

Primjena termografije u građevinarstvu

Vladimir Pašagić

Ključne riječi

infracrvena termografija, građevinarstvo, energija zračenja, mjerna metoda, površina građevine, značajke građevine

Key words

infrared thermography, civil engineering, radiation energy, measurement method, building surface, properties of buildings

Mots clés

thermographie infrarouge, génie civil, énergie de radiation, méthode de mesure, surface d'une construction, propriétés des constructions

Ключевые слова

инфракрасная термография, строительство, энергия излучения, метод измерения, поверхность объекта, характеристики объекта

Schlüsselworte

infrarote Thermographie, Bauwesen, Strahlungsenergie, Messungsmethode, Oberfläche des Bauwerks, Kennzeichen des Bauwerks

V. Pašagić

Primjena termografije u građevinarstvu

Infracrvena termografija, odnosno termografija beskontaktna je metoda mjerenja energije zračenja. Mjerenjem energije zračenja indirektno se mjeri temperatura površine promatrane građevine, što omogućuje zaključivanje o statičkim i dinamičkim značajkama te građevine. Prikazane su mogućnosti primjene infracrvene termografije u građevinarstvu. Opisana je fizikalna osnova termografije, princip mjerne metode, rad termografskog uređaja te odgovarajuće norme, uz primjere primjene.

V. Pašagić

Use of thermography in civil engineering

The infrared thermography or thermography is a contactless method for measuring the radiation energy. By measuring the radiation energy, the surface temperature of the building/facility under study is also measured, and so conclusions can be made about static and dynamic properties of such buildings. Various possibilities of using the infrared thermography in civil engineering applications are presented. The author describes the physical concept behind thermography, the measurement method principle, the operation of thermographic devices and relevant standards, and provides appropriate practical examples.

V. Pašagić

L'emploi de thermographie en génie civil

La thermographie infrarouge ou la thermographie est une méthode d'enregistrement de l'énergie de radiation sans contact physique. En mesurant l'énergie de radiation, la température à la surface de la construction étudiée est également mesurée, et des conclusions peuvent ainsi être faites sur les propriétés statiques et dynamiques de ces constructions. Les possibilités variées de l'emploi de la thermographie infrarouge en génie civil sont présentées. L'auteur décrit le concept physique derrière la thermographie, le principe de la méthode de mesure, l'opération des dispositifs thermographiques, et les normes applicables, et fournit également quelques exemples pratiques.

В. Пашагић

Применение термографии в строительстве

Инфракрасная термография, соответственно термография - бесконтактный метод измерения энергии излучения. Измерением энергии излучения косвенно измеряется температура поверхности наблюдаемого объекта, что даёт возможность делать заключения о статических и динамических характеристиках того объекта. Показаны возможности применения инфракрасной термографии в строительстве. Описана физическая основа термографии, принцип метода измерения, работа термографического устройства, а также соответствующие нормы наряду с примерами применения.

V. Pašagić

Anwendung der Thermographie im Bauwesen

Infrarote Thermographie, bzw. Thermographie ist eine unkontakte Methode der Messung der Strahlungsenergie. Durch Messung der Strahlungsenergie wird indirekt die Oberflächentemperatur des betrachteten Bauwerks gemessen, wodurch eine Folgerung über die statischen und dynamischen Kennzeichen dieses Bauwerks ermöglicht ist. Dargestellt sind die Möglichkeiten der Anwendung der infraroten Thermographie im Bauwesen. Beschrieben ist die physikalische Grundlage der Thermographie, das Prinzip der Messungsmethode, die Arbeit der Thermographischen Einrichtung, sowie die entsprechenden Normen, mit Beispielen der Anwendung.

Pregledni rad

Subject review

Ouvrage de synthèse

Обзорная работа

Übersichtsarbeit

Autor: Dr. sc. **Vladimir Pašagić**, dipl. ing. fiz., Brodarski institut, Avenija V. Holjevca 20, Zagreb

1 Uvod

Infracrvena je termografija (u daljnjem tekstu ICT) mjerna dijagnostička metoda koja se već desetke godina primjenjuje u mnogim područjima, osobito u području očuvanja energije, građevinarstvu, elektrotehnici, strojarstvu, petrokemijskoj industriji, ekologiji i dr. Od druge polovice 90-ih godina prošlog stoljeća, znatno se povećala primjena termografije u građevinarstvu. Uspostavljen je sustav relevantnih norma te sustavno izobražavanje termografista.

Najveći poticaj primjeni ICT-a u građevinarstvu dale su energijske krize. Naftna kriza 1973. godine bila je povod za poticanje mjera racionalnog iskorištavanja energije na globalnoj razini. Tada su vlade mnogih država donijele strože propise radi smanjenja potrošnje energije, a između ostalog i propise o toplinskoj zaštiti zgrada. Termografija je tada našla primjenu kao kvalitativna mjerna metoda nalaženja gubitaka topline kroz vanjske ovojnice zgrada [1]. Uspješnim se prevladavanjem naftne krize interes za energijske uštede u građevinarstvu smanjio.

Problem štedljivog iskorištavanja energije ponovno je aktualiziran istraživanjem utjecaja potrošnje energije na promjenu klime, porastom cijena energenata i političkoj ovisnosti država s nedostatnim vlastitim izvorima energije [2]. Dokazano je i općeprihvaćeno da energijski sektor ima najveći negativni utjecaj na okoliš na lokalnoj i na globalnoj razini. U državama europske unije (EU) potrošnja energije u zgradarstvu jest 41 % od ukupne potrošnje energije, a slična je situacija i u Hrvatskoj [3]. Stoga je povećanje energijske učinkovitosti u zgradarstvu jedan od najisplativijih načina smanjenja troškova za energiju te smanjenje štetnih emisija, osobito stakleničkih plinova, u okoliš. U sektoru zgradarstva jest i najveći potencijal energijskih ušteda.

Primjenom niza norma (navedene su u točki 4. ovog teksta) i priručnika [4], koji se rabe od početka ovog tisućljeća, termografija omogućava kvantitativne ocjene gubitaka energije u zgradarstvu, nalaženje mjesta s povećanom vlagom, ocjenu učinkovitosti sustava grijanja – hlađenja - ventilacije, određivanje toplinskih značajki građevinskih materijala i dr.

