

UPORABA PULZNE TERMOGRAFIJE ZA NEPORUŠNE PREISKAVE V GRADBENIŠTVU

APPLICATION OF PULSED THERMOGRAPHY IN NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING

Patricia Cotič, univ. dipl. inž. grad.

patricia.cotic@imfm.si

Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

Primož Murn, univ. dipl. inž. grad.

primoz.murn@zarja.si

ZARJA, stanovanjsko podjetje, d. o. o., Prešernov trg 5, 8000 Novo mesto

doc. dr. Dejan Kolarič, univ. dipl. mat.

dejan.kolaric@fgg.uni-lj.si

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

izr. prof. dr. Zvonko Jagličič, dipl. inž. fiz.

zvonko.jaglicic@fgg.uni-lj.si

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana,
in Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov, dipl. inž. grad.

vlatko.bosiljkov@fgg.uni-lj.si

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 543.067.3:772.96

Povzetek | V gradbeništvu je uporaba termografije za neporušne preiskave razmeroma slabo poznana, prav tako tudi načini obdelave termografskih podatkov za karakterizacijo napak in vključkov v gradbenih konstrukcijskih elementih. Direktni prenos tehnik obdelave podatkov s strojništva ni mogoč, saj se materialne lastnosti preizkušancev kot tudi pogoji merjenja na obeh področjih bistveno razlikujejo. V delu predstavimo uporabo temperaturnega kontrasta in pulzno-fazne termografije za preiskave laboratorijskih betonskih preizkušancev s pulzno termografijo. Temperaturni kontrast je dovolj občutljiv za zaznavanje najpogostejših napak in vključkov v betonskih konstrukcijskih elementih, ne moremo pa z njim kvantitativno oceniti globine anomalij. Slednje omogoča pulzno-fazna termografija s faznimi slikami, ki se izkaže kot odlično orodje za obdelavo termografskih podatkov v primerih, ko zahtevamo veliko prostorsko ločljivost in velik kontrast slike.

Ključne besede: termografija, neporušne preiskave, gradbeništvo, karakterizacija napak, temperaturni kontrast, pulzno-fazna termografija

Summary | Although thermography is a powerful method for non-destructive testing in mechanical engineering, it is much less developed for application in civil engineering. Particularly, there is a lack of data processing techniques used for the characterization of defects and inclusions in building structures. The direct transfer of techniques from mechanical to civil engineering is not possible due to different material properties and experimental conditions. The application of thermal contrast and pulsed phase thermography on results obtained by thermographic inspection of laboratory concrete specimens using pulsed thermography was studied. The results show that the thermal contrast is efficient enough for the detection of the most common defects and inclusions in building

structures. However, it fails for the quantitative determination of defect depth. The latter is fulfilled by using pulsed phase thermography and phase images. In general, pulsed phase thermography proves to be a powerful method for the analysis of thermal data where both high geometrical resolution and high contrast of images are required.

Keywords: thermography, non-destructive testing, civil engineering, defect characterization, thermal contrast, pulsed phase thermography.

1 • UVOD

Slikanje z infrardečo kamero (*termokamera*) ali na kratko *termografija* nam da podatke o površinski temperaturi telesa. Pri uporabi termokamere v gradbeništvu po navadi najprej pomislimo na slikanje objektov pri iskanju toplotnih mostov. Vendar pa lahko termokamera uporabimo tudi za neporušne preiskave, kjer nam izmerjena temperaturna slika površine merjenca in njena časovna odvisnost odkrije, kaj se skriva pod površino. V primerjavi z drugimi neporušnimi metodami, kot so na primer ultrazvok, radar ali meritev električne upornosti, imajo termografske preiskave nekaj prednosti: metoda je hitrejša od drugih naštetih, relativno poceni in med merjencem in kamero ni potreben fizični stik. Zaradi tega ni potrebna površinska obdelava merjenca pred meritvijo in preiskujemo lahko tudi površine, kjer je fizični stik težko zagotoviti.

V strojništvu uporabljajo termografijo na primer za detekcijo korozije (Grinzatoa, 2007), mehanskih poškodb, napetosti v materialu in za kontrolo zvarov ((Bagavathiappan, 2013), (Maldague, 2001)). Uporaba termokamere za neporušne preiskave v gradbeništvu še ni tako pogosta kot v strojništvu. Glavna razlika

med preiskovanimi materiali v gradbeništvu in strojništvu je, da imajo gradbeni materiali običajno veliko manjšo toplotno prevodnost in zato daljše relaksacijske čase, ki določajo časovno skalo spreminjanja temperature. Poleg tega imajo preizkušanci v gradbeništvu bolj nehomogeno notranjo strukturo in so veliko večjih dimenzij, kakor je to običajno v strojništvu. Zaradi tega lahko nastopijo težave pri zagotavljanju enakomernega gretja preizkušancev.

Raziskav s področja neporušnega preizkušanja materialov v gradbeništvu je precej manj kakor na sorodnih področjih. Vodilni pri tem je inštitut BAM (Federal Institute for Materials Research and Testing) iz Berlina, od koder so poročali o zaznavanju votlin v laboratorijskih betonskih preizkušancih (Maierhofer, 2002) in raziskavah površine zidanih stavb, ki spadajo med kulturno dediščino (Maierhofer, 2009). Predvsem na slednjih so termografijo že uporabili za vizualizacijo podometne teksture, zaznavanje površinskih razpok, vlažnosti zidovja, odstopanja posameznih plasti ((Arndt, 2004), (Avdelidis, 2004), (Binda, 2009), (Maierhofer, 2009)) kot tudi za preiskovanje mozaikov

((Avdelidis, 2007), (Theodorakeas, 2012)). Na UL FGG smo termografijo uspešno uporabili v kombinaciji z drugimi neporušnimi, delno porušnimi in porušnimi preiskavami zidanih stavb ((Bosiljkov, 2010a), (Bosiljkov, 2010b)). V nedavni raziskavi smo metodo uporabili za zaznavanje odstopanja ometa laboratorijskih večslojnih kamnitih zidov med strižno obtežbo kot tudi za zaznavanje podometnih razpok (Cotič, 2013).

Kljub naštetim primerom uporabe termografije v gradbeni praksi so načini karakterizacije zaznanih napak in vključkov v preiskovanih objektih slabo raziskani. Glede na to, da je pri karakterizaciji anomalij pri neporušnih preiskavah v gradbeništvu najpomembnejša določitev njihovih globin v preizkušancu, nas je zanimala možnost kvalitativne in kvantitativne ocene globine anomalije na podlagi termografskih preiskav laboratorijskih betonskih preizkušancev. Poleg raziskav globinske odvisnosti smo analizirali še vpliv najbolj tipičnih napak in vključkov v gradbenih konstrukcijskih elementih (lokalizirana voda, zračne votline, delaminacija, armatura, instalacijske cevi) na uspešnost preiskav. Omeniti velja, da smo raje izbrali betonske preizkušance kot zidane, saj betonski preizkušanci zaradi večje homogenosti omogočajo lažjo interpretacijo različnih vplivov na rezultate.

2 • TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Sevanje

Energijo, ki jo črno telo s temperaturo T seva kot elektromagnetno valovanje v prostor, opisuje Planckov zakon (Strnad, 1978):

$$\frac{dj_{\epsilon i}}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (1)$$

pri čemer je kvocient $dj_{\epsilon i}/d\lambda$ delež izsevane gostote energijskega toka $j_{\epsilon i}(\lambda)$ na intervalu valovnih dolžin med λ in $\lambda + d\lambda$. S h smo v Planckovem zakonu označili Planckovo kon-

stanto ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js), s $c = 3 \cdot 10^8$ m/s svetlobno hitrost in $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannovo konstanto. Spekter sevanja $dj_{\epsilon i}/d\lambda$, ki ga opisuje Planckov zakon, smo na sliki 1 narisali za nekaj različnih temperatur telesa. Opazimo, da se valovna dolžina λ_{\max} pri kateri telo seva največ energije, z nižanjem temperature telesa premika k večjim valovnim dolžinam. Medtem ko je pri Soncu, ki seva približno kakor črno telo s temperaturo 5777 K, maksimum v vidnem delu spektra pri valovni dolžini okoli 0,5 μm , telesa pri temperaturi 300 K sevajo najmočnejše pri

valovnih dolžinah okoli 10 μm . Odvisnost valovne dolžine λ_{\max} od temperature telesa izračunamo iz Planckovega zakona pri pogoju, ko spekter $dj_{\epsilon i}/d\lambda$ doseže maksimum (Strnad, 1978). Rezultat

