

## TERMOGRAFSKA DIJAGNOSTIKA OBJEKATA ZAŠTITE KULTURNE BAŠTINE

## THERMOGRAPHIC DIAGNOSIS OF OBJECTS TO CULTURAL HERITAGE PROTECTION



Suzana Polić-Radovanović<sup>1</sup>, Slavica Ristić<sup>2</sup>, Mila Popović-Živanović<sup>1</sup>, Bore Jegdić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centralni institut za konzervaciju, Beograd

<sup>2</sup> Institut Goša, Beograd

### REZIME

U radu je prikazan kratak pregled osnovnih principa infracrvene termografije i najznačajnije oblasti nje-  
ne primene. Posebna pažnja je posvećena primeni  
termografije u oblasti građevinarstva, odnosno ob-  
lasti zaštite kulturne baštine. Termografija kao bes-  
kontaktna metoda ispitivanja je korišćena za otkri-  
vanje vlage u zidovima i krovovima, utvrđivanje ko-  
rektnosti termalne izolacije, oštećenja u konstrukci-  
jama itd. U eksplikaciji mogućnosti primene ove  
tehnike u oblasti zaštite kulturne baštine prikazani  
su rezultati istraživanja u Muzeju nauke i tehnike u  
Beogradu.

**Ključne reči:** termografija, kulturna baština, dijag-  
nostika vlage

### ABSTRACT

This paper presents a brief overview of the basic  
principles of infrared thermography in most impor-  
tant areas of its application. Special attention is paid  
to the application of thermography in the construc-  
tion, or areas of cultural heritage protection. Ther-  
mography as a contactless method of testing is used  
to detect moisture in walls and roofs, determining  
the correctness of thermal insulation, structural  
damage and so on. In explanation of possible  
applications of this technique in the field of cultural  
heritage are presented the results of research at the  
Museum of Science and Technology in Belgrade.

**Key words:** thermography, cultural heritage, diag-  
nosis of moisture

### 1. UVOD

Zaštita kulturne baštine predstavlja jedan od  
društvenih prioriteta u savremenom svetu. To potvr-  
đuju brojni međunarodni dokumenti i konvencije,  
koje su donete u cilju uspostavljanja standarda zašti-  
te kulturne baštine. U dokumentima se posebno isti-  
če da je preventivna zaštita kao strategija izuzetno  
važna za zaštitu nasleđa [1].

Multidisciplinarni pristup istraživanju problema  
zaštite baštine polazi od dijagnostike stanja okruže-  
nja, uključuje i interdisciplinarno povezuje sve neop-  
hodne aktivnosti i mere zaštite objekata i artefakata,  
koji su valorizovani kao prirodne i kulturne vredno-  
sti. Multidisciplinarni pogled na navedene probleme  
obuhvata različite oblasti kao što su: termoenerge-  
tika, procesna tehnika, tehnologija materijala, laser-  
ske tehnike, mehanika fluida, heritologija, meteo-  
rologija, ekologija, arheologija, informatika, istorija  
umetnosti i mnogo drugih disciplina [1].

Logička matrica u savremenoj konzervaciji po-  
drazumeva da najobimniji posao predstavlja postu-  
pak planiranja na osnovu izvršenih nedestruktivnih  
dijagnostičkih metoda, kojima se utvrđuje uticaj  
okoline, sastav materijala, i drugi parametri relevan-  
tni za procenu stanja objekata [2].

Imajući u vidu značaj stanja muzejskih depoa i  
galerija za očuvanje zbirki, kao i specifičnost uticaja  
okruženja na predmete kulturne baštine, nametnula  
se potreba ispitivanja prisustva vlage i termoizo-  
lacije u muzejskim prostorijama.

Termografija je samo jedna od metoda koje  
nalaze široku primenu u procesu preventivne i  
kurativne konzervacije. Ona je jedna od najefikas-  
nijih tehnika beskontaktnog ispitivanja i monitoringa  
kompleksnih građevinskih objekata [3–19]. Naza-  
menljiva je u dijagnostici toplotnih gubitaka u  
građevinama, prisustvu vlage u građevinskim objek-  
tima, stanju betonskih konstrukcija, pregledu podnog  
grejanja i eventualnih curenja sistema vodovodnih ili

grejnih cevi, lociranju loše izolacije, proceni termičkih performansi, dihtunga i zaptivki, lociranju grejnih žica i cevi, detekciji delaminacije na fasadama, u betonskim mostovima i drugo. Kod ravnog krova na građevinama ovom metodom mogu se veoma efikasno otkriti mesta prodora i zadržavanja vlage, identifikovati putevi i oštećenja vodom. Termografija se koristi i za detekciju kapilarnog prodiranja vode u građevinskim objektima, kao i za otkrivanje zone potencijalne kondenzacije vlage iz vazduha.

U svetu se termografija koristi kao metoda za preventivno održavanje objekata i metoda ispitivanja njihove energetske efikasnosti. Kod nas je metoda koja beleži sve veću primenu, ali još uvek nije dostigla zadovoljavajući nivo primene.