Uspješna se primjena termografije u navedenim primjerima postiže samo ako su ostvareni određeni uvjeti koji se odnose na mjernu opremu, klimatske uvjete, način provedbe termografskog mjerenja te obradu i analizu rezultata mjerenja. Cijena termografskih mjernih uređaja sve je prihvatljivija, u prvome redu zbog novih tehnoloških rješenja i povećane primjene, pa se termografskim uređajima često koriste i nedovoljno educirane osobe. Rezultati navedenog često su nezadovoljavajuća obrada i netočna interpretacija rezultata termografskih mjerenja. Pokazalo se nužnim poznavanje osnova fizike toplinskog zračenja u svezi s problematikom termograf-

skih mjerenja, a to se stječe izobrazbom za certificiranog termografista [5]. U državama Sjeverne Amerike i EU termografija je kao nadzorna metoda u građevinarstvu postala standardnom metodom pa se takav razvoj primjene može očekivati i u Hrvatskoj.

2 Fizikalne osnove termografije

Svako tijelo koje ima temperaturu iznad apsolutne nule ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$) zrači elektromagnetske valove te je moguća bezkontaktna metoda mjerenja intenziteta elektromagnetskog zračenja tijela. ICT su mjerenja elektromagnetskog zračenja u dijelu elektromagnetskog spektra koji se naziva infracrvenim spektrom.

Zračenje ili radijacija označava prijenos energije elektromagnetskim valovima. Brzina širenja elektromagnetskih valova (c), valna duljina (λ) i frekvencija (ν) povezani su relacijom $c = \lambda \nu$. IC spektar se proteže u području valnih duljina od $0,7 \text{ }\mu\text{m}$ do $1000 \text{ }\mu\text{m}$, no u tom širokom području samo je usko područje valnih duljina od $0,7 \text{ }\mu\text{m}$ do $20 \text{ }\mu\text{m}$ od praktične koristi za opću primjenu [6].

Emisija elektromagnetskih valova tijela s temperaturom iznad apsolutne nule temelji se na tzv. zakonima zračenja [7]. Ti zakoni odnose se na idealno tijelo, tzv. crno tijelo. Značajke su crnog tijela da apsorbira cjelokupno zračenje koje pada na njega, bez obzira na valnu duljinu ili kut upada. Isto ima za posljedicu da je cjelokupno zračenje koje dolazi s površine crnog tijela emitirano zračenje, tj. da nijedno tijelo ne može emitirati više zračenja od crnog tijela na nekoj valnoj duljini i temperaturi. Crno tijelo nema preferirani smjer emitiranja zračenja.

Zakoni su zračenja Planckov, Wienov i Stefan-Boltzmannov.

Planckov zakon zračenja daje energiju zračenja crnog tijela emitiranog s jedinične površine u jedinični prostorni kut kao funkciju valne duljine i određene temperature crnog tijela, $E_c(\lambda, T)$.

Wienov zakon daje vezu između temperature i valne duljine na kojoj se nalazi maksimum energije zračenja, a dan je relacijom: $\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \text{ }\mu\text{mK}$. Od praktičnog su interesa u građevinarstvu temperature od približno -30 °C do približno $+50 \text{ °C}$, a iz Wienova zakona imamo $\lambda_{\text{max}} \approx 12 \text{ }\mu\text{m}$ (za -30 °C), odnosno $\lambda_{\text{max}} \approx 9 \text{ }\mu\text{m}$ (za $+50 \text{ °C}$).

Stefan-Boltzmannov zakon daje ukupnu snagu zračenja crnog tijela, po jedinici površine, za sve valne duljine, W_c , a za određenu temperaturu T .

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

gdje je σ Stefan-Boltzmannova konstanta i iznosi $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Za razliku od crnog tijela, koje je idealni apsorber odnosno emiter zračenja, realna tijela upadno zračenje mogu apsorbirati, reflektirati i propuštati odnosno transmitirati. Omjer između apsorbitanog i prispjelog zračenja naziva se koeficijentom apsorpcije (a), omjer između reflektiranog i prispjelog zračenja koeficijentom refleksije (r), a omjer između propuštenog i prispjelog zračenja koeficijentom propusnosti odnosno transmisije (τ). Dakle, snaga zračenja koje pada na tijelo (W) dijeli se na apsorbitanu (W_a), reflektiranu (W_r) i propuštenu (W_τ) snagu [6]

$$W = W_a + W_r + W_\tau$$

$$1 = a + r + \tau$$

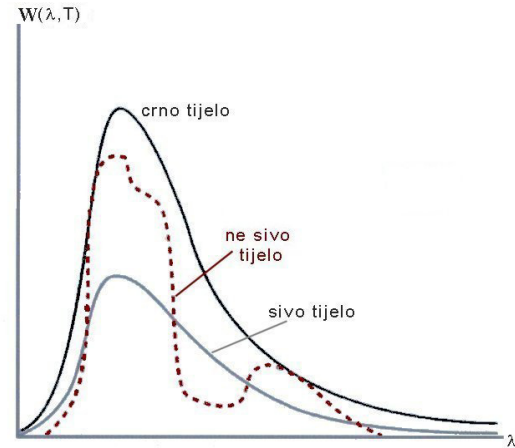
Većina je tijela nepropusna za infracrveno zračenje ($\tau = 0$) te se u tim slučajevima prispjelo zračenje djelomično apsorpira, a djelomično reflektira [6]. Udio prispjelog zračenja koje će se apsorbirati, odnosno reflektirati, ovisi o materijalu i stanju površine, valnoj duljini prispjelog zračenja i o kutu upada. Prisutna je također i ovisnost o temperaturi. Za inženjersku je primjenu zadovoljavajuće točno raditi s prosječnim vrijednostima koeficijenata apsorpcije i refleksije, za odabrani spektralni kanal i odabrani temperaturni interval, jer se spektralni kanal i temperaturni interval odabiru tako da ovisnost koeficijenata apsorpcije i refleksije o valnoj duljini nije značajna [6].

Zračenje realnih tijela odstupa od zračenja crnog tijela te je raspodjela snage zračenja po spektru valnih duljina drugačija. Veličina za koju je snaga zračenja realnog tijela manja od snage zračenja crnog tijela, za odabranu temperaturu i valnu duljinu, naziva se koeficijentom emisije $\varepsilon = \varepsilon(\lambda, T)$, odnosno $W_{\text{realno tijelo}}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot W_C(\lambda, T)$ [8] (slika 1.a, 1.b).

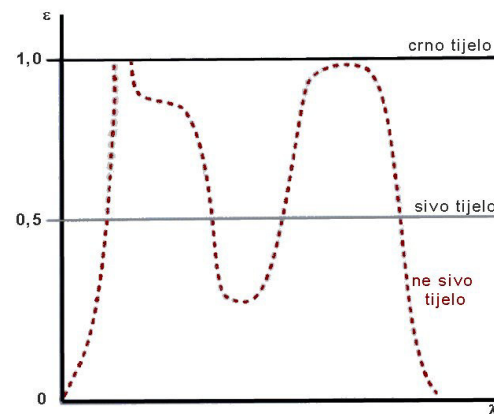
Eksperimentalno je određivanje vrijednosti ε relativno jednostavno, pa je u tome razlog njegove praktičke upotrebe. Ipak, poteškoće u određivanju ε pojavljuju se zbog činjenice da se vrijednost ε mijenja po spektru valnih duljina, odnosno $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$. Promjene ε u relativno širokom temperaturnom intervalu su male prema promjenama vezanim za λ . S obzirom na koeficijent emisije realna tijela razvrstavamo u dvije skupine: siva tijela ($\varepsilon = \text{konst.}$) i nesiva tijela (obojena tijela) ($\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$) (slika 1.b).

