

Sveučilište u Zagrebu

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Bojan Milovanović

KARAKTERIZACIJA OŠTEĆENJA ARMIRANOG BETONA PRIMJENOM METODE INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2013.



University of Zagreb

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Bojan Milovanović

APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR DEFECT CHARACTERIZATION IN REINFORCED CONCRETE

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2013.



Sveučilište u Zagrebu

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Bojan Milovanović

KARAKTERIZACIJA OŠTEĆENJA ARMIRANOG BETONA PRIMJENOM METODE INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

DOKTORSKI RAD

Mentor:

prof.dr.sc. Ivana Banjad Pečur, dipl.ing.građ.

Zagreb, 2013.



University of Zagreb

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Bojan Milovanović

APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR DEFECT CHARACTERIZATION IN REINFORCED CONCRETE

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

prof. Ivana Banjad Pečur, PhD

Zagreb, 2013.

ZAHVALA

Stranica pisane riječi premalo je prostora da bih zahvalio svima koji su ugradili dio sebe u ovaj moj rad, u jedno lijepo i intenzivno razdoblje u mom životu.

Posebno sam zahvalan pokojnoj prof.dr.sc. Dunji Mikulić, koja me je poticala na znanstveno-istraživački rad te pod čijim sam vodstvom započeo avanturu u znanosti i doktorski studij.

Hvala mojoj mentorici prof.dr.sc. Ivani Banjad Pečur na vođenju, sugestijama, potpori i korisnim diskusijama, prof.dr.sc. Nini Štirmer, predivnoj osobi, na velikoj brizi da dovršim disertaciju, korisnim savjetima koji su razbistrili mnoge ljudske i znanstvene nedoumice. Na kraju se zahvaljujem prof.dr.sc. Lovri Krstuloviću Opari na korisnim prijedlozima i sugestijama. Bila mi je čast raditi sa svima i uvijek ću biti zahvalan na savjetima i znanju koje ste mi prenijeli.

Zahvaljujem se kolegama sa zavoda na prekrasnoj radnoj atmosferi i na podršci tijekom izrade disertacije. Posebna zahvala laborantima Zvjezdani Matuzić i Miri Matuziću koji su mi pomogli pri izradi uzoraka i pri provođenju ispitivanja.

Zahvaljujem se i Mariji Jelčić Rukavina ne svesrdnoj moralnoj podršci i brojnim razgovorima koji su mi dali podstrek da ne odustanem ni u najtežim trenucima. Ivanu Gabrijelu i Nenadu Bijeliću zahvaljujem na trenucima opuštanja tijekom napornih radnih dana, zauvijek ćemo imati Đurđu! Dubravki Bjegović, Marijani Serdar i Ani Baričević na uzoru i predanosti u radu.

Zahvaljujem se svim svojim studentima, s kojima i za koje mi je bilo čast raditi.

Također se zahvaljujem kolegama Raphaelu Danjeuxu koji mi je svojim komentarima i sugestijama pomogao pri definiranju teme rada, te Robertu Rinaldiju koji mi je uvijek bio na raspolaganju za savjete, te je osim svojim iskustvom pri definiranju teme rada, nesebično pomagao pri kompletiranju i uspostavi sustava mjerenja zanemarujući pri tome svoje obveze.

Posebnu zahvalu upućujem svojim bivšim učiteljima i profesorima iz Osnovne škole Kotoriba i Graditeljske škole Čakovec čije sam znanje upijao tijekom školovanja i profesorima Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu koji su me prepoznali i poticali u

radu i zbog kojih se svakodnevno preispitujem, težim napredovati i postati bolja osoba, kako bih bio na ponos svojim učiteljima.

Izrada ovog rada bila bi nemoguća bez pomoći i potpore mojih prijatelja i kolega, bez njihovog razumijevanja u trenucima kad nisam mogao... Posebno hvala Bojani Kutleša Jelić, Ivani Carević, Ivani Semanić, Ivani Pavleković Gogić, Marku Martinoviću.

Hvala mojim roditeljima na podršci i strpljenju, a posebno mojoj pokojnoj baki koja je uvijek vjerovala u mene.

Bojan Milovanović

SAŽETAK

Nerazorna ispitivanja korištenjem infracrvene (IC) termografije sastoje se od toplinske stimulacije objekta i praćenjem promjene temperature na njegovoj površini tijekom nestacionarnog hlađenja ili zagrijavanja. Postojanje nehomogenosti utječe na širenje topline te time uzrokuje lokalne promjene u temperaturnom polju koje se bilježe IC kamerom.

U ovom radu je razvijena metodologija za toplinsku stimulaciju armiranog betona u svrhu određivanja oštećenja. Provedeno je istraživanje stanja područja nerazornih ispitivanja materijala i konstrukcija metodom IC termografije. Provedena su ispitivanja toplinskih svojstava tri vrste betona od kojih su izrađeni uzorci, a sve u svrhu točnijeg određivanja toplinske provodljivosti, toplinske efuzivnosti i difuzivnosti koja su potrebna prilikom određivanja dubine na kojoj se nalaze oštećenja. Razvijena je metodologija za provođenje ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija s posebnim naglaskom na metode toplinske pobude, tehnike prikupljanja termograma i naknadne obrade sekvenci termograma te analize rezultata mjerenja. Kod naknadne obrade rezultata ispitivanja korištene su: termografija koračnog grijanja (SH); termografija faznog impulsa (PPT), fazni i amplitudni prikaz; termografija glavnih komponenti (PCA); tehnika naknadne obrade rezultata ispitivanja pomoću korelacijskih operatora, što je dovelo do napretka u mogućnosti otkrivanja oštećenja u slučaju korištenja navedenih metoda. Razvijeni su i modeli za karakterizaciju oštećenja uz uvjet poznavanja toplinske difuzivnosti betona, vremenskog razvoja krivulje temperaturnog kontrasta te koeficijenta kalibracije modela.

Zaključeno je da je metodu aktivne IC termografije moguće koristiti za detekciju i kvantifikaciju oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama. Na rezultate ispitivanja utječu fizikalno mehanička svojstva betona, ali je poznavanjem karakteristika mjernog sustava, konfiguracije ispitivanja, toplinskih svojstava betona te temperaturnog polja na površini betona moguće uz korištenje definiranih modela karakterizirati oštećenja.

Ključne riječi:

Oštećenja u armiranom betonu, Infracrvena termografija, Nerazorna ispitivanja, Toplinska svojstva betona, Termografija koračnog grijanja, Termografija faznog impulsa, Termografija glavnih komponenti, Tehnika korelacijskih operatora, Model za karakterizaciju oštećenja u betonu

PROŠIRENI SAŽETAK

POZADINA ISTRAŽIVANJA:

Cilj procjene stanja postojeće armiranobetonske konstrukcije je omogućiti uvid u trenutno stanje promatrane konstrukcije i njezina svojstva u budućnosti, te utjecaj pronađenih oštećenja na sigurnost i životni vijek konstrukcije. Kod procjene stanja armiranobetonskih konstrukcija neophodno je primjenjivati pouzdane i učinkovite nerazorne metode ispitivanja kojima je moguće detektirati, lokalizirati i karakterizirati različite vrste oštećenja. Prednost je nerazornih metoda u njihovoj jednostavnosti i činjenici da ne oštećuju konstrukciju ili uzrokuju samo manja površinska oštećenja. Interpretacija rezultata, međutim, jest jedan od najzahtjevnijih zadataka u modernome graditeljstvu.

Iako se IC termografija koristi u graditeljstvu za identifikaciju gubitaka topline kroz vanjsku ovojnicu zgrada, uviđa se njezina sve veća primjena za nerazorna ispitivanja i vrednovanje materijala i konstrukcija. Nerazorna ispitivanja korištenjem IC termografije općenito se sastoje od toplinske stimulacije objekta koji se promatra i praćenjem varijacije temperature na njegovoj površini tijekom nestacionarnog hlađenja ili zagrijavanja. Postojanje nehomogenosti u materijalu utječe na širenje topline te time uzrokuje lokalne promjene u temperaturnom polju koje se bilježe IC kamerom.

METODE ISTRAŽIVANJA:

U ovom radu je razvijena metodologija za toplinsku stimulaciju armiranog betona u svrhu određivanja oštećenja. Provedeno je istraživanje stanja područja nerazornog ispitivanja materijala i konstrukcija metodom infracrvene (IC) termografije s primjenom pasivne tehnike i aktivnih tehnika ispitivanja te pregled spoznaja o fizikalnom konceptu toplinskog zračenja u infracrvenom spektru valnih dužina, problematici detektora infracrvenog zračenja, njihovoj geometrijskoj i temperaturnoj razlučivosti. Analizirane su metode naknadne obrade rezultata ispitivanja, termograma, koje se koriste u području zrakoplovstva, svemirske industrije za lociranje oštećenja u materijalima te određivanje njihove veličine i dubine, s razmatranjem mogućnosti primjene pojedinih metoda u području građevinarstva.

Iz istraživanja provedenih na mostu Krapina na autocesti Zagreb - Macelj, te pregleda stanja područja, zaključeno je da nerazorno ispitivanje betonskih konstrukcija korištenjem IC termografije koje se temelji na pasivnoj termografiji ima određeni broj ograničenja i

nedostataka. Zbog toga se preporuča korištenja tehnika aktivne termografije kako bi se odredilo postojanje oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama.

U radu su provedena ispitivanja toplinskih svojstava tri vrste betona od kojih su izrađeni uzorci, a sve u svrhu točnijeg određivanja toplinske provodljivosti, toplinske efuzivnosti i toplinske difuzivnosti koja su potrebna prilikom određivanja dubine na kojoj se nalaze oštećenja.

Tijekom istraživanja razvijena je metodologija za provođenje ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija s posebnim naglaskom na metode toplinske pobude (zagrijavanja), tehnike prikupljanja termograma (tehnike IC termografije) i tehnike naknadne obrade sekvenci termograma te analize rezultata mjerenja. Poseban naglasak je postavljen na određivanje granica metode, točnije određivanje donje granice veličine oštećenja kojeg je moguće otkriti primjenom IC termografije u ovisnosti o kvaliteti betona, udaljenosti toplinske pobude, te termo-higrometrijskim uvjetima pri kojima se provodi ispitivanje, s ciljem simuliranja stvarnih uvjeta i situacija u kojima se nalaze armiranobetonske konstrukcije.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA:

Definiran je eksperimentalni poligon na kojem je moguće provoditi ispitivanja IC termografijom u svrhu otkrivanja oštećenja, a koji je definiran potrebom da postoji mogućnost prenošenja uzoraka (ograničene su dimenzije i masa samih uzoraka) i kondicioniranja u predviđenim uvjetima, a da su s druge strane uzorci dovoljno veliki da se mogu simulirati stvarna oštećenja, bez utjecaja rubova ili oštećenja međusobno na temperaturno polje.

Za prethodnu i naknadnu obradu rezultata ispitivanja su razvijeni algoritmi i vlastite funkcije te programi (poznati kao M-datoteke) u kodu MATLAB-a, koji su služili za pojedine korake analize rezultata.

Kod naknadne obrade rezultata ispitivanja, odnosno otkrivanja postojanja oštećenja korištene su: termografija koračnog grijanja (SH); termografija faznog impulsa (PPT), pri čemu je razmatran fazni i amplitudni prikaz; termografija glavnih komponenti (PCA); tehnika naknadne obrade rezultata ispitivanja pomoću korelacijskih operatora, što je dovelo do evidentnog napretka u mogućnosti otkrivanja oštećenja u slučaju korištenja navedenih metoda. Razvijeni su i modeli za karakterizaciju oštećenja uz uvjet poznavanja toplinske difuzivnosti betona, vremenskog razvoja krivulje temperaturnog kontrasta (točke infleksije) te koeficijenta kalibracije modela.

ZAKLJUČAK:

Zaključeno je da je metodu aktivne infracrvene termografije moguće koristiti za detekciju i kvantifikaciju oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama. Na rezultate ispitivanja utječu fizikalno mehanička svojstva betona, ali je poznavanjem karakteristika mjernog sustava, konfiguracije ispitivanja, toplinskih svojstava betona te temperaturnog polja na površini betona moguće uz korištenje definiranih modela karakterizirati oštećenja.

Ključne riječi:

Oštećenja u armiranom betonu, Infracrvena termografija, Nerazorna ispitivanja, Toplinska svojstva betona, Termografija koračnog grijanja, Termografija faznog impulsa, Termografija glavnih komponenti, Tehnika korelacijskih operatora, Model za karakterizaciju oštećenja u betonu

STRUCTURED ABSTRACT

BACKGROUND:

The objective of condition assessment of existing reinforced concrete structures is to provide insight into current condition of the observed structure, to predict development of deterioration, and to assess the influence of defects found on the safety and expected life-time of the structure. During the condition assessment of reinforced concrete structures, it is necessary to implement reliable and effective non-destructive testing methods which can detect, locate and characterize different types of defects. The advantage of non-destructive methods is their simplicity and the fact that they do not damage the structure or cause only minor surface damage. Interpretation of the results, however, is one of the most challenging tasks in modern construction process.

Although infrared (IR) thermography is being used in civil engineering for identification of heat losses through the building's thermal envelope, it has been realized its potential as one of the non-destructive thermal methods for nondestructive testing of materials and structures. Nondestructive testing using IR thermography generally consists of thermal stimulation of the object under examination and monitoring of its surface temperature variation during the transient heating or cooling phase. The existence of inhomogeneities in the core material affects the heat transfer and thus causes local changes of temperature distribution on the surface of the observed structure, which is then recorded using an IR camera.

METHODOLOGY:

In this thesis, a methodology for thermal stimulation of reinforced concrete was developed in order to determine the existence of defects. Research on the state of the art in the field of non-destructive testing of materials and structures using IR thermography, both passive and active techniques was performed. The review of scientific knowledge on the physical concept of thermal radiation in the infrared wavelengths band and the issues of infrared detectors, their spatial and temperature resolution is also given. Post-processing methods of sequence of thermograms used in the field of aviation and aerospace industry for detection and characterization of defects were analyzed, in order to evaluate their possible application in the field of civil engineering.

Based on the investigation carried out on the "Krapina" bridge, highway Zagreb – Macelj, and the state of the art research, it was concluded that non-destructive testing of concrete

structures using IR thermography, passive technique, has a number of limitations and disadvantages. Therefore, active thermography techniques are recommended to be used for determination of defects in reinforced concrete structures.

In presented thesis, thermal properties of three concrete types (classes) were tested; all in order to accurately determine thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal effusivity which are needed to determine defect's depth.

During the research, reinforced concrete testing methodology using active IR thermography was developed. The emphasis was made on the method of thermal excitation, data acquisition techniques (IR thermography techniques) and post-processing techniques used for thermogram sequence analysis. Special emphasis was placed on determination the limits of the method, especially on determination of the lower limits of detectable defect size. In order to simulate actual field conditions and actual in situ test situations in which one can find itself when testing reinforced concrete structures, quality of concrete, distance of thermal excitation and thermo-hygrometric conditions were varied.

RESULTS:

Testing ground with the possibility of carrying out IR thermography laboratory testing of defects in concrete specimens was developed. The specimens are defined and restrained by the need for transportation (their size and mass) from the preconditioning to the test position. On the other hand, the samples have to be large enough in order to be able to simulate actual defect size, without the influence of edges and interaction of several defects on the temperature distribution.

Pre and post-processing of termogram sequences was performed using, newly developed algorithms (also known as M-files) in MATLAB code.

In the post-processing of thermogram sequences, step heating (SH) thermography, pulsed phase (PPT) thermography, principle component analysis (PCA) and correlation operators' technique were used in order to determine the existence of defects in concrete specimens. The use of mentioned techniques leads to substantial development in defect determination in concrete and reinforced concrete specimens. In addition, models for defect characterization were developed. This models require a priori knowledge of thermal diffusivity of concrete, temporal development of temperature contrast curve (inflection time) and the value of calibration coefficient.

CONCLUSIONS:

It was concluded that the method of IR thermography can be used for the detection and quantification of defects in reinforced concrete structures. Physical and mechanical properties of concrete influence test results, but with the understanding of the measurement system and test configuration, together with the information on the thermal properties of concrete and the temperature distribution on the concrete surface it is possible to characterize defects by using the suggested models.

Keywords:

Defects in reinforced concrete, Infrared thermography, Non-destructive testing, Thermal properties of concrete, Step heating thermography, Pulsed phase thermography, Principle component thermography, Correlation operators technique, Model for defect characterization in concrete

SADRŽAJ:

Sažetak..... I

Proširenisažetak..... II

Structured abstract..... V

Popis slika..... VIII

Popis tablica..... XXIX

Popis oznaka i skraćenica..... XXXII

1. UVOD..... 1

2. CILJ I HIPOTEZE..... 4

2.1. Ciljevi istraživanja i očekivani znanstveni doprinos..... 4

2.2. Hipoteze..... 5

2.3. Opis istraživanja..... 5

3. STANJE PODRUČJA..... 8

3.1. Infracrvena termografija..... 8

3.1.1. Uvodno o zračenju..... 8

3.1.2. Refleksija, apsorpcija, propusnost..... 14

3.1.3. Crno tijelo..... 16

3.1.4. Kirchhoffov zakon zračenja..... 17

3.1.5. Realno tijelo..... 17

3.1.6. Koeficijent emisije..... 19

3.1.7. Koeficijent emisije betona..... 23

3.2. Termografski sustav..... 25

3.2.1. Detektori..... 25

3.2.1.1. Mikrobolometri..... 27

3.2.1.2. NETD..... 29

3.2.1.3. FOV..... 30

3.2.1.4. IFOV..... 31

3.3. Osnovni postupak mjerenja..... 32

3.4. Degradacija signala..... 36

3.5. Rezultat termografskog snimanja..... 37

3.6. Aktivna termografija 39
3.6.1. Toplinska difuzivnost 40
3.6.2. Toplinska efuzivnost 41
3.6.3. Teorija toplinskog vala 41
3.6.4. Termografija koračnog grijanja 43
3.6.5. Vibrotermografija 44
3.6.6. Impulsna termografija 46
3.6.7. Lock-in termografija 47
3.6.7.1. Apsolutni fazni kontrast 49
3.6.7.2. Granična frekvencija 49
3.6.7.3. Kvantitativna LT 49
3.6.8. Termografija faznog impulsa 50
3.6.9. Termografija glavnih komponenti 53
3.6.10. Naknadna obrada pomoću korelacijskih operatora 58
3.7. Mjerenje na terenu - motivacija za provođenje istraživanja 60
3.8. Pregled stanja područja metoda i tehnika za ispitivanje betona 64
3.9. Pregled stanja područja metoda i tehnika za obradu rezultata mjerenja 79
3.10. Korištenje termografskih tehnika za mjerenje toplinskih svojstava 117
3.10.1. Literaturne vrijednosti toplinske difuzivnosti betona 117
3.10.2. Literaturne vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta betona 118
3.10.3. Literaturne vrijednosti toplinske provodljivosti betona 119
3.10.4. Mjerenje toplinske difuzivnosti 123
3.10.5. Mjerenje toplinske provodljivosti betona metodom vrućeg diska 130
3.10.6. Mjerenje toplinske efuzivnosti betona komparativnom metodom 134
3.11. Obrada i analiza slike 134
4. EKSPERIMENTALNI RAD 136
4.1. Planiranje i provedba istraživanja 136
4.2. Eksperimentalni poligon 139
4.2.1. Beton za laboratorijske uzorke ploča 139
4.2.2. Program ispitivanja 141
4.2.3. Laboratorijski uzorci ploča 143
4.3. Mjerna oprema 149

4.3.1. Sustav IrNDT 149
4.3.2. Infracrvena kamera 149
4.3.3. Elektroničko sučelje za aktivnu termografiju 150
4.3.4. Power Box 151
4.3.5. Halogena Lampa 152
4.3.6. Uređaj Mathis TCi 153
5. REZULTATI I ANALIZA ISPITIVANJA 155
5.1. Svojstva betona u svježem stanju 155
5.2. Svojstva očvrslog betona 156
5.3. Koeficijent emisije betona 161
5.4. Ispitivanje toplinske difuzivnosti betona 163
5.5. Vrijednost toplinske provodljivosti prema ACI-u 175
5.6. Mjerenje toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti betona nestacionarnom metodom vrućeg diska 175
5.6.1. Korekcija kalibracijske krivulje betona za toplinsku efuzivnost 179
5.6.2. Korekcija kalibracijske krivulje betona za toplinsku provodljivosti 183
5.7. Rezultati ispitivanja toplinske efuzivnosti komparativnom metodom 187
5.8. Koeficijent refleksije toplinskog vala 193
6. REZULTATI I ANALIZA ISPITIVANJA IC TERMOGRAFIJOM 194
6.1. Prethodna obrada sekvenci termograma 194
6.2. Otkrivanje oštećenja transmitivnom metodom uz naknadnu obradu rezultata mjerenja – rezultati ispitivanja 196
6.3. Rezultati ispitivanja reflektnom metodom 210
6.3.1. Rezultati ispitivanja bez naknadne obrade rezultata mjerenja 213
6.3.2. Utjecaj refleksije na otkrivanje oštećenja 216
6.3.3. Rezultati ispitivanja korištenjem korelacijskih operatora 218
6.3.4. Rezultati ispitivanja korištenjem termografije glavnih komponenti 223
6.3.5. Termografija faznog impulsa – fazni prikaz 230
6.3.6. Termografija faznog impulsa – amplitudni prikaz 240
6.3.7. Rezultati ispitivanja kod obrade cijele sekvence grijanja i hlađenja 247
6.3.8. Rezultati ispitivanja kod obrade sekvence grijanja 253
7. KARAKTERIZACIJA OŠTEĆENJA 260