## 2. OSNOVI INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Termografija se najjednostavnije može definisati kao tehnika pomoću koje se registruje infracrveno zračenje, koje je karakteristično za svaki objekat, čija temperatura je iznad apsolutne nule. Ovo zračenje je posledica neprekidnog kretanja elementarnih naelektrisanih čestica unutar supstance. Danas termografija koristi sofisticiranu opremu i softver za dijagnostiku stanja objekata na bazi njihovog infracrvenog zračenja [5–8].

Objekti u našem okruženju razmenjuju toplotu neprekidnim apsorbovanjem i emitovanjem infracrvenog zračenja. Emisija toplotnog zračenja je u funkciji raspodele temperature, a preko nje u funkciji kompletnog stanja ispitivanog predmeta. IC termografija je beskontaktna metoda merenja temperature i njene raspodele na površini tela. Rezultat termografskog merenja je termogram, koji u sivim tonovima ili nekom kodu boja, daje sliku temperaturne raspodele na površini posmatranog objekta. Temperaturna raspodela posredno daje informaciju o stanju same površine ili je pak odraz strukture i unutrašnjeg stanja posmatranog objekta.

U najjednostavnijoj verziji, termografski sistem se sastoji od termografske kamere i jedinice za obradu termograma (PC). U samoj kameri integrisana je IC optika, senzor IC zračenja, jedinica za pretvaranje električnog u video signal, monitor i kartica za prikupljanje podataka. Računar služi za obradu termograma pomoću određenog softvera, koji učitava podatke sa kartice kamere. Materijali koji se koriste za izradu sočiva termografskih kamera moraju biti propusni za IC zračenje, a to su; germanijum, cink sulfid, cink selenid, za dugotalasna IC zračenja, te silikon, safir, kvarc ili magnezijum, za srednjetalasna IC zračenja.

Da bi se iz zračenja prispelog na kameru izračunala korektna vrednost temperature posmatranog objekta, potrebno je poznavati svojstva površine objekta, temperaturu okolnih objekata, udaljenost kamere od posmatranog objekta, temperaturu i relativnu vlažnost vazduha. Sve te podatke potrebno je prethodno podesiti kao ulazne parametre u softveru kamere. Danas se infracrvena termografija koristi u skoro svim sferama ljudske delatnosti (medicina, kriminalistika, biologija, tehnika, svakodnevni život).

Infracrveno zračenje (IR) je vid elektromagnetne emisije, čije su talasne dužine  $\lambda$  u opsegu 0,7–1.000  $\mu\text{m}$  i predstavlja toplotno zračenje koje proizvode sva tela zagrejana iznad temperature apsolutne nule. Sa povećanjem temperature objekta raste i intenzitet emitovanog IR zračenja. U termografiji se koriste dve vrste detektora:

- kratkotalasni, otkriva talasne dužine u opsegu 3–4  $\mu\text{m}$ ;
- dugotalasni, u opsegu 8–14  $\mu\text{m}$ .

Ova dva opsega nisu slučajno izabrana. Oni su takozvani atmosferski prozori u kojima je veća propustljivost atmosfere za IR zrake [5].

Termografija može biti “pasivna” i “aktivna”. Pasivna termografija detektuje zračenje tela koja su na višoj ili nižoj temperaturi od okoline, a aktivna detektuje zračenje tela, koje je rezultat širenja toplote unete na različite načine u ispitivani objekat.

### 2.1 Osnovi infracrvene tehnologije

Jedan od osnovnih zakona klasične elektromagnetne teorije je da ubrzane naelektrisane čestice zrače energiju [7]. Kako se ubrzanje i toplotno kretanje elektrona i protona povećavaju sa temperaturom, sledi da energija zračenja određenog uzorka, mora da se povećava sa temperaturom.

Relativni spektralni intenzitet zavisi prvenstveno od temperature objekta i emisionih svojstava materijala od koga su objekti napravljeni, kao i spektralne emisivnosti materijala. Objekat sa visokom emisivnošću treba da ima i visoku apsorpciju.

Crno telo je idealan apsorber celokupnog zračenja, koje pogađa telo sa bilo kojom talasnom dužinom, pod bilo kojim uglom. Ako je crno telo u fizičkoj ravnoteži, ono mora da emituje zračenjem tačno onoliko energije koliko apsorbuje. Otuda sledi da crno telo nije samo savršen apsorber, nego i savršen emiter. Za opisivanje pojava vezanih za pojam crnog tela koriste se Plankov, Winov i Štefan/Bolcmanov zakon.

Karakteristike zračenja stvarnih necrnih (sivih) površina, razlikuju se od idealno crnog tela na

---

---

nekoliko načina. Zračenje stvarnih površina zavisi od mnogobrojnih faktora kao što su sastav, završna obrada površine, temperatura, talasna dužina zračenja, ugao pod kojim se zračenje emituje, spektralna raspodela upadnog zračenja i od toga da li je telo neprozirno [7].