Kirchoffov zakon dan je relacijom $a = \varepsilon$, odnosno da je koeficijent apsorpcije jednak koeficijentu emisije za tijela u toplinskoj ravnoteži [7]. Uobičajena je praksa da se Kirchoffov zakon primjenjuje i u slučajevima odstupanja od toplinske ravnoteže, tj. umjesto teže mjerljivog koeficijenta apsorpcije, a koristimo se lakše dostupnim podacima za ε . Zapravo, relacija $a = \varepsilon$ vrijedi približno i u tim slučajevima ako se za ε uzme vrijednost prema temperaturi kakvu ima izvor zračenja (emiter), jer bi

takvu temperaturu imala površina primatelja u stanju toplinske ravnoteže s emiterom. (Pretpostavlja se da temperatura primatelja ima zanemariv utjecaj u odnosu prema utjecaju temperature emitera.)



Slika 1.a Raspodjela snage zračenja crnog tijela, nesivog i sivog tijela za odabranu temperaturu T [9]



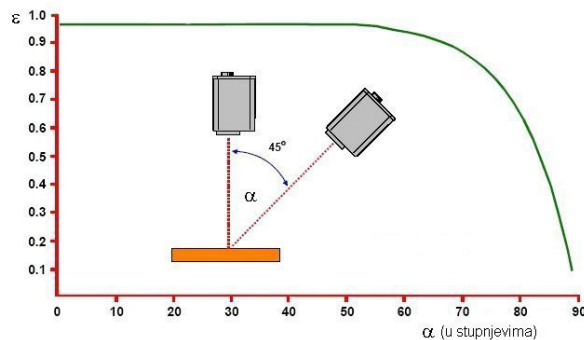
Slika 1.b Koeficijent emisije crnog tijela, nesivog i sivog tijela za odabranu temperaturu T [9]

Kruta su tijela većinom nepropusna za toplinsko zračenje, tj. $\tau = 0$, pa vrijedi relacija: $a + r = 1$. Apсорpcija, koja se praktički odvija na samoj površini krutog tijela, bitno ovisi o stanju te površine. Tako glatke i polirane metalne površine jako reflektiraju energiju zračenja koja pada na njih, tzv. dozračenu energiju, i to pod kutom jednakim upadnom kutu dozračene energije. Zbog toga je kod njih koeficijent apsorpcije a , kao i emisije ε , vrlo malen. Suprotno tome, kod oksidiranih (zrnastih) metalnih površina je a odnosno ε umjereno velik ($\varepsilon \approx 0,8 - 0,9$). Zbog hrapavosti površine kut refleksije nije jednak kutu upadnog zračenja. Pri rješavanju inženjerskih problema obično se pretpostavlja slučaj difuzne refleksije, tj. refleksije neovisne o kutu upadnog zračenja.

Primjer ovisnosti koeficijenta emisije o kutu mjerenja energije zračenja s površine tijela dan je na slici 2. za površine s velikim koeficijentom emisije. Ekvivalentna

je ovisnost vrijednosti koeficijenta emisije o kutu mjerenja i za površine s malim koeficijentima emisije. Stoga se termografska mjerenja nastoje izvršiti do kuta od 45° prema normali na površinu mjerenja.

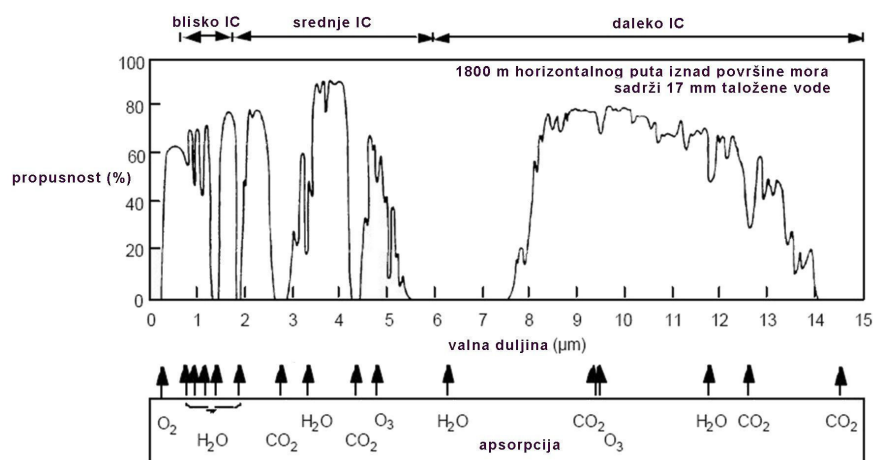
U tablicama postoje podaci za koeficijente emisije u smjeru normale, ε_n , različitih materijala. Vrijednosti koeficijenta emisije određuju se ovisno o stanju površine prema sljedećim relacijama: za glatke površine $\varepsilon = 0,95\varepsilon_n$, za polirane površine $\varepsilon = 1,2 \varepsilon_n$, za hrapave površine $\varepsilon = 0,98 \varepsilon_n$ [8].



Slika 2. Koeficijent emisije u ovisnosti o kutu mjerenja [8]

Udaljenost molekula i jakost njihovih veza određuju od koje se dubine zračenje emitira u prostor izvan površine tijela odnosno tekućine [7]. Stoga, zračenje koje emitiraju krutine i tekućine uključuje samo molekule blizu površine i, primjerice, za metale je taj sloj debljine nekoliko molekula, a za nemetale nekoliko mikrometara. Kako se emisija s površine događa samo s tankog sloja, za krutine i tekućine se emisija i apsorpcija zračenja promatraju kao površinska pojava [7]. Za plinove su emisija i apsorpcija zračenja volumenske pojave.

Interakcije elektromagnetskih valova s konstituentima atmosfere ima za posljedicu da atmosfera propušta inf-



Slika 3. Atmosferski prozori [8]

racveno zračenje samo u određenim spektralnim područjima koje nazivamo atmosferskim prozorima (slika 3.).

Iz grafičkog prikaza propusnosti atmosfere razumljivo je zašto se ICT mjerenja, osobito terenska, obavljaju u tzv. kratkovalnom (od oko $3 \mu\text{m}$ do $5 \mu\text{m}$) i dugovalnom (od oko $7 \mu\text{m}$ do $14 \mu\text{m}$) spektralnom području.