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

imenujemo Wienov zakon. Za telo, ki ni črno – s tem mislimo, da ne seva, kakor to opisuje Planckov zakon –, je izsevani energijski tok manjši:

$$j = \epsilon j_{\epsilon i}, \quad (3)$$

pri čemer je koeficient ϵ emisivnost telesa in znaša za večino realnih sevalcev med 0,1

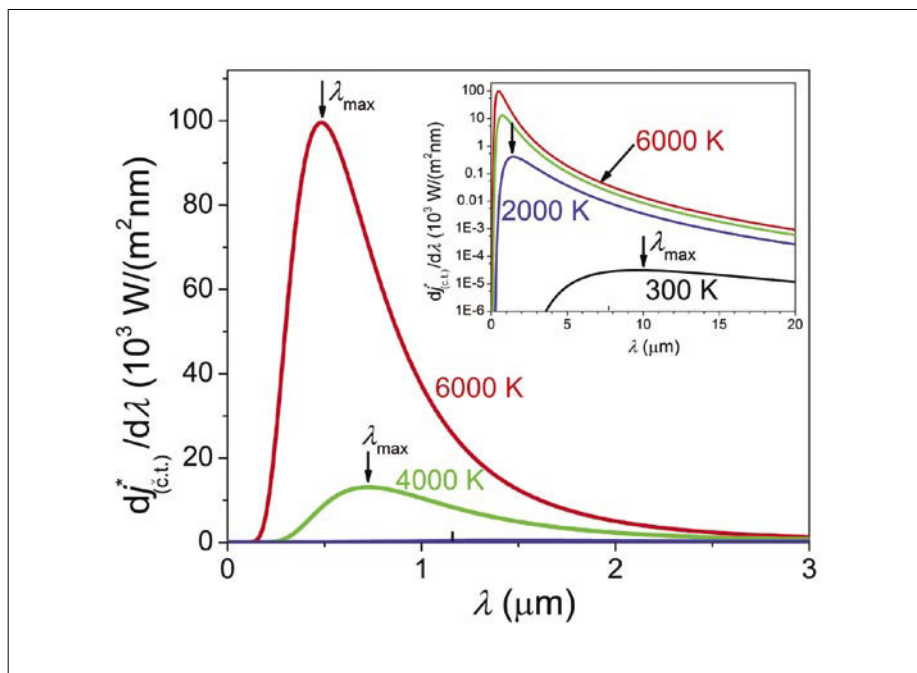
in 0,95. Za gradbene materiale, kot so npr. beton, malta in opeka, je emisivnost ε med 0,9 in 0,95 (Maldague, 2001).

Lastno sevanje, ki ga opisuje Planckov zakon, ni edini vir energije, ki prihaja od telesa v termokamero. S površine telesa, ki ga opazujemo s termokamero, se delno odbija sevanje, ki ga povzročata okolica. Količina odbitega sevanja je odvisna od absorptivnosti površine telesa in je najmanjša za črno telo, ki popolnoma absorbira vpadno sevanje. Ker odbito sevanje ni odvisno od temperature telesa, ki ga s termokamero opazujemo, je to nezaželen prispevek. Absorptivnost telesa je enaka njegovi emisivnosti ε in je torej za gradbene materiale relativno velika. Zato prispeva pri preiskavah v gradbeništvu odbito sevanje običajno manj od 10 % energijskega toka, ki prihaja s površine telesa v termokamero (Pašagič, 2008). Seveda pa moramo paziti, da površine, ki jih snemamo, niso neposredno osvetljene s sončno svetlobo, saj takrat energija odbitega sevanja znatno presega lastno sevanje.

2.2 Delovanje termokamere

Infrardečo svetlobo je leta 1800 odkril William Herschel, ko je po prehodu sončne svetlobe skozi stekleno prizmo opazoval naraščanje temperature živosrebrnega termometra v odvisnosti od njegove lege v spektru razklonjene svetlobe, kakor je prikazano na sliki 2 (Maldague, 2001). Presenečen je odkril, da je tudi v nevidnem delu spektra, pri valovnih dolžinah, daljših od valovne dolžine rdeče svetlobe, temperatura termometra povišana. Ta del elektromagnetnega spektra je poimenoval »nevidni žarki« ali »žarki, ki povzročajo toploto«. Danes jim pravimo infrardeča svetloba (IR-svetloba) in ji pripišemo valovne dolžine od okoli 0,8 μm (NIR, ang. Near-infrared) do približno 300 μm , kjer se približno začne mikrovalovni del spektra elektromagnetnega valovanja (Maldague, 2001). John Herschel, sin Williama Herschela, je posnel prvo sliko z IR-svetlobo. IR-del sončevega spektra je po prehodu skozi optično prizmo usmeril na filterski papir, navlažen z alkoholom. Tam, kjer je na papir prišlo največ IR-svetlobe, je alkohol najbolj izhlapeval (McDaniel, 1962). Tako je dobil prvi *termogram* (angl. thermogram) – sliko, ki jo naredi IR-svetloba.

Kot detektorje IR-svetlobe danes največ uporabljamo tako imenovane bolometre – polprevodnike, ki se jim zaradi segrevanja z IR-svetlobo spreminja električna upornost. Poleg bolometra in ustreznih leč, ki naredijo sliko predmeta na detektorju, je pomemben del



Slika 1 • Sevanje črnega telesa pri različnih temperaturah telesa, kot ga opisuje Planckov zakon. Z navpičnimi puščicami smo označili valovno dolžino, pri kateri telo z izbrano temperaturo seva največ energije. Skala na ordinatni osi vložene slike je logaritemska. Izsevana gostota energijskega toka telesa s temperaturo 300 K je tudi pri valovnih dolžinah okoli 10 μm veliko manjša od gostote energijskega toka telesa s temperaturo nekaj tisoč Kelvinov

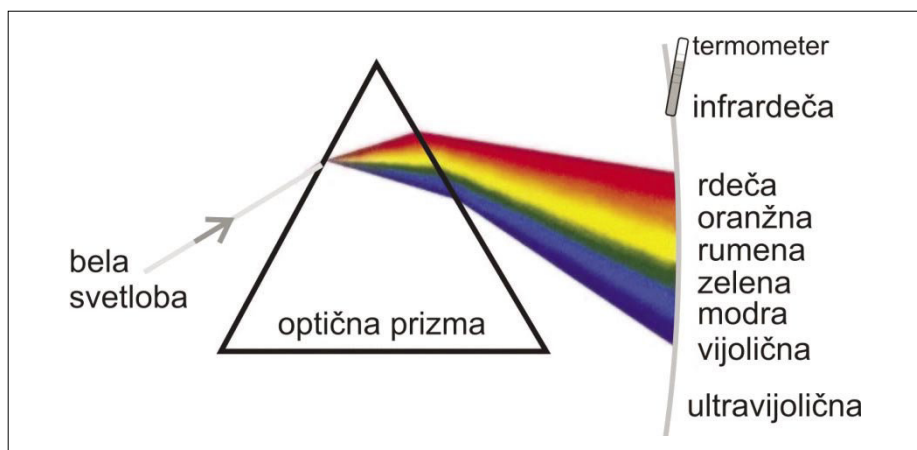
termokamere tudi tako imenovani IR-filter. Ta prepreči pot vidni svetlobi do detektorja, saj bi vidna svetloba detektor hitro preobremenila. Za IR-filter velikokrat služijo že leče same. Polprevodnika germanij in silicij, ki ju običajno uporabljamo za izdelavo leč v termokamerah, slabo prepuščata vidno svetlobo (Hall, 1954). Po drugi strani lahko z ustreznimi antirefleksnimi plastmi na lečah dosežemo, da prepuščajo skoraj 100 % IR-svetlobe.

Najprej so termokamere uporabljali izključno v vojaške namene. Okrog leta 1960 pa so po-

stale prosto dostopne tudi za civilno uporabo. V primeru neporušnih preiskav smemo reči, da termokamero uporabljamo kot natančen brezkontaktni termometer, s katerim merimo porazdelitev temperature po površini merjenca v odvisnosti od časa.