Za opisivanje zračenja realnih materijala u odnosu na ponašanje crnog tela, koriste se različita svojstva IC zračenja, koja karakterišu emisivnost, apsorpciju i odbijanje odnosno refleksiju. Sposobnost zračenja, ili emisivnost označava osobine realnog tela koje su vezane za zračenje u poređenju sa crnim telom. Emisivnost je funkcija temperatura tela, talasne dužine i ugla detekcije. Apsorbovana količina upadnog zračenja je teško merljiva vrednost. Eksperimentalno je često lakše odrediti emisivnost, odnosno odrediti koeficijent emisivnosti. Zato je poželjno imati odnos između ovih veličina, tako da vrednosti izmerenih svojstava jedne površine omoguće izračunavanje drugih.

Kirhofov zakon je vezan za odnos između emitujućih i apsorbujućih svojstava tela. Ovaj zakon može da obuhvati različite uslove, u zavisnosti od toga da li se razmatraju spektralne, ukupne, usmerene ili osobine u poluprostoru. Primenom Kirhofovog zakona, a uzimajući u obzir da je materijal potpuno neproziran, utvrđeni su odnosi između sposobnosti apsorpcije, zračenja i refleksije.

U opštem slučaju, sredina koja okružuje objekat razmatra se kao prozračna, neemitujuća neapsorbujuća sredina, što nije uvek slučaj. Zbog toga je bitno poznavati zakone poremećaja zračenja u apsorbujućoj, emitujućoj i rasejavajućoj sredini.

IC zračenje koje telo emituje kroz sredinu, može da se poremeti emisijom zračenja sredine i apsorpcijom zračenja u sredinu. Emisija zračenja u sredini identifikuje se sa oslobađanjem energije u obliku fotona, dok se apsorpcija identifikuje sa apsorpcijom fotona. Takođe, tokom prolaska kroz sredinu prisutan je i efekat rasejanja, koje može da bude: elastično, neelastično, izotropno i anizotropno rasejanje. Kako zračenje prolazi kroz dati sloj sredine, tako se njegov intenzitet smanjuje usled apsorpcije i rasejanja. Eksperimentalno je utvrđeno da promene u intenzitetu zavise od koeficijenta ekstinkcije, rasejanja i koeficijenta apsorpcije sredine.

Toplotno zračenje koje prima infracrveni objekat, sastoji se od zračenja koje emituje ne samo objekat, već i njegova okolina. Kada signali prvobitnog zračenja dospeju u IC detektor, signali su modifikovani zbog zračenja koje emituje sočivo, skenirajući sistem i detektor. Imajući u vidu kompleksnost detektovanja IC zračenja vrši se filtracija svih uticaja na zračenje emitovano od ispitivanog objekta.

Materijali koji su transparentni za infracrvene talasne dužine nisu nužno transparentni za talasne dužine vidljive oblasti spektra zračenja. Na primer, dok su silicijum i germanijum neprozirni u vidljivim talasnim dužinama, oni su transparentni u delovima infracrvenog spektra. Za germanijum, koji se obično koristi kao materijal za izradu infracrvenih sočiva, indeks prelamanja  $n=4$ , a transparentnost ovog materijala postaje  $t=0,47$ . Veliki gubici u transparentnosti obično se minimiziraju primenom anti-refleksionih premaza na površini sočiva. Time se koeficijent transmisije povećava na oko 94%–99% za dati interval talasnih dužina. Interval talasnih dužina određuje naneti materijal i debljina antirefleksnog sloja.

Infracrveni detektori su veoma značajna komponenta u termografskim sistemima. To su konvertori koji apsorbuju IR-energiju i konvertuju je u signal, obično električni napon ili struju. Infracrveni detektori mogu se podeliti u dve grupe: termičke i fotonske detektore [4–6].

## 2.2 Podela termografije

Termografija se može podeliti na pasivnu i aktivnu. Pasivna termografija je povezana sa prirodnom temperaturnom distribucijom na površini objekta i ona je u ispitivanjima predmeta kulturne baštine povezana sa ispitivanjima vezanim za strukturu objekata ili njihovih delova. Pasivna termografija u najvećem broju ispitivanja je povezana sa kvalitativnim određivanjem anomalija u konstrukcijama, a u nekim specijalnim slučajevima može biti korišćena i za kvantitativna ispitivanja.

Aktivna termografija je metoda koja koristi spoljne izvore, kao što su lampe, laseri itd., da uniformno zagreje ili ohladi predmet koji se ispituje. Termalni gradijent se u tom slučaju uspostavlja na površini ispitivanog objekta koji se snima pomoću termografskog uređaja.

Prsline, uključci, delaminacije, itd. su elementi koji unose temperaturni gradijent zbog toga što imaju različit koeficijent prenosa toplote [8, 9, 17–20]. Uslov za pravilnu vizuelizaciju pomoću termografije je da se vrši strogo ravnomerno zagrevanje ispitivanog objekta. Postoje više načina kako se unosi spoljna temperatura. Prema tom kriterijumu termografija se može podeliti na:

- impulsnu,
- sa stepenastim zagrevanjem,
- Lock-in (sinhronu) termografiju i
- Vibrotermografiju.