3 ICT – mjerna metoda

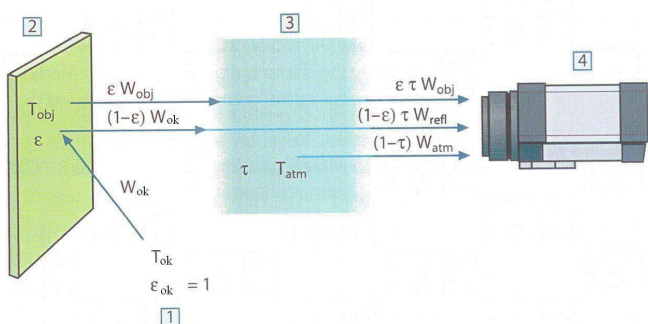
ICT je beskontaktna, nedestruktivna, brza i učinkovita metoda mjerenja energije zračenja tijela odnosno objekta mjerenja. Poznavanjem određenih fizikalnih značajki objekta mjerenja ICT mjerenjem određuje se temperatura i njezina raspodjela na površini tijela. Raspodjela temperature na površini objekta mjerenja određena je u prvome redu procesima u samom objektu mjerenja. Znajući fiziku procesa i raspodjelu temperature površine, moguće je odrediti stanje objekta mjerenja. Dakle, temperaturni iznos i raspodjela temperature na površini posredno daju informaciju o stanju same površine i odraz su strukture i unutrašnjeg stanja promatranog objekta ispod te površine [7].

Ovisno o tome na koji je način objekt mjerenja doveden u stanje koje je pogodno za termografsko mjerenje imamo pasivnu, odnosno aktivnu termografiju. Pasivna je termografija termografska metoda koja promatra objekte u temperaturno kvazistacionarnom stanju [10]. Aktivna je termografija promatranje dinamičkog ponašanja površine objekta izloženog kontroliranoj toplinskoj uzbuđi. Toplinska se uzbuđi može postići na različite načine, a najčešće se rabe impulsna, periodička i vibracijska uzbuđi. Svrha uzbuđi jest slanje određene količine energije u promatrani objekt i praćenje kako se mijenja temperaturna raspodjela površine objekta mjerenja [10].

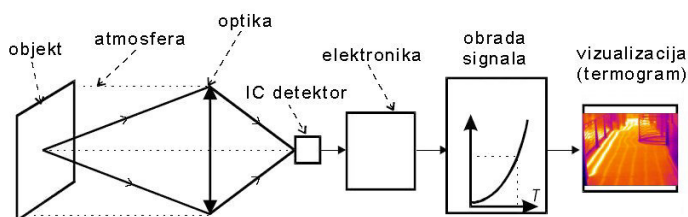
Prema načinu obrade termograma termografija se dijeli na kvalitativnu i kvantitativnu. Obrada termograma, od-

nosno snimljenih podataka energije zračenja, obavlja se uporabom odgovarajućega programskog paketa. Ta obrada može biti kvalitativna, što podrazumijeva samo uočavanje mjesta različitosti, ili kvantitativna što uključuje utvrđivanje iznosa temperatura, temperaturnih razlika ili emisijskih faktora po pojedinim lokacijama [10].

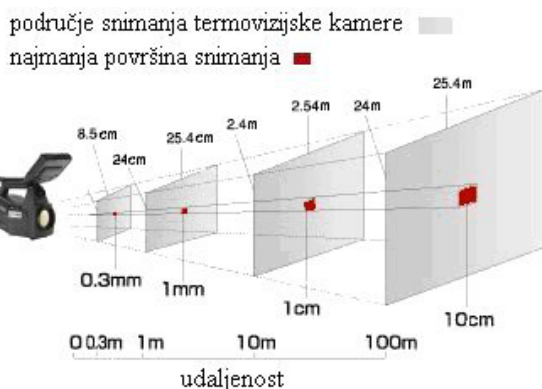
Analizom termograma može se zaključivati o strukturi materijala, mogućim pukotinama ili procesima koji se zbivaju ispod površine.



Slika 4.a Ilustrativni prikaz ICT mjerenja [9]



Slika 4.b Shematski prikaz rada ICT uređaja [8]



Slika 4.c Shematski prikaz rada ICT uređaja [9]

Uobičajeni prikaz rezultata ICT-a je termogram, slika koja prezentira registriranu energiju zračenja u tonovima sive boje ili nekoga drugog koda boja. Za termogram se drži da je vizualni prikaz raspodjele temperature na površini tijela, a što je točno tek nakon što se izvrše relevantni računski postupci s izmjerenim energijama zračenja. Zahvaljujući postojećim programskim paketima, koji su obično integrirani u modernim termografskim uređajima, dobivanje temperature površine objekta mjerenja iz registrirane energije zračenja je relativno jednostavno, ali uz uvjet poznavanja vrijednosti određenih fizikalnih veličina (temperatura i vlažnost zraka, emisivnost objekta, udaljenost mjerenja i dr.) [8].

Zahvaljujući prije svega razvoju detektora i optike, danas se kao ICT uređaji uglavnom rabe termovizijske kamere koje mjere u dugovalnom i/ili kratkovalnom spektralnom kanalu zbog navedenih ograničenja u propusnosti atmosfere. Na slici 4.a je prikaz ICT mjerenja

termovizijskom kamerom. Ilustrativno je prikazano koje sve energije zračenja mjeri termovizijska. W je oznaka za snagu zračenja (obj. – objekt mjerenja, refl. – refleksija, atm – atmosfera), T je temperatura (u kelvinima), ε je koeficijent emisije, a τ propusnosti. Zanimljiva je samo energija zračenja objekta jer služi za izračunavanje temperature površine objekta mjerenja. Doprinosi od efekata refleksije energije zračenja drugih objekata i atmosfere (zraka) moraju se izračunati.

Optika termovizijske kamere fokusira zračenje s objekta mjerenja na detektor koji pretvara zračenje u električni signal. Elektronika kamere pojačava te električne signale i digitalizira ih. Digitalizirani se signali obrađuju, zavisno od odabrane funkcije programa ugrađenog u kameru, a termogram se prikazuje na zaslonu kamere (slika 4.b).

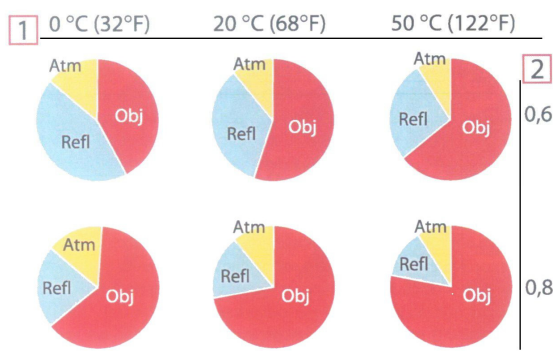
Na slici 4.c prikazana je veličina površine koju mjerenjem zahvaća termovizijska kamera u zavisnosti od udaljenosti, kao i dimenzija najmanje površine koju kamera registrira kao mjernu točku. Prikaz je dan za leću žarišne daljine 36 mm.