2.3 Merske tehnike

Iz izmerjene časovne odvisnosti površinske temperature in poznavanja procesov prenosa toplote v snovi lahko sklepamo o notranji strukturi preizkušanca. Pri pasivni termogra-



Slika 2 • Herschelov poskus (okoli leta 1800). Termometer je pokazal povišano temperaturo tudi v očem nevidnem delu spektra

fiji opazujemo objekte v kvazistacionarnem stanju. Sem sodi na primer slikanje stavb pozimi za določanje toplotnih mostov ali slikanje delujočih naprav za iskanje mest, kjer se pregrevajo. Pri neporušnih preiskavah je pomembnejša tako imenovana *aktivna* termografija (Maldague, 2001). Pri aktivni termografiji objekt, ki ga preiskujemo, grejemo z grelniki in opazujemo, kako se površinska temperatura spreminja s časom. Če je na primer tik pod površino preizkušanca kovina, ki odlično prevaja toploto, se bo tam po izključitvi gretja temperatura hitreje zmanjševala kot na mestu, kjer je pod površino toplotnoizolacijski material. Po načinu ogrevanja in zajemanja podatkov ločimo tri vrste aktivne termografije (Maldague, 2001)¹:

a) *pulzna termografija* (angl. pulsed thermography) – po kratkem gretju (milisekunde do sekunde za kovine, nekaj minut za gradbene materiale) opazujemo ohlajanje površine (nekaj sekund za kovine, približno eno uro za gradbene materiale).²

b) *termografija z odzivom na periodično motnjo* (angl. lock-in thermography) – temelji na zaznavanju termičnih valov, ki nastanejo znotraj preizkušanca, ko ga stimuliramo s periodičnim gretjem. Opazujemo časovno odvisnost med vzbujevalnim signalom in površinsko temperaturo.

c) *termografija s stopničastim pulzom* (angl. step heating) – temperaturo površine preizkušanca opazujemo med gretjem.

V članku predstavljamo uporabo pulzne termografije, ki je v gradbeništvu najbolj pogosta. Termografijo z odzivom na periodično motnjo so doslej uporabili za zaznavanje in oceno vlažnosti površin gradbenih materialov (Wild, 1998). Nedavna raziskava poroča tudi o izkoriščanju periodičnega sončnega sevanja za zaznavanje napak na ovoju stavb (Bortolin, 2013). V splošnem pa ima pulzna termografija bistvene prednosti pred termografijo z odzivom na periodično motnjo. Slednja namreč potrebuje večje število meritev pri različnih frekvencah, da lahko zaznamo napake na več globinah (Larbi, 2009).

2.4 Karakterizacija anomalij

V nasprotju z radarjem in ultrazvokom, kjer je čas preleta odbitega signala sorazmeren globini anomalije v preizkušancu, termografski podatki neposredno ne pokažejo globine

anomalij. Raziskovalci s področja uporabe termografije v strojništvu so predlagali dva glavna pristopa k obdelavi podatkov. Prvi pristop temelji na *temperaturnem kontrastu* (angl. thermal contrast), drugi, tako imenovan *pulzno-fazna termografija* (angl. pulsed phase thermography), pa na obdelavi podatkov v frekvenčni domeni. Poudariti velja, da sta bila oba pristopa razvita za uporabo v strojništvu, na materialih, kjer so časi segrevanja kratki. Glavni namen tega članka je zato pokazati prednosti in slabosti obeh pristopov pri uporabi termografije v gradbeništvu. Medtem ko temperaturni kontrast uporabimo pri širši karakterizaciji anomalij, pulzno-fazno termografijo uvedemo le za kvantitativno določanje globine anomalij.

Temperaturni kontrast

Temperaturni kontrast $C(t)$ za posamezno točko na površini merjenca definiramo kot (Maldague, 2001)

$$C(t) = \Delta T = T_{def}(t) - T_{ref}(t), \quad (4)$$

kjer T_{def} označuje časovno odvisno temperaturo površine nad anomalijo, T_{ref} pa nad homogenim (referenčnim) območjem. Čas zaznavanja določene anomalije opredelimo z nastopom maksimalnega temperaturnega kontrasta C_{max} tj. s časom $t_{C_{max}}$.

Empiričen izraz za odvisnost med globino anomalije z , C_{max} in časom $t_{C_{max}}$ predlaga Balageas s sod. na podlagi preiskav ogljikovih kompozitov (Balageas, 1987),

$$z = A \sqrt{t_{C_{max}}} (C_{max})^n \cdot \text{mK}^{-n} \text{s}^{-1/2}, \quad (5)$$

kjer sta A in n brezdimenzijska prosta parametra. Zgornjo enačbo lahko preoblikujemo v linearno zvezo

$$\log \left(\frac{z}{\sqrt{t_{C_{max}}}} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{1/2} \right) = B + n \log(C_{max} \text{K}^{-1}), \quad (6)$$

ki jo bomo poskušali uporabiti (poglavje 4.1) tudi za analizo rezultatov meritev betonskih preizkušancev.

Pulzno-fazna termografija in fazni kontrast

Pri pulzno-fazni termografiji najprej izračunamo Fourierjevo transformacijo časovne odvisnosti temperature $T(t)$ za posamezno točko na površini merjenca. Dobimo odvisnost amplitude in faze signala od frekvence. Dvodimenzionalno sliko odvisnosti faze signala pri določeni frekvenci imenujemo *fazna slika*. Fazne slike nam omogočajo zaznavanje globljih anomalij, so manj odvisne od nehomogenega gretja površine preizkušanca ter so občutljive za izbrano frekvenčno okno. To pomeni, da lahko s faznimi slikami opazujemo določen pas na globini. Natančnejša razlaga metode je podana npr. v (Maldague, 2001).

Na podlagi termografskih raziskav tankih kovinskih plošč in plošč iz pleksistekla je za kvantitativno določanje globine anomalij iz faznih slik Ibarra-Castaneda predlagal pristop, ki temelji na faznem kontrastu (Castaneda, 2004). Fazni kontrast definiramo podobno kot temperaturni kontrast, in sicer

$$\Delta\phi = \phi_{def}(f) - \phi_{ref}(f), \quad (7)$$

kjer Φ_{def} označuje frekvenčno odvisno fazo za območje nad anomalijo, Φ_{ref} pa nad homogenim (referenčnim) območjem. Arndt je predlagani model prilagodil za preiskave gradbenih konstrukcij z (Arndt, 2006)

$$z = k_c \sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}, \quad (8)$$

kjer je α termična difuzivnost snovi, k_c brezdimenzijski prosti parameter, f_{ch} pa frekvenca pri maksimalnem faznem kontrastu.

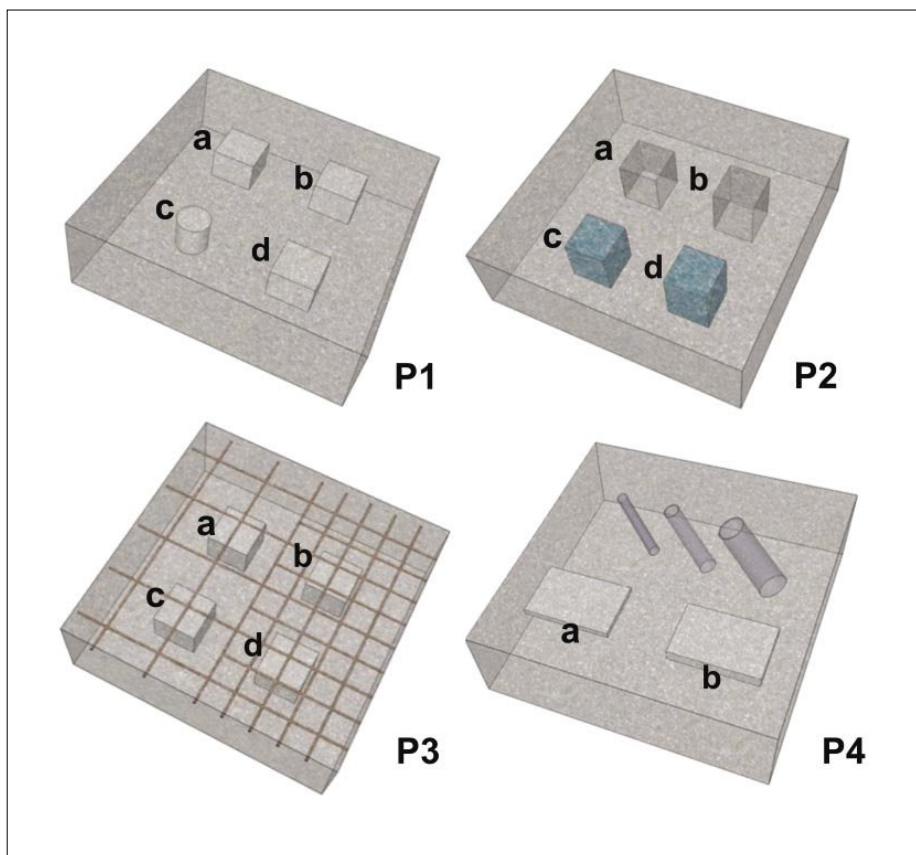
¹ Imena vrst aktivne termografije v slovenskem jeziku še niso privzeta in uporabljamo le prevode angleških izrazov.

² Ker so v gradbeništvu uporabljeni daljši pulzi segrevanja, se je namesto pulzna termografija uveljavil izraz termografija s kvadratnim pulzom (angl. square pulse thermography) (Arndt, 2010).