Impulsna termografija je jedna od najčešće korišćenih metoda za NDT. Toplotna stimulacija objekta se vrši sa izvorima toplote koji zrače ener-

giju u kratkim vremenskim intervalima od nekoliko ns do stotina ms. Kao izvori toplote služe impulsne lampe, laseri itd. U kratkom vremenskom intervalu dolazi do narušavanja toplotne ravnoteže ispitivanog objekta. Nakon prestanka delovanja izvora toplote, dolazi do brzog hlađenja zbog difuzije, konvekcije, kondukcije i zračenjem sa površine tela. Na osnovu snimljenog temperaturnog kontrasta, može se vršiti kvantitativna analiza i postaviti zavisnost između vremena prenosa toplote i dubine defekta u odnosu na površinu objekta.

Prisustvo defekata ispod površine objekta smanjuje stopu difuzije, tako da kada se posmatra površinska temperatura, različite temperature se registruju kod defekata u odnosu na okolinu. Postoji transmisiona i refleksiona impulsna termografija. U transmisionalnoj, uzorak se greje sa jedne strane, dok infracrvena kamera snima sa druge strane, dok u drugom tipu termografije, i izvor zračenja i kamera se nalaze na istoj strani.

Suprotno od impulsne, ispitivanja termografijom sa stepenastim grejanjem se odvija u toku grejanja. Promene površinske temperature sa vremenom su direktno povezane sa karakteristikama objekta. Ova tehnika se često naziva i infracrvena radiometrija sa vremenskom rezolucijom (time-resolved infrared radiometry – TRIR). Koristi se najčešće za ispitivanje višeslojnih struktura, kompozita, keramike itd.

Lock-in (sinhrona) termografija je dinamički metod merenja, odnosno analiza toplotnih talasa. U ovoj metodi se koriste sinusni, modulirani signali za ekscitaciju uzorka. Toplotni izvori mogu biti halogene lampe, laseri ili toplotni pištolji. Koristi se stacionarni režim ekscitacije. Istovremeno se registruju signali pobude i signali odgovora ispitivanog predmeta preko snimanja termalne emisije sa infracrvenom kamerom. U ovoj metodi je neophodno da se vrši precizni monitoring vremenske zavisnosti snimljenih signala. Može se dobiti amplitudna raspodela IC zračenja sa površine, kao i fazna raspodela. Prva zavisi od više karakteristika površine objekta, dok druga ne zavisi od stanja površine objekta, nego od vremena kašnjenja, odnosno od fazne razlike između pobudnog i dobijenog signala.

Vibrotermografija je aktivna metoda, u kojoj se vrši direktna konverzija mehaničke energije unetih vibracija u toplotnu energiju. Toplotna energija je posledica trenja molekula na mestima gde postoje defekti, kao što su prsline ili raslojavanje, delaminacija. Metoda je pogodna za ispitivanje objekata sa visokom temperaturnom provodnošću.

Postoji više proizvođača termografske opreme [4-6]. Najjednostavnije kamere daju samo kvalitativnu sliku raspodele temperature na površini objekta

sa skromnom rezolucijom. Najnovije kamere su veoma kompleksni sistemi sa vrhunskim elektronskim i optičkim komponentama i sa softverom koji omogućava kontrolisanje režima snimanja, automatsku kompenzaciju ambijentalnih uslova, emisivnosti površine, obradu termograma u toku snimanja i naknadnu obradu po zadatim kriterijumima i za više promenljivih.

### 3. PRIMENA TERMOGRAFIJE U GRAĐEVINARSTVU

Uspešna primena termografije u građevinarstvu podrazumeva da su stvoreni optimalni uslovi za njeno korišćenje, da su eliminisani faktori koji dovode do nepoželjnih uticaja na ukupnu termografsku sliku objekta, da je izvršena kompenzacija atmosferskih uticaja, da je pravilno izabrana emisivnost ispitivanih površina i da ispitivanje radi termografer sa iskustvom.

Detekciju vlage i prodiranje vode u građevinskim objektima, korišćenjem infracrvenih kamera, bazira se na različitim svojstvima termalne provodljivosti i termalnog kapaciteta vode i materijala od kojeg je izgrađen objekat. U tabeli su prikazane termalne karakteristike za pojedine materijale koji se koriste u građevinarstvu [8].

Naziv materijala	Gustina $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Koeficijent toplotne provodljivosti $\lambda$ W/(mK)	Specifični toplotni kapacitet $C_p$ J/(kgK)	Emisioni faktor $e$
Cigla	1800	0,872	1047	0,911
Kamen	2300	2,908	879	0,88
Osnovni malter	1800	0,861	837	0,92
Spoljni sloj maltera	1800	0,814	837	0,95
Vazduh	1,164	0,0251	1012	-
Voda	995,7	0,616	4176	-

Mnogo faktora utiče na to kako će se vlaga pojaviti u infracrvenoj slici, odnosno na termogramu. Na primer, grejanje i hlađenje vlažnih zona će se drugačije prikazati u zavisnosti od materijala, doba dana itd. Iz tog razloga je važno da se za sprovođenje sanacionih radova koriste i druge metode za proveru vlage u zidovima i krovnim konstrukcijama.