7.1. Karakterizacija oštećenja promatranjem oblika krivulje hlađenja 260

7.2. Određivanje promjera oštećenja 269

7.3. Model za određivanje dubine oštećenja 274

7.4. Model za određivanje debljine oštećenja 288

8. ZAKLJUČAK 291

8.1. Zaključci mjerenja toplinskih svojstava betona 293

8.1.1. Zaključci o ispitivanju toplinske difuzivnosti betona 293

8.1.2. Zaključci o ispitivanju toplinske provodljivosti betona 294

8.1.3. Zaključci o ispitivanju toplinske efuzivnosti betona 295

8.2. Zaključci ispitivanja postojanja oštećenja u betonu transmitivnom metodom 295

8.3. Zaključci ispitivanja postojanja oštećenja u betonu reflektnom metodom 297

8.3.1. Ispitivanje bez naknadne obrade rezultata mjerenja - zaključci 297

8.3.2. Ispitivanja korištenjem korelacijskih operatora - zaključci 298

8.3.3. Ispitivanje korištenjem termografije glavnih komponenti - zaključci 299

8.3.4. Ispitivanje korištenjem termografije faznog impulsa - zaključci 300

8.3.5. Rezultati mjerenja korištenjem cjelokupne sekvence i sekvence zagrijavanja - zaključci 301

8.4. Određivanje karakteristika oštećenja u betonu - zaključci 302

8.4.1. Karakterizacija oštećenja promatranjem krivulje hlađenja - zaključci 303

8.4.2. Određivanje promjera oštećenja - zaključci 303

8.4.3. Model za određivanje dubine oštećenja 304

8.4.4. Model za određivanje debljine oštećenja 304

8.5. Izvorni znanstveni doprinos 305

8.6. Preporuke za daljnja istraživanja 305

LITERATURA 307

ŽIVOTOPIS 322

Popis objavljenih radova 327

POPIS OZNAKA I SKRAĆENICA

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
A	Amplitude iz Fourierove transformacije	
Accuracy	Točnost mjerenja	
A_s	Oplošje promatranog tijela koja se zagrijava	
A_{tw}	Amplituda toplinskog vala	
a.u.	Proizvoljna jedinica	arbitrary units
b_h	Horizontalna dimenzija detektora (FPA)	Horizontal detector size (FPA)
Bi	Biotov broj	$Bi = \frac{h_{cc} \cdot \frac{V}{A_s}}{\lambda_c}$
b_v	Vertikalna dimenzija detektora (FPA)	Vertical detector size (FPA)
BM x − y	Oznaka uzorka, "x" označava betonsku mješavinu, "y" označava vrstu defekata u uzorku	
c	Brzina svjetlosti ($2{,}998\times10^8$ m/s)	
c_p	Specifični toplinski kapacitet	
C	Kontrast faznog prikaza	phase contrast
CFRP		Carbon fiber reinforced polymer
C_{TR}	Prag kontrasta (temperature ili faze)	contrast threshold
$C_{\max}$	Maksimalni kontrast faznog prikaza	
$\mathbf{Cov}$	matrica kovarijance	
$\mathbf{Cov_D}$	dijagonalizirana matrica s vlastitim vrijednostima na dijagonali	
C_{infl}	Koeficijent kalibracije kod određivanja dubine oštećenja	
C'_{infl}	Koeficijent kalibracije kod određivanja dubine oštećenja u slučaju postojanja armature	
C_r	koeficijent korelacije	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
d	Debljina oštećenja simuliranog u ploči	
d_{ud}	Udaljenost s koje se promatra objekat mjerenja	
d_{2r}	Promjer oštećenja simuliranog u ploči	
$d_{2r,n}$	Normalizirani promjer oštećenja	
D	Dubina delaminacije	
DAC	Tehnika diferencijalnog apsolutnog kontrasta	Differential absolute contrast technique
DFT	Diskretna Fourierova transformacija	
DTT	Dinamička toplinska tomografija	Dynamic thermal tomography
D_{max}	Maksimalno zrno agregata u betonu	
D_T	Normalizirana razlika temperatura na površini iznad oštećenja i neoštećenog betona	
e_{eff}	Toplinska efuzivnost	
$e_{eff}^{unknown}$	Toplinska efuzivnost nepoznatog materijala	
$e_{eff}^{reference}$	Toplinska efuzivnost referentnog materijala	
$e_{eff,BM\ x-y}$	Toplinska efuzivnost uzorka betona mješavine BM x-y	
$e_{eff,obj}$	Toplinska efuzivnost materijala objekta koji se promatra	
$e_{eff,d}$	Toplinska efuzivnost materijala oštećenja	
$e_{eff,ref}$	Toplinska efuzivnost referentnog uzorka	
EOF	Empirijske ortogonalne funkcije	empirical orthogonal functions
E(T)	Vlastita emisija zračenja realnog tijela pri određenoj temperaturi T u [K]	
$E_{ct}(T)$	Vlastita emisija zračenja crnog tijela pri određenoj temperaturi T u [K]	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
Extrinsic semiconductor	Ekstrinsični poluvodič	Poluvodič koji je dopiran s nečistoćama kako bi se modificirao broj i tip prisutnih slobodnih nosioca naboja.
f	Fokalna duljina	Focal distance
f_b	Granična frekvencija	Blind frequency
f_b'	Prividna granična frekvencija	
f_n	Dostupna frekvencija za koju postoji prikaz nakon FFT analize	$f_n = \frac{n}{N\Delta}$
f_{opt}	Optimalna frekvencija pri kojoj je razlika u fazi oštećenog i neoštećenog područja uzorka maksimalna	
f_T	Koeficijent korekcije zbog temperature	
f_u	Koeficijent korekcije zbog vlažnosti materijala, dano u % mase	
f_ψ	Koeficijent korekcije zbog vlažnosti materijala, dano u % volumena	
FC	Filtrirani kontrast	Filtered contrast
FFT	Brza Fouriereova transformacija	Fast Fourier Transform
FIR	Daleko područje valnih duljina IC spektra	Far infrared
F_a	Faktor korekcije za starost materijala	
F_G	Geometrijski faktor	Faktor koji ovisi o geometrijskim parametrima oštećenja i objekta koji se promatra, a definira mogućnost otkrivanja oštećenja
F_m	Faktor korekcije za vlažnost materijala	
F_T	Faktor korekcije za temperaturu materijala	
F_T	Toplinski faktor	Faktor koji ovisi o toplinskim karakteristikama

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
		oštećenja i objekta koji se promatra, a definira mogućnost otkrivanja oštećenja
FOV	Vidno polje	(Field of View, eng.) Površina koju detektira termografska kamera, ovisno je o udaljenosti objekta, izražava se u stupnjevima
FPA	FPA-detektor zračenja	Focal plane array
FRP	Vlaknima ojačan polimer	Fiber reinforced polymers
FWHM		Full Width, Half Maksimum technique
$f(\mathbf{x}, t)$	Modelska funkcija	
GFRP	Stakloplastika	Glass Fiber Reinforced Polymer
GPR	Georadar	Ground penetrating radar
h	Planckova konstanta ($6{,}626\times10^{-34}$ Js)	
h_{cc} $[W/m^2K]$	Koeficijent izmjene topline tijela s okolišem (uključuje konvekciju i kondukciju)	
HDR	Guma velike gustoće	high density rubber
HFOV	Horizontalno vidno polje kamere	Horizontal Field of View
I	jakost struje	
IC	Infracrveno	
ID	početno odstupanje	*initial deviation*
IFOV	Prostorna razlučivost kamere	Instantaneous Field of View
Im	Imaginarni dio Fourierove transformacije	
Image frequency	Frekvencija obnove slike	Vrijeme potrebno da kamera proizvede novi signal sa svakog pojedinog elementa (piksela) vidnog polja
Intrinsic semiconductor	Intrinsični poluvodič	Poluvodič koji je dovoljno čist da preostale nečistoće neznatno utječu na električna

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
		svojstva
IR resolution	Razlučivost IC detektora	
j	Imaginarna jedinica ($j^2 = -1$)	
k	Boltzmannova konstanta ($1{,}38\times10^{-23}$ J/K)	
$k_{eff,BM\ x-y}$	Koeficijent nagiba pravca regresije pri ispitivanju toplinske difuzivnosti uzorka betona mješavine BM x-y	
$k_{eff,ref}$	Koeficijent nagiba pravca regresije pri ispitivanju toplinske difuzivnosti referentnog uzorka	
L	Debljina uzorka, ploče	
L_0	Karakteristična linearna dimenzija krutine	
LDR	Guma male gustoće	low density rubber
LDRAl	Kompozit gume male gustoće i aluminija	low density rubber - aluminum
LT	Lock-in termografija	Lock-in thermography
LWIR	IC zračenje dugih valnih duljina	Long-wavelength infrared
m_c	Masa cementa	
m_3	Statistički moment trećeg reda	
m_4	Statistički moment četvrtog reda	
Minimum focus distance	Minimalna fokalna duljina	
mrad	mili radijan	
MIR	Srednje-valno područje IC spektra prema ISO 20473	Mid Infrared
MTF		Modulation transfer function
MWIR	IC zračenje srednjih valnih duljina	Mid-wavelength infrared
n	broj rezultata PPT, $n = 0{,}1{,}2, \ldots, N/2$	
N	Ukupni broj mjerenja, broj termograma u sekvenci	
NETD	Razlučljivost temperaturnih razlika	Noise equivalent temperature difference

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
NIR	Blisko područje valnih duljina IC spektra	Near infrared
N_{px}	Broj piksela na termogramu	
NTSC	National Television System Committee	naziv za sustav kodiranja boje koji se koristi za analogni televizijski signal (60Hz)
p	Opseg promatranog uzorka u smjeru normale s obzirom na smjer širenja toplinskih valova	
p	Laplaceova varijabla	
PAL	Phase Alternating Line	naziv za sustav kodiranja boje koji se koristi za analogni televizijski signal (50Hz)
PCA	Analiza glavnih komponenti	Principal component analysis
PCT	Vrijeme maksimalnog temperaturnog kontrasta	Peak Contrast Time
PMMA	Polimetilmetakrilat	polymethylmethacrylate
PPT	Termografija faznog impulsa	Pulse Phase Thermography
PSDT	Metoda maksimuma druge derivacije krivulje hlađenja	Peak Second Derivative Time
PST	Vrijeme maksimalnog nagiba	Peak Slope Time
PT	Impulsna termografija	Pulse thermography
Q	Magnituda modulirane topline koja se unosi u uzorak zagrijavanjem	Modulated heat
Q_P $[W/m^2]$	Specifična snaga zagrijavanja uzorka	
QWIP		Quantum Well Infrared Photodetectors
r_G	Udaljenost od središta Gaussove zrake	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
R	Električni otpor	
Re	Realni dio Fourierove transformacije	
RFC	Relativni filtrirani kontrast	relative filtered contrast
R_G^2	Radijus Gaussove zrake	
ROIC	Redout Integrated Circuit	
S	Površina presjeka promatranog uzorka u smjeru normale s obzirom na smjer širenja toplinskih valova	
S_b	Prosječna vrijednost faznog kuta u neoštećenom području uzorka	
SB kontrast	Kontrast između područja oštećenja i neoštećenog područja	Signal to Background contrast
$SC_{x,y}$	Standardni kontrast	
SH	Termografija koračnog grijanja	Step-Heating Thermography
SNR	Odnos signal-šum	Signal to noise ration
Spatial resolution	Prostorna razlučivost	Veličina točke u ovisnosti o udaljenosti objekta. Izražava se u miliradijanima kao omjer promjera točke koja odaje 95 % energije i udaljenosti
Spectral range	Spektralni raspon	Valna dužina infracrvenog zračenja koju registrira IC kamera
SVD	Dekompozicija na singularne vrijednosti	Singular Value Decomposition
SW camera	Kratkovalna kamera	Short vawe camera
SWIR	IC zračenje kratkih valnih duljina	Short-wavelength infrared
t	Vrijeme	
t_d	Optimalno vrijeme promatranja	Vrijeme potrebno da se postigne maksimalni nagib krivulje temperaturnog kontrasta (peak slope time)
t_h	Vrijeme zagrijavanja uzorka	Heating time

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
t_{infl}	vrijeme pojavljivanja točke infleksije na krivulji kontrasta	
t_{ID}	vrijeme početnog odstupanja	
t_m	Optimalno vrijeme promatranja	Vrijeme potrebno da se postigne maksimum razlike temperature oštećenog i neoštećenog područja na uzorku ΔT
t_{max}	Vrijeme tijekom mjerenja kod kojeg promatrani parametar ima maksimalnu vrijednost	
t_x	Vrijeme potrebno da se postigne određeni postotak maksimalne temperature uzorka	
$t_{0,3}$	Vrijeme potrebno da se postigne 30% maksimalne temperature uzorka	
$t_{0,5}$	Vrijeme potrebno da se postigne 50% maksimalne temperature uzorka	
$t_{0,7}$	Vrijeme potrebno da se postigne 70% maksimalne temperature uzorka	
T	Apsolutna temperatura tijela	
T_{amb}	Temperatura okoline promatranog objekta	
τ_{atm}	Koeficijentom transmisije atmosfere	
T_{atm}	Temperatura atmosfere	
T_{av}^{i}	Prosječna temperatura i-tog termograma	
$\overline{T_d}$	Srednja temperatura na području oštećenja,	
T_d	Temperatura zone koja sadrži oštećenja	
$T_D^i(x,y)$	Razlika temperature između neobrađenih podataka $T_i(x,y)$ i srednje temperature i-tog termograma T_{av}^{i}	
$T_i(x,y)$	Temperatura piksela (x,y) i-tog	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
	termograma	
T_o	Temperatura okoline	
T_{ob}	Temperatura umjernog crnog tijela	
T_{object}	Temperatura promatranog objekta	
T_r	Temperatura neoštećenog materijala prije početka zagrijavanja	
$T_{reference}$	Temperatura površine referentnog materijala	
T_{refl}	Reflektirana prividna temperatura	
$\overline{T}_s$	Srednja temperature na „neoštećenom“ području	
T_s	Temperature neoštećene zone	
TSR	Rekonstrukcija termografskog signala	Thermographic signal reconstruction
$T_{unknown}$	Temperatura površine nepoznatog materijala	
Temperature range	Temperaturni opseg	
NETD	Temperaturna razlučivost	(Noise equivalent temperature difference) Najmanja razlika temperature koju termografska kamera može razlučiti od šuma
$T_{pix}(i,j,t)$	Temperatura piksela (i,j) u trenutku vremena t	
$T_{surr(i,j)}(t)$	Srednja temperatura susjednih piksela pikselu (i,j) u promatranom trenutku vremena t	
TT	Toplinska tomografija	Thermal Tomography
u_1	Maseni sadržaj vlage prvog skupa podataka	
u_2	Maseni sadržaj vlage drugog skupa podataka	
U	Napon	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
U_n	Napon šuma	
Uncooled microbolometer	Nehlađeni mikrobolometar	Vrsta ID termometra, obično na bazi otporničkog osjetnika temperature
v/c	Vodocementni omjer	
V	Volumen promatranog tijela	
VFOV	Vertikalno vidno polje kamere	Vertical Field of View
VLWIR	IC zračenje vrlo dugih valnih duljina	Very-long wave infrared
VT	Vibrotermografija	Vibrothermography
W_{uk}	Ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina realnog tijela	
W_x	Konstanta koja prema teorijskom rješenju povezuje α_{diff}, L i t_x	$\alpha_{diff} = \frac{W_x L^2}{\pi^2 t_x}$
x_i	Pojedinačni rezultati mjerenja,	
$\overline{X}$	Srednja vrijednost rezultata mjerenja,	
XPS	Ekstrudirani polistiren	
z	Dubina ispod površine promatranog objekta	
α	Koeficijent apsorpcije	omjer apsorbiranog i upadnog zračenja
α_{diff}	Toplinska difuzivnost	
$\alpha_{diff,d}$	Toplinska difuzivnost materijala oštećenja	
α_T	Temperaturni koeficijent električnog otpora	
α_3	Asimetričnost	Skeweness
α_4	Kurtičnost - spljoštenost	Kurtosis
$\alpha_{diff,II}$	Toplinska difuzivnost materijala paralelno na toplinski tok	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
$\alpha_{diff,\perp}$	Toplinska difuzivnost materijala okomito na toplinski tok	
$\mathcal{L}^{-1}$	Inverzna Laplaceova transformacija	
$\gamma(\lambda)$	Ukupni koeficijent atenuacije zračenja	
δ	Kut u odnosu na normalu na tijelo koje se promatra IC kamerom	
Δ	vremenski interval između dva termograma	
ΔL	Smanjenje debljine uzorka, ploče	
ΔT	Temperaturna razlika ili toplinski kontrast	temperature difference or thermal contrast
$\Delta\bar{T}$	Bezdimenzionalna promjena temperature površine uzorka nakon zagrijavanja (temperaturni kontrast)	
$\Delta T_{3D}(x, y, t)$	Temperaturni kontrast u slučaju 3D prijenosa topline	
ΔU_s	Porast napona uzrokovan razlikom temperature umjernog crnog tijela i temperature okoline	
$\Delta\phi$	Apsolutni fazni kontrast	
ε	Koeficijent emisije realnog tijela	
λ	Valna duljina zračenja	
λ_c	Toplinska provodljivost	
$\lambda_{c,d}$	Toplinska provodljivost materijala oštećenja	
$\lambda_{c,rel}$	Relativna toplinska provodljivost	$\lambda_{c,rel} = \frac{\lambda_{c,s} - \lambda_{c,d}}{\lambda_{c,s}}$
$\lambda_{c,s}$	Toplinska provodljivost neoštećenog materijala promatranog objekta	
λ_{c1}	Toplinska provodljivost materijala prije korekcije za temperaturu i vlažnost	
λ_{c2}	Toplinska provodljivost materijala nakon korekcije za temperaturu i vlažnost	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
λ_{max}	Valna duljina koja odgovara maksimumu izračene energije	
λ_{tw}	Valna duljina toplinskog vala	
μ	Trajanje toplinske difuzivnosti	Thermal diffusion length
μ_d	Trajanje toplinske difuzivnosti oštećenog područja uzorka	
μ_s	Trajanje toplinske difuzivnosti neoštećenog područja uzorka	
υ	Frekvencija zračenja	
v_{tw}	Brzina širenja toplinskog vala	
ρ	Koeficijent refleksije	omjer reflektiranog i upadnog zračenja
ρ_m	Volumenska masa materijala	
$\rho_{m,\,dry}$	Volumenska masa suhog materijala	
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta ($5{,}67\times10^{-8}$ W/m^{2}K^4)	
$\sigma_{b,d}$	Standardna devijacija šuma na području oštećenja	
$\sigma_{b,s}$	Standardna devijacija pozadinskog šuma na neoštećenom području uzorka	
σ_{sc}	Koeficijent raspršenja zračenja	
σ_s	Standardna devijacija temperature na neoštećenom području	
σ_s	Standardna devijacija rezultata mjerenja,	
τ	Koeficijent transmisije	omjer propuštenog i upadnog zračenja
ϕ_d	Faza zone koja sadrži oštećenja	
ϕ_s	Faza zone neoštećene zone	
ϕ_{tw}	Faza toplinskog vala	
$\emptyset$	Faza iz Fourierove transformacije	
$\emptyset_{amb}$	Snaga zračenja iz okoline	

Oznaka (engleski naziv)	**Objašnjenje (hrvatski naziv)**	**Definicija**
$\emptyset_{bb}$	Snaga zračenja s crnog tijela	
$\emptyset_{\mathrm{d}}$	Vrijednost faze za oštećeno područje uzorka	
$\emptyset_{det}$	Ukupna upadna snaga zračenja na detektoru	
$\emptyset_{i}$	Doprinosi pojedinih fenomena snazi zračenja	
$\emptyset_{object}$	Snaga zračenja s promatranog objekta	
ψ_1	Volumni sadržaj vlage prvog skupa podataka	
ψ_2	Volumni sadržaj vlage drugog skupa podataka	
ω	Kutna modulacijska frekvencija	

POPIS SLIKA

Slika	Naslov slike	Stranica
Poglavlje 3		
Slika 3.1	Spektri zračenja crnog tijela za različite temperature – Planckove krivulje [Kreith et al., 2011]	10
Slika 3.2	Wienov zakon [Vollmer & Moellmann, 2010]	11
Slika 3.3	Spektar elektromagnetskog zračenja [Ibarra-Castanedo, 2005]	12
Slika 3.4	Propusnost atmosfere na infracrveno zračenje [Kaplan 2007]	14
Slika 3.5	Raspodjela upadnog zračenja [Galović 2003]	15
Slika 3.6	Modeli crnog tijela [Minkina & Dudzik 2009]	16
Slika 3.7	Crno tijelo je idealni difuzni emiter koji emitira zračenje jednoliko u svim smjerovima [Vollmer & Moellmann, 2010]	16
Slika 3.8	Aproksimacija spektralne hemisferne raspodjele koeficijenta emisije obojane površine sivim tijelom [Kreith et al. 2011]	18
Slika 3.9	Raspodjela snage zračenja crnog tijela, realnog i sivog tijela za odabranu temperaturu T [Pašagić 2008, Vollmer & Moellmann 2010]	18
Slika 3.10	Raspodjela spektralne gustoće zračenja crnog tijela i realnog tijela ovisno o kutu promatranja u odnosu na normalu na površinu [Vollmer & Moellmann 2010]	20
Slika 3.11	Koeficijent emisije crnog tijela, realnog i sivog tijela za odabranu temperaturu T [Vollmer & Moellmann 2010]	20
Slika 3.12	Ovisnost koeficijenta emisije o kutu zaokreta [Vollmer & Moellmann 2010]	22
Slika 3.13	Shematski prikaz ovisnosti koeficijenta emisije o otklonu od normale za metale i nemetale [Vollmer & Moellmann 2010]	22
Slika 3.14	Temeljni proces optičke pobude u poluvodičima (a) intrinzična (vlastita) apsorpcija, (b) ekstrinzična apsorpcija, (c) apsorpcija slobodnog nosioca [Rogalski 2011]	26
Slika 3.15	Relativni spektralni odaziv fotonskog i toplinskog detektora [Rogalski 2011]	26
Slika 3.16	Shematski prikaz rada toplinskog detektora [Rogalski 2012]	27
Slika 3.17	InSb FPA detektor [Tissot J.L., Bertrand F. 1999]	28
Slika 3.18	Shematski prikaz presjeka mikrobolometra [FLIR 2008, Rogalski 2012]	28