3 • EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Opis laboratorijskih preizkušancev

Za termografske preiskave smo pripravili štiri betonske preizkušance dimenzij $50 \times 50 \times 15 \text{ cm}^3$. Zaradi strukture preizkušancev smo za lažjo vgradljivost uporabili samozgoščevalni beton z maksimalnim zrnom agregata 4/8 mm. Kot je razvidno s slike 3, imajo preizkušanci vgrajene različne anomalije. Te smo opisali v preglednici 1. Namen anomalij iz stiropora v preizkušancu P1 je raziskava vpliva različne globine enake anomalije na možnost zaznavanja s termokamero. Vključki v preizkušancih P2, P3 in P4 pa simulirajo tipične napake in vključke v gradbenih konstrukcijskih elementih, kot so lokalizirana voda in zračne votline (P2), armatura (P3), instalacijske cevi in delaminacija (P4). Dimenzije kvadrov iz stiropora v preizkušancu P1 so $8 \times 8 \times 6 \text{ cm}^3$, v P2 pa je dimenzija lukenj $8 \times 8 \text{ cm}^2$ s spreminljivo globino (tu so bile luknje z ene strani preizkušanca odprte, da smo lahko vanje dodali vodo). Armatura v preizkušancu P3 je položena v dveh ortogonalnih smereh z rastrom $10 \times 10 \text{ cm}^2$ oziroma $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Krovni sloj betona nad armaturo je 2,5 cm. Plošči iz stiropora, ki simulirata delaminacijo v P4, sta debeline 1 cm (a) oz. 2 cm (b), plastične cevi pa premera 1, 1,5 in 2,5 cm (z leve proti desni na sliki 3, P4). Krovni sloj betona nad vsemi anomalijami v P4 je med 1,5 in 2 cm.



Slika 3 • Skice betonskih preizkušancev z vgrajenimi anomalijami

Anomalija	Material	Krovni sloj betona (cm)
P1 a	stiropor	3 ali 6
P1 b	stiropor	1,5 ali 7,5
P1 c,d	stiropor	4,5
P2 a	zrak	6
P2 b	zrak	3
P2 c	voda	6
P2 d	voda	3
P3 a,b	stiropor	6,6
P3 c,d	stiropor	4,6
P4 a,b	stiropor	1,5–2
P4 cevi	plastika	1,5–2

Preglednica 1 • Material in krovni sloj betona vgrajenih anomalij za preizkušance P1–P4



Slika 4 • Termokamera FLIR A320, ki smo jo uporabili pri raziskavah

3.2 Opis merske opreme

Za grejte smo uporabili infrardeča grelnika z močjo po 1,2 kW, postavljena 45 cm od površine preizkušanca, da je bilo zagotovljeno približno enakomerno segrevanje. V sklopu optimizacije časa segrevanja smo preizkušance gregli 5, 15, 30 in 45 min. Termokamera FLIR A320 (slika 4), ki smo jo uporabili pri naših raziskavah, zaznava IR-svetlobo z valovno dolžino med 7,5 μm in

13 μm . V goriščni ravnini leče ima postavljeno mrežo majhnih bolometrov, ki zagotavljajo ločljivost 320 \times 240 grafičnih točk (pikslov). Sliko lahko zajemamo s frekvenco 30 Hz in izmerimo temperaturne razlike na površini objekta, ki ga snemamo, z maksimalno občutljivostjo 50 mK pri temperaturi 30 °C (Flir, 2009). Temperaturno ohlajanje smo spremljali 45 min. (za potrebe pulzno-fazne termografije

150 min.). Ker bi pri tako dolgem času in pri frekvenci zajemanja slik s 30 Hz dobljena merska datoteka znašala nekaj 10 GB, smo frekvenco zajemanja slik zmanjšali na 0,2 Hz, velikost končne datoteke pa s tem na približno 1 GB. Za upravljanje termokamere in nastavitve parametrov termografske meritve smo uporabili program FLIR ResearchIR Max 3.2, nadaljnjo obdelavo podatkov pa opravili v programu Matlab R2012a.

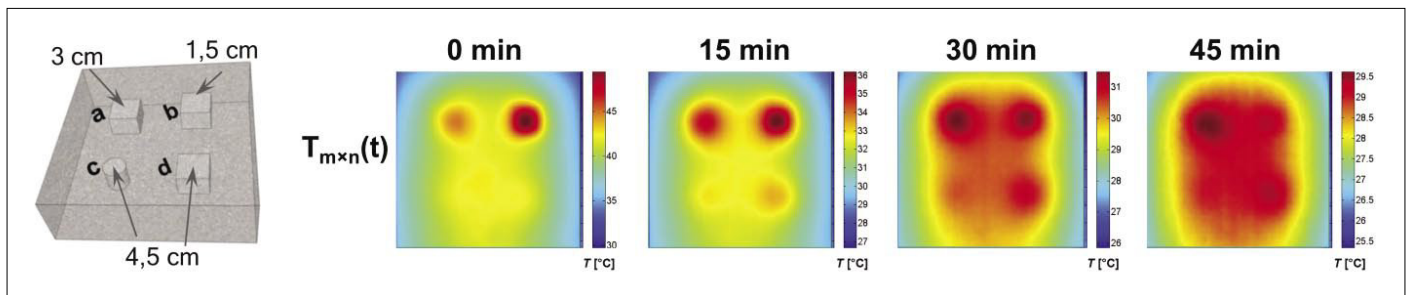
4 • REZULTATI

Na sliki 5 vidimo porazdelitev temperature na površini preizkušanca P1 takoj po prenehanju grejta (0 min.) ter po 15, 30 in 45 min. ohlajanja. S slike je lepo razvidno, da je čas zaznavanja anomalij neposredno odvisen od njihovih globin, saj se vpliva globljih anomalij c in d (na 4,5 cm globine, glej preglednico 1) pojavita šele po 15 min. merjenega ohlajanja, medtem ko vpliv anomalij a in b z manjšim krovnim slojem betona (1,5 oz. 3 cm) opazimo že takoj po končanem grejtu.

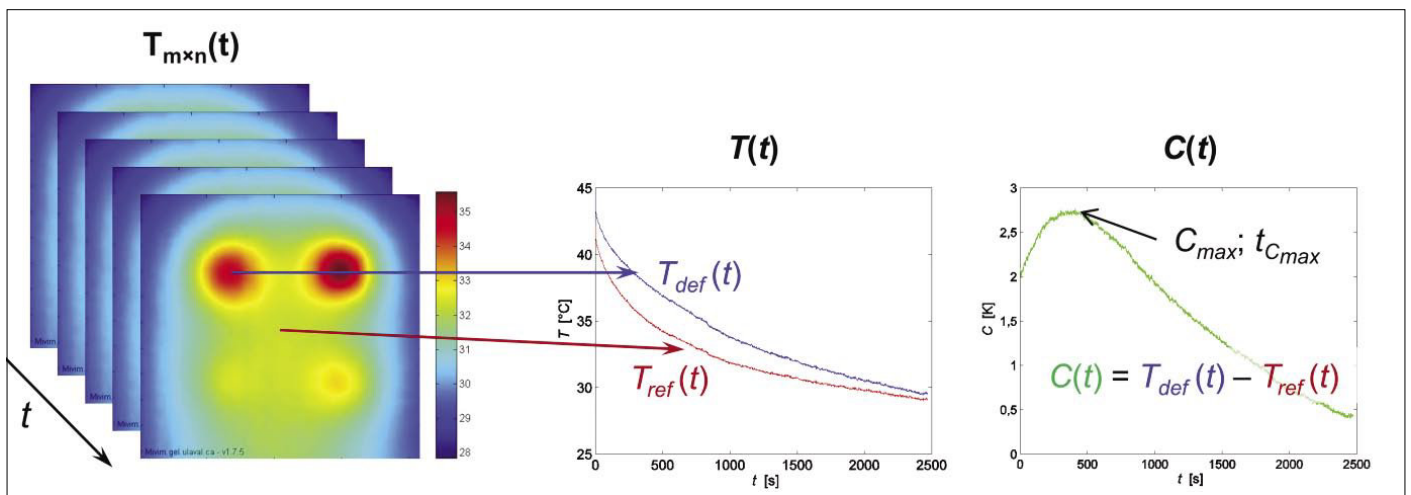
4.1 Temperaturni kontrast

Slika 6 prikazuje določitev temperaturnega kontrasta (enačba 4) za območje nad anomalijo a preizkušanca P1. Potek časovno odvisnega temperaturnega kontrasta je za različno globoke anomalije prikazan na sliki 7 za 30-min. segrevanje. Z večjo globino anomalije sta opazni zmanjševanje kontrasta kot tudi pomikanje časa nastopa maksimalnega kontrasta t_{Cmax} k poznejšim časom. Rezultat na sliki 7 še kaže, da pri

