlem*, ‘Thermography of Low Energy Buildings’, *Qirt 2000, Reims, Fr.*, pp. 1–6, 2000.
- [7] *A. Capozzoli, A. Gorrino, and V. Corrado*, ‘A building thermal bridges sensitivity analysis’, *Appl. Energy*, vol. 107, pp. 229–243, 2013.
- [8] *E. Lucchi*, ‘Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. November 2017, pp. 3077–3090, 2018.
- [9] FLIR, ‘User’s manual FLIR Tools/Tools+’, p. 176, 2017.
- [10] ‘*M. Richardson*, „Safe use of thermal imaging technology”, *Fire International* 5 (2001).’
- [11] *E. Lucchi*, ‘Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. November 2017, pp. 3077–3090, 2018.
- [12] ‘ISO DIN 6781/1983 („Thermal performance in buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in buildings envelope. Infrared method”)’.
- [13] *B. Coffey, S. Borgeson, S. Selkowitz, J. Apte, P. Mathew, and P. Haves*, ‘Towards a very low-energy building stock: Modelling the US commercial building sector to support policy and innovation planning’, *Build. Res. Inf.*, vol. 37, no. 5–6, pp. 610–624, 2009.
- [14] *M. O’Grady, A. A. Lechowska, and A. M. Harte*, ‘Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging’, *Energy Build.*, vol. 135, pp. 20–32, 2017.
- [15] ‘EN ISO 10211 („Thermal bridge in buildings construction – heat flow and surface temperatures”)’.
- [16] ‘EN ISO 14683 („Thermal bridge in buildings construction –linear thermal transmittation”).’
- [17] *M. Fox, S. Goodhew, and P. De Wilde*, ‘Building defect detection: External versus internal thermography’, *Build. Environ.*, vol. 105, pp. 317–331, 2016.
- [18] *R. M. S. F. Almeida, N. M. M. Ramos, and P. F. Pereira*, ‘A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings’, *Energy Build.*, vol. 139, pp. 174–185, 2017.
- [19] *M. Sherman and M. Modera*, ‘Comparison of measured and predicted infiltration using the LBL infiltration model’, *Meas. Air Leakage Build. ASTM STP 904*, no. July 2015, pp. 325–347, 1986.
- [20] <https://www.infratec-infrared.com/thermography/industries-applications/medicine/>. – pagina web a firmei InfraTec
- [21] <https://www.trutechtools.com/ThermalImagersByApplication>. – pagina web a firmei TruTechTools