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 3.19	Specifična detektabilnost Dλ* različitih fotonskih i toplinskih detektora [Vollmer & Moellmann 2010]	30
Slika 3.20	Vidno polje kamere [Vollmer & Moellmann 2010]	31
Slika 3.21	Prikaz razlike između FOV i IFOV	31
Slika 3.22	Radiometarski lanac – osnovni postupak mjerenja [Vollmer & Moellmann, 2010]	32
Slika 3.23	Isti termogram u različitim paletama boja	37
Slika 3.24	Konvencija označavanja koordinata na termogramima - 2D [Maldague 2001]	38
Slika 3.25	Vrste prikaza podataka, a) 3D; b) 1D vremenski razvoj	38
Slika 3.26	Tehnike aktivne termografije [Ibarra-Castanedo et al. 2007]	40
Slika 3.27	Razvoj temperature površine uzorka kao funkcija drugog korijena iz vremena [Maldague 2001]	44
Slika 3.28	Shematski prikaz vibrotermografije [Zweschper et al. 2003]	45
Slika 3.29	Shematski prikaz impulsne termografije [Spiessberger et al. 2010]	46
Slika 3.30	Shematski prikaz Lock-in termografije [Spiessberger et al. 2010]	47
Slika 3.31	Pronalaženje vrijednosti amplitude i faze toplinskog vala [Ibarra-Castanedo 2005]	48
Slika 3.32	Eksperimentalna konfiguracija PT i LT [Ibarra-Castanedo 2005]	51
Slika 3.33	Prikaz sekvenci amplitude a) i faze b) i njihovi pripadajući profili u frekvencijskom spektru za piksel (i,j) na području bez oštećenja [Ibarra-Castanedo 2005]	52
Slika 3.34	Amplituda [dB] dugotrajnog pravokutnog toplinskog impulsa u frekvencijskoj domeni	52
Slika 3.35	Sekvenca od N termograma	54
Slika 3.36	Formiranje 2D rasterske matrice iz sekvence termograma	56
Slika 3.37	Termogram (3D i 2D prikaz) uzorka BM 1-1 d, udaljenost 1,5 m	57
Slika 3.38	PCT EOF_1 (3D i 2D prikaz) uzorka BM 1-1 d, udaljenost 1,5 m	57
Slika 3.39	PCT EOF_2 (3D i 2D prikaz) uzorka BM 1-1 d, udaljenost 1,5 m	58
Slika 3.40	Korelacijski koeficijenti dvije varijable X i Y [Klein et al. 2008]	58
Slika 3.41	Termogram uzorka BM 1-3 d udaljenost toplinske pobude 2m, temperatura	59

Slika	Naslov slike	Stranica
	[K]	
Slika 3.42	Razvoj temperature piksela, period hlađenja uzorka	59
Slika 3.43	Korelogrami razvoja temperature uzorka BM 1-3 D udaljenost 2m; a) za neoštećeni dio uzorka; b) za oštećenje	60
Slika 3.44	Korelirani kontrast uzorka BM 1-3 d udaljenost 2m; a) 3D prikaz; b) 2D prikaz	60
Slika 3.45	Termogram i fotografija oštećenja kolničke ploče (zaustavne trake) mosta Krapina na autocesti Zagreb - Macelj	61
Slika 3.46	Termogram i fotografija prijelazne naprave tipa „Silent Joint“ na mostu Krapina na autocesti Zagreb - Macelj	62
Slika 3.47	Termogram i fotografija oštećenja kolničke ploče mosta Krapina na autocesti Zagreb - Macelj	62
Slika 3.48	Termogram i fotografija oštećenja kolničke ploče mosta Krapina na autocesti Zagreb - Macelj	62
Slika 3.49	Prikazi faznog pomaka [Sakagami & Kubo, 2002] a) trajanje zagrijavanja 15 min; b) trajanje zagrijavanja 35 min	64
Slika 3.50	Spektar amplituda nestacionarnih krivulja hlađenja [Weritz et al., 2005]	66
Slika 3.51	Spektar faza nestacionarnih krivulja hlađenja [Weritz et al., 2005]	66
Slika 3.52	Prikaz amplituda za frekvenciju 0,14 mHz [Weritz et al., 2005]	66
Slika 3.53	Prikaz faza za frekvenciju 0,14 mHz [Weritz et al., 2005]	66
Slika 3.54	Shematski prikaz uzorka sa simuliranim mjestima lošeg injektiranja natega za prednapinjanje [Maierhofer, Arndt, Rollig, et al., 2006]	67
Slika 3.55	Termogram snimljen 40 min nakon početka zagrijavanja natega elektrootpornim grijačima (tamna područja su ispunjena zrakom, a svijetla s injekcijskom smjesom) [Maierhofer, Arndt, Rollig, et al., 2006]	68
Slika 3.56	Termogram uzorka zida a) 140 s nakon početka hlađenja, b) 660 s nakon početka hlađenja uzorka [Meola, 2007b]	69
Slika 3.57	Razvoj temperature površine betona iznad oštećenja i „zdravog“ betona i razlika krivulja s maksimumom u točki P_{tmax},ΔT_{max} [Maierhofer et al., 2007]	69
Slika 3.58	Maksimalna temperaturna razlika i vrijeme njezinog pojavljivanja kao funkcije tlačne čvrstoće betona [Maierhofer et al., 2007]	69
Slika 3.59	Veza između D_T i D_e [Meola, 2007]; a) $\lambda_{c,rel}$=0,95-0,99 (zrak u betonu); b) $\lambda_{c,rel}$=0,5-0,9 (voda u betonu)	71

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 3.60	Rezultati prema [Abdel-Qader et al., 2008] a) izvorni termogram, b) zametak oštećenja (seed image), c) modificirani SRG algoritam, d) modificirani SRG algoritam s morfološkom korekcijom	73
Slika 3.61	Fotografija lampe (6 kW) i shematski prikaz mjerenja skenirajućim sustavom [Kurita et al., 2009]	73
Slika 3.62	Termogrami [Kurita et al., 2009]; a) termogram prije toplinske pobude; b) termogram tijekom toplinske pobude; c) termogram 10 s nakon toplinske pobude; d) pseudo termogram nakon analize	74
Slika 3.63	Usporedba termograma (lijevo) i rezultata druge derivacije sekvence termograma (desno) koji daje bolji kontrast [Nahant et al., 2010]	75
Slika 3.64	Krivulja hlađenja uzorka nakon toplinske pobude bljeskom u trajanju od 10 ms [Dumoulin et al., 2010]	76
Slika 3.65	Krivulja razvoja temperature površine uzorka tijekom zagrijavanja u trajanju od 30 s i hlađenja uzorka [Dumoulin et al., 2010]	76
Slika 3.66	Krivulja temperaturnog kontrasta nakon toplinske pobude bljeskom u trajanju od 10 ms [Dumoulin et al., 2010]	76
Slika 3.67	Razvoj temperaturnog kontrasta tijekom zagrijavanja u trajanju od 30 s i hlađenja uzorka [Dumoulin et al., 2010]	76
Slika 3.68	Razvoj temperature (lijevo) i faze (desno) ovisno o frekvenciji za područje iznad oštećenja (čelik) i neoštećeno područje [Dumoulin et al., 2010]	77
Slika 3.69	Rezultati ispitivanja [Van Leeuwen et al., 2011]; a) shema uzorka; b) termogram nakon toplinske pobude; c) fazni prikaz pri 0,000185 Hz; d) fazni prikaz pri 0,00092 Hz	77
Slika 3.70	Sekvenca termograma tijekom ciklusa od jednog dana; a) tijekom zagrijavanja; b) kraj procesa rasta temperature; c) tijekom procesa hlađenja; d) kraj hlađenja [Dumoulin & Averty, 2012]	78
Slika 3.71	Rezultati istraživanja [Dumoulin & Averty, 2012] a) Prikaz amplituda nakon FFT analize; b) prikaz treće EOF	79
Slika 3.72	Usporedba prikaza razvoja temperature na čeličnom uzorku u linearnom a) i logaritamskom mjerilu b) [Shepard et al., 2003]	81
Slika 3.73	Ovisnost dubine oštećenja o ponašanju krivulje razvoja temperature u logaritamskom mjerilu [Shepard et al., 2004]	82
Slika 3.74	Termograma a) i prva derivacija termograma b) dobiveni nakon impulsne pobude (PT) čelične ploče [Shepard et al., 2003]	83
Slika 3.75	Usporedba signala neobrađene sekvence termograma (crno) i rekonstruirane sekvence termograma (sivo) [Shepard et al., 2003]	84
Slika 3.76	Prikaz TSR signala jednog piksela iznad neoštećenog područja (crno) i	84

Slika	Naslov slike	Stranica
	oštećenog područja (sivo) na uzorku čelika a) prva derivacija signala; b) druga derivacija signala [Shepard et al., 2003]	
Slika 3.77	a) Usporedba neobrađenih podataka (crno) i TSR podataka (sivo) prema položaju piksela na liniji koja prolazi kroz središte oštećenja (934 ms nakon zagrijavanja); b) prva derivacija TSR podataka za istu liniju [Shepard et al., 2003]	85
Slika 3.78	Razvoj temperature piksela i njegova prva i druga derivacija u log-log domeni za pločasti uzorak s adijabatskim granicama [Balageas, 2010]	86
Slika 3.79	a) Asimetričnost, b) Kurtičnost (spljoštenost) distribucije [Usamentiaga et al., 2012]	87
Slika 3.80	a) Razvoj temperature tri piksela u vremenu; b) histogrami promatrana tri piksela [Madruga et al., 2008]	88
Slika 3.81	Prikazi asimetričnosti (skewness) za uzorke CFRP-a s nejednolikim zagrijavanjem [Madruga et al., 2008]	89
Slika 3.82	Prikazi asimetričnosti (skewness) za za uzorke CFRP-a a) 300 termograma u sekvenci; b)1800 termograma u sekvenci [Madruga et al., 2008]	89
Slika 3.83	Druga derivacija rezultata impulsne termografije pri 0,367s [Genest et al., 2007]	90
Slika 3.84	Usporedba rezultata ispitivanja (druga glavna komponenta) za a) duraluminij; b) čelik [Vavilov & Marinetti, 2009]	91
Slika 3.85	Usporedba a) analiziranih valova toplinske pobude; b) relativnih normaliziranih spektara snage [Pitarresi, 2012]	92
Slika 3.86	Fazni prikazi dobiveni korištenjem tri različite lock-in frekvencije (f_r), pri čemu je glavna frekvencija nosioc f_c=16,7 mHz [Pitarresi, 2012]	93
Slika 3.87	Razvoj temperature na površini uzorka može se promatrati kao superpozicija više toplinskih valova [Goetschel et al., 2012]	93
Slika 3.88	Rezultati toplinske tomografije a) termogram; b) maksigram; c) vrijemegram; d) tomogram (sloj 0,24 - 0,31 mm); e) tomogram (sloj 0,42 – 0,54 mm); f) tomogram (sloj 0,60 – 0,66 mm); g) tomogram (sloj 0,67 – 0,69 mm); h) tomogram (sloj 0,71 – 0,90 mm) [Swiderski, 2009]	96
Slika 3.89	Rezultati tehnike temperaturnog kontrasta za odabrane točke s termograma (a) [Ibarra-Castanedo et al., 2007]	97
Slika 3.90	Neobrađeni termogrami uzoraka kompozita grafit-epoksi u različitim trenucima t [Pilla et al., 2002]	98
Slika 3.91	Prikazi uzoraka kompozita grafit-epoksi nakon obrade rezultata mjerenja DAC tehnikom [Pilla et al., 2002]	98
Slika 3.92	Usporedba rezultata dobivenih primjenom klasične DAC tehnike a) i	99

Slika	Naslov slike	Stranica
	rezultata dobivenih modificiranom DAC tehnikom b) za uzorke CFRP-a [Benítez et al., 2008]	
Slika 3.93	Rezultati PPT tehnike (fazni prikaz) pri frekvenciji a) 0,15 Hz; b) 0,47 Hz; c) 0,63 Hz; d) 1,10 Hz; e) 2,21 Hz [Ibarra-Castanedo et al., 2007]	100
Slika 3.94	Obrade rezultata ispitivanja korištenjem PCA tehnike za nekorigirane rezultate (gornji red) i predprocesuirane podatke (oduzimanje hladnog termograma): a) EOF_1, b) EOF_2; c) EOF_3; d) EOF_4; e) EOF_5 [Ibarra-Castanedo et al., 2007]	101
Slika 3.95	Temperaturni odziv i kontrast s označenim relevantnim karakterističnim vremenima [Rajic 2002b]	102
Slika 3.96	Shematski prikaz parametra FWHM na krivulji [Almond et al., 1996]	103
Slika 3.97	Neobrađeni i obrađeni termogram, pukotina u uzorku titana, dobivena VT tehnikom [Holland & Renshaw, 2010]	103
Slika 3.98	Fazni prikaz CFRP uzorka sa simuliranim oštećenjima, frekvencija 0,3 Hz [Ibarra-Castanedo & Maldague, 2005]	105
Slika 3.99	Prikaz ovisnosti dubine oštećenja i granične frekvencije fb [Ibarra-Castanedo & Maldague, 2005]	105
Slika 3.100	Termogram čeličnog uzorka sa različitim sučeljcima [Zeng, Li, et al., 2012]	107
Slika 3.101	Krivulje temperaturnog kontrasta imaju svoj maksimum u istom trenutku vremena za dva različita oštećenja [Wysocka-Fotek et al., 2012]	108
Slika 3.102	Vrijeme maksimalnog temperaturnog kontrasta u usporedbi s promjerom oštećenja i dubinom na kojoj se oštećenje nalazi [Wysocka-Fotek et al., 2012]	108
Slika 3.103	Distribucija vremenske derivacije temperature [Wysocka-Fotek et al., 2012]	108
Slika 3.104	Profil vremenske derivacije temperature korištene za određivanje promjera oštećenja [Wysocka-Fotek et al., 2012]	109
Slika 3.105	Odnos optimalne frekvencije i dubine oštećenja iz 1D modela [Ishikawa et al., 2013]	109
Slika 3.106	Teorijsko rješenje za odnos faktora ωd i odnosa dubine oštećenja i debljine uzorka [Vageswar et al., 2010]	110
Slika 3.107	Odnos omjera karakterističnih vremena i omjera preostale debljine oštećenog i debljine neoštećenog dijela uzorka [Vageswar et al., 2010]	111
Slika 3.108	Temperaturni kontrast kao funkcija vremena za različita oštećenja u GFRP uzorku [Lahiri et al., 2012]	112
Slika 3.109	Odnos omjera dubine oštećenja i korijena i vremena t_{max} te vrijednosti C_{max}	112

Slika	Naslov slike	Stranica
	u logaritamskom mjerilu [Lahiri et al., 2012]	
Slika 3.110	Rezultati mjerenja korištenjem LT i PPT tehnike, fazni prikaz i prikaz amplitude pri različitim frekvencijama [Montanini, 2010]	113
Slika 3.111	Usporedba nominalne vrijednosti veličine oštećenja i rezultata dobivenih korištenjem IC termografije za različite dubine oštećenja [Montanini, 2010]	115
Slika 3.112	a) Termogram (t=4s); b) prikaz standardnog kontrasta pri 120 s, s ozačenim oštećenjima 1-4 i neoštećenim područjem 5 [Grys, 2012]	115
Slika 3.113	Skica koordinatnog sustava [Cernuschi et al., 2001]	124
Slika 3.114	Ovisnost temperature o udaljenosti od središta Gaussove zrake u vremenu [Cernuschi et al., 2001]	124
Slika 3.115	Ovisnost temperature o udaljenosti od središta Gaussove zrake [Cernuschi et al., 2001]	124
Slika 3.116	Bezdimenzionalni razvoj temperature stražnje strane uzorka [Wróbel & Rdzawski, 2009]	126
Slika 3.117	Prikaz temperaturnih profila iznad temperature okoliša [Bison et al., 2012]	128
Slika 3.118	Prikaz rezultata ispitivanja i aproksimacijske krivulje [Bison et al., 2012]	128
Slika 3.119	Mjerenje toplinske difuzivnosti metodom bljeska uz korištenje pregrade s vertikalnim reškama [Krapez et al., 2004]	130
Slika 3.120	Periodična distribucija topline na uzorak [Krapez et al., 2004]	130
Slika 3.121	Senzor Mathis Tci uređaja	130
Slika 3.122	Linearna ovisnost otpora senzora i njegove temperature	131
Slika 3.123	Promjena napona senzora u vremenu [C-Therm, 2009]	132
Slika 3.124	Odnos 1/m i toplinske efuzivnosti [C-Therm, 2002]	133
Slika 3.125	Izgled kalibracijske krivulje za toplinsku provodljivost [C-Therm, 2002]	133
Slika 3.126	Dvodimenzionalan izgled konvolucijske maske Gaussovog filtera za $\sigma=1$ i $\sigma=4$	134
Poglavlje 4		
Slika 4.1	Shematski prikaz transmitivne metode mjerenja	137
Slika 4.2	Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 2,0 m od površine uzorka, transmitivna metoda ispitivanja	137
Slika 4.3	Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 1,5 m od površine uzorka	138

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 4.4	Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 3,0 m od površine uzorka	138
Slika 4.5	Granulometrijski sastav prirodnog agregata, Smontara	139
Slika 4.6	Granulometrijski sastav drobljenog agregata, Očura	139
Slika 4.7	Položaj simuliranih defekata BM x-1 – utjecaj promjera defekata	144
Slika 4.8	Položaj simuliranih defekata BM x-2 – utjecaj debljine defekata na detekciju	145
Slika 4.9	Položaj simuliranih defekata BM x-3 – utjecaj razmaka armature na detekciju defekata	146
Slika 4.10	Fotografija defekata BM x-1	146
Slika 4.11	Fotografija defekata BM x-2	146
Slika 4.12	Fotografija defekata BM x-3	146
Slika 4.13	Kalupi za izradu laboratorijskih uzoraka, ploča BM x-1 do BM x-3	147
Slika 4.14	Simulacije oštećenja od XPS-a	147
Slika 4.15	Učvršćenje simulacije oštećenja korištenjem paljene žice	147
Slika 4.16	Armatura korištena za izradu uzoraka oznake BM x-3	147
Slika 4.17	Uzorci mješavine BM 1-y	148
Slika 4.18	Uzorci mješavine BM 2-y	148
Slika 4.19	Uzorci mješavine BM 3-y	148
Slika 4.20	Shematski prikaz sustava IrNDT	149
Slika 4.21	Termovizijska kamera FLIR P 640	150
Slika 4.22	IRX-Box elektroničko sučelje	151
Slika 4.23	Princip rada jednofaznog regulatora napona [Šunde 2011]	151
Slika 4.24	Power Box	152
Slika 4.25	Halogena lampa korištena pri ispitivanjima	152
Slika 4.26	Uređaj Mathis TCi [C-Therm, 2009]	153
Slika 4.27	Senzor Mathis Tci uređaja	153
Slika 4.28	Shematski prikaz rada uređaja Mathis TCi	154

Slika	Naslov slike	Stranica
Poglavlje 5		
Slika 5.1	Izgled uzorka neposredno nakon betoniranja	155
Slika 5.2	Uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće	155
Slika 5.3	Volumenska masa betona iz vlažne komore	156
Slika 5.4	Tlačna čvrstoća betonskih mješavina	156
Slika 5.5	Uzorci ispiljeni za ispitivanje plinopropusnosti, apsorpcije i kapilarnog upijanja	157
Slika 5.6	Rezultati ispitivanja plinopropusnosti uzoraka betona	158
Slika 5.7	Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja uzoraka betona kao funkcija vremena [min]	159
Slika 5.8	Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja uzoraka betona kao funkcija √s	160
Slika 5.9	Srednje vrijednosti koeficijenata vodoupojnosti uzoraka betona	160
Slika 5.10	Uzorak BM 1-y-1 za mjerenje koeficijenta emisije betona	161
Slika 5.11	Uzorci za mjerenje koeficijenta emisije betona	161
Slika 5.12	Termogram i uzorak BM 1-y-2 za mjerenje koeficijenta emisije betona	162
Slika 5.13	Termogram i uzorak BM 2-y-1 za mjerenje koeficijenta emisije betona	162
Slika 5.14	Termogram i uzorak BM 3-y-3 za mjerenje koeficijenta emisije betona	163
Slika 5.15	Sustav za ispitivanje toplinske difuzivnosti	163
Slika 5.16	Tipični uzorci za ispitivanje toplinske difuzivnosti betona	164
Slika 5.17	Zaslon za sprječavanje dodatnog zagrijavanja uzorka zračenjem nakon isključivanja lampe	165
Slika 5.18	Primjer postavljanja uzorka pred reflektor, bez korištenja zaslona tijekom hlađenja	165
Slika 5.19	Primjer postavljanja uzorka pred reflektor, uz korištenje zaslona tijekom hlađenja	165
Slika 5.20	Temperatura na površini uzorka - zaslon između lampe i uzorka	166
Slika 5.21	Temperature površina uzoraka tijekom ispitivanja toplinske difuzivnosti bez korištenja zaslona	167
Slika 5.22	Temperature površina uzoraka tijekom ispitivanja toplinske difuzivnosti uz korištenja zaslona	168