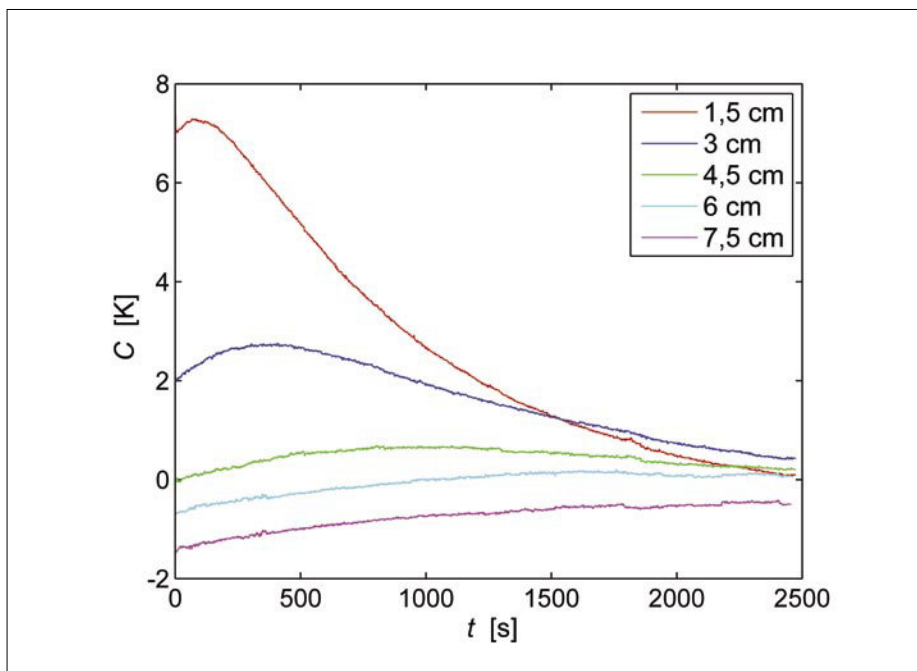
30-min. segrevanju lahko še zaznamo anomalijo na globini 6 cm, saj je do te globine temperaturni kontrast še pozitiven. Večina gradbenih konstrukcij ima v splošnem precej heterogeno notranjo strukturo. Poleg anomalij so možna mesta lokalizirane vode ali povečane vlažnosti ter prisotnost armature, ki bi načeloma lahko vplivali na spremenjeno možnost zaznavanja. S preizkušancema P2 in P3 smo te predpostavke želeli preveriti tako, da smo simulirali prisotnost tako lokalizirane vode kot armature dveh rastrov; 10 in 5 cm. Slika 8 (levo) pokaže, da je pri vodni anomaliji kontrast pol manjši kakor pri zračni. Voda torej bistveno vpliva na slabše zaznavanje, medtem



Slika 5 • Časovno zaznavanje različno globokih anomalij preizkušanca P1 prek temperaturnih slik. Vsaka slika ima svojo temperaturno skalo



Slika 6 • Določitev temperaturnega kontrasta $C(t)$ za območje nad anomalijo a preizkušanca P1. Pri tem C_{max} označuje maksimalni temperaturni kontrast, t_{Cmax} pa čas nastopa le-tega



Slika 7 • Potek časovno odvisnega temperaturnega kontrasta za različno globoke anomalije preizkušancev P1 in P2 po 30-min. segrevanju

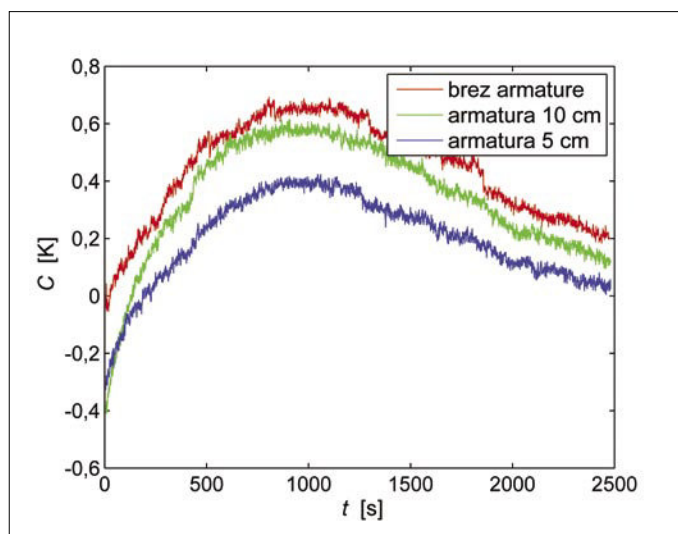
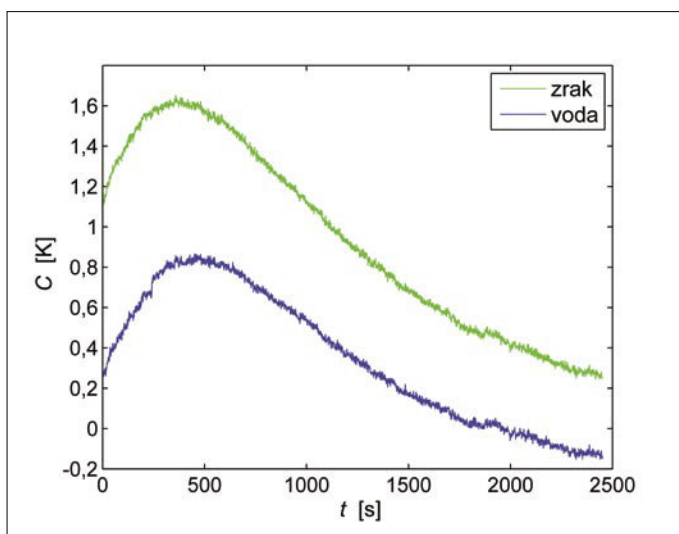
ko skoraj ne vpliva na čas $t_{C_{max}}$. Znižanje kontrasta lahko pripišemo večji toplotni prevodnosti vode glede na zrak in tako manjši razliki v toplotni prevodnosti glede na okolico, to je beton; toplotna prevodnost za zrak znaša 0,026 W/mK, za vodo 0,60 W/mK, za beton pa 2,1 W/mK. Za vpliv armature na zaznavanje pri globini 4,6 cm je s slike 8 (desno) razvidno, da armatura, položena v rastru 10 cm, minimalno zmanjša temperaturni kontrast. Po drugi strani pa ga armatura, ki je

položena v rastru 5 cm, zmanjša za približno 30 %. Znižanje temperaturnega kontrasta ob prisotnosti armature je pričakovan rezultat, saj armatura bolje prevaja toploto. Omeniti velja, da je majhen premer armature omejeval neposredno zaznavanje armature. Zgornji rezultati so pokazali, da je temperaturni kontrast lahko močno odvisen od vrste anomalije, medtem ko je čas $t_{C_{max}}$ od te skoraj neodvisen in tako pogojen le z njeno globino. Slednje kaže, da bi z opazovanjem

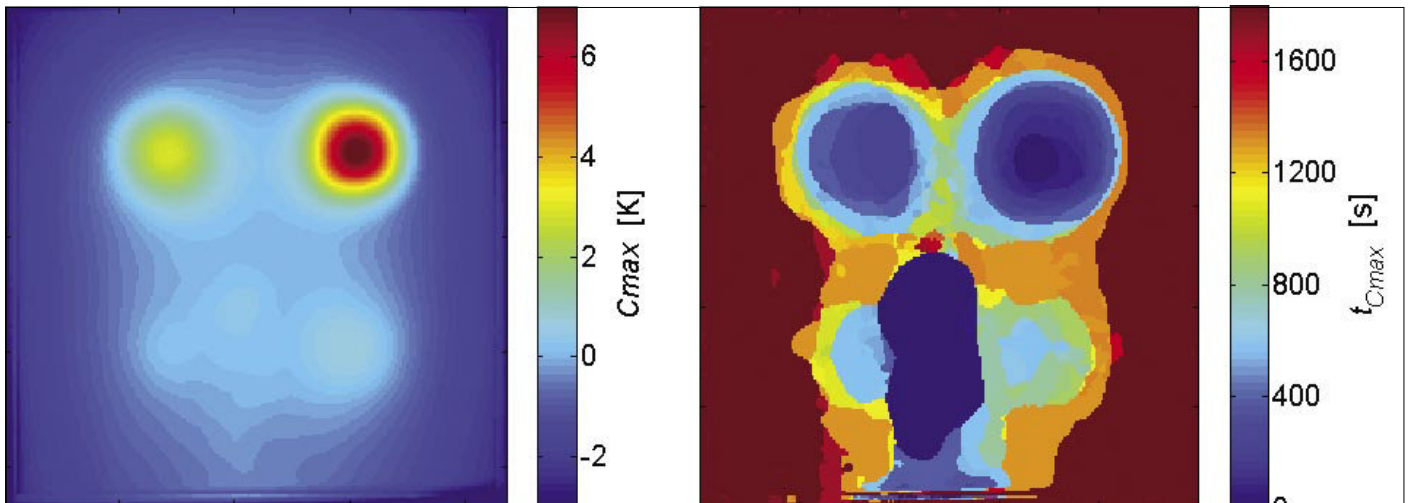
obeh parametrov, C_{max} in $t_{C_{max}}$ lahko kvalitativno določili vrsto anomalije in njeno globino. To omogočajo kontrastne in časovne slike (Krapez, 1991), kjer posamezno slikovno točko opišemo s pripadajočim parametrom. Pri kontrastnih slikah je to C_{max} pri časovnih pa $t_{C_{max}}$. Primer obeh je prikazan na sliki 9 za preizkušane P1. Glavna prednost tega prikaza pred opazovanjem celotnega temperaturnega profila je, da omogoča kvalitativno karakterizacijo anomalij le prek dveh slik. S tem bistveno zmanjšamo potrebni čas za analizo termografske meritve, obenem pa nam omogoča lažjo interpretacijo rezultatov, kar je ključnega pomena pri prenosu termografije kot neporušne metode v širšo prakso.