Utvrđivanje prisustva vlage i stanja termoizolacije objekata kulturne baštine je veoma bitno pri

obezbeđivanju optimalnih temperaturnih uslova čuvanja u depoima i izlaganja eksponata u galerijama. Ovaj problem je posebno značajan za metalne eksponate. Nedovoljna izolacija može da se pojavi zbog gubitka izolacione mase s vremenom, mehaničkih oštećenja, ili nestručnom intervencijom prilikom različitih sanacionih radova, što stvara nepotpuno ispunjene zidne strukture. Termografska kamera omogućava da se vide mesta sa nedovoljnom izolacijom zato što ona ili imaju drugačija svojstva toplotne provodljivosti u odnosu na područja sa dobrom izolacijom, ili prikazuju zone pothlađivanja. U svetu postoje značajna istraživanja primene termografije u istraživanju objekata kulturne baštine. [10–19]

Termografijom se mogu uspešno detektovati i mesta gde dolazi do strujanja vazduha zbog slabe zaptivenosti ili loše izvedene izolacije. Ovo je takođe važna komponenta pri obezbeđivanju stabilnih temperaturnih uslova za čuvanje i izlaganje eksponata izrađenih od metala.

Uspešno termografsko ispitivanja unutrašnjosti objekata zahteva da se obezbedi temperaturna razlika vazduha u ispitivanim delovima objekta u odnosu na spoljnu sredinu. Ona mora biti najmanje 10°C i to nekoliko sati pre snimanja i za vreme snimanja. Za period od nekoliko sati, spoljna temperatura ne sme da varira više od 30%, od trenutka kada počne snimanje. Za vreme termografskog snimanja, unutrašnja, ambijentalna temperatura ne sme da se menja više od  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Nekoliko sati pre početka snimanja i dok ono traje, ne sme biti uticaja sunca na posmatrane delove objekta. Negativni pritisak unutar objekta 10–50 Pa je poželjan ako se ispituje zaptivanje prozora i vrata.

#### 4 TERMOGRAFSKO ISPITIVANJE U MUZEJU NAUKE I TEHNIKE

Muzej nauke i tehnike je ustanova kulture koja u svojoj zbirci ima predmeta od velikog značaja za tehničku, odnosno industrijsku baštinu. U najvećem broju, to su metalni predmeti ili predmeti u kombinaciji metala drveta i plastike.

Prisustvo kapilarne vlage, ili vlage zbog prodiranja vode, kao i potencijalna mesta kondenzacije vlage iz vazduha su osnovni uslovi za pojavu korozije kao procesa destrukcija metala i legura usled hemijske ili elektrohemijske reakcije sa okolnom sredinom. Elektrohemijska korozija metala je najrasprostranjeniji oblik korozije. On se odvija pri uzajamnom dejstvu metala sa elektrolitima kao što je voda, vodeni rastvori soli, kiselina i baza i predstavlja heterogeni elektrohemijski proces.

Čuvanje metalnih eksponata u suvim depoima i njihovo izlaganje u suvim, izložbenim prostorijama je osnovni uslov u preventivnoj konzervaciji. Iz tog razloga od posebnog interesa za muzeje je ispitivanje prisustva vlage.

Termografsko snimanje Muzeja nauke i tehnike izvršeno je infracrvenom kamerom Therma CAM T-335, FLIR Systems, čije tehničke karakteristike su:

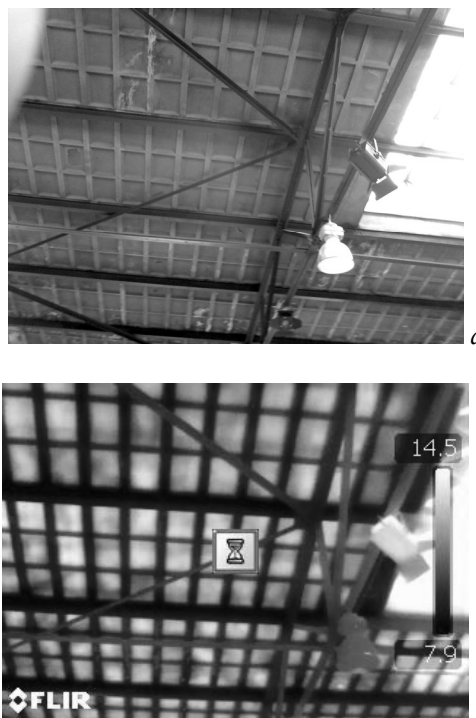
1. Detektor: nehladjeni mikrobolometar, rezolucije 320x240 piksela
2. Temperaturni opseg: od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+650^\circ\text{C}$
3. Temperaturna osetljivost:  $0.05^\circ\text{C}$
4. Spektralni opseg: od 7,5 do 13  $\mu\text{m}$
5. Objektiv:  $45^\circ \times 33.8^\circ$  i  $25^\circ \times 19^\circ$