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 5.23	Razvoj temperature površine uzorka i temperature lampe uz korištenje zaslona, uzorak BM 1-y-1	168
Slika 5.24	Razvoj bezdimenzionalne vrijednosti U(L,t) u vremenu sa stražnje strane uzoraka	169
Slika 5.25	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 1-y-1, promatrano od početka zagrijavanja	169
Slika 5.26	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 1-y-2, promatrano od početka zagrijavanja	169
Slika 5.27	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 1-y-3, promatrano od početka zagrijavanja	170
Slika 5.28	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 2-y-1, promatrano od početka zagrijavanja	170
Slika 5.29	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 2-y-2, promatrano od početka zagrijavanja	170
Slika 5.30	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 2-y-3, promatrano od početka zagrijavanja	170
Slika 5.31	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 3-y-1, promatrano od početka zagrijavanja	171
Slika 5.32	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 3-y-2, promatrano od početka zagrijavanja	171
Slika 5.33	Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 3-y-3, promatrano od početka zagrijavanja	171
Slika 5.34	Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja toplinske difuzivnosti betona, uz analizu rezultata prema [Parker et al., 1961]	173
Slika 5.35	Odnos toplinske difuzivnosti i sadržaja pora u svježem betonu	174
Slika 5.36	Odnos toplinske difuzivnosti i volumenske mase očvrslog betona – suhi uzorak	174
Slika 5.37	Odnos toplinske difuzivnosti i tlačne čvrstoće betona (28 dana)	174
Slika 5.38	Odnos toplinske difuzivnosti i koeficijenta plinopropusnosti betona	174
Slika 5.39	Ispitivanje toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka betona	175
Slika 5.40	Prikaz površine uzorka za ispitivanje toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti betona	175
Slika 5.41	Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka: a) BM 1-y-1; b) BM 1-y-2	176

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 5.42	Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka: a) BM 2-y-2; b) BM 2-y-3	176
Slika 5.43	Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka: a) BM 3-y-1; b) BM 3-y-2	177
Slika 5.44	Odnos toplinske provodljivosti betona	177
Slika 5.45	Odnos toplinske efuzivnosti betona	177
Slika 5.46	Uzorak izrađen od recikliranog betona a) i reciklirane opeke b) u sklopu projekta ECO-SANDWICH	179
Slika 5.47	Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku efuzivnost uređaja Mathis Tci za primjenu na betonu	181
Slika 5.48	Rezultati ispitivanja toplinske efuzivnosti betona metodom vrućeg diska	182
Slika 5.49	Usporedba toplinske efuzivnosti i tlačne čvrstoće betona	183
Slika 5.50	Usporedba toplinske efuzivnosti i volumenske mase zasićenog uzorka	183
Slika 5.51	Usporedba toplinske efuzivnosti i sadržaja pora u svježem betonu	183
Slika 5.52	Usporedba toplinske efuzivnosti i volumenske mase suhog uzorka	183
Slika 5.53	Kalibracijska krivulja za određivanje toplinske provodljivosti tehničke keramike prema proizvođaču uređaja Mathis TCi	184
Slika 5.54	Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku provodljivost uređaja Mathis Tci za primjenu na betonu	185
Slika 5.55	Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti betona metodom vrućeg diska	186
Slika 5.56	Usporedba toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće betona	186
Slika 5.57	Usporedba toplinske provodljivosti i volumenske mase zasićenog uzorka	186
Slika 5.58	Usporedba toplinske provodljivosti i sadržaja pora u svježem betonu	187
Slika 5.59	Usporedba toplinske provodljivosti i volumenske mase suhog uzorka	187
Slika 5.60	Sustav za ispitivanje toplinske efuzivnosti	187
Slika 5.61	Uzorak betona za ispitivanje toplinske efuzivnosti	188
Slika 5.62	Uzorci poznate toplinske efuzivnosti	188
Slika 5.63	Sekvenca termograma neposredno prije i tijekom zagrijavanja uzorka betona i referentnog uzorka u ukupnom trajanju od 30 s	189
Slika 5.64	Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyroceram)	190

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 5.65	Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyrex)	190
Slika 5.66	Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyroceram)	190
Slika 5.67	Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyrex)	190
Slika 5.68	Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyroceram)	190
Slika 5.69	Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyrex)	190
Slika 5.70	Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyroceram)	191
Slika 5.71	Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyrex)	191
Slika 5.72	Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyroceram)	191
Slika 5.73	Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyrex)	191
Slika 5.74	Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyroceram)	191
Slika 5.75	Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyrex)	191
Poglavlje 6		
Slika 6.1	BM 3-1 s donje strane, optimalni termogram rezolucije 640 x 480 piksela	194
Slika 6.2	BM 3-1 s donje strane, optimalni termogram rezolucije 160 x 120 piksela	194
Slika 6.3	Shematski prikaz postupka transformacije matrica	194
Slika 6.4	Optimalni termogrami uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom	195
Slika 6.5	Optimalni termogrami (3D prikaz) uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom	195
Slika 6.6	PCT (mod 4) uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom	195
Slika 6.7	PCT (mod 4) (3D prikaz) uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom	196
Slika 6.8	Shematski prikaz transmitivne metode mjerenja	197
Slika 6.9	Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 2,0 m od površine uzorka, transmitivna metoda ispitivanja	197
Slika 6.10	BM 1-1; Temperatura [K], (frame 721/1106); 3D i 2D prikaz	200
Slika 6.11	BM 1-1; PCT (EOF_3), 3D i 2D prikaz	200

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 6.12	BM 1-1; PCT (EOF_7), 3D i 2D prikaz	200
Slika 6.13	BM 1-1; FFT faza (f=1,808x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	201
Slika 6.14	BM 1-3; Temperatura [K], (frame 721/1106); 3D i 2D prikaz	201
Slika 6.15	BM 1-3; PCT (EOF_2), 3D i 2D prikaz	201
Slika 6.16	BM 1-3; PCT (EOF_4), 3D i 2D prikaz	201
Slika 6.17	BM 1-3; FFT faza (f=1,754x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	201
Slika 6.18	BM 1-3; FFT amplituda (f=2,632x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	202
Slika 6.19	BM 2-3; Temperatura [K], (frame 360/732); 3D i 2D prikaz	203
Slika 6.20	BM 2-3; PCT (EOF_3), 3D i 2D prikaz	203
Slika 6.21	BM 2-3; FFT faza (f=2,732x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	203
Slika 6.22	BM 2-3; FFT amplituda (f=1,366x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	203
Slika 6.23	BM 3-1; Temperatura [K], (frame 683/780); 3D i 2D prikaz	204
Slika 6.24	BM 3-1; PCT (EOF_6), 3D i 2D prikaz	204
Slika 6.25	BM 3-1; FFT faza (f=2,564x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	204
Slika 6.26	BM 3-1; FFT amplituda (f=3,846x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	204
Slika 6.27	BM 3-1; Korelirani kontrast, 3D i 2D prikaz	205
Slika 6.28	BM 3-3; Temperatura [K], (frame 720/1140); 3D i 2D prikaz	206
Slika 6.29	BM 3-3; PCT (EOF_3), 3D i 2D prikaz	206
Slika 6.30	BM 3-3; FFT faza (f=1,754x10^{-4}Hz), 3D i 2D prikaz	206
Slika 6.31	Promjena temperature na neoštećenom dijelu uzorka, pri transmitivnoj metodi	208
Slika 6.32	Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 1,5 m od površine uzorka	210
Slika 6.33	Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 3,0 m od površine uzorka	210
Slika 6.34	Prikaz utjecaja udaljenosti toplinske pobude na mogućnost jednolikog zagrijavanja uzorka BM 2-2 promatrano s donje strane udaljenost: a) 1,5 m; b) 2,0 m; c) 3,0 m	213
Slika 6.35	Prikaz utjecaja udaljenosti toplinske pobude na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorku BM 2-1 promatrano s donje strane udaljenost: a) 1,5 m;	213

Slika	Naslov slike	Stranica
	b) 2,0 m; c) 3,0 m	
Slika 6.36	Prikaz utjecaja udaljenosti toplinske pobude na mogućnost jednolikog zagrijavanja uzorka BM 1-3 promatrano s donje strane udaljenost: a) 1,5 m; b) 2,0 m; c) 3,0 m	214
Slika 6.37	Prikaz utjecaja armature na mogućnost otkrivanja oštećenja uzorka BM 1-3 promatrano s donje strane udaljenost 2,0 m: a) bez armature; b) s armaturom	214
Slika 6.38	Prikaz utjecaja kvalitete betona na mogućnost jednolikog zagrijavanja uzorka BM x-2 promatrano s gornje strane udaljenost 2,0 m; a) BM 1-2; b) BM 2-2; c) BM 3-2	215
Slika 6.39	Utjecaj refleksije na otkrivanje oštećenja, uzorak BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m; a) termogram 11, b) termogram 41, c) termogram 78, d) termogram 133, e) termogram 240, f) termogram 431, g) termogram 594, h) termogram 731	217
Slika 6.40	Korelirani kontrast, uzorak BM 3-3 s gornje strane udaljenost 2m	218
Slika 6.41	Korelirani kontrast, uzorak BM 3-1 s gornje strane udaljenost 3m, 3D i 2D prikaz	218
Slika 6.42	Korelirani kontrast, uzorak BM 2-1 s donje strane udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz	219
Slika 6.43	Korelirani kontrast, uzorak BM 2-1 s gornje strane udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz	219
Slika 6.44	Usporedba koreliranog kontrasta za betone različite kvalitete, svi uzorci su s donje strane na udaljenosti 3m: a) BM 1-1; b) BM 2-1; c) BM 3-1	220
Slika 6.45	Usporedba koreliranog kontrasta za betone različite kvalitete, uzorak BM 2-3 s donje strane: a) udaljenost 1,5m; b) udaljenost 2m; c) udaljenost 3m	220
Slika 6.46	Usporedba koreliranog kontrasta za betone različite kvalitete, uzorak BM 3-1 s donje strane: a) udaljenost 1,5m; b) udaljenost 2m; c) udaljenost 3m	221
Slika 6.47	Usporedba koreliranog kontrasta za uzorak BM 1-3 s donje strane na udaljenosti 2m , 3D i 2D prikaz	222
Slika 6.48	Usporedba koreliranog kontrasta za uzorak BM 1-3 s gornje strane na udaljenosti 2m , 3D i 2D prikaz	222
Slika 6.49	PCT BM 1-3 s gornje strane udaljenost 3m: a) optimalni termogram; b) EOF_2	223
Slika 6.50	PCT BM 1-1 s donje strane udaljenost 1,5m: a) EOF_1; b) EOF_2; c) EOF_3; d) EOF_4; e) EOF_5; f) EOF_6	224
Slika 6.51	PCT BM 1-1 s donje strane udaljenost 1,5m, 3D prikaz: a) EOF_2; b) EOF_5	225

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 6.52	PCT BM 1-2 s gornje strane, udaljenost 1,5m: a) EOF_2; b) EOF_3; c) EOF_4; d) EOF_6; e) EOF_7; f) skica oštećenja;	226
Slika 6.53	PCT (EOF_2) BM 1-3 s gornje strane, udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz	226
Slika 6.54	Termogram (3D i 2D prikaz) a) i b); PCT (EOF_8) c) i d) za uzorak BM 2-2 s donje strane, udaljenost 1,5m	227
Slika 6.55	PCT BM 2-2 s gornje strane: a) EOF_2 udaljenost 1,5m; b) EOF_2 udaljenost 2m; c) EOF_2 udaljenost 3m	228
Slika 6.56	Uzorak BM 3-3 s donje strane, udaljenost 1,5m, PCT (EOF_3) a); uzorak BM 3-3 s gornje strane, udaljenost 1,5m, PCT (EOF_2)	228
Slika 6.57	PCT udaljenost 2m s gornje strane: a) BM 1-2; b) BM 2-2; c) BM 3-2	229
Slika 6.58	PCT (EOF_2) udaljenost 2m s donje strane: a) BM 1-3; b) BM 2-3; c) BM 3-3	229
Slika 6.59	BM 1-3 s gornje strane udaljenost 1,5m: a) Termogram; b) FFT Fazni prikaz f=5,540x10^{-4} Hz	230
Slika 6.60	BM 1-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3m, FFT Fazni prikaz: a) f=4,751x10^{-4}Hz; b) f=1,188x10^{-3} Hz; c) f=2,850x10^{-3}Hz	231
Slika 6.61	FFT Fazni prikaz BM 1-1 s donje strane udaljenost 1,5m: a) f=1,136x10^{-3} Hz; b) f=1,420x10^{-3} Hz; c) f=1,705x10^{-3} Hz; d) f=1,990x10^{-3} Hz; e) f=2,273x10^{-3} Hz; f) f=2,557x10^{-3} Hz; g) f=3,409x10^{-3} Hz; h) f=3,693x10^{-3} Hz	232
Slika 6.62	FFT Fazni prikaz BM 1-3 s donje strane udaljenost 1,5m: a) f=1,096x10^{-3} Hz; b) f=3,562x10^{-3} Hz	233
Slika 6.63	FFT fazni prikaz BM 2-2 s gornje strane: a) udaljenost 1,5m (f=1,364x10^{-3}Hz); b) udaljenost 2m (f=1,928x10^{-3}Hz); c) udaljenost 3m (f=1,202x10^{-3}Hz)	234
Slika 6.64	FFT Faza udaljenost 2m s gornje strane: a) BM 1-2, f=1,676x10^{-3}Hz; b) BM 2-2, f=1,928x10^{-3}Hz; c) BM 3-2 f=1,441x10^{-3}Hz	235
Slika 6.65	FFT Faza BM 3-2 udaljenost 2m s gornje strane: a) 3D prikaz, f=5,764x10^{-4}Hz; b) 2D prikaz, f=5,764x10^{-4}Hz; c) 3D prikaz, f=1,441x10^{-3}Hz; d) 2D prikaz, f=1,441x10^{-3}Hz	235
Slika 6.66	a) Uzorak BM 3-3 s donje strane, udaljenost 1,5m, f=1,301x10^{-3}Hz; b) uzorak BM 3-3 s gornje strane, udaljenost 1,5m, f=1,370x10^{-3}Hz	236
Slika 6.67	BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) optimalni termogram, 3D prikaz; b) optimalni termogram, 2D prikaz; c) FFT Faza, 3D prikaz, f=1,102x10^{-3}Hz; d) FFT Faza, 2D prikaz, f=1,102x10^{-3}Hz; e) FFT Faza, 3D prikaz, f=1,377x10^{-3}Hz; f) FFT Faza, 2D prikaz, f=1,377x10^{-3} Hz	237

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 6.68	BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m, a) Optimalni termogram, b) FFT Faza, f=1,681x10^{-3}Hz;// BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m; c) Optimalni termogram, d) FFT Faza, f=1,231x10^{-3}Hz;// BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m, e) Optimalni termogram, f) FFT Faza, f=1,653x10^{-3}Hz	238
Slika 6.69	BM 1-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m, a) Optimalni termogram, b) FFT Faza, f=1,950x10^{-3}Hz;// BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m; c) Optimalni termogram, d) FFT Faza, f=2,479x10^{-3}Hz;// BM 3-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m, e) Optimalni termogram, f) FFT Faza, f=1,441x10^{-3}Hz	239
Slika 6.70	BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m, a) Optimalni termogram; b) FFT Faza (f=4,525x10^{-4}Hz)	240
Slika 6.71	BM 2-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m; a) Optimalni termogram; b) FFT Amplituda (f=3,472x10^{-4}Hz)	241
Slika 6.72	BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m; a) Optimalni termogram; b) FFT Amplituda (f=5,510x10^{-4}Hz); c) FFT Amplituda (f=8,264x10^{-4}Hz)	242
Slika 6.73	BM 1-3 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m; a) FFT Amplituda (f=1,671x10^{-3}Hz); b) FFT Amplituda (f=27,855x10^{-3}Hz); c) FFT Amplituda (f=55,710x10^{-3}Hz)	242
Slika 6.74	BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m; a) FFT Amplituda, 3D prikaz (f=5,602x10^{-4}Hz); b) FFT Amplituda, 2D prikaz (f=5,602x10^{-4}Hz);	243
Slika 6.75	BM 2-3 s donje strane, udaljenost pobude 3 m; a) Optimalni termogram; b) FFT Amplituda, 3D i 2D prikaz (f=5,263x10^{-4}Hz); c) Termogram snimljen 42,67 min nakon isključenja toplinske pobude; d) FFT Amplituda, 3D i 2D prikaz (f=67,368x10^{-3}Hz);	244
Slika 6.76	BM 3-1 s donje strane, udaljenost pobude 1,5 m; a) Optimalni termogram; b) FFT Amplituda, 3D i 2D prikaz (f=8,264x10^{-4}Hz);	244
Slika 6.77	a) BM 2-3 s donje strane, udaljenost pobude 2 m, FFT Amplituda, (f=5,785x10-3Hz);// b) BM 2-3 s gornje strane, udaljenost pobude 2 m, FFT Amplituda, (f=5,050x10^{-4}Hz);	245
Slika 6.78	FFT Amplituda s donje strane udaljenost toplinske pobude 2,0 m: a) BM 1-3 (f=1,671x10^{-3}Hz); b) BM 2-3 (f=5,785x10^{-3}Hz); c) BM 3-3 (f=5,764x10^{-4} Hz)	246
Slika 6.79	BM 2-2 s gornje strane, FFT Amplituda: a) udaljenost toplinske pobude 1,5 m (f=1,364x10^{-3}Hz); b) udaljenost toplinske pobude 2,0 m (f=5,509x10^{-4}Hz); c) udaljenost toplinske pobude 3,0 m (f=7,212x10^{-4}Hz)	246
Slika 6.80	Razvoj temperature na površini uzorka BM 1-1 kroz cijeli period grijanja i hlađenja	247

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 6.81	BM 1-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)	248
Slika 6.82	BM 1-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) FFT Faza, cjelokupna sekvenca, (f=5,208x10^{-4}Hz); b) FFT Faza, sekvenca hlađenja, (f=9,732x10^{-4}Hz)	248
Slika 6.83	BM 1-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) FFT Amplituda, cjelokupna sekvenca, (f=2,604x10^{-4}Hz); b) FFT Amplituda, sekvenca hlađenja, (f=7,299x10^{-4}Hz)	248
Slika 6.84	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) Korelirani kontrast, cjelokupna sekvenca, 3D i 2D prikaz; b) Korelirani kontrast, sekvenca hlađenja, 3D i 2D prikaz	249
Slika 6.85	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)	249
Slika 6.86	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_4)	250
Slika 6.87	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Faza, cjelokupna sekvenca, (f=4,167x10^{-4}Hz); b) FFT Faza, sekvenca hlađenja, (f=1,653x10^{-3}Hz): c) FFT Faza, cjelokupna sekvenca, (f=8,333x10^{-4}Hz); b) FFT Faza, sekvenca hlađenja, (f=2,479x10^{-3}Hz)	250
Slika 6.88	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Amplituda, cjelokupna sekvenca, (f=2,778x10^{-4}Hz); b) FFT Amplituda, sekvenca hlađenja, (f=5,785x10^{-3}Hz); c) FFT Amplituda, cjelokupna sekvenca, (f=1,111x10^{-3}Hz); d) FFT Amplituda, cjelokupna sekvenca, (f=2,778x10^{-3}Hz)	251
Slika 6.89	BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)	252
Slika 6.90	BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Faza, cjelokupna sekvenca, (f=8,333x10^{-4}Hz); b) FFT Faza, sekvenca hlađenja, (f=1,928x10^{-3}Hz):	252
Slika 6.91	BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Amplituda, cjelokupna sekvenca, (f=2,778x10^{-4}Hz); b) FFT Amplituda, sekvenca hlađenja, (f=8,264x10^{-4}Hz)	252
Slika 6.92	Razvoj temperature na površini uzorka BM 2-2 kroz cijeli period grijanja	253
Slika 6.93	BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2); b) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_1); c) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_3); d) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_6); e) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_7)	254
Slika 6.94	BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Faza, sekvenca hlađenja, (f=1,653x10^{-3}Hz); b) FFT Faza, sekvenca zagrijavanja,	254