Poleg nehomogene notranje strukture ima bistveno vlogo na rezultate meritev tudi čas segrevanja preizkušancev. Zanimalo nas je, kolikšen je optimalni čas segrevanja v odvisnosti od globine anomalije. Slika 10 prikazuje rezultate, dobljene za maksimalni temperaturni kontrast C_{max} in pripadajoči čas $t_{C_{max}}$ v odvisnosti od globine anomalije. Izkaže se, da je pri vseh globinah optimalni čas segrevanja 30 min., kjer doseže C_{max} največje vrednosti in obenem najgloblji doseg – do 6 cm. Zanimivo je, da tako krajši (15 min.) kot tudi daljši (45 min.) časi segrevanja dosegajo nižje vrednosti temperaturnega kontrasta in manjši doseg – le do 4,5 cm globine.

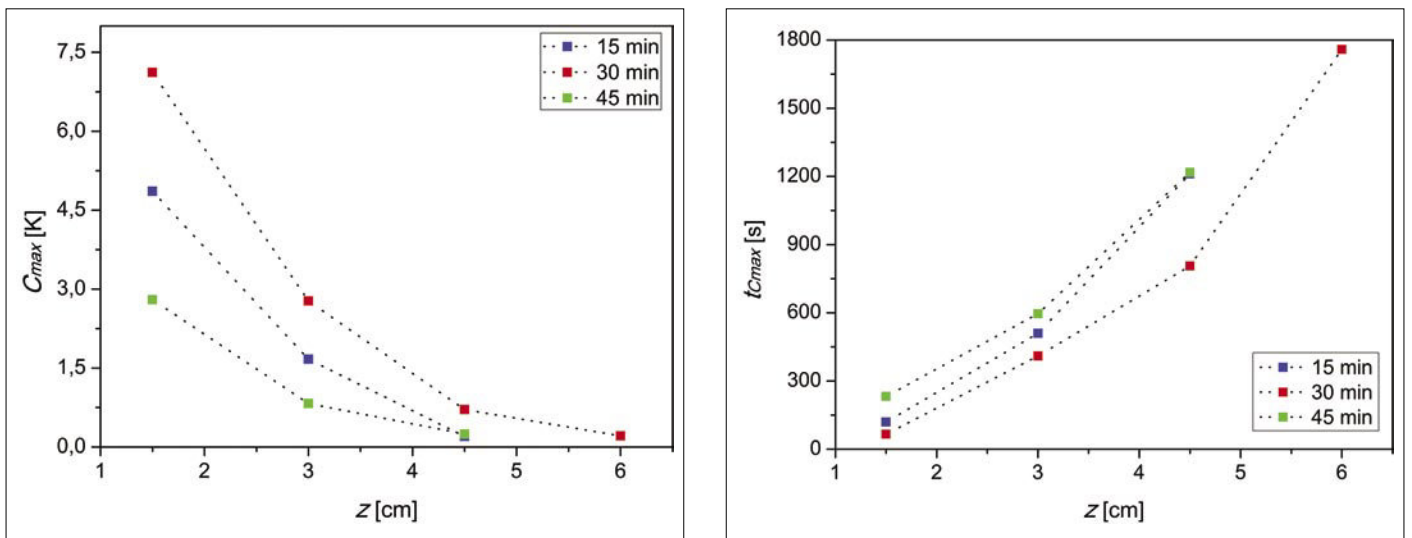
Grafa $C_{max}(z)$ in $t_{C_{max}}(z)$ na sliki 10 kažeta odvisnost od globine anomalije, ki smo jo poskušali opisati z enačbo 6. Slika 11 kaže rezultate prilagajanja za C_{max} in $t_{C_{max}}$ dobljene pri času gretja 30 min., saj se je ta čas izkazal za optimalnega. Iz grafa je razvidno,



Slika 8 • Potek časovno odvisnega temperaturnega kontrasta ob prisotnosti lokalizirane vode glede na zračno votlino (levo) ter ob prisotni armaturi rastra 10 oz. 5 cm (desno) po 30-min. segrevanju (prikazano za anomaliji na globini 3 cm (preizkušane P2) oz. 4,6 cm (preizkušane P3))



Slika 9 • Kontrastna slika (levo) in časovna slika (desno) za preizkušane P1 po 30-min. segrevanju



Slika 10 • Odvisnost maksimalnega temperaturnega kontrasta C_{max} (levo) in časa njegovega nastopa t_{Cmax} (desno) od globine anomalije za različne čase segrevanja (15, 30 in 45 min.) (črta le povezuje merske točke za lažje spremljanje rezultatov)

da navedeni model ne more opisati naših eksperimentalnih rezultatov (vrednost determinacijskega koeficienta znaša $R^2 = 0,25$). Za to je mogočih več razlag. Čas gretja je bil v našem primeru znatno daljši, kot je ta pri konstrukcijah iz kompozitov, zato se je že med gretjem v notranjosti preizkušanca zvišala temperatura. Drugi možni razlogi za odstopanje eksperimentalnih vrednosti od modela so še drugačni robni pogoji, nepopolnoma enakomerno gretje in nenatančnost pri določitvi C_{max} in t_{Cmax} na večjih globinah (glej sliko 7). Problem prilagajanja eksperimentalnih vrednosti temu modelu je izpostavil tudi Maldague na preiskavah materialov v strojništvu. Namesto časa t_{Cmax} predlaga uporabo časa $t_{C_{1/2max}}$ ko je dosežena polovična vrednost C_{max} obenem pa tudi uporabo

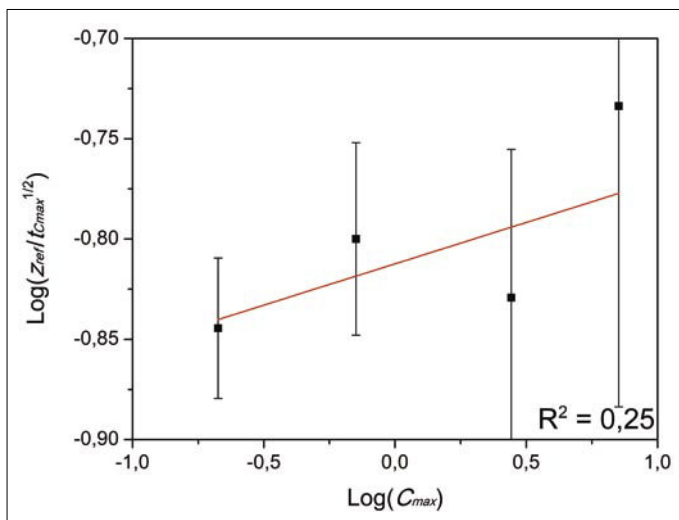
inverznega postopka z numeričnim modelom (Maldague, 2001).