Ilustrativni prikaz termograma s pripadajućom fotografijom objekta mjerenja dan je na slici 5.

Kako energije zračenja s objekta koje nisu uzrokovane temperaturom objekta, a to su refleksija zračenja okolnih objekata i zračenja atmosfere, predstavljaju smetnju u ICT mjerenjima zanimljivo je znati koliki je njihov doprinos rezultatima mjerenje u zavisnosti od uvjeta mjerenja. Udio energije zračenja od refleksije i atmosfere je to manji što je temperatura objekta mjerenja veća i/ili kada je koeficijent emisije objekta mjerenja što veći, i obratno. Ilustrativni prikaz navedenog dan je na slici 6. za mjerenja u dugovalnom kanalu. Redak označen s 1 su temperature, a stupac označen sa 2 su koeficijenti emisije objekta mjerenja.



Slika 5. Ilustrativni prikaz termograma u energijskoj iskaznici zgrade [11]



Slika 6. Ilustrativni prikaz doprinosa energija zračenja pri ICT mjerenju [9]

Termovizijska je kamera zapravo složen optički sustav te stoga svaka termovizijska kamera ima pridruženu, karakterističnu krivulju kalibracije. ICT mjerenje s dvije termovizijske kamere daje jednake rezultate mjerenja tek nakon „korekcija“ registriranih vrijednosti s relevantnim kalibracijskim krivuljama. Navedenim se želi istaknuti značenje umjerenosti mjernog uređaja.

4 Normiranost ICT mjerenja

Radi moguće krive interpretacije termograma, što je često posljedica utjecaja vanjskih faktora i načina provedbe mjerenja, značajno je postupanje prema određenim normama i/ili tzv. dobroj laboratorijskoj praksi. Pridržavajući se određenih procedura mjerenja, dobiveni termogrami, kao rezultat ICT mjerenja, daju raspodjele temperature po površini objekta mjerenja u granicama određene točnosti, a ti su podaci korisni u procesu održavanja (zgrada, mostova, energetskih postrojenja, električnih i mehaničkih uređaja itd.).

Norme koje se odnose na ICT pri primjeni u građevinarstvu su s kraja prošlog odnosno početka ovog tisućljeća, a to su:

- ASTM C1060-90(2003) „Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings“
- ASTM C1153-97(2003)e1 „Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging“
- ASTM D4788-03 „Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography“
- ASTM E1186-03 „Standard Practices for Air Leakage Site Detection in Building Envelopes and Air Barrier Systems“
- EN 13187:1998 „Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method“

U Hrvatskoj u primjeni ne postoje propisi, a ni proklamirana laboratorijska praksa za ICT mjerenja. Hrvatska udruga za infracrvenu termografiju – HUICT, osnovana u lipnju 2005., nastoji implementirati ICT sukladno implementaciji u državama EU, ali bez odgovarajuće podrške relevantne državne administracije (MINGORP, MZOUN, MZOS, MZSS) teško da će u tom nastojanju i uspjeti. Kako su u posljednje vrijeme znatno pojeftinili termografski uređaji, uporaba primjene ICT-a brzo se povećava, a time i broj osoba koje obavljaju termografska mjerenja. Dakle, za optimalnu korist od ICT-a nužna je primjena normi i postupanja sukladno postupanju u državama u kojima je to područje uređeno. Potrebno je svakako zadovoljiti određene nužne uvjete za uspješnu provedbu ICT mjerenja i analize termograma. Za korisnika usluga ICT-a jamstvo za dobivanje zadovoljavajuće kvalitete ICT mjerenja i analiza jest da pružatelj usluga ima akreditaciju prema normi HRN EN ISO/IEC 17020 za te inspekcijske usluge.

Nužni uvjeti za termografsku opremu, procedure mjerenja, mjeritelja i izvješća, prema postojećim normama, jesu: - točnost rada mjerne opreme treba ispitati prije i nakon ICT mjerenja (provedba kalibracijskog testa propisanog od strane proizvođača) - značajke mjerne opreme koja se rabi pri ICT mjerenjima omogućavaju realizaciju zadanih mjerenja (temperaturna i prostorna rezolucija uređaja i dr.) - ICT mjerenja se provode samo u određenim uvjetima - mjerenje i registracija svih fizikalnih veličina koje imaju efekta na interpretaciju termograma (relativna vlažnost, brzina vjetra, temperatura zraka, itd.) - termografist, odnosno mjeritelj treba imati odgovarajuću izobrazbu (certificiranu) - izvješće mora sadržavati sve podatke koji su potrebni za provjeru prezentiranih termograma i analiza (uvjeti mjerenja, podaci o mjerenoj opremi, podaci o mjeritelju, podaci o objektu mjerenja itd.).

U situacijama termografskog mjerenja na otvorenom, a uz postojanje vjetra brzina većih od 1 m/s, potrebno je znati brzinu vjetra radi određivanja faktora korekcije izmjerenih vrijednosti temperatura objekta mjerenja [9]. Stoga bi se termografist pri mjerenjima na otvorenom morao koristiti anemometrom i registrirati brzine vjetra na visinama mjerenja. Kod kvantitativne je termografije obvezatna mjerna oprema, a osim termografskog uređaja nužni su i uređaji za mjerenje temperature i relativne vlažnosti zraka, brzine vjetra (za mjerenja na otvorenom), udaljenosti objekta mjerenja, kuta mjerenja i dr. Mjerni uređaji moraju biti određene točnosti mjerenja.

5 Primjeri primjene ICT mjerenja u građevinarstvu

S primjenom ICT-a u građevinarstvu započelo se već od druge polovice 60-ih godina, no od druge polovice 90-ih, prošlog stoljeća znatno se povećala primjena termografija.

Uspješna primjena ICT-a uvelike ovisi o poznavanju toplinskih značajki, u prvome redu koeficijentata emisije i materijala koji se rabe u građevinarstvu. Na tome polju postoji veći broj radova, ali i dalje se intenzivno provode ispitivanja [12-14].