Slika	Naslov slike	Stranica
	(f=5,450x10^{-4}Hz)	
Slika 6.95	BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Amplituda, sekvenca hlađenja, (f=1,928x10^{-3}Hz); b) FFT Amplituda, sekvenca zagrijavanja, (f=2,725x10^{-4}Hz); c) FFT Amplituda, sekvenca zagrijavanja, (f=5,450x10^{-4}Hz); d) FFT Amplituda, sekvenca zagrijavanja, (f=6,812x10^{-3}Hz)	255
Slika 6.96	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) Korelirani kontrast, sekvenca zagrijavanja, 3D i 2D prikaz; b) Korelirani kontrast, sekvenca hlađenja, 3D i 2D prikaz	255
Slika 6.97	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2); b) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_1); c) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_3); d) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_6)	256
Slika 6.98	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Faza, sekvenca hlađenja, (f=1,653x10^{-3}Hz); b) FFT Faza, sekvenca zagrijavanja, (f=5,571x10^{-4}Hz); c) FFT Faza, sekvenca zagrijavanja, (f=8,357x10^{-4}Hz); b) FFT Faza, sekvenca zagrijavanja, (f=5,571x10^{-3}Hz)	257
Slika 6.99	BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Amplituda, sekvenca hlađenja, (f=5,785x10^{-3}Hz); b) FFT Amplituda, sekvenca zagrijavanja, (f=5,571x10^{-4}Hz); c) FFT Amplituda, sekvenca zagrijavanja, (f=5,571x10^{-3}Hz); d) FFT Amplituda, sekvenca zagrijavanja, (f=13,928x10^{-3}Hz)	257
Slika 6.100	BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_3); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)	258
Slika 6.101	BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Faza, sekvenca zagrijavanja, (f=5,587x10^{-4}Hz); b) FFT Faza, sekvenca hlađenja, (f=1,928x10^{-3}Hz):	258
Slika 6.102	BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT Amplituda, sekvenca zagrijavanja, (f=8,380x10^{-4}Hz); b) FFT Amplituda, sekvenca hlađenja, (f=8,264x10^{-4}Hz)	259
Poglavlje 7		
Slika 7.1	Razvoj temperature površine betona uzorka BM 2-1d iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog betona i razlika krivulja	260
Slika 7.2	Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-1d iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog betona i razlika krivulja	260
Slika 7.3	Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-1d iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog betona i razlika krivulja	261
Slika 7.4	Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-3g iznad oštećenja broj 1 i „zdravog“ betona i razlika krivulja	261
Slika 7.5	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena	262

Slika	Naslov slike	Stranica
	njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-1 s donje strane	
Slika 7.6	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-1 s gornje strane	262
Slika 7.7	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-2 s gornje strane	262
Slika 7.8	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-3 s donje strane	262
Slika 7.9	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-3 s gornje strane	262
Slika 7.10	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o toplinskoj provodljivosti betona uzoraka BM x-1 s donje strane	263
Slika 7.11	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o toplinskoj provodljivosti betona uzoraka BM x-1 s gornje strane	263
Slika 7.12	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona a) te o toplinskoj provodljivosti betona b) uzoraka BM 1-1 s donje strane	263
Slika 7.13	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona a) te o toplinskoj provodljivosti betona b) uzoraka BM 2-1 s donje strane	264
Slika 7.14	Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona a) te o toplinskoj provodljivosti betona b) uzoraka BM 3-1 s donje strane	264
Slika 7.15	Razvoj temperature površine betona uzorka BM 3-3 s donje strane iznad oštećenja broj 1 a); broj 2 b) i broj 3 c) te neoštećenog betona i krivulja razlika normaliziranih temperatura	265
Slika 7.16	Razvoj temperature površine betona uzorka BM 3-3 s gornje strane iznad oštećenja broj 1 a); broj 2 b) i broj 3 c) te neoštećenog betona i krivulja razlika normaliziranih temperatura	265
Slika 7.17	Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 1-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m	266
Slika 7.18	Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m	267

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 7.19	Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m	267
Slika 7.20	Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 1-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m	269
Slika 7.21	Proces određivanja promjera oštećenja u uzorcima korištenjem FWHM tehnike	270
Slika 7.22	Linija za koju je dana prostorna raspodjela temperature (profil temperature) za uzorak BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3m	271
Slika 7.23	Shematski prikaz određivanja promjera oštećenja iz profila temperature; a) bez potrebe za fitovanjem, b) s potrebom za fitovanjem, c) određivanje polumjera oštećenja	272
Slika 7.24	Rezultati ispitivanja promjera oštećenja u uzorku BM 2-3 s donje strane ovisno o udaljenosti toplinske pobude	272
Slika 7.25	Prikaz povećanja veličine oštećenja zbog lateralne difuzije topline, uzorak BM 3-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2m	273
Slika 7.26	Proces određivanja dubine oštećenja iz sekvence termograma	275
Slika 7.27	Razvoj temperature na uzorku BM 2-3 s donje strane, udaljenost 2m	276
Slika 7.28	Karakteristične točke na temperaturnom kontrastu, oštećenje broj 1, uzorak BM 2-3	276
Slika 7.29	Fitanje krivulje porasta temperature a) i krivulje temperaturnog kontrasta b) uzorka polinomom šestog stupnja, uzorak BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m	277
Slika 7.30	Prva i druga derivacija krivulje temperaturnog kontrasta oštećenja broj 1 uzorka BM 3-1 s donje strane, udaljenost 2m	277
Slika 7.31	Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz	278
Slika 7.32	Krivulje razvoja temperature oštećenja broj 1, temperatura neoštećenog područja te krivulja temperaturnog kontrasta na uzorku BM 2-3 D U2m	279
Slika 7.33	Prva i druga derivacija regresijskih krivulja razvoja temperature oštećenja broj 1 i neoštećenog područja na uzorku BM 2-3 D U2m	279
Slika 7.34	Prva derivacija regresijske krivulje temperaturnog kontrasta oštećenja broj 1 i neoštećenog područja na uzorku BM 2-3 D U2m	279
Slika 7.35	Druga derivacija regresijske krivulje temperaturnog kontrasta oštećenja broj 1 i neoštećenog područja na uzorku BM 2-3 D U2m	280
Slika 7.36	Dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s donje strane	210

Slika	Naslov slike	Stranica
Slika 7.37	Srednja dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s donje strane	282
Slika 7.38	Usporedba projektirane (crtkano) i izmjerene srednje dubine oštećenja uzoraka BM x-3 s donje strane	282
Slika 7.39	Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 1,5 m, 3D i 2D prikaz	284
Slika 7.40	Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 2 m, 3D i 2D prikaz	284
Slika 7.41	Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 3 m, 3D i 2D prikaz	284
Slika 7.42	Usporedba projektirane (crtkano) i izmjerene srednje dubine oštećenja uzoraka BM x-3 s gornje strane	285
Slika 7.43	Usporedba projektirane (crtkano) i izmjerene srednje dubine oštećenja uzoraka BM x-3 s gornje strane	285
Slika 7.44	Srednja dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s gornje strane	286
Slika 7.45	Dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s gornje strane	286
Slika 7.46	a) Podcijenjena dubina oštećenja uz korištenje C_{infl}=4,8 pri proračunu; b) izmjerena dubina oštećenja uz korigirani koeficijent kalibracije $C_{inflBM\ x-1}$=3,2	287
Slika 7.47	Ovisnost između DT i De ovisno o geometrijskim karakteristikama oštećenja uzoraka BM 1-2, BM 2-2 i BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m	289
Slika 7.48	Ovisnost između DT i d·d2rD ovisno o geometrijskim karakteristikama oštećenja uzoraka BM 1-2, BM 2-2 i BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m	289

POPIS TABLICA

Tablica	Naslov tablice	Stranica
Poglavlje 3		
Tablica 3.1	Podjela IC spektra zračenja [Byrnes 2009]	12
Tablica 3.2	Podjela spektra IC zračenja prema CIE [Commission Internationale de l'Eclairage 1987]	13
Tablica 3.3	Podjela spektra IC zračenja prema ISO 20473 [ISO TC 172 2007]	13
Tablica 3.4	Podjela spektra IC zračenja prema odgovoru detektora [J. Miller & Friedman 2004; J. L. Miller 1994]	13
Tablica 3.5	Koeficijent emisije za beton i vodu prema [Minkina & Dudzik 2009, FLIR Systems 2007]	23
Tablica 3.6	Koeficijent emisije za beton i vodu prema [Andrassy et al. 2008]	23
Tablica 3.7	Koeficijent emisije za beton i vodu prema [Maldague 2001]	23
Tablica 3.8	Literaturne vrijednosti toplinske difuzivnosti za beton	116
Tablica 3.9	Literaturne vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta za beton	119
Tablica 3.10	Literaturne vrijednosti toplinske provodljivosti betona	120
Tablica 3.11	Koeficijent korekcije za temperaturu prema [HRN EN ISO 10456, 2008]	122
Tablica 3.12	Koeficijent korekcije za vlažnost prema [HRN EN ISO 10456, 2008]	123
Poglavlje 4		
Tablica 4.1	Sastav betona za mješavinu BM 1-y	140
Tablica 4.2	Sastav betona za mješavinu BM 2-y	140
Tablica 4.3	Sastav betona za mješavinu BM 3-y	141
Tablica 4.4	Program ispitivanja svježeg i očvrslog betona	141
Tablica 4.4	Svojstva XPS-a [Willems et al. 2006]	147
Tablica 4.5	Tehničke karakteristike kamere FLIR P640 [FLIR 2012]	150
Poglavlje 5		
Tablica 5.1	Svojstva betona u svježem stanju	155
Tablica 5.2	Rezultati ispitivanja volumenske mase očvrsnulog betona	156

Tablica	Naslov tablice	Stranica
Tablica 5.3	Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće očvrsnulog betona	156
Tablica 5.4	Rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona uzoraka	157
Tablica 5.5	Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja betona	158
Tablica 5.6	Rezultati ispitivanja vodoupojnosti uzoraka betona	159
Tablica 5.7	Izmjerene vrijednosti koeficijenta emisije za korištene uzorke betona pri temperaturi od 100 °C	162
Tablica 5.8	Izmjerene prosječne vrijednosti koeficijenta emisije betona (temperatura 100 °C)	163
Tablica 5.9	Debljine uzoraka za ispitivanje toplinske difuzivnosti betona	164
Tablica 5.10	Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona BM 1-y uz analizu prema [Parker et al., 1961]	172
Tablica 5.11	Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona BM 2-y uz analizu prema [Parker et al., 1961]	172
Tablica 5.12	Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona BM 3-y uz analizu prema [Parker et al., 1961]	172
Tablica 5.13	Toplinska provodljivost suhog betona proračunata prema [ACI Committee 122, 2002]	175
Tablica 5.14	Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i efuzivnosti betona	177
Tablica 5.15	Vrijednosti parametra 1/m za betone korištene u ovom radu	178
Tablica 5.16	Toplinska provodljivost uzoraka od recikliranog betona i reciklirane opeke u suhom stanju pri 10 °C	178
Tablica 5.17	Korigirane vrijednosti toplinske provodljivosti i efuzivnosti uzoraka od recikliranog betona i reciklirane opeke u zasićenom stanju pri 20 °C	179
Tablica 5.18	Konstante kalibracije senzora #T039 proizvođača Mathis TCi	180
Tablica 5.19	Vrijednosti parametra 1/m za betone korištene u ovom radu	181
Tablica 5.20	Korigirane vrijednosti parametra toplinske efuzivnosti za betone korištene u ovom radu	182
Tablica 5.21	Vrijednosti parametra 1/m za betone korištene u ovom radu	184
Tablica 5.22	Korigirane vrijednosti parametra toplinske provodljivosti za betone korištene u ovom radu	186
Tablica 5.23	Svojstva referentnih materijala za ispitivanje toplinske efuzivnosti	188
Tablica 5.24	Rezultati ispitivanja toplinske efuzivnosti betona komparativnom metodom	192

Tablica	Naslov tablice	Stranica
Tablica 5.25	Koeficijent refleksije toplinskog vala	193
Poglavlje 6		
Tablica 6.1	Uvjeti ispitivanja uzoraka transmitivnom metodom	207
Tablica 6.2	Uvjeti ispitivanja uzoraka reflektnom metodom	211
Tablica 6.3	Vlažnost uzoraka BM x-3 prilikom ispitivanja s udaljenosti 2m	240
Poglavlje 7		
Tablica 7.1	Ovisnost nagiba pravca regresije o karakteristikama oštećenja	268
Tablica 7.2	Proračun toplinske difuzivnosti betona	274
Tablica 7.3	Dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s donje strane	280
Tablica 7.4	Srednje dubine oštećenja uzorka BM x-3	282
Tablica 7.5	Odstupanje srednje dubine oštećenja uzorka BM x-3 od projektirane dubine	283

1 UVOD

Beton je materijal koji se najčešće koristi u graditeljstvu diljem svijeta. Kroz povijest, vrsta i kvaliteta samog betona te usporedno i tehnologija betoniranja mijenjala se i poboljšavala, ali i u današnje vrijeme se događa da su betonske konstrukcije izvedene na način da nisu zadovoljeni projektirani zahtjevi [FIB-Commission#5, 2005]. Trajnost armiranobetonskih konstrukcija predstavlja ozbiljan problem u cijelom svijetu, pa procjena stanja konstrukcija u svrhu određivanja preostalog uporabnog vijeka i planiranja metoda popravaka postaje sve značajnija. U razvijenim zemljama troškovi popravaka nadilaze troškove izgradnje novih konstrukcija.

Do oštećenja betona dolazi uslijed kemijskih, fizičkih i mehaničkih utjecaja. Kemijski utjecaji uzrokuju koroziju armaturnog čelika koja dovodi do pojave pukotina i odvajanja zaštitnog sloja, karbonatizaciju, smrzavanje i odmrzavanje te skupljanje betona u fazi očvršćivanja. Mehanički utjecaji kao što su dugotrajna statička i dinamička preopterećenja te incidentne situacije (potresi, mehanički udarci) također dovode do oštećenja betona. Osim toga, zbog nekvalitetne ugradnje betona, u konstrukcijama se mogu pojaviti gnijezda i šupljine.

Cilj procjene stanja postojeće betonske konstrukcije je omogućiti uvid u trenutno stanje promatrane konstrukcije i njezina svojstva u budućnosti, utjecaj pronađenih oštećenja na sigurnost i životni vijek konstrukcije. Kod procjene stanja armiranobetonskih konstrukcija neophodno je primjenjivati pouzdane i učinkovite nerazorne metode ispitivanja kojima je moguće detektirati, locirati i karakterizirati različite vrste oštećenja.

Pod ispitivanjem bez razaranja podrazumijeva se skup metoda temeljen na principima fizike sa svrhom utvrđivanja svojstava materijala ili komponenata sustava te otkrivanja različitih vrsta oštećenja, a da se pritom ne utječe na funkcionalnost objekta koji se ispituje.

Ispitivanja betona nerazornim metodama primjenjuju se kod kontrole kvalitete i otkrivanja nedostataka na novim konstrukcijama, ocjene stanja betona u postojećim konstrukcijama, procjene uspješnosti sanacija i za monitoring tijekom eksploatacije [Mikulić et al., 2005].

Razvijen je širok spektar metoda i tehnika koje se primjenjuju kod nerazornog ispitivanja betonskih konstrukcija, za određivanje lokacije te karakterizacije oštećenja ili oštećenih područja na konstrukciji [Malhotra & Carino, 2004; Mikulić et al., 2005; ACI, 1998].

Prednost je nerazornih metoda u njihovoj jednostavnosti i činjenici da ne oštećuju konstrukciju ili uzrokuju samo manja površinska oštećenja. Interpretacija rezultata, međutim, jest jedan od najzahtjevnijih zadataka u modernome graditeljstvu [Banjad Pečur et al., 2009].

Iako se IC termografija koristi u graditeljstvu za identifikaciju gubitaka topline kroz vanjsku ovojnicu zgrada, uviđa se njezina sve veća primjena za nerazorna ispitivanja i vrednovanja materijala i konstrukcija korištenjem IC termografije [Meola, 2007; Milovanović & Banjad Pečur, 2011].

Nerazorna ispitivanja korištenjem IC termografije općenito se sastoje od toplinske stimulacije objekta koji se promatra i praćenjem promjene temperature na njegovoj površini tijekom nestacionarnog hlađenja ili zagrijavanja. Analiza se općenito provodi povezivanjem provođenja topline u krutim tijelima, kroz koje se toplinska energija širi procesom toplinske difuzije, dok se IC kamerom bilježi temperatura površine promatranog tijela [Meola & Carlomagno, 2004]. Postojanje nehomogenosti u materijalu utječe na širenje topline te time uzrokuje lokalne promjene u temperaturnom polju. Jedini preduvjet za otkrivanje oštećenja je postojanje dovoljne razlike u toplinskim svojstvima oštećenja i neoštećenog materijala [Maierhofer et al., 2007]. Poznato je da IC termografija ima određena ograničenja kada se ispituju materijali male toplinske provodljivosti s dubokim defektima, ali se pokazala vrlo korisnom kada se koristi zajedno s metodama koje dopuštaju otkrivanje oštećenja na većoj dubini [Milovanović & Banjad Pečur, 2011].

Kao najveća prednost korištenja IC termografije pokazala se njezina sposobnost da se u relativno kratkom periodu pregleda velika površina promatrane konstrukcije i odrede kritična mjesta na koja se potrebno koncentrirati korištenjem drugih nerazornih metoda.

Primjena IC termografije na armiranobetonske konstrukcije vrlo je rijetko istraživana i razlikuje se u odnosu na primjenu u metalima zbog znatno manje toplinske provodljivosti betona u odnosu na metale, te zbog toga što su dimenzije betonskih konstrukcija i defekata u njima za red veličina veće od onih koji su ispitivani na uzorcima metala [Nahant et al., 2010; Weritz et al., 2005]. U slučaju betona, zanimanje za postojanjem oštećenja primarno je do

dubine zaštitnog sloja betona, što znači do dubine od 7 cm, što je razumno za korištenje IC termografije kao metode za nerazorno ispitivanje.

Praktičnom primjenom je dokazano da je moguće puno vremena, energije i troškova izgubiti na in-situ ispitivanja ukoliko se jasno ne definiraju pogodne metode ispitivanja, njihove prednosti i ograničenja te način obrade rezultata mjerenja. Netočni i/ili rezultati koji zavaravaju često su rezultat nerazumijevanja ispitne metode koju ispitivač koristi, neiskustva ispitivača u korištenju ispitne metode te neiskustva u obradi rezultata [Bungey & Millard, 1996].

Zbog navedenoga je zaključeno da je potrebno razviti metodologiju za toplinsku stimulaciju armiranog betona u svrhu određivanja oštećenja. Potrebno je provesti istraživanje stanja područja nerazornog ispitivanja materijala i konstrukcija metodom infracrvene (IC) termografije s primjenom pasivne tehnike i aktivnih tehnika ispitivanja te pregled spoznaja o fizikalnom konceptu toplinskog zračenja u infracrvenom spektru valnih dužina, problematici detektora infracrvenog zračenja, njihovoj geometrijskoj i temperaturnoj razlučivosti. Potrebno je analizirati metode naknadne obrade rezultata ispitivanja, termograma, koje se koriste u području zrakoplovstva, svemirske industrije za lokaciju oštećenja u materijalima te određivanje njihove veličine i dubine, s razmatranjem mogućnosti primjene pojedinih metoda u području građevinarstva.

2 CILJ I HIPOTEZE

2.1 Ciljevi istraživanja i očekivani znanstveni doprinos

Glavni cilj ovog rada i istraživanja koje je prethodilo njegovoj izradi je:

Razviti metodologiju za toplinsku stimulaciju armiranog betona u svrhu određivanja oštećenja.

Također, definirani su pomoćni ciljevi koji izražavaju specifične aspekte istraživanja, a sve u svrhu zadovoljenja glavnog cilja rada. Pomoćni ciljevi rada su:

- Istražiti utjecaj fizikalno mehaničkih svojstava betona na rezultate ispitivanja infracrvenom termografijom.
- Odrediti utjecaj geometrijskih karakteristika oštećenja i položaja oštećenja na mogućnost detekcije, a sve u ovisnosti o termohigrometrijskim uvjetima okoliša.
- Razviti analitičke i empirijske modele za kvantifikaciju oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama korištenjem podataka dobivenih snimanjem infracrvenom termografijom

Očekivani znanstveni doprinos ovog istraživanja i rada može se definirati kroz nekoliko točaka:

- Proširenje dosadašnjih saznanja o mogućnostima detekcije različitih oštećenja armiranobetonskih konstrukcija metodom IC termografije, s obzirom na njihovu vrstu, veličinu i dubinu, lokaciju položaja armature.
- Unapređenje interpretacije rezultata mjerenja IC termografijom (sustavna naknadna analiza i interpretacija) u svrhu kvantifikacije oštećenja.
- Unapređenje postojećih matematičkih modela za analizu i kvantifikaciju rezultata ispitivanja metodom IC termografije.
- Proširenje saznanja o pouzdanosti mjerenja i poboljšanje pouzdanosti mjerenja metodom IC termografije s primjenom u armiranobetonskim konstrukcijama.

2.2 Hipoteze

Hipoteze istraživanja i rada su slijedeće:

1. ***Metodu aktivne infracrvene termografije moguće je koristiti za detekciju i kvantifikaciju defekata u armiranobetonskim konstrukcijama.***
2. ***Fizikalno mehanička svojstva betona utječu na rezultat snimanja infracrvenom termografijom.***
3. ***Korištenjem inverznih metoda toplinskog toka i podataka prikupljenih analizom sekvenci termograma, moguće je kvantificirati oštećenja u armiranom betonu***

2.3 Opis istraživanja

U prvom dijelu istraživanja provedeno je istraživanje stanja područja nerazornog ispitivanja materijala i konstrukcija metodom infracrvene (IC) termografije s primjenom pasivne tehnike i aktivnih tehnika ispitivanja te pregled spoznaja o fizikalnom konceptu toplinskog zračenja u infracrvenom spektru valnih dužina, problematici detektora infracrvenog zračenja, njihovoj geometrijskoj i temperaturnoj razlučivosti. Analizirane su metode naknadne obrade rezultata ispitivanja (termograma) koji se koriste u području zrakoplovstva, svemirske industrije za lokaciju oštećenja u materijalima te određivanje njihove veličine i dubine, s razmatranjem mogućnosti primjene pojedinih metoda u području građevinarstva.