4.2 Pulzno-fazna termografija in fazni kontrast

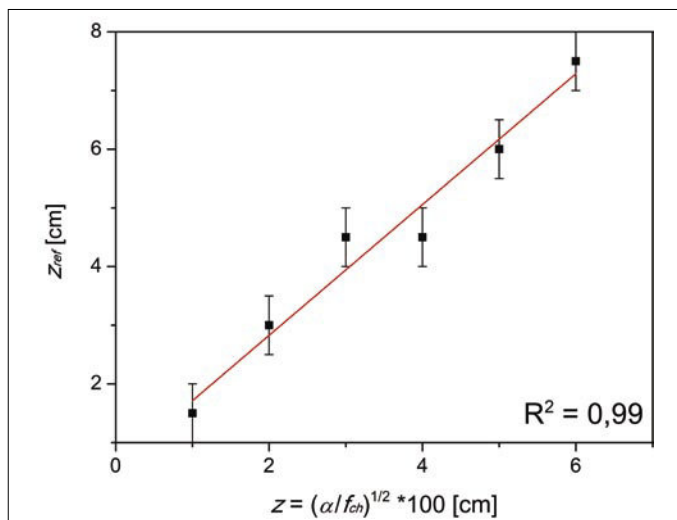
Slika 12 prikazuje potek faznega kontrasta za anomaliji na globini 1,5 cm (levo) in 3 cm (desno) preizkušanca P1. Razvidno je, da pri globljih anomalijah maksimalni fazni kontrast nastopi pri manjših frekvencah f_{ch} . O podobni odvisnosti poroča tudi Arndt na podlagi preiskav betonskih laboratorijskih preizkušancev (Arndt, 2006). Rezultati za f_{ch} za vse anomalije preizkušanca P1 so zbrani v preglednici 2. Omeniti velja, da smo za natančnejšo določitev f_{ch} uporabili dodajanje ničel (angl. zero-padding) do 2^{13} (Press, 2007), kar da frekvenčni prirastek $\Delta f = 2,4 \cdot 10^{-5}$ Hz.

Z_{ret} ($\pm 0,5$ cm)	f_{ch} (Hz)	$Z_{cal} = (\alpha/f_{ch})^{1/2} \cdot 100$ (cm)
1,5	$1,60 \cdot 10^{-3}$	2,4
3	$4,3 \cdot 10^{-4}$	4,5
4,5	$1,9 \cdot 10^{-4}$	6,8
6	$1,4 \cdot 10^{-4}$	7,9
7,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	9,6

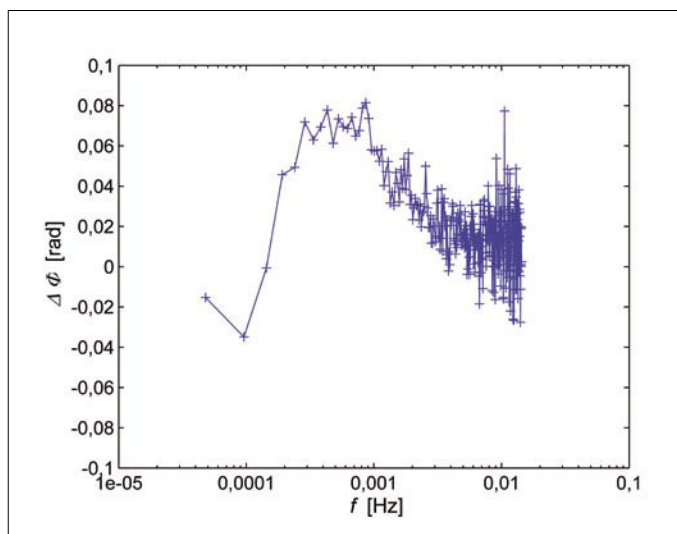
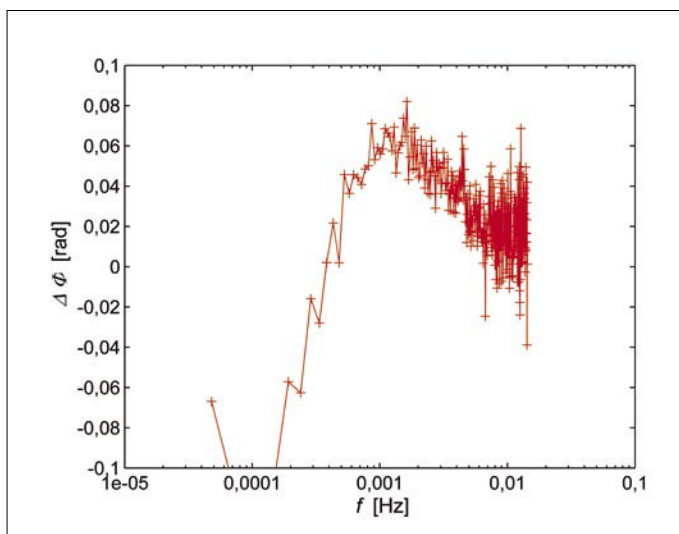
Preglednica 2 • Frekvenca pri maksimalnem faznem kontrastu f_{ch} za vse anomalije preizkušanca P1 ter izračunana globina anomalij Z_{cal} z modelom po enačbi 8. Pri računu smo uporabili vrednost termične difuzivnosti betona $\alpha = 8,86 \cdot 10^{-7}$ m²/s



Slika 11 • Rezultat prilaganja eksperimentalnih podatkov za C_{max} in t_{cmax} za anomalije preizkušanca P1, dobljenih za čas segrevanja 30 min., z modelom po enačbi 6 (anomalija na globini 7,5 cm ni vključena)



Slika 13 • Rezultat prilaganja eksperimentalnih podatkov za f_{ch} za anomalije preizkušanca P1, dobljenih po 45-min. segrevanju in merjenju ohlajanja za 150 min., z modelom po enačbi 8



Slika 12 • Potek faznega kontrasta za anomaliji na globini 1,5 cm (levo) in 3 cm (desno) preizkušanca P1 po 45-min. segrevanju in merjenju ohlajanja za 150 min

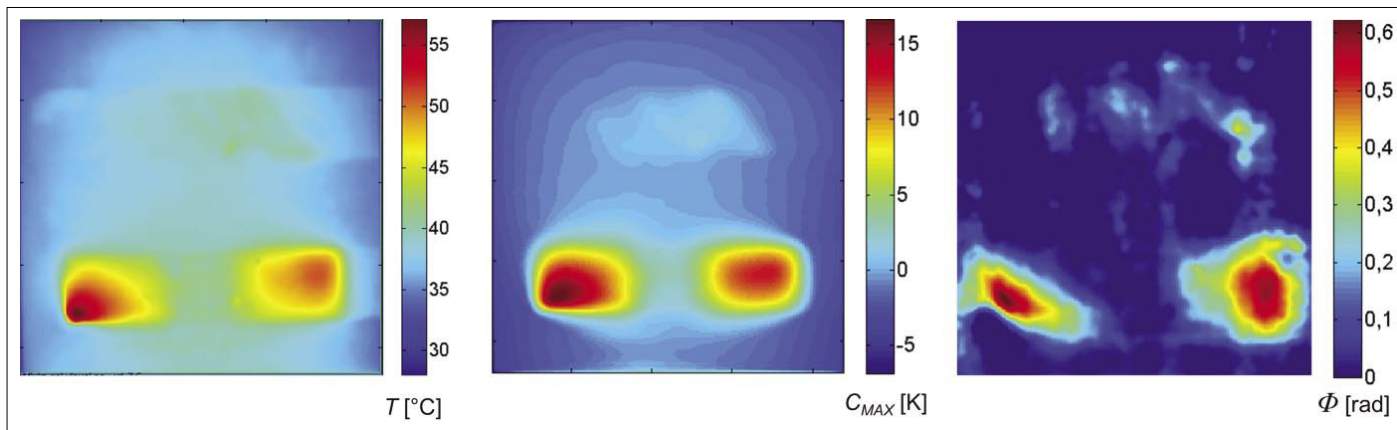
Graf na sliki 13 kaže rezultat prilaganja eksperimentalnih vrednosti iz preglednice 2 z modelom po enačbi 8. Razvidno je, da model z visoko natančnostjo opiše eksperimentalne rezultate (vrednost determinacijskega koeficienta znaša $R^2 = 0,99$). Pri tem je vrednost prostega parametra k_c iz enačbe 8 enaka $k_c = 1,11$. Arndt pokaže, da je vrednost tega parametra malo odvisna od časa segrevanja in da za približno oceno globino anomalije dobro velja vrednost $k_c = 1$ (Arndt, 2006). Poudariti je treba, da smo lahko s pulzno-fazno termografijo natančno zaznali še najglobljo anomalijo.

Ugotovitev, da model po enačbi 8 natančno opiše eksperimentalno odvisnost f_{ch} od glo-

bine anomalije ter da je vrednost $k_c = 1$ dobra predpostavka, omogoča, da lahko fazne slike pri določenih frekvencah interpretiramo kot slike na ustrezni globini. To omogoča neposredno združevanje rezultatov preiskav različnih neporušnih metod, kar je za radar in termografijo prikazano v (Cotič, 2014).