Snimanja su vršena u sledećim temperaturnim uslovima:

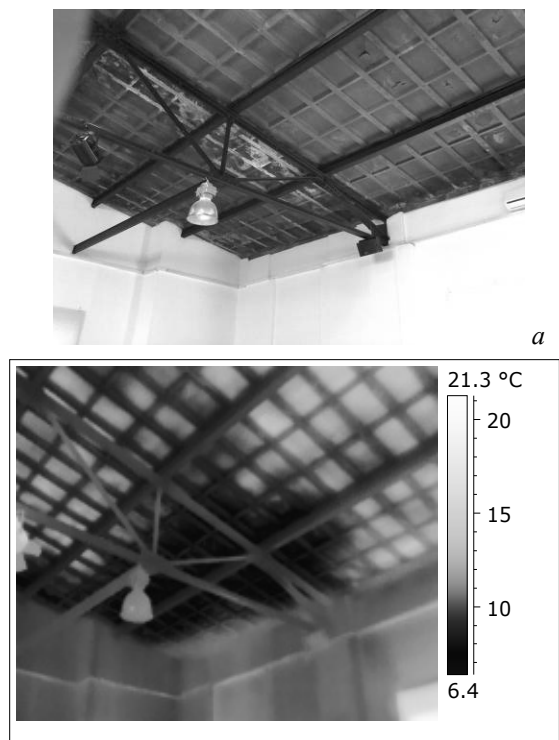
- Spoljna temperatura:  $10^\circ\text{C}$
- Unutrašnja temperatura:  $15^\circ\text{C}$
- Vremenski uslovi: Sunčano, bez vetra

Pored termograma snimani su i digitalni video zapisi zbog lakšeg identifikovanja otkrivenih aktivnih i potencijalnih mesta vlaženja.

Na slici 1. su prikazani termografski i video zapis dela krovne konstrukcije na kojoj se vide fleke od prethodnog prokišnjanja. U trenutku snimanja vlage nije bilo, što je rezultat uspešne sanacije.



Sl.1. Deo plafona u levom delu galerije sa uspešno izvršenom sanacijom. Postoje fleke od prethodnog prisustva vlage: a–video snimak, b–termogram



Sl. 2 Deo krova sa zarobljenom vlagom tokom saniracije

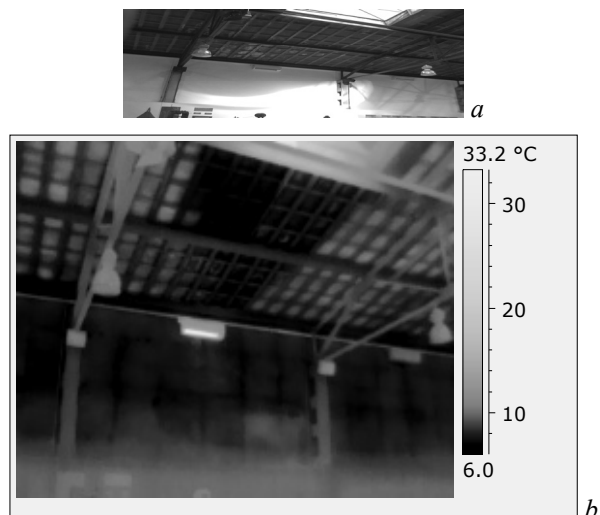
Na slici 2. prikazan je drugi deo krovne konstrukcije, gde se vidi da je ranije bilo prokišnjavanje. Prema izjavama kustosa, posle sanacije nema prokišnjavanja. Termogram pokazuje da postoji vlaga. Tamna fleka na termografskom snimku signalizira da se na ovom delu zadržala vlaga unutar izolacije koja je postavljena u veoma kratkom periodu na krovnoj konstrukciji.

Snimanja krovne konstrukcije Muzeja su rađena u jutarnjim satima, kada je ovaj deo krova bio obasjan suncem. Voda se sporije greje i kako se vidi sa termogramima, njena temperatura je niža za oko 5° C u odnosu na susedne delove krovne konstrukcije.

Osim utvrđivanja prisustva vlage, termografijom se mogu registrovati i toplotne grede, odnosno delovi objekata sa slabom termalnom izolacijom. Na slici 3b je prikazan termogram gde se pored vlaženja u krovu vidi deo spoljnog zida izložbenog prostora. Gornji deo zida ima znatno nižu temperaturu, a vidljiva je i njegova struktura. Na ovom delu jasno se očitava zona zida koja je potencijalno mesto za kondenzaciju vlage u zimskim uslovima.

Video snimak i termogram dela izložbenog prostora pokazuju još jednu mogućnost koju pruža termografija (sl.4).