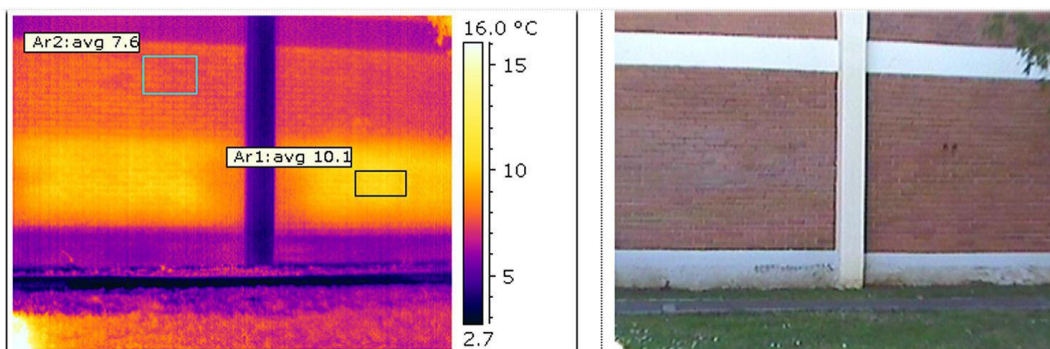
Smanjenje gubitaka toplinske energije u zgradarstvu postaje jedan od prioritetnih projekata država EU, [15], a ICT se već dokazao kao uspješna metoda u otkrivanju i kvantificiranju tih gubitaka i za stare i za novosagrađene građevine [16-20]. Kvantifikacija gubitaka topline u zgradarstvu moguća je ako je poznata raspodjela temperature po površini vanjskog zida uz istodobno poznavanje temperature s unutarnje strane zida [21]. Iz termograma građevinske konstrukcije također se mogu otkriti različite anomalije u termičkim svojstvima građevinskih konstrukcija upotrijebljenih za gradnju vanjskih zidova, jer takve anomalije rezultiraju promjenama raspodjele temperature po površini strukture. Temperatura vanjske površine ovisi i o istjecanju zraka unutar i/ili kroz vanjske zidove. Podaci o raspodjeli temperature po površini zida mogu se upotrijebiti za detektiranje najrazličitijih

5. raslojavanje materijala pročelja
6. „sindromi bolesne zgrade“, rast gljivica i druge sa zdravljem povezane pojave
7. oštećenja krovova.

Problemi se često, kao i njihovi uzroci i posljedice, jednostavno ne mogu vidjeti dok ne nastanu ozbiljne štete. Tada je jedino rješenje skupa rekonstrukcija. Velika je vrijednost ICT-a što omogućava da se vide oku nevidljivi toplinski pokazatelji povezani s mnogim od navedenih problema u zgradama. Kada se ispravno rabi termografija omogućava vlasnicima zgrada, arhitektima, korisnicima i inspektorima (nadzornicima) da lociraju probleme, provjere značajke zgrade i potvrde rješenja.

1) Gubitak topline, provjera izolacije

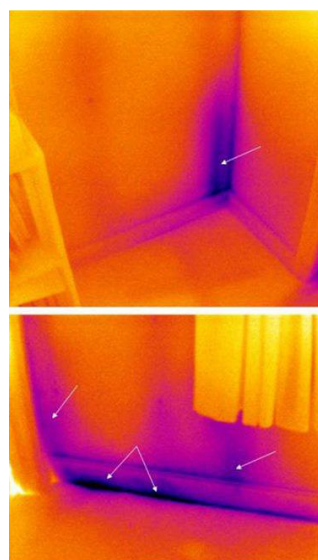
Nepostojanje, oštećenja i loše izvedena izolacija uzrokuju gubitke toplinske energije i jasno će biti prikazani na termogramu kada postoji barem 10 °C razlike između unutrašnje i vanjske temperature zraka, ali moguće je raditi i s manjom temperaturnom razlikom.



Slika 7. Gubitak topline iz zgrade (svijetla površina) radi nezadovoljavajuće izolacije zida i hladan toplinski most (tamna vertikala) [22]

termičkih neregularnosti, poput toplinskih mostova, defekata u izolaciji, vlage u zidu, istjecanja zraka iz zgrade. Zgrade mogu imati probleme uzrokovane neadekvatnim projektom, konstrukcijom i održavanjem koje je teško dijagnosticirati i riješiti. Glavni problemi koji se pojavljuju u zgradarstvu, a u rješavanju kojih se rabi ICT, jesu:

1. pretjerana uporaba energije zbog nedostatka ili oštećenja izolacija, izolacija koja je izvedena neadekvatno i pretjeranog istjecanja zraka iz zgrade
2. oštećenja od vlaženja zbog prodora ili kondenzacije vodene pare, posebno zidova i krovova
3. raspodjela grijaćih tijela koja nije optimalna i nezadovoljavajuće značajke sustava grijanja – hlađenja – ventilacije
4. nedovoljna potvrda valjanosti detalja konstrukcije ili strukturnih karakteristika



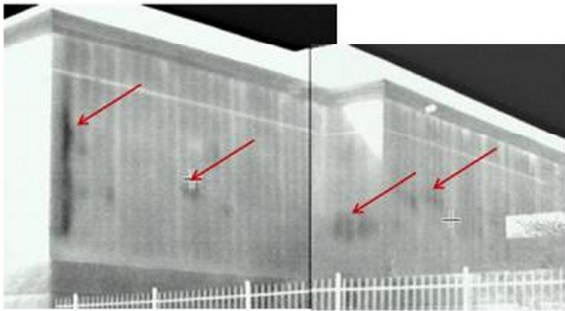
Slika 8. Mnogi tipovi izolacije omogućuju prodiranje zraka. Izolacija od staklene vune „u prikazanom slučaju, ne zaustavlja prodiranje zraka kroz dio zida u stanu

Štete nastale zbog izolacije slabih toplinskih izolacijskih karakteristika su velike i to: u prekomjernoj potrošnji energije, u trošku uzrokovanom smrznutim cijevima za vodu ili sustavu protupožarnih sprinklera – zdravstvenim problemima povezanim s rastom plijesni

u hladnim točkama [23] - oštećenju krovova i interijera uzrokovanih štetom od leda, kondenzacije i prodorima vode.

2) Vlaga, kondenzacija

Pozicioniranje vlage s termografijom [24,25] često je jednostavno jer voda ima i veliku toplinsku vodljivost i veliki toplinski kapacitet, ali određivanje uzroka nastan-



Slika 9. Vlaga u vanjskome zidu

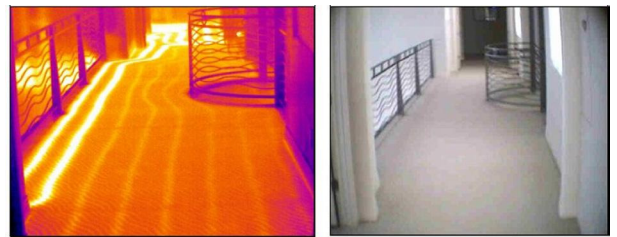
ka vlage može biti teško. Kondenzacija vodene pare često je uzročnik prije nego prodiranje (curenje) vode, pa je važno da se identificiraju mjesta istjecanja zraka. Zrakom se može donijeti vodena para unutar sekcija zida, a hladna mjesta tada uzorkuju kondenzaciju. Porast popularnosti uporabe sustava završne vanjske izolacije (EIFS) ima za posljedicu porast slučajeva oštećenja strukture zbog vlage. Termografija je dragocjeni alat za lociranje vlage u EIFS sustavima.