Laboratorijska istraživanja provedena su na uzorcima s oštećenjima poznate veličine i oblika koja su smještena na poznatim dubinama unutar armiranobetonskih uzoraka. Unutar uzoraka varirane su veličina i dubina simuliranog oštećenja kako bi se odredio utjecaj geometrijskih karakteristika oštećenja i dubine oštećenja na mogućnost detekcije infracrvenom termografijom.

Istražena je optimalna metoda toplinske pobude uzoraka koja omogućuje ispitivanje postojanja oštećenja na većim dubinama unutar betonskih uzoraka, odnosno metoda naknadne obrade rezultata ispitivanja koja omogućuje zadovoljavajuću razlučivost oštećenja. Varirana je ovisnost udaljenosti toplinske pobude od uzoraka koji se pobuđuju, trajanje procesa

zagrijavanja ovisno o dubini i veličini oštećenja, a u svrhu određivanja optimalne udaljenosti i optimalnog trajanja toplinske pobude uzoraka.

Istražen je utjecaj razmaka armature na mogućnost otkrivanja oštećenja koja se nalaze na dubini većoj od debljine zaštitnog sloja, utjecaj svojstava betona (gustoće i vlažnosti) na mogućnost provođenja mjerenja, te utjecaj razlike toplinskih svojstava betona i materijala oštećenja na mjerenja.

Ispitivana su i toplinska svojstva materijala neoštećenog dijela uzorka te toplinska svojstva oštećenja, kao što su toplinska provodljivost, specifični toplinski kapacitet, toplinska difuzivnost, toplinska efuzivnost, a sve u svrhu kvantifikacije oštećenja (određivanja dubine i veličine oštećenja).

Mjerenje, odnosno prikupljanje termograma je provedeno tijekom procesa zagrijavanja i hlađenja uzoraka, u pravilnim vremenskim intervalima od 10 s. Naknadna obrada termograma i njihova interpretacija provedena je promatrajući sekvencu termograma prikupljenih u vremenu tijekom toplinske pobude uzoraka, te sekvencu termograma prikupljenih tijekom perioda hlađenja uzoraka.

Sekvence termograma analizirane su korištenjem slijedećih tehnika obrade rezultata ispitivanja IC termografijom:

- Termografija koračnog grijanja (SH)
- Termografija faznog impulsa (PPT), pri čemu je razmatran fazni i amplitudni prikaz;
- Termografija glavnih komponenti (PCA);
- Tehnika naknadne obrade rezultata ispitivanja pomoću korelacijskih operatora

Pri tome su uspoređivani rezultati ispitivanja korištenjem transmitivne metode (toplinska pobuda i IC kamera su sa suprotne strane uzorka) te reflektne metode (toplinska pobuda i IC kamera su s iste strane uzorka) za otkrivanje postojanja oštećenja u uzorcima. Također, uspoređivana je mogućnost otkrivanja oštećenja tijekom procesa hlađenja uzoraka, odnosno tijekom cijele sekvence ispitivanja (grijanje + hlađenje).

Kvantifikacija oštećenja provedena je korištenjem modela dobivenih iz teorijskih razmatranja toplinskog toka, a kao ulazni podaci korištene su krivulje temperaturnog

kontrasta, odnosno podaci dobiveni prilikom analize sekvenci, uz potrebu poznavanja toplinskih svojstava betona.

Zbog velikog rasipanja literaturnih podataka o vrijednostima toplinske provodljivosti, toplinske efuzivnosti i toplinske difuzivnosti betona, u radu su provedena ispitivanja navedenih toplinskih svojstava betona korištenjem nestacionarne metode vrućeg diska (toplinska provodljivost i toplinska efuzivnost), odnosno komparativne metode ispitivanja (u slučaju ispitivanja toplinske efuzivnosti) i modificirane Parkerove metode u slučaju ispitivanja toplinske difuzivnosti betona.

3 STANJE PODRUČJA

3.1 Infracrvena termografija

Infracrvena (IC) termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela.

Mjerenje temperature se temelji na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja određene valne duljine koje se emitira s površine promatranog tijela i koje se uz pomoć IC kamere pretvara u vidljivu sliku u obliku temperaturnog polja korištenjem Stefan-Boltzmannovog zakona za realna tijela.

$$W_{uk} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Gdje su:

W_{uk} – ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina realnog tijela [W/m^2]

ε – koeficijent emisije realnog tijela

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [5,67×10^{-8} W/m^{2}K^4]

T – apsolutna temperatura tijela [K]

3.1.1 Uvodno o zračenju

Pierre Prevost je 1791. godine dokazao da sva tijela neprekidno zrače toplinu neovisno o njihovoj temperaturi [Prevost 1791]. Kasnije je ovaj zakon proširen na način da glasi: „Svako tijelo koje ima temperaturu višu od 0 K, emitira elektromagnetsko zračenje u cjelokupnom spektru valnih duljina“ [Petela 2010, Breitenstein et al. 2010, Moran et al. 2011, Greensite 2003]. Ova tvrdnja direktno proizlazi iz Stefan-Boltzmannovog zakona zračenja.

Teorija energijskog zračenja je dvojna (dualna), budući da istovremeno prihvaća koncept elektromagnetskog vala po teoriji Maxwella, odnosno koncept kvanta po teoriji Plancka [Galović 2003].

Mehanizam emisije smatra se vrlo jednostavnim: atomi se sastoje od elektrona, negativno nabijenih subatomskih čestica, i pozitivno nabijene jezgre. Pri sudaru s drugim atomima dolazi do oscilacije pozitivnih i negativnih naboja. Prema Maxwellovoj teoriji, oscilirajući

naboji emitiraju (a mogu i apsorbirati) elektromagnetsko zračenje [Greensite 2003]. Prenesenu energiju zračenjem može se tretirati kao kontinuirani spektar elektromagnetskih valova, čije su brzina c, valna duljina λ i frekvencija υ povezane jednadžbom:

$$c = \lambda \cdot \upsilon$$

Spektralnu gustoću zračenja crnog tijela ili emisijsku moć crnog tijela uspješno je objasnio Max Planck [Planck 1900, Planck 1914], koji je fenomenološkim pristupom došao do zaključka da spektralnu gustoću crnog tijela savršeno opisuje izraz:

$$E_{ct}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

kao funkcija valne duljine [Henč-Bartolić & Kulišić 1999], odnosno

$$E_{ct}(\upsilon, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\upsilon}{kT}} - 1},$$

kao funkcija frekvencije zračenja [Henč-Bartolić & Kulišić 1999]

Gdje su:

υ – frekvencija zračenja [Hz]

λ – valna duljina zračenja [m]

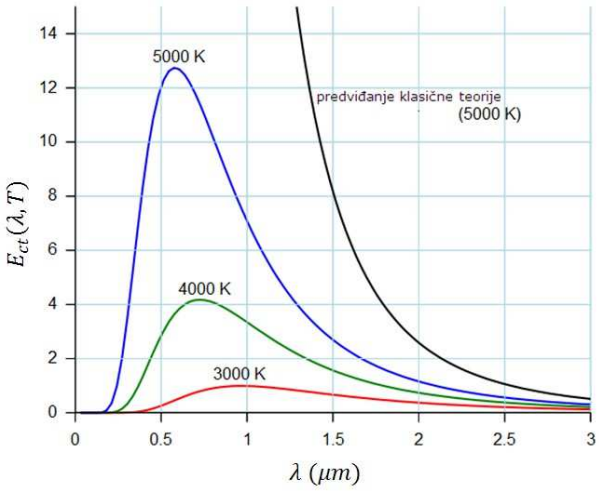
c – brzina svjetlosti (3×10^8 m/s)

k – Boltzmannova konstanta ($1{,}38\times10^{-23}$ J/K)

T – apsolutna temperatura tijela [K]

h – Planckova konstanta ($6{,}626\times10^{-34}$ Js)

Kada se nacrtaju krivulje prema Planckovim jednadžbama za spektralnu gustoću zračenja kao funkcije frekvencije ili valne duljine za različite temperature, dobiju se krivulje koje se potpuno slažu s eksperimentalnim rezultatima (Slika 3.1).



Slika 3.1 Spektri zračenja crnog tijela za različite temperature – Planckove krivulje [Kreith et al., 2011]

Planckova ideja o kvantiziranosti energije ne može se shvatiti ni opravdati zakonima klasične fizike, ali ona daje ispravan rezultat za zračenje crnog tijela koji su definirali Stefan i Boltzmann te se zbog toga kvantiziranost prihvaća kao fundamentalna činjenica u prirodi.

Jožef Stefan je iz eksperimentalnih spektara zračenja ustanovio da je ukupni intenzitet zračenja, odnosno energija koju zrači metar kvadratni površine tijela u sekundi, proporcionalan četvrtoj potenciji apsolutne temperature crnog tijela.

Neovisno o Stefanu, Ludwig Boltzmann [Boltzmann 1878] je teorijskim razmatranjima došao do istog rezultata i odredio izraz za ukupni intenzitet zračenja idealnoga crnog tijela koji se danas naziva Stefan-Boltzmannov zakon:

$$W_{uk} = \sigma \cdot T^4$$

Gdje su:

W_{uk} – ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina realnog tijela [W/m^2]

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($5{,}67\times10^{-8}$ W/m^{2}K^4)

T – apsolutna temperatura tijela [K]

Može se jednostavno pokazati da se integriranjem Planckovog zakona od 0 do ∞ za određenu temperaturu može odrediti ukupni intenzitet zračenja za sve valne duljine i da je on jednak upravo Stefan-Boltzmannovom zakonu zračenja za crno tijelo [Henč-Bartolić & Kulišić 1999].

Slika 3.1 jasno prikazuje da svaka krivulja na određenoj valnoj duljini ima svoj maksimum. To je ona valna duljina oko koje se na određenoj temperaturi emitira najviše energije. Maksimumi spektralne gustoće zračenja $E_{ct}(\lambda, T)$ pomiču se prema kraćim valnim duljinama kada temperatura raste. Tu činjenicu iskazuje Wienov zakon pomaka, a kaže da je valna duljina koja odgovara maksimumu izračene energije λ_{max} obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi [Wien 1896; Henč-Bartolić & Kulišić 1999].

$$\lambda_{\max} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}}{T}[m]$$

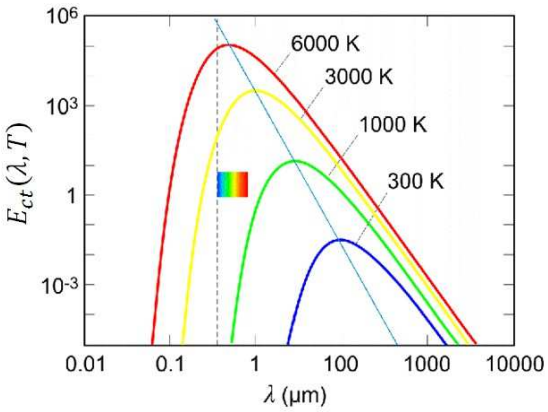
Gdje su:

λ_{max} – valna duljina koja odgovara maksimumu izračene energije

$2{,}898 \times 10^{-3}$ Km – Wienova konstanta pomaka

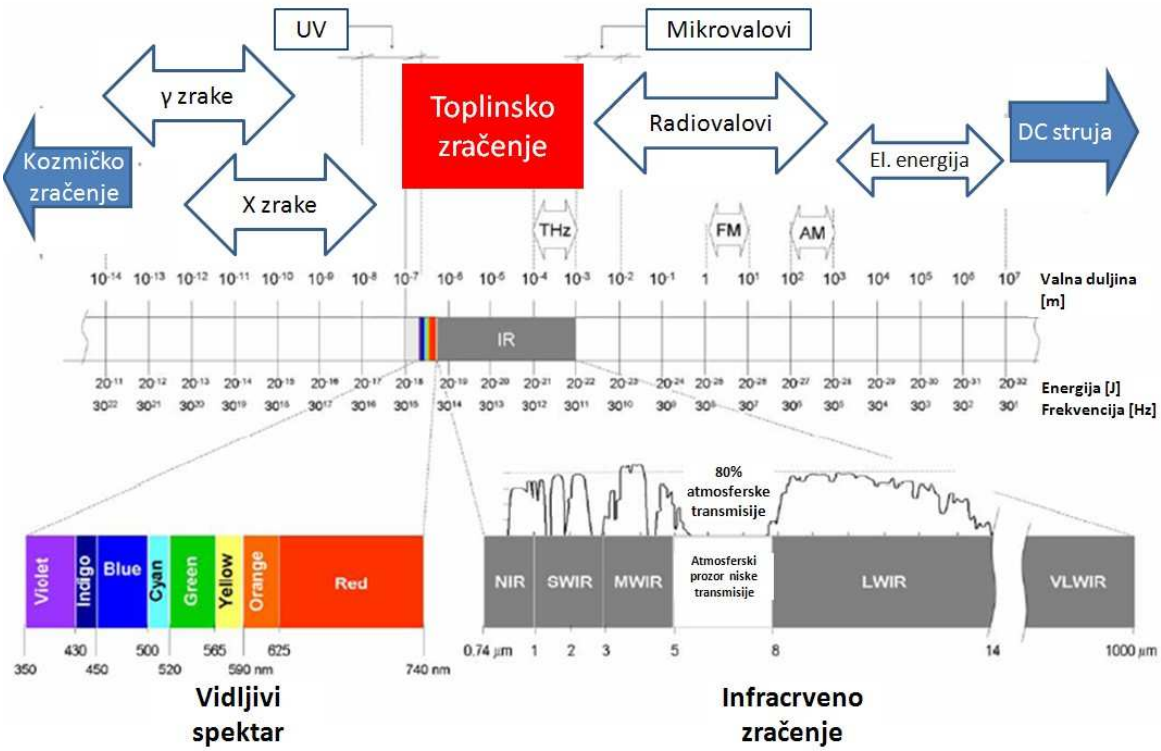
T – apsolutna temperatura tijela [K]

Ukoliko se Planckove krivulje nacrtaju u logaritamskom mjerilu jasno je vidljivo da se svi maksimumi izračene energije za različite temperature nalaze na pravcu što potvrđuje linearnu ovisnost temperature i valne duljine u skladu s Wienovim zakonom pomaka, Slika 3.2.



Slika 3.2 Wienov zakon [Vollmer & Moellmann, 2010]

Da li će se veći dio energije prenijeti na jednom ili drugom pojasu valnih duljina, vezano je na prilike u kojima zračenje nastaje i na činjenicu što će se kasnije događati s nastalim valovima. Može se na primjer dogoditi da se zračenjem najprije prenosi najveći dio energije na kratkim valnim duljinama, ali ako ti valovi prođu kroz neki medij koji upija (apsorbira) valove kratkih valnih duljina, onda će se u propuštenom (transmitiranom) zračenju najveći dio preostale energije prenositi na valovima dugih valnih duljina. Ovisno o tome na kojim se valnim duljinama ili njihovim uskim intervalima pretežito javljaju pojedina zračenja, dijeli se čitav spektar elektromagnetskog zračenja na područja koja kvantitativno prikazuje Slika 3.3.



Slika 3.3 Spektar elektromagnetskog zračenja [Ibarra-Castanedo, 2005]

Središnji dio spektra koji se proteže približno od 0,1 do 100 μm i djelomično obuhvaća ultraljubičasto, sveukupno vidljivo i infracrveno zračenje, naziva se toplinskim zračenjem i ono je dominantno vezano na izmjenu topline. Od cjelokupnog spektra zračenja, ljudsko oko registrira samo područje valnih duljina od 0,4 do 0,7 μm [Galović 2003].

Infracrvenim zračenjem se naziva elektromagnetsko zračenje u području (spektru) valnih duljina između 0,7 do 1000 μm [Nave 2012]. Infracrveno područje (IC spektar) valnih duljina se dijeli na nekoliko pod-područja. Podjele nemaju fizikalno definirane granice, pa se u literaturi mogu pronaći različite podijele na pod-područja (Tablica 3.1, Tablica 3.2, Tablica 3.3, Tablica 3.4). Najčešće se koristi podjela na pod-područja prema [Byrnes 2009]

Tablica 3.1 Podjela IC spektra zračenja [Byrnes 2009]

Naziv pod-područja	***Kratica***	***Valne duljine [μm]***	***Energija fotona [cV]***
Blisko infracrveno	*NIR*	*0,75 - 1,4*	*0,9 - 1,7*
IC zračenje kratkih valnih duljina	*SWIR*	*1,4 - 3*	*0,4 - 0,9*
IC zračenje srednjih valnih duljina	*MWIR*	*3 - 8*	*150 - 400*
IC zračenje dugih valnih duljina	*LWIR*	*8 - 15*	*80 - 150*
Daleko područje valnih duljina IC spektra	*FIR*	*15 - 1000*	*1,2 - 80*

Tablica 3.2 daje podjelu spektra IC zračenja kako je predložila CIE - Međunarodna komisija za osvjetljenje (International Commission on Illumination).

Tablica 3.2 Podjela spektra IC zračenja prema CIE [Commission Internationale de l'Eclairage 1987]

Naziv pod-područja	***Valne duljine [µm]***	***Frekvencija [THz]***
IR-A	*0,7 – 1,4*	*215 - 430*
IR-B	*1,4 - 3*	*100 - 215*
IR-C	*3 - 1000*	*300 - 100*

Tablica 3.3 daje podjelu spektra IC zračenja kako ju definira ISO 20473.

Tablica 3.3 Podjela spektra IC zračenja prema ISO 20473 [ISO TC 172 2007]

Naziv pod-područja	***Kratica***	***Valne duljine (µm)***
Blisko infracrveno	*NIR*	*0,78–3*
Srednje-valno područje IC spektra	*MIR*	*3–50*
Daleko područje valnih duljina IC spektra	*FIR*	*50–1000*

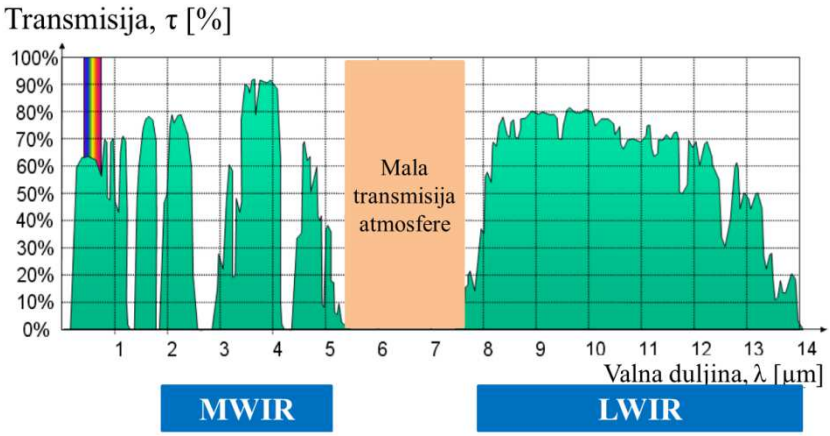
Četvrti način podjele spektra IC zračenja na pod-područja temelji se na odazivu različitih detektora (Tablica 3.4).

Tablica 3.4 Podjela spektra IC zračenja prema odgovoru detektora [J. Miller & Friedman 2004; J. L. Miller 1994]

Naziv pod-područja	***Valne duljine [µm]***	***Napomena***
Blisko infracrveno	*0,7 – 1,0*	*Od približnog kraja vidljivog područja do početka područja potpune apsorpcije zračenja silicija*
IC zračenje kratkih valnih duljina	*1,0 - 3*	*Od područja potpune apsorpcije silicija do područja transmisije zračenja kroz atmosferu u MWIR području. Područje pokrivaju detektori izrađeni od InGaAs (Indij- galij-arsenida) i manje osjetljivi senzori od olovnih soli*
IC zračenje srednjih valnih duljina	*3 - 5*	*Definirani atmosferskim prozorom transmisije zračenja. Područje pokrivaju senzori izračeni od InSb (Indij-antimonida), HgCdTe (živa-kadmij-telura) te djelomično PbSe (olovnog selenida).*

Naziv pod-područja	*Valne duljine [μm]*	*Napomena*
IC zračenje dugih valnih duljina	*8 do 12 ili 7 - 14*	*Definirani atmosferskim prozorom transmisije. Područje pokrivaju senzori izrađeni od HgCdTe (živa-kadmij-telura) i mikrobolometri*
IC zračenje vrlo dugih valnih duljina (VLWIR)	*12 - 30*	*Područje pokrivaju senzori izračeni od silicija s primjesama*

Općenito se može zaključiti da podjelu spektra IC zračenja diktira transmisija zračenja kroz Zemljinu atmosferu. Slika 3.4 prikazuje (propuštanje) transmisiju zračenja kroz sloj atmosfere debljine 1800m, na visini od 10 m iznad tla i prikazuje kako najveći utjecaj na apsorpciju zračenja atmosfere imaju voda, ugljični dioksid i ozon.



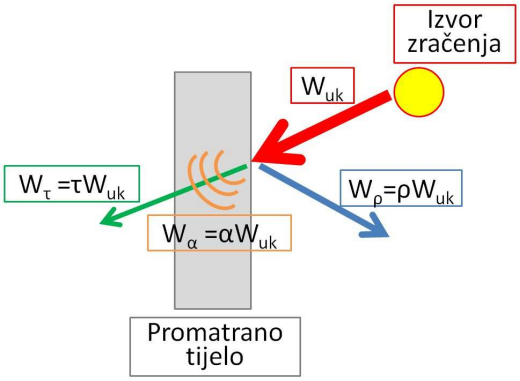
Slika 3.4 Propusnost atmosfere na infracrveno zračenje [Kaplan 2007]

Dva intervala spektra zračenja imaju vrlo veliku transmisiju (1-5 μm i 8-14 μm), poznati su pod nazivom atmosferski prozori, i njihovo je značenje izraženo time da su gotovo sve IC kamere izrađene na način da funkcioniraju u jednom od navedena dva spektra.