Različita debljima zidova utiče na njihov termalni kapacitet. Suncem zagrejani zid na slici 4a je dobijen zazidavanjem tri prozora. Zbog različitih materijala i različite debljine, postoji razlika u temperaturi na unutrašnjem delu zida. Na termogramu, sl.4b jasno se vidi lokacija zazidanih prozora.



Sl. 3. Plafonski deo desno od ulaza i gornji deo spoljnog zida

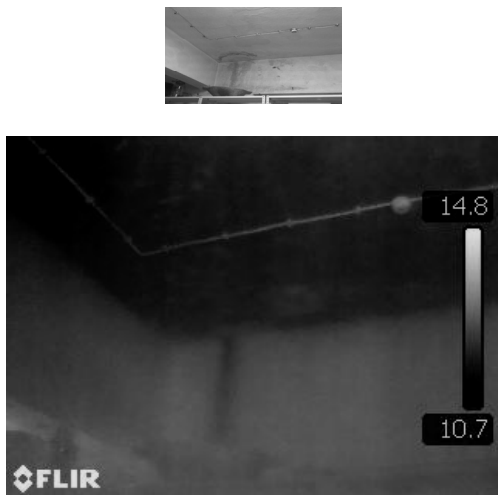


Slika 4. Skrivena struktura zida izložbenog prostora

Za preventivnu zaštitu metalnih i drvenih predmeta industrijske i kulturne baštine od posebnog je značaja prisustvo kapilarne vlage u depoima muzeja.

U centralnom depou Muzeja nauke i tehnike postoje tragovi prodora vlage, ali u trenutku snimanja nisu pronađena vlažna mesta. Rezultati ispiivanja su ilustrovani na slici 5.

Na sl.5b su jasno vidljive električne instalacije sa povišenom temperaturom u odnosu na plafon depoa.

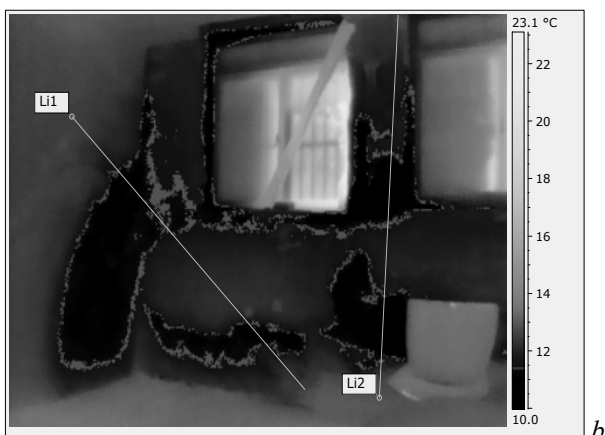


Sl. 5 Depo muzeja bez prisustva vlage

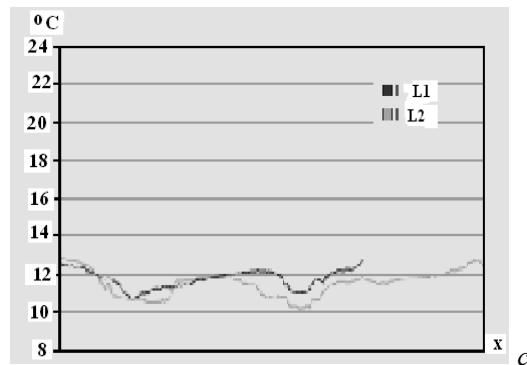
U suterenu zgrade Muzeja Nauke i tehnike se nalazi nekoliko prostorija koje su namenjene za čuvanje premeta iz bogate zbirke metalnih predmeta. Trenutno nisu u upotrebi zbog loše hidroizolacije i prisustva kapilarne vlage. Ove prostorije su termografski snimljene, a na slici 6a i 6b su prikazani rezultati dobijeni u prostoriji na uglu Skenderbegove i Dobračine ulice. Prostorija se nalazu delom ispod nivoa ulice. Na slici 6b su pored mernih linija prikazane i izoterme, kojima se jasno crtavaju granice prisustva vlage u zidovima prostorije.



a



b



Sl. 6 a–video zapis, b–temogram sa mernim linijama, c–dijagram temperaturnih promena duž mernih linija

Slika 7 predstavlja video i termografski snimak metalnih predmeta iz rimskog perioda koji su ispitivani. Ekspoziti su izrazito korodirani, a produkti korozije imaju različitu emisivnost pri različitim temperaturama.



a



b

Slika 7. Metalni eksponati iz rimskog perioda, a–video snimak, b–termogram u fazi hlađenja eksponat

Debljina eksponata i lokalni ugao površina u odnosu na kameru takođe variraju. Uzorci su zagrejavani do temperature od 77° C. Termogram je snimljen tokom procesa hlađenja. Delovi eksponata gde je metal manje oštećen korozijom duže ostaju zagrejavani i na termogramima se pojavljuju kao područja sa svetlijom nijansom. Tamniji su oni delovi gde su korozivni produkti i gde postoje šupljine ispunjene vazduhom. Ti delovi brže poprimaju sobnu temperaturu.