3) Provjera sustava grijanja – hlađenja - ventilacije (GHV)

Sustav GHV može imati projektne ili instalacijske nedostatke koji rezultiraju u pretjeranoj uporabi energije i/ili neudobnosti zgrade. ICT pomaže specijalistima [26, 27] da vizualiziraju inače nevidljive učinke tih slabih karakteristika koji se iskazuju kao pretjerano topla ili hladna područja.



Slika 10. ICT provjera rada sustava GHV



Slika 11. ICT provjera podnog grijanja

4) Potvrđivanje konstrukcijskih detalja

Verifikacija konstrukcijskih detalja i značajki građevina, osobito komercijalnih zgrada, veoma je značajna. Termografija se primjenjuje s velikim uspjehom u provjeri povezanosti greda i položaja pojačanja betonskih zidanih elemenata. Inspekcija se može obaviti u bilo koje vrijeme kada imamo uvjete prolaza topline – uobičajeno rano navečer kada temperatura pada. Potvrđivanje postojanja izolacije u zidanim elementima zidova također je postalo vrlo važno zbog visoke cijene energije i zdravlja korisnika prostora vezanog za rast gljivica u hladnim šupljinama zida.

5) Raslojavanje pročelja

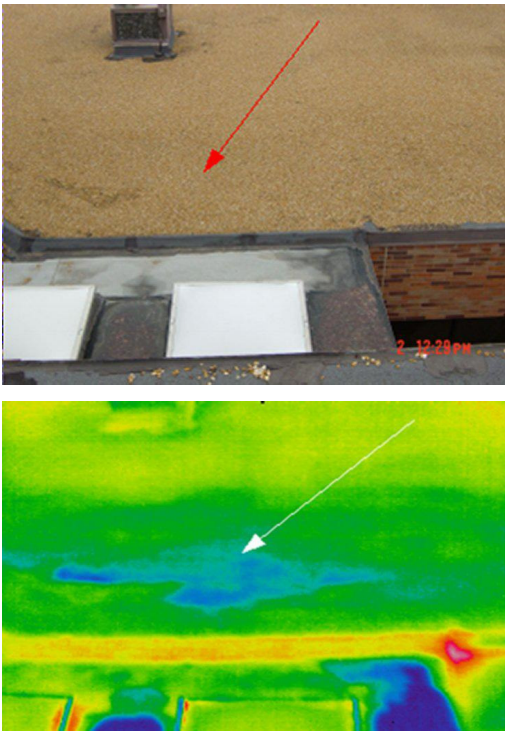
Oštećenja pročelja mogu rezultirati ozbiljnim povredama osoba. Zidane pročeljne pločice zgrada sklone su bržim promjenama temperature kada raslojavanje započne (radi sloja zraka), u usporedbi s dijelom gdje su fiksirane. ICT se može primijeniti za nalaženje mjesta raslojavanja, tj. odvajanja ploča od pročelja [28].

6) Sindrom bolesne zgrade

Kada su zgrade suviše nepropusne ili vlažne, u prvi plan dolazi problem vezan za zdravlje. Problemi koji dolaze od neodgovarajućih značajki sustava GHV, prodora vlage u zidove, rasta gljivica na hladnim, vlažnim površinama i neodgovarajućim izmjenama zraka, grupiraju se zajedno kao „sindrom bolesne zgrade“. Mnogi se od tih problema mogu vizualizirati ICT-om. Dijagnoza tih problema često je složen proces.

7) Vlaga na ravnom krovu

ICT inspekcija ravnih krovova provodi se već godinama. Tehnika omogućuje otkrivanje zaustavljene vlage u krovu, što je važno jer s vremenom ta vlaga vodi do preuranog propadanja krova.

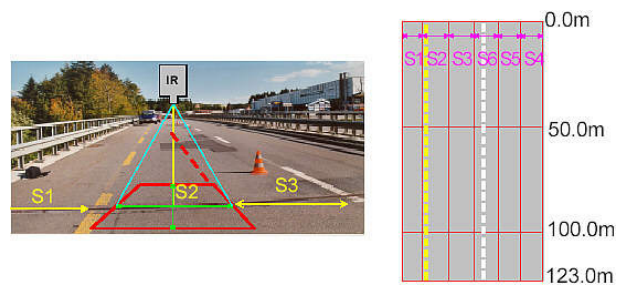


Slika 12. Nalaženje vlage na ravnom krovu s pomoću ICT-a

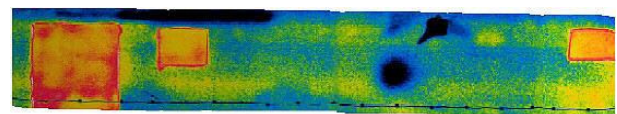
Proces propadanja armiranobetonskih konstrukcija zbog korozije čelika u armiranobetonskim konstrukcijama je problem koji se pojavljuje na mnogim građevinama. ICT je jedna od metoda nalaženja korodiranog čelika u objektu, [29], [30], a aktivna se termografija u prvome redu rabi u mostogradnji. Održavanje mostova, i to prije svega sigurnosti radi, veoma je važno. Taj je problem napose istaknut u SAD-u zbog velikog broja mostova sagrađenih prije 50 i više godina, i to za znatno manju gustoću prometa od postojeće. U postupku nalaženja oštećenja (mjesto i veličine) rabi se sve više metoda ICT, pasivna i aktivna, u jednom ili dva spektralna područja [31], [32].



Slika 13. ICT sustav za otkrivanje skrivenih oštećenja cesta i kolnika mostova (brzina kretanja 40 km/h) [33]



Slika 14. Shematski prikaz nalaženja oštećenja kolnika mosta [33]



Slika 15. Termogram dijela kolnika označen sa S3 [33]

6 Zaključak

ICT je mjerna nerazorna dijagnostička metoda koja se sve uspješnije primjenjuje u mnogim područjima, a povećana primjena u građevinarstvu datira od 90-ih godina 20-og stoljeća. Uspostavom relevantnih norma, sustavnim izobražavanjem osoba koje se koriste ICT-om, odnosno certificiranjem termografista i suvremenom termografskom opremom, stvoreni su uvjeti učinkovite primjene ICT-a u laboratoriju i na terenu.