3.1.2 Refleksija, apsorpcija, propusnost

Sveukupno zračenje koje dolazi s površine nekog tijela zove se svjetloća površine i sastoji se od reflektiranog, propuštenog (transmitiranog) i vlastitog emitiranog zračenja. Dok reflektirano i propušteno (transmitirano) zračenje imaju svoje izvore u drugim tijelima, vlastito emitirano zračenje ima izvor u promatranom tijelu [Galović 2003].

Na osnovi zakona o održanju energije (I. zakon termodinamike) proizlazi da ukupna količina tijelu dozračene energije W_{uk} treba biti jednaka zbroju količine energije koja se reflektira od tijela, koju tijelo apsorbira i koja se kroz tijelo propusti (transmitira), Slika 3.5.



Slika 3.5 Raspodjela upadnog zračenja [Galović 2003]

$$W_{uk} = \alpha(\lambda) \cdot W_{uk} + \rho(\lambda) \cdot W_{uk} + \tau(\lambda) \cdot W_{uk}$$

$$1 = \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda)$$

Gdje su:

α - koeficijent apsorpcije $0 \leq \alpha \leq 1$

ρ - koeficijent refleksije $0 \leq \rho \leq 1$

τ - koeficijent propusnosti (transmisije) $0 \leq \tau \leq 1$

λ – valna duljina

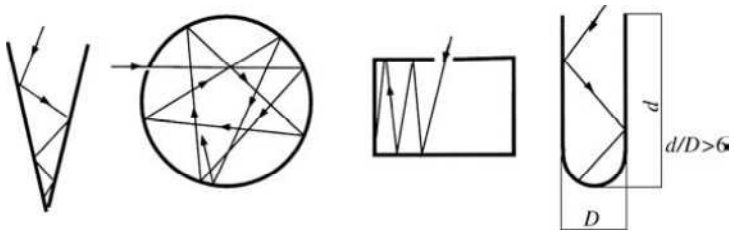
Za inženjerske primjene, gotovo su sva tijela nepropusna za prispjelo zračenje i za njih je $\tau = 0$. Postoje tijela propusna za samo određeni interval valnih duljina upadnog zračenja (staklo je propusno u vidljivom spektru zračenja, λ = 0,4 – 0,7 μm, a nepropusno u IC spektru zračenja λ = 0,7 – 400 μm). Izravnu primjenu u IC termografiji imaju materijali koji transmitiraju u IC spektru zračenja kao što su germanij (Ge), cinkov sulfid (ZnS), cinkov selenid (ZnSe), safir i kvarc (Al_2O_3) te magnezij (Mg) [Andrassy et al. 2008] koji se koriste kao leće pri proizvodnji IC kamera ili pak kao IC prozori (windows) za olakšavanje inspekcije teško dostupnih ili opasnih mjesta.

Sva daljnja razmatranja i ispitivanja u ovom radu bavit će se nepropusnim tijelima, a za njih vrijedi jednadžba:

$$1 = \alpha(\lambda) + \rho(\lambda)$$

3.1.3 Crno tijelo

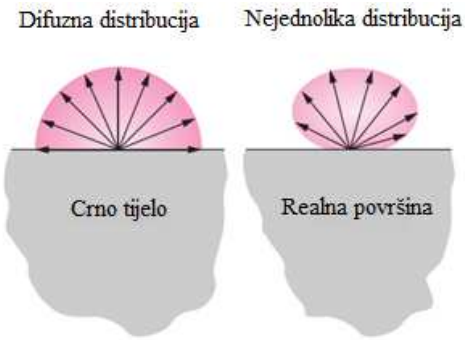
Crno tijelo je idealizirani fizikalni sustav čije je svojstvo da upija cjelokupno elektromagnetsko zračenje koje padne na njegovu površinu (ne reflektira, niti transmitira zračenje) - idealni apsorber. Koeficijent apsorpcije crnog tijela je $\alpha = 1$, a koeficijent refleksije $\rho = 0$ te koeficijent transmisije $\tau = 0$. Iako crno tijelo ne postoji, njegova vrlo dobra aproksimacija je izotermna šupljina s malim otvorom. Otvor takve šupljine (Slika 3.6) ponaša se kao crno tijelo, jer gotovo potpuno apsorbira svo upadno zračenje koje uđe kroz otvor u šupljinu. Naime, zraka se nakon ulaska u šupljinu mnogobrojnim refleksijama u njoj potpuno apsorbira, a vjerojatnost da dio upadnog zračenja iziđe vrlo je malena [Henč-Bartolić & Kulišić 1999].



Slika 3.6 Modeli crnog tijela [Minkina & Dudzik 2009]

Važna svojstva crnog tijela su:

- crno tijelo u potpunosti apsorbira cjelokupno upadno zračenje svih valnih duljina i svih smjerova,
- za zadanu temperaturu i valnu duljinu ni jedna površina ne može emitirati više zračenja nego površina crnog tijela,
- intenzitet zračenja crnog tijela je neovisan o smjeru, tj. crno tijelo je difuzni emiter



Slika 3.7 Crno tijelo je idealni difuzni emiter koji emitira zračenje jednoliko u svim smjerovima [Vollmer & Moellmann, 2010]

3.1.4 Kirchhoffov zakon zračenja

Kirchhoffov zakon zračenja definira jednakost koeficijenta emisije i koeficijenta apsorpcije crnog tijela pri određenoj valnoj duljini, odnosno općenito, on kaže da je tijelo koje je sposobno apsorbirati zračenje pri nekoj valnoj duljini, jednako sposobno emitirati zračenje pri toj valnoj duljini [Kirchhoff 1860, Henč-Bartolić & Kulišić 1999]. Iz Kirchhoffovog zakona zračenja proizlazi tada da je koeficijent emisije tijela ε jednak koeficijentu apsorpcije tijela α pri istoj valnoj duljini λ:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$$

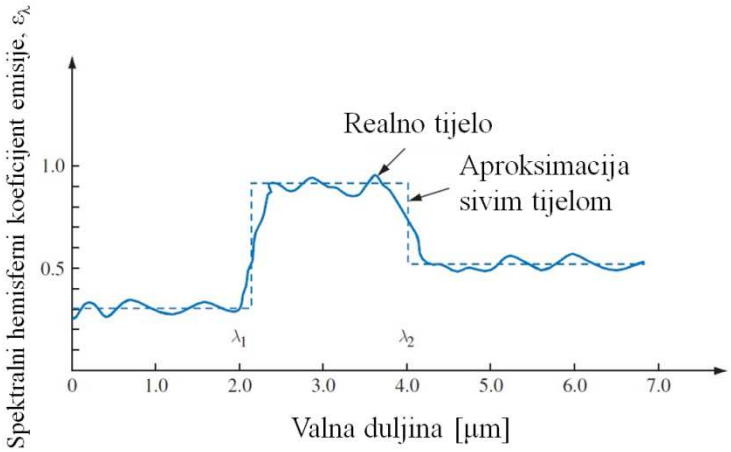
Tako da prema Kirchhoffovom zakonu, uz poštivanje I. zakona termodinamike i uz pretpostavku da je promatrano tijelo neprozirno za IC spektar zračenja $\tau = 0$ za određenu valnu duljinu λ vrijedi jednadžba:

$$1 = \varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda)$$

Tijelo koje reflektira cjelokupno upadno zračenje naziva se bijelo tijelo, s koeficijentom refleksije $\rho = 1$. Tijelo koje ima konstantni koeficijent emisije $\varepsilon = konst.$ za sve valne duljine upadnog zračenja podjednako, zove se sivo tijelo. Koeficijent refleksije sivog tijela kreće se između 0 i 1 i ne ovisi o valnoj duljini zračenja. Sivo tijelo također zrači difuzno kao i crno tijelo, a spektralna krivulja zračenja je slična onoj crnog tijela iste temperature, s tom razlikom da joj je visina proporcionalno smanjena za vrijednost koeficijenta emisije [Kreith et al. 2011].

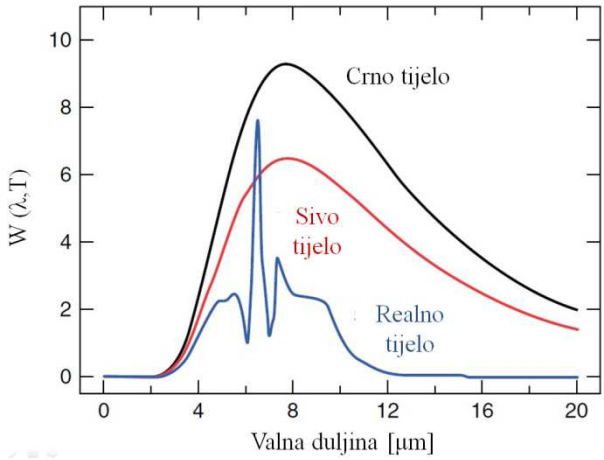
3.1.5 Realno tijelo

Općenito, većina tijela nisu siva i koeficijenti refleksije i apsorpcije, odnosno emisije, su im funkcije valne duljine, a takva tijela se nazivaju realna tijela. Za većinu praktičnih primjena u IC termografiji, koeficijent emisije $\varepsilon\ (\lambda, T)$ je konstantna vrijednost i sliči sivom tijelu. To se događa zbog toga što se u praktičnoj IC termografiji obično promatra tijelo na relativno konstantnoj temperaturi i koriste se IC kamere koje funkcioniraju u jednom pod-području spektra IC zračenja, obično LWIR. Spektralna hemisferna raspodjela koeficijenta emisije obojane površine može se tada aproksimirati sivim tijelom iste temperature, Slika 3.8 [Kreith et al. 2011].



Slika 3.8 Aproksimacija spektralne hemisferne raspodjele koeficijenta emisije obojane površine sivim tijelom [Kreith et al. 2011]

Iako su do sada diskutirani zakoni zračenja crnog tijela, oni se ne mogu primijeniti na realna tijela u cijelom spektru valnih duljina. Spektralna gustoća zračenja realne površine razlikuje se od Planckove distribucije za crno tijelo (Slika 3.9).



Slika 3.9 Raspodjela snage zračenja crnog tijela, realnog i sivog tijela za odabranu temperaturu T [Pašagić 2008, Vollmer & Moellmann 2010]

Spektralna gustoća zračenja (emisijska moć) realnog tijela je snaga toplinskog zračenja određene valne duljine (frekvencije) koju na temperaturi T emitira jedinica površine tijela i ovisi o valnoj duljini, temperaturi, materijalu i osobinama površine tijela.

Ukoliko su poznati koeficijenti emisije površine jednostavno je izračunati i emisijska svojstva realnog tijela. Ukoliko je poznata spektralna raspodjela koeficijenta emisije $\varepsilon_\lambda = (\lambda, T)$ moguće je korištenjem Planckovog zakona izračunati i vlastito spektralno zračenje realnog tijela kao funkciju valne duljine [Galović 2003].

$$E(\lambda,T)=\varepsilon\left(\lambda,T\right)E_{ct}(\lambda,T)=\varepsilon\left(\lambda,T\right)\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

Gdje su:

λ – valna duljina zračenja

c – brzina svjetlosti (3×10^8 m/s)

k – Boltzmannova konstanta ($1{,}38\times10^{-23}$ J/K)

T – apsolutna temperatura tijela [K]

h – Planckova konstanta ($6{,}626\times10^{-34}$ Js)

Ukoliko je poznat sveukupni koeficijent emisije, može se izračunati Stefan-Boltzmannov zakon za realna tijela. Kako je ranije objašnjeno, u primjeni IC termografije, mogu se izolirati područja u spektralnoj raspodjeli koeficijenta emisije kod kojih se realno tijelo može poistovjetiti sa sivim tijelom, odnosno kad se može pretpostaviti da je $\varepsilon = const.$ i tada se koeficijent emisije naziva monokromatska emisivnost, a vrijedi u uskom području valnih duljina $\lambda_1 - \lambda_2$.

$$W_{uk}(T)=\varepsilon(T)\cdot\sigma\cdot T^4$$

Gdje su:

W_{uk} – ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina realnog tijela [W/m^2]

ε – sveukupni emisijski faktor realnog tijela

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($5{,}67\times10^{-8}$ W/m^{2}K^4)

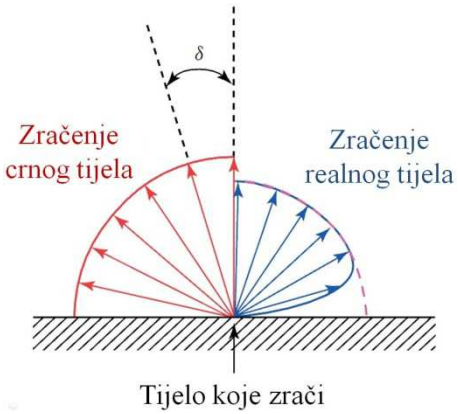
T – apsolutna temperatura tijela [K]

3.1.6 Koeficijent emisije

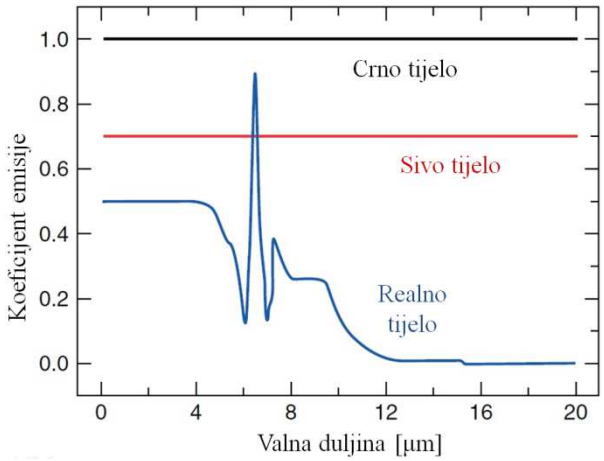
Emitivno svojstvo realnog tijela opisuje se pomoću koeficijenta emisije ε, koji se definira kao omjer vlastitog emitiranog zračenja realnog tijela E(T) i vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela E_{ct}(T) pri istoj temperaturi [Galović 2003].

$$\varepsilon(T)=\frac{E(T)}{E_{ct}(T)}$$

Spektralna distribucija gustoće zračenja realnog tijela može biti drugačija od difuzne (koja vrijedi za crno tijelo), Slika 3.10.



Slika 3.10 Raspodjela spektralne gustoće zračenja crnog tijela i realnog tijela ovisno o kutu promatranja u odnosu na normalu na površinu [Vollmer & Moellmann 2010]



Slika 3.11 Koeficijent emisije crnog tijela, realnog i sivog tijela za odabranu temperaturu T [Vollmer & Moellmann 2010]

Iz toga proizlazi da koeficijent emisije realnog tijela može poprimati različite vrijednosti ovisno o tome da li se njegovu vlastitu emisiju prati na zadanoj valnoj duljini (Slika 3.11) ili u zadanom smjeru, odnosno u smjeru kuta δ, te brzini zagrijavanja promatranog tijela ili pak integralno kao prosječni koeficijent emisije nad svim valnim duljinama i smjerovima.

Na osnovi do sad provedenih istraživanja može se definirati da je koeficijent emisije funkcija valne duljine λ, kuta promatranja tijela δ, temperature promatrane površine T i vremena t [Minkina & Dudzik 2009]:

$$\varepsilon = f\left(\lambda, \delta, T, t\right)$$

Ukoliko je promatrano tijelo neprozirno na IC zračenje, koeficijent emisije može se izračunati prema izrazu:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda ,$$

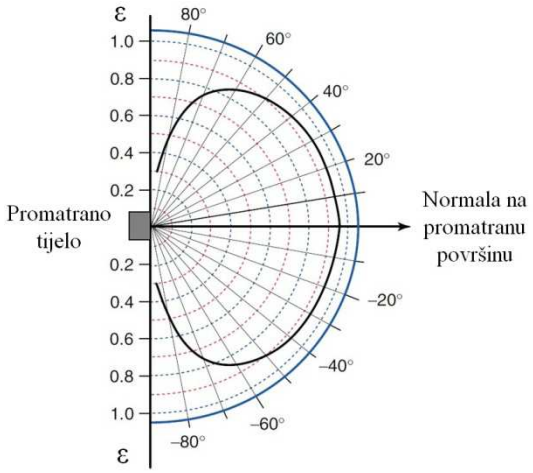
a ukoliko je tijelo polu-transparentno (transparentno za IC zračenje), koeficijent emisije se računa prema izrazu:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{(1-\rho_\lambda)(1-\tau_\lambda)}{1-\rho_\lambda \tau_\lambda}$$

Osim ovdje navedenih faktora o kojima ovisi koeficijent emisije promatranog tijela, za pouzdano određivanje koeficijenta emisije potrebno je uzeti u obzir i stanje površine. Stanje površine vrlo je teško opisati matematički, tako da se matematičkim opisom vrijednosti koeficijenta emisije obično dobivaju manje točne vrijednosti koeficijenata emisije. Ovo je naročiti problem u slučaju metala i drugih tijela malog koeficijenta emisije, kod kojih i tanki sloj oksida daje povećanje koeficijenta emisije. Kod IC termografije, točne vrijednosti koeficijenta emisije promatranog tijela od iznimne su važnosti za točno određivanje temperature tijela iz Stefan-Boltzmannovog zakona za realna tijela. Za točno određivanje koeficijenta emisije najbolje je koristiti jednostavne postupke za mjerenje koeficijenta emisije, koji su propisani u literaturi [Minkina & Dudzik 2009, Orlove 1982, Andrassy et al. 2008].

Parametar koji značajno utječe na koeficijent emisije je vrsta materijala koji se nalazi na površini tijela. U pojednostavljenoj klasifikaciji, materijali se dijele na nemetale (koji se u LWIR području valnih duljina mogu aproksimirati sivim tijelima s koeficijentima emisije većima od 0,8) i metale koji ukoliko su polirani i neoksidirani imaju vrlo mali koeficijent emisije (manji od 0,2). Za promatrani materijal, koeficijent emisije može znatno varirati ovisno o strukturi same površine. Navedeno uzrokuje nepovoljnu situaciju jer za isti materijal može postojati više vrijednosti koeficijenta emisije. Naročito se to može pokazati u slučaju metala kod kojih za polirane metale koeficijent emisije može biti jednak 0,02, a ukoliko je površina oksidirana ili korodirana, vrijednosti koeficijenta emisije mogu biti iznad 0,8 [Vollmer & Moellmann 2010].

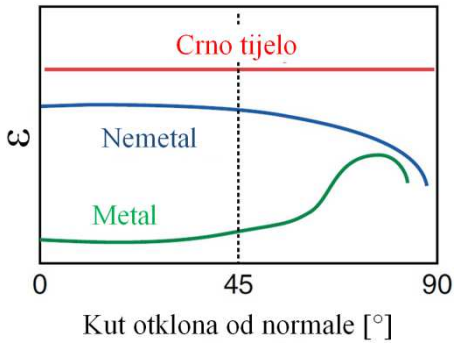
Slika 3.12 prikazuje izmjerene vrijednosti koeficijenta emisije ovisno o kutu zaokreta od normale dobivene pomoću Leslie-jeve kocke [Vollmer & Moellmann 2010].



Slika 3.12 Ovisnost koeficijenta emisije o kutu zaokreta [Vollmer & Moellmann 2010]

Kvalitativno je oblik krivulje sličan za sve vrste materijala za nemetale, uz različite apsolutne vrijednosti koeficijenata emisije. Ovakav je zaključak povoljan zbog toga što se može odrediti područje rada u kojem je koeficijent emisije konstantan. Slika 3.12 pokazuje da je područje u kojem je koeficijent emisije konstantan do otklona od najmanje 45° u obje strane od normale, nakon čega njegova vrijednost pada. Ovisno o materijalu koji se promatra, taj otklon može biti i veći (do 70°), ali se u tom slučaju gornja granica treba odrediti ispitivanjem [Vollmer & Moellmann 2010, Galović 2003].

Zanimljivo je različito ponašanje koeficijenta emisije kod većih otklona za metale i nemetale. Kod nemetala, kao što je već pokazano, postoji karakterističan pad vrijednosti koeficijenta emisije, dok kod metala vrijednost koeficijenta emisije najprije raste s povećanjem otklona od normale, a zatim naglo pada, Slika 3.13. To znači da metali imaju izraženiju emisiju u smjeru površine nego u smjeru normale na površinu.



Slika 3.13 Shematski prikaz ovisnosti koeficijenta emisije o otklonu od normale za metale i nemetale [Vollmer & Moellmann 2010]

3.1.7 Koeficijent emisije betona

Iako se u literaturi može pronaći veliki broj tablica koje daju vrijednosti koeficijenata emisije, one su često bez dodatnih informacija o tome za koje područje valnih duljina su izmjerene, pri kojoj temperaturi su izmjerene i koliki je bio kut promatranja tijela prilikom mjerenja. Navedeno se naročito odnosi na tijela s malim koeficijentom emisije.

Kako se u ovom radu promatra beton u različitim stupnjevima vlažnosti, u daljnjem tekstu će se prikazati koeficijenti emisije betona i vode izmjereni od strane različitih istraživača, Tablica 3.5, Tablica 3.6, Tablica 3.7.