---

---

## 5 ZAKLJUČAK

Termografska ispitivanja zgrade Muzeja nauke i tehnike u Beogradu pokazala su prednosti termografije kao beskontaktna, nedestruktivne metode istraživanja.

Nalazi potvrđuju da u krovnoj konstrukciji izložbenog prostora Muzeja nauke i tehnike postoje mesta sa skrivenom vlagom koja se zadržala ispod izolacionih slojeva. Takođe, utvrđeno je da su mesta na kojima se prethodno pojavljivala vlaga dobro sanirana. Utvrđeno je da izložbeni prostor ima slabu termooizolaciju. Levi, bočni zid, posebno u gornjem delu, potencijalno je mesto kondenzacije vlage u promenljivim temperaturnim uslovima, u zimskom periodu.

U krovnoj konstrukciji otvorenog depoa postoje mesta vlaženja, a ima i pojave kapilarne vlage u ulaznom delu.

Kapilarna vlaga postoji i u donjim delovima fasade zgrade muzeja. Snimanje prostorija u sutere-nu potvrdilo je prisustvo aktivne vlage koja je i makroskopski vidljiva. Termografskim ispitivanjem je konstatovano koja su mesta vlaženja sanirana.

Ispitivanje je pokazalo da je osim primene pasivne termografije, neophodno ispitivanje proširiti uvođenjem aktivne termografije, kako bi se detaljno ispitali svi elementi i preduzeli koraci za dalju sanaciju. Predložene mere pripadaju oblasti preventivne konzervacije objekata i predmeta industrijske baštine.

## LITERATURA

1. S. Polic-Radovanovic, S. Ristic, B. Jegdic, Z. Nikolic, Metodološki i tehnički aspekti primene novih tehnika u zaštiti kulturne baštine, Institut Goša i Centralni institut za konzervaciju, Beograd, ISBN/ISSN 978-86-86917-12-06, COBISS.SR-ID 180484620, 2010
2. S. Polic-Radovanovic, Research unfavorable environmental Impact to the Cultural heritage in Light of International heritological Practice, International Scientific Conference on Environment and biodiversity, ECOLOGICA, Beograd, 2010.
3. Litos, P., Honner, M., Kunes, J., University of West Bohemia, Thermography Applications in Technology Research, InfraMation 2004 Proceedings ITC 104 A 2004-07-27
4. FLIR, prospektni materijal
5. Thermography, Level I, Course Manual, Infrared Training Stockholm, Publ No1 560 093 D
6. AB, Agema Infrared systems, User manual for installation and operation of Thermovision®900., Stockholm, 1993. electronic series, ed. F.E. Terman., New York, McGraw-Hill book company, 1963.
7. C.Kittel, H. Kroemer, Thermal physics. First ed., New York, W.H. Freeman and Company, 1980.
8. Titman, D.J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures, Journal of NDT & E International, 34, 149-154, (2001).
9. Maldague X (2001). "Advances in pulsed phase thermography." Retrieved September 10, 2005, [http://www.gel.ulaval.ca/~maldagx/r\\_1220t.pdf](http://www.gel.ulaval.ca/~maldagx/r_1220t.pdf)
10. Moropoulou, A., Avdelidis, N.P., Aggelakopoulou, E., Griniezakis, S., Kouli, M., Aggelopoulos, A., Karmis, P. and Uzunoglou, N.K. Examination of plastered mosaic surfaces using NDT techniques, Journal of Insight, 43, 241-243, (2001).
11. M. Rao, D Rao, Review of nondestructive evaluation techniques for frp composite structural components, Morgantown, West Virginia, 2007
12. Christiane MAIERHOFER, Mathias ROELLIG, Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009
13. Avdelidis, N.P. and Moropoulou, A. Review Paper: Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, Journal of CulturalHeritage, 5, 119-127, (2004).
14. S. Švaić, I. Boras, Ic termografija-primjena kod očuvanja kulturne baštine, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006
15. Srečković M., Ristić S., Kutin M., Milić S., Kaluđerović B., Janičijević M., Nekonvencionalne tehnike za ocenu zaostalih napona, mehaničkog stanja i strukture materijala sa akcentom na IC i mikroramanovu spektroskopiju u ispitivanje materijala, Tehnička dijagnostika, br. 2, 2006, st. 20-29
16. M. Kutin, S.Ristić, M.Puharić, Termografsko snimanje interakcije laserske svetlosti sa kompozitnim materijalima, 31.HIPNEF 2008, 15. – 17. 10. 2008, Vrnjačka Banja
17. Sebastiano Imposa, Infrared thermography and Georadar techniques applied to the "Sala delle Nicchie" (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy), Journal of Cultural Heritage 11 (2010) 259–264
18. S. Ristić, S. Polić-Radovanović, Termogafsko ispitivanje vlage u Manastiru Pinosava, Institut Goša, 2009.
19. S. Ristić, S. Polić-Radovanović, Muzejski metalni eksponati u promenljivim temperaturnim uslovima-Muzej nauke i tehnike u Beogradu, studija, Institut Goša, 2009.