Primjenom ICT-a u građevinarstvu mogu se ostvariti znatne uštede te povećati sigurnost građevine. Potom, da bi se u Hrvatskoj ostvarila planirana ušteda energije racionalnom potrošnjom energije u zgradarstvu, u postupku je primjena Direktive 2002/91/EU (EPBD, *Energy Performance Building Directive*) [15]. Jedan od važnijih čimbenika primjene EPBD-a, odnosno ostvarenja stvarnih ušteda energije u zgradarstvu, energijske su iskaznice zgrada koje moraju izdavati nezavisni, odnosno nepristrani stručnjaci. Sugerira se uporaba ICT-a kao objektivne i brze metode utvrđivanja gubitaka topline u zgradarstvu i za novosagrađene građevine i građevine koje treba rekonstruirati, odnosno za sve građevine za

koje se izdaje energijska iskaznica. Smanjenjem potrošnje energije u zgradarstvu omogućit će se izvršavanje

obveza Hrvatske koje slijede iz Kyotskoga protokola u svezi sa smanjenjem emisije stakleničkih plinova.

LITERATURA

- [1] EN 13187:1998: *Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method*
- [2] SAVE Projects; http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/save_en.htm
- [3] Vuk B., Marušić D.: *ENERGIJA u Hrvatskoj: godišnji energetski pregled: 1996. - 2000.*, Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske, Zagreb, 2001.
- [4] Seffrin R.J., editor: *Guideline for measuring distance/target size values for quantitative thermal imaging cameras (2004); Guideline for measuring and compensating for reflected temperature, emittance & transmittance (2004); Guideline for infrared inspection of building envelopes & insulated roofs (2004)*, Infraspection Institute, Burlington, NJ, 2004.
- [5] CFP Europe, European Guideline: *Certification of thermographers*, 2003.
- [6] Bertman B.: *The ABC's of Infrared*, Howard W. Sams & Co. Inc., 1970.
- [7] Rohsenow W. M. and Hartnett J. P.: *Handbook of Heat Transfer*, McGraw - Hill, 1973.
- [8] Hudson R.D.: *Infrared System Engineering*, John Wiley and Sons. New York, 1969.
- [9] FLIR Systems: *ThermaCAMTM P65 User's manual*, 2005.
- [10] Makdague X.: *Infrared Technology for Nondestructive Testing*, ISBN 0-471-18190-0, 2001.
- [11] Šijanec Zavrl M.: *Energijske oznake in druga potrdila o energetski učinkovitosti*, ZRMK institut, http://gcs.gizrmk.si/gcs/Clanek_Januar.pdf
- [12] Moropoulou A.; Avdelidis N. P.: *Emissivity measurements on historic building materials using dual-wavelength infrared thermography*, Proc. SPIE, Thermosense XXIII, 4360 (2001) 224-228
- [13] Avdelidis N.P., Moropoulou A.: *Emissivity considerations in building thermography*, Energy and Buildings 35 (2003) 663-667
- [14] Guerrero I. C., Ocana S. M., Requena I. G.: *Thermal-physical aspects of materials used for the construction of rural buildings in Soria (Spain)*, Construction and Building Materials 19 (2005) 197-211
- [15] DIRECTIVE 2002/91/EU; http://www2.env.uea.ac.uk/gmmc/energy/energy_pdfs/EU_buildings_directive.pdf
- [16] Snell J. and Spring R.: *Nondestructive Testing of Building Envelope Systems Using Infrared Thermography*, Snell Infrared, Montpelier, Vermont, InfraMation 2002.
- [17] Datcu S., Iboş L., Candau Y., Matter S.: *Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography*, Infrared Physics & Technology 46 (2005) 451-467
- [18] Meola C.: *Infrared thermography of masonry structures "Infrared Physics & Technology*, 49, Issue, (2007) 3, 228-233
- [19] Heinrich H., Dahlem K.H.: *Thermography of low energy buildings*, Quantitative InfraRed Thermography, 2000-001 (http://www.uni-kl.de/Bauphysik/fileadmin/bauphysik/docs/mitarbeiter/dahlem/abstract/Qirt_2000.pdf)
- [20] Brüggemann H.: *The German approach to thermal insulation of dwellings and checking with thermography* (http://www.npl.co.uk/tman/meetings/23_feb_05/downloads/bruggemann_raytek.pdf)
- [21] Hrs Borković Ž., Suša M.: *Primjena IC termografije u zgradarstvu*, http://www.huict.hr/images/pictures/impl_doc_1_14.pdf
- [22] Mužević M., Pašagić V.: *ICT ispitivanje i analiza školskih zgrada (Topusko, Gvozđ)*, Izvješće Brodarskog instituta, 2007.
- [23] McMullan P.C.: *Infrared technology for preservation*, InfraMation 2003
- [24] Rosina E., Ludwig N.: *Optimal thermographic procedures for moisture analysis in building materials*, Proc. SPIE, 3827 (1999.) 22-33
- [25] Ludwig N., Redaelli V., Rosina E., Augelli F.: *Moisture detection in wood and plaster by IR thermography*, Infrared Physics & Technology 46 (2004) 161-166
- [26] Amhaus E.G., Fronapfel E.L.: *Infrared Applications for Post Construction Radiant Heating Systems*, InfraMation 2004 Proceedings
- [27] Gonzalez D.A., Madruga F.J., Quintela M.A., Lopez-Higuera J.M.: *Defect assessment on radiant heaters using infrared thermography*, NDT&E International 38 (2005) 428-432
- [28] Li Z., Yao W., Lee S., Lee C. and Yang Z.: *Application of Infrared Thermography Technique in Building Finish Evaluation*, Journal of Nondestructive Evaluation, 19 (2000) 1, 11-19
- [29] Sekulić D., Bjegović D., Mikulić D.: *Monitoring armaturnog čelika u betonu*, Građevinar 52 (2000) 10, 577-586
- [30] Del Grande N. K. and Durbin P. F.: *Dual-Band Infrared Imaging to Detect Corrosion Damage within Airframes and Concrete Structures*, Thermosense XVI: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications, Proceedings of SPIE (1994) 2245, 202-209
- [31] Hing C. L., Halabe U. B., Klinkhachorn P., Gangarao Hota V. S.: *Infrared Thermography Testing of FRP Bridge Decks*, REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION. AIP Conference Proceedings, 894 (2007) 1600-1607.
- [32] Khan M.S., Washer G.A., Chase S. B.: *Evaluation of dual-band infrared thermography system for bridge deck delamination surveys*, Proc. SPIE, 3400 (1998) 224-235
- [33] Stimolo M.: *Passive Infrared Thermography as Inspection and Observation Tool in Bridge and Road Construction*, International Symposium (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003