Omeniti velja še izboljšano zaznavanje na podlagi faznih slik oz. natančnejše faznokontrastnih slik, kar prikazuje slika 14 za preizkušane P4 (od leve proti desni: temperaturna, kontrastna in faznokontrastna slika), kjer nastopajo vse anomalije na globini 1,5–2 cm (glej preglednico 1). Pri faznokontrastni sliki, podobno kot pri kontrastni sliki, posamezno slikovno točko opišemo s pripadajočim maksimalnim

faznim kontrastom. S temperaturne slike ob začetku snemanja je razvidno, da je signal proti šumu premajhen, da bi lahko zaznali plastične cevi. Opazimo lahko tudi, da je del površine nad ploščami iz stiropora bolj segret, kar bi lahko pripisali dejstvu, da sta se plošči med betoniranjem nagnili in je tako del plošče bližje površini. Kontrastna slika ima večje razmerje signala proti šumu od temperaturne slike, vendar ima obenem slabšo prostorsko ločljivost, tj. ne more zaznati nagnjenih plošč, ampak prikaže nekakšno povprečno stanje preizkušanca vzdolž globine. Faznokontrastna slika pa ima velik kontrast kot tudi zelo dobro prostorsko ločljivost, kar je v skladu z občutljivostjo za določeno frekvenčno okno.



Slika 14 • Temperaturna slika (levo) ob začetku snemanja, kontrastna slika (sredina) in faznokontrastna slika pri frekvenci $3,7 \cdot 10^{-3}$ Hz (desno) za preizkušane P4

5 • SKLEP

V članku smo pokazali uporabo temperaturnega kontrasta in pulzno-fazne termografije pri obdelavi podatkov pri pulzni termografiji na laboratorijskih betonskih preizkušancih. Spremljanje časovne odvisnosti temperaturnega kontrasta je uporabno orodje za raziskave odziva termokamere na različne termične lastnosti napak in vključkov v betonskih konstrukcijskih elementih. Vrsta anoma-

lije lahko bistveno vpliva na temperaturni kontrast, prav tako tudi prisotnost gostejše armature. Kontrastne in časovne slike lahko uporabimo za kvalitativno oceno globine anomalije, medtem ko kvantitativna ocena globine s tema metodama ni mogoča. Za to smo uporabili pulzno-fazno termografijo, pri kateri ohlajanje površine preizkušanca analiziramo v frekvenčni domeni. Prilagaja-

nje eksperimentalnih podatkov za frekvenco nastopa maksimalnega faznega kontrasta z modelom, ki ga je predlagal Arndt (Arndt, 2006), je pokazalo odlično ujemanje. Faznokontrastne slike dajo velik kontrast, globlji doseg in večjo prostorsko ločljivost. Edina slaba lastnost pulzno-fazne termografije je relativno dolg čas merjenja ohlajanja. Zato v primerih, ko ne zahtevamo velike prostorske ločljivosti oz. kvantitativnega opisa anomalij, za obdelavo termografskih podatkov zadostuje metoda temperaturnega kontrasta.

6 • ZAHVALA

Prvi avtor se zahvaljuje Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finan-

ciranje doktorskega študija (št. pogodbe 1000-10-310156). Avtorji se zahvaljujejo izr. prof. dr.

Violeti Bokan Bosiljkov in Franciju Čeponu za strokovno pomoč pri pripravi preizkušancev.

7 • LITERATURA

- Arndt, R., Maierhofer Ch., Röllig, M., Weritz, F., Wiggerhauser, H., Structural investigation of concrete and masonry structures behind plaster by means of pulse phase thermography, 7th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography (QIRT), Rhode-St-Genese, 5.–8. julij, 2004, 1–6, 2004.
- Arndt, R., Maierhofer Ch., Röllig, M., Quantitative Pulse-Phase Thermography for Masonry and Concrete Structures, 9th European NDT Conference (EC-NDT 2006), Berlin, 25.–29. september, 2006, 1–8, 2006.
- Arndt, R. W., Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering, *Infrared Phys Techn* 53, 246–253, 2010.
- Avdelidis, N. P., Moropoulou, A., Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *J Cult Herit* 5, 119–127, 2004.
- Avdelidis, N. P., Kouli, M., Ibarra-Castaneda, C., Maldague, X., Thermographic studies of plastered mosaics, *Infrared Phys Techn* 49, 254–256, 2007.
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., Jayakumar, T., Infrared thermography for condition monitoring – A review, *Infrared Phys Techn* 60, 35–55, 2013.

- Balageas, D. L., Deom, A. A., Boscher, D. M., Characterization and nondestructive testing of carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method, *Mater Eval* 45, 456–465, 1987.
- Binda, L., Saisi, A., Application of NDTs to the diagnosis of historic structures, 7th Int. Symp. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE'09), Nantes, 30. junij–3. julij 2009, 1–28, 2009.
- Bortolin, A., Cadelano, G., Ferrarini, G., Bison, P., Peron, F., Maldague, X., High-resolution survey of buildings by lock-in IR thermography, *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV (SPIE 8705)*, Baltimore, 29. april–3. maj, 2013, 1–9, 2013.
- Bosiljkov, V., Uranjek, M., Žarnić, R., Bokan Bosiljkov, V., An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures, *J Cult Herit* 11, 3, 239–249, 2010.
- Bosiljkov, V., Maierhofer Ch., Koepp, C., Wöstmann, J., Assessment of Structure Through Non-Destructive Tests (NDT) and Minor Destructive Tests (MDT) Investigation: Case Study of The Church at Carthusian Monastery at Zice (SLOVENIA), *Int J Archit Herit* 4, 1, 1–15, 2010.
- Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X., Pulsed phase thermography reviewed, *Quant Infrared Thermogr J* 1, 1, 47–70, 2004.
- Cotič, P., Jagličič, Z., Bosiljkov, V., Validation of non-destructive characterization of the structure and seismic damage propagation of plaster and texture in multi-leaf stone masonry walls of cultural-artistic value, *J Cult Herit*, 2013, doi: 10.1016/j.culher.2013.11.004.
- Cotič, P., Jagličič, Z., Niederleithinger, E., Stoppel, M., Bosiljkov, V., Image fusion for improved detection of near-surface defects in NDT-CE using unsupervised clustering methods, *J Nondestruct Eval*, 2014, doi: 10.1007/s10921-014-0232-1.
- FLIR A320 Technical Specifications, http://www.shopflir.com/crm_uploads/flir-a320-specifications.pdf (28. 2. 2012).
- Grinzato, E., Vavilov, V., Bison, P. G., Marinetti S., Hidden corrosion detection in thick metallic components by transient IR thermography, *Infrared Phys Techn* 49, 3, 234–238, 2007.
- Hall, L. H., Bardeen, J., Blatt, F. J., Infrared Absorption Spectrum of Germanium, *Phys Rev* 95, 559–560, 1954.
- Krapez, J. C., Maldague, X., Cielo, P., Thermographic nondestructive evaluation: Data inversion procedures, *Res Nondestruct Eval* 3, 2, 101–124, 1991.
- Larbi, W.B., Ibarra-Castanedo, C., Klein, M., Bendada, A., Maldague, X., Experimental Comparison of Lock-in and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials, 6th Int. Workshop - NDT Signal Processing (ASPND2009), London, Ontario, Canada, 25.–27. avgust, 2009, 1–9, 2009.
- Maierhofer Ch., Brink, A., Röllig, M., Wiggerhauser, H., Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region, *Infrared Phys Techn* 43, 271–278, 2002.
- Maierhofer Ch., Arndt, R., Röllig, M., Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography, *Infrared Phys Techn* 49, 213–217, 2007.
- Maierhofer Ch., Röllig, M., Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures, *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, 30. junij–3. julij 2009, 1–6, 2009.
- Maldague, X. P. V., Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- McDaniel, G. W., Robinson, D. Z., Thermal Imaging by Means of the Evaporation, *Applied Optics* 1, 3, 311–324, 1962.
- Pašagić, V., Primjena termografije u građevinarstvu, *Gradjevinar* 60, 12, 1055–1064, 2008.
- Press, W. H., Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 2007.
- Strnad, J., Fizika, 2. del, Električna/Optika, DZS, 1978.
- Theodorakeas, P., Ibarra-Castanedo, C., Sfarra, S., Avdelidis, N. P., Kouli, M., Maldague, X., Paoletti, D., Ambrosini, D., NDT inspection of plastered mosaics by means of transient thermography and holographic interferometry, *NDT&E Int* 47, 150–156, 2012.
- Wild, W., Buscher, K., Wiggerhauser, H., Amplitude sensitive modulation thermography to measure moisture in building materials, *Int. Soc. for Optical Engineering, Thermosense XX*, Orlando, 28. marec, 1998, 156–163, 1998.