Tablica 3.5 Koeficijent emisije za beton i vodu prema [Minkina & Dudzik 2009, FLIR Systems 2007]

Materijal	***Specifikacija materijala***	***Temperatura, [°C]***	***Spektar valne duljine***	***Koeficijent emisije***
Beton		*20*	*T*	*0,92*
	suh	*36*	*SW*	*0,95*
	hrapav	*17*	*SW*	*0,97*
	na stazama	*5*	*LLW*	*0,974*
Voda	*sloj debljine >0,1 mm*	*0–100*	*T*	*0,95–0,98*
	destilirana	*20*	*T*	*0,96*

T, total spectrum (0 –∞) μm; SW, 2–5 μm; LW, 8–14 μm; LLW, 6,5–20 μm.

Tablica 3.6 Koeficijent emisije za beton i vodu prema [Andrassy et al. 2008]

Materijal	***Specifikacija materijala***	***Temperatura, [°C]***	***Spektar valne duljine***	***Koeficijent emisije***
Beton	*hrapava površina*	*0 - 400*	*-*	*0,92-0,97*
Voda	*destilirana*	*20*	*-*	*0,96*

Tablica 3.7 Koeficijent emisije za beton i vodu prema [Maldague 2001]

Materijal	***Specifikacija materijala***	***Temperatura, [°C]***	***Spektar valne duljine***	***Koeficijent emisije***
Beton		*20*	*-*	*0,92*
Voda		*-*	*-*	*0,99*
	destilirana	*20*	*-*	*0,96*

Navedene vrijednosti su orijentacijske i svakako je potrebno provesti mjerenje koeficijenta emisije na konkretnom materijalu koji se ispituje zbog što veće točnosti mjerenja.

Iz prikazanog je vidljivo da je koeficijent emisije betona visok, te da ovisi o temperaturi na kojoj je izmjeren, valnoj duljini na kojoj je izmjeren te o tome kakvo je stanje površine betona. Sam sastav betona ili barem ovisnost o njegovim osnovnim mehaničkim svojstvima ili v/c omjeru nije specificirana od niti jednog autora.

Zaključeno je da je za dobivanje stvarne temperature uzoraka promatranih u ovom radu potrebno izmjeriti koeficijent emisije promatranog betona, poglavlje 4.1.

Koeficijent emisije betona ispitivanog u sklopu ovog rada, određen je korištenjem metode za određivanje koeficijenta emisije koju je predložio [Orlove 1982]:

- Na promatrani predmet se zalijepi materijal male debljine, a poznatog koeficijenta emisivnosti i velike toplinske provodljivosti (obično je to električarska izolir traka, $\varepsilon = 0{,}95$)
- Osnovna pretpostavka postupka je da je stvarna temperatura na promatranom predmetu i na električarskoj traci jednaka
- Promatrani predmet se zagrije na temperaturu barem 20, a bolje 50°C višu od temperature okoliša
- Izmjeri se stvarna temperatura na mjestu na predmetu na kojem je zalijepljena električarska traka, pri čemu ovaj postupak podrazumijeva provođenje svih radnji za kompenzaciju utjecaja refleksija i utjecaja atmosfere u skladu s dobrom termografskom praksom
- Izmjeri se temperatura na predmetu, a u neposrednoj blizini točke u kojoj je provedeno prethodno mjerenje na električarskoj traci (kako bi se izbjegao utjecaj nejednolikog zagrijavanja promatranog predmeta)
- Podešava se koeficijent emisije do vrijednosti pri kojoj se postigne ista temperatura promatranog predmeta kao i temperatura na električarskoj traci
- Očitana vrijednost je koeficijent emisije promatranog predmeta

Ostale metode određivanja koeficijenta emisije ovdje nisu razmatrane, a mogu se pronaći u [Minkina & Dudzik 2009].

3.2 Termografski sustav

Termografski sustav je skup uređaja koji služi snimanju, zapisivanju (pamćenju) i obradi, a po potrebi i ispisu termograma. Termografski sustav načelno osim IC kamere, podrazumijeva računalo s aplikacijama za obradu i analizu termograma te u slučaju aktivne termografije i sustava za toplinsku pobudu promatranog predmeta čiji se pak dijelovi razlikuju, ovisno o tome da li se radi o sustavu za LT (lock-in termografija), PT (impulsna termografija) ili PPT (termografija faznog impulsa), te o vrsti pobude koja se koristi (ksenonske bljeskalice, halogene lampe, infracrvene grijalice, ultrazvuk, i dr.).

IC kamera je središnji objekt termografskog sustava. Osnovna podjela IC kamera proizlazi iz transmisije zračenja kroz Zemljinu atmosferu, kako je pokazano ranije (Tablica 3.4, Slika 3.4). Većina je detektora i IC kamera prirodno podijeljena na kratkovalne (SW) i dugovalne (LW) kamere. Osim navedenih, postoje i detektori koji rade u bliskom IC području (0,78 – 1,5 μm kao što su kvantni i fotoemisijski detektori, te detektori koji rade u dalekom IC području kao što su toplinski detektori [Minkina & Dudzik 2009; Maldague 2001].

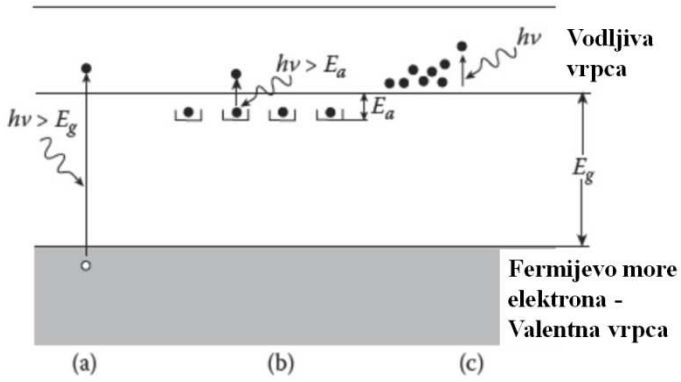
Druga podjela IC kamera koja se koristi slijedi iz vrste detektora (osjetnika) koji se koriste, te se kamere dijele na kamere s hlađenim – fotonskim detektorom (hlađenje tekućim dušikom na -196 °C) i nehlađenim detektorom – toplinskim detektorom [Ibarra-Castanedo 2005; Minkina & Dudzik 2009].

3.2.1 Detektori

IC detektor (osjetnik) je uređaj koji pretvara upadno IC zračenje u električni signal. Teorija funkcioniranja IC detektora temelji se na teoriji fotoelektričnog efekta, koji se ovdje neće diskutirati. Iako za termografista detaljno poznavanje detektora nije nužno potrebno za korištenje IC sustava, u ovom radu će se detektori kratko obraditi zbog toga što interpretacija IC slika zahtijeva poznavanje ograničenja IC kamere kao što su temperaturna rezolucija (NETD – *noise equivalent temperature difference*), točnost mjerenja (*temperature accuracy*) i prostorna rezolucija (MTF – *modulation transfer function*).

Napredak u tehnologiji IC detektora povezan je s razvojem u poluvodičkim IC detektorima, koji su dio skupine fotonskih detektora. Kod fotonskih detektora, zračenje se apsorbira unutar materijala interakcijom s elektronima vezanima na atomsku rešetku ili atoma nečistoće koja se dopiranjem dodaje poluvodičima ili pak interakcijom sa slobodnim

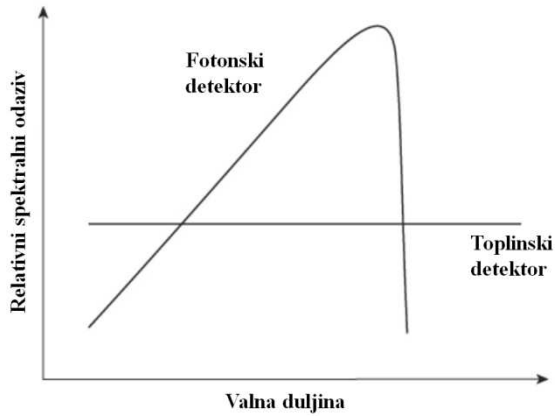
elektronima. Promatrani izlazni signal rezultat je promjene distribucije elektronske energije. Slika 3.14 prikazuje temeljni proces optičke pobude u poluvodičima [Kinch 2000, Elliott & Gordon 1993].



Slika 3.14 Temeljni proces optičke pobude u poluvodičima (a) intrinzična (vlastita) apsorpcija, (b) ekstrinzična apsorpcija, (c) apsorpcija slobodnog nosioca [Rogalski 2011]

Fotonski detektori pokazuju selektivnu ovisnost valne duljine dospjelog zračenja po jedinične snage upadnog zračenja, Slika 3.15. Oni prikazuju savršen odnos signala i šuma (*signal to noise ratio*) i vrlo brzi odgovor na pobudu. No kako bi se postiglo navedena svojstva, potrebno je hladiti fotonske detektore do kriogenih temperatura [Rogalski 2011].

Druga vrsta IC detektora sastoji se od toplinskih detektora kod kojih se upadno zračenje apsorbira u materijal i pri tome mijenja njegovu temperaturu što rezultira promjenom fizikalnih svojstava tog materijala što se koristi za generiranje izlaznog električnog signala, Slika 3.16 [Maldague 2001]. Signal ne ovisi o fotonskoj prirodi upadnog zračenja, već samo o snazi upadnog zračenja ili brzini promjene upadnog zračenja, te su zbog toga toplinski efekti neovisni o valnoj duljini zračenja, Slika 3.15 [Rogalski 2011].

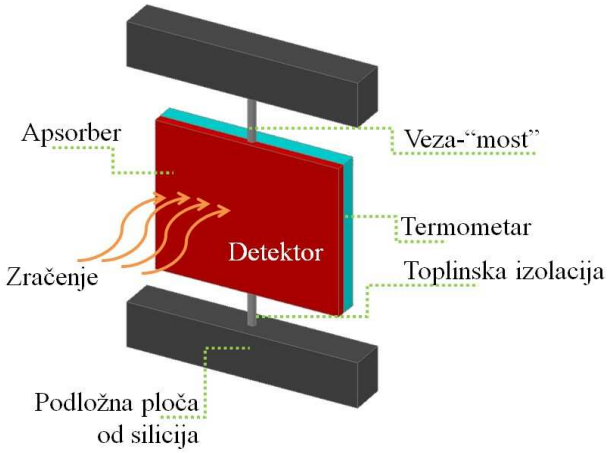


Slika 3.15 Relativni spektralni odaziv fotonskog i toplinskog detektora [Rogalski 2011]

Tri su osnovne vrste toplinskih detektora pronašle svoju primjenu u IC termografiji, i to bolometri, piroelektrični i termoelektrični detektori.

Kod piroelektričnih detektora mjeri se promjena u unutarnjoj električnoj polarizaciji, dok se kod bolometara mjeri promjena električnog otpora. U suprotnosti s fotonskim detektorima, prednost je toplinskih detektora da se mogu koristiti pri sobnim temperaturama. Oni su obično karakterizirani skromnom osjetljivosti i sporim odzivom zbog toga što je proces grijanja i hlađenja detektora relativno spor [Rogalski 2011].

Kada su toplinski detektori u ravnoteži, ne postoji vođenje topline s njih, detektor jedino emitira energiju istom brzinom kojom ju i apsorbira. Temperatura detektora će se povećati svaki put kada je upadno zračenje veće od onoga u ravnotežnom stanju, odnosno kada detektor apsorbira više energije nego što emitira. Tada se višak temperature odvodi s detektora vođenjem [Ibarra-Castanedo 2005].

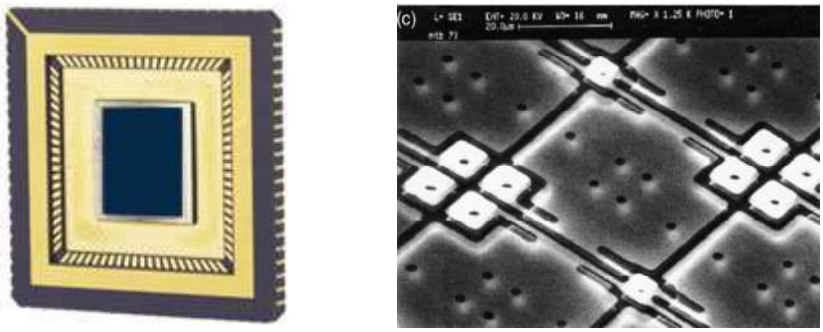


Slika 3.16 Shematski prikaz rada toplinskog detektora [Rogalski 2012]

Kako IC kamera korištena u ovom radu koristi mikrobolometar za detektiranje zračenja predmeta koji se promatra, u daljnjem tekstu detaljnije će se objasniti samo mikrobolometri.

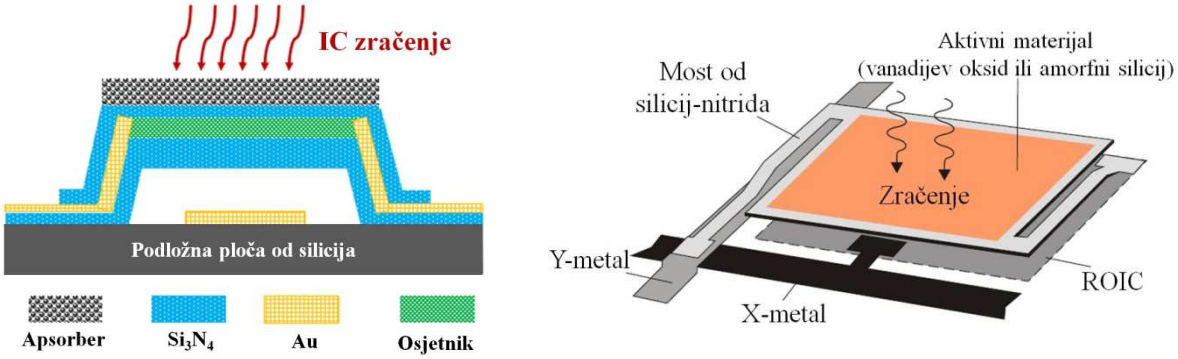
3.2.1.1 Mikrobolometri

Mikrobolometar (Slika 3.17) je otporni element izrađen od materijala (vanadijevog oksida ili amorfnog silicija) s vrlo malim specifičnim toplinskim kapacitetom i velikim linearnim toplinskim izduženjem, a koji je istovremeno dobro izoliran od okoline. Na taj način apsorbirano zračenje uzrokuje veliku promjenu otpora koja se onda mjeri i procesuira u sliku [FLIR 2008].



Slika 3.17 InSb FPA detektor [Tissot J.L., Bertrand F. 1999]

Mikrobolometar se sastoji od matrice, na primjer 640x480, pojedinačnih detektora, piksela gdje se svaki piksela sastoji od nekoliko slojeva, Slika 3.18, ovakav detektor se naziva FPA (*Focal Plane Array*) detektor.



Slika 3.18 Shematski prikaz presjeka mikrobolometra [FLIR 2008, Rogalski 2012]

Donji sloj sustava mikrobolometarskog detektora, sastoji se od podložne ploče tiskanog kruga izrađene od silicija i ROIC (*Redout Integrated Circuit*) iznad kojeg se nalazi osjetnik (bolometar). Ispod osjetnika se nalazi reflektor (izrađen od zlata) koji reflektira dio zračenja koji je prošao kroz apsorber i vraća ga natrag do apsorbera, čime se omogućuje najbolja moguća apsorpcija zračenja, a time i povećanje razine signala. Kako bi se postigla što bolja izolacija apsorbera od ROIC-a, apsorber se izrađuje izdignuto iznad ROIC-a za 2μm (poput mikromosta). Cijeli detektor je u vakuumu kako bi se time nadalje poboljšala toplinska izolacija apsorbera, ali i izolacija od ulaska prašine koja bi narušila njegovu trajnost [Rogalski 2011].

Mikrobolometri također imaju unutarnji mehanički sustav NUC (*Non Uniformity Correction*) za rekalibraciju toplinske slike. NUC sustavom se korigira „iskrivljeni“ signal koji dolazi do apsorbera zbog različitog zagrijavanja dijelova apsorbera. Toplinska slika se rekalibrira s vremena na vrijeme zbog zagrijavanja detektora tijekom rada i u slučajevima

kada je kamera tek upaljena te kada u vrlo kratkom vremenu dolazi do velike razlike u snazi upadnog zračenja na detektor [FLIR 2008]. Kako bi se postiglo što manje zagrijavanje detektora, temperatura mikrobolometra je termoelektrički stabilizirana s Peltierovim člankom.

Kako je prethodno bilo rečeno, FPA detektor se sastoji od primjerice 640×480 detektora, odnosno to je matrica od ukupno 307 200 detektora (piksela) reakciju kojih (promjenu otpora) ROIC sustav treba zabilježiti 25 ili 50 puta (PAL sustav) ili 30 (60) puta (NTSC sustav) u sekundi. Frekvencija očitanja ROIC sustava se još naziva i frekvencija snimanja kamere [Minkina & Dudzik 2009].

3.2.1.2 NETD

Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) ili razlučljivost temperaturnih razlika je razlika između temperature promatranog objekta i temperature okoline koja generira razinu signala na detektoru jednaku razini šuma, tako da je odnos signal-šum (*signal to noise ratio*) jednak jedinici. Drugi naziv za NETD je temperaturna rezolucija ili osjetljivost detektora [Minkina & Dudzik 2009].

$$NETD = \frac{U_n}{\frac{\Delta U_S}{T_{ob}-T_o}} = \frac{T_{ob}-T_o}{\frac{\Delta U_S}{U_n}} \qquad [K],$$

gdje su:

U_n - napon šuma (noise voltage), razina signala šuma

ΔU_s - porast napona uzrokovan razlikom temperature umjernog crnog tijela T_{ob} i temperature okoline T_o.

Za danu detektabilnost signala D^*_λ, vrijednost NETD ovisi o kvadratnom korijenu površine detektora i optimalnoj valnoj duljini detekcije signala [Minkina & Dudzik 2009].

$$D^*(\lambda, f) = \frac{\sqrt{F_d \cdot \Delta f}}{NEP_\lambda} \qquad \left[\frac{cm\sqrt{Hz}}{W}\right],$$

gdje su:

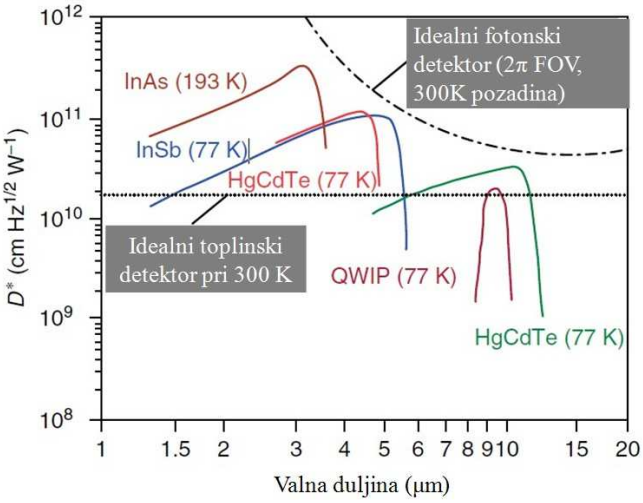
F_d – aktivna površina detektora

Δf – promatrani pojas frekvencije

NEP_λ – NEP (*Noise equivalent power*) – snaga zračenja potrebna za postizanje jediničnog odnosa signal – šum na detektoru

Nadalje, na vrijednost NETD utječe i optika kamere i svi atenuacijski faktori upadnog zračenja (ograničena propusnost atmosfere i optike, i dr.) i svi će oni uvećati vrijednost NETD.

Detektabilnost (odziv osjetnika) je normalizirani odnos signal-šum. Slika 3.19 prikazuje specifičnu detektabilnost D_λ^* različitih fotonskih i toplinskih detektora IC zračenja u usporedbi s teorijskim granicama D^* za idealne fotonske i toplinske detektore na određenoj radnoj temperaturi, s hemisfernim vidnim poljem prema pozadini temperature 300 K.



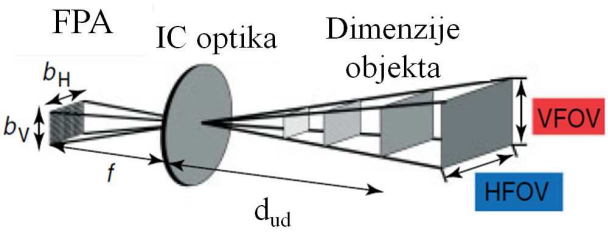
Slika 3.19 Specifična detektabilnost D_λ^* različitih fotonskih i toplinskih detektora [Vollmer & Moellmann 2010]

Daljnja razmatranja i detaljniji opis NETD i detektabilnosti moguće je pronaći u [Minkina & Dudzik 2009, Vollmer & Moellmann 2010], dok je postupak ispitivanja NETD definiran u standardu [ASTM:E1543-00 2011].

3.2.1.3 FOV

FOV (*Field of View*) može se definirati kao vidno polje kamere, odnosno kutna granica vidnog polja kamere. Ponekad se FOV definira kao površina koju kamera registrira ovisno o udaljenosti d_{ud} od objekta snimanja i optici (leći) koja se koristi [Vollmer & Moellmann 2010]. Ovaj parametar određuje prostornu (geometrijsku) rezoluciju u horizontalnom (HFOV) i vertikalnom (VFOV) smjeru. Vrijednost FOV se izražava u stupnjevima, a može se izračunati korištenjem osnovne trigonometrije uz potrebu poznavanja fokalne duljine leće f i dimenzija detektora b (FPA), Slika 3.20 [Vollmer & Moellmann 2010]:

$$FOV = 2 \cdot \arctan\left(\frac{b}{2f}\right) \quad [m]$$



Slika 3.20 Vidno polje kamere [Vollmer & Moellmann 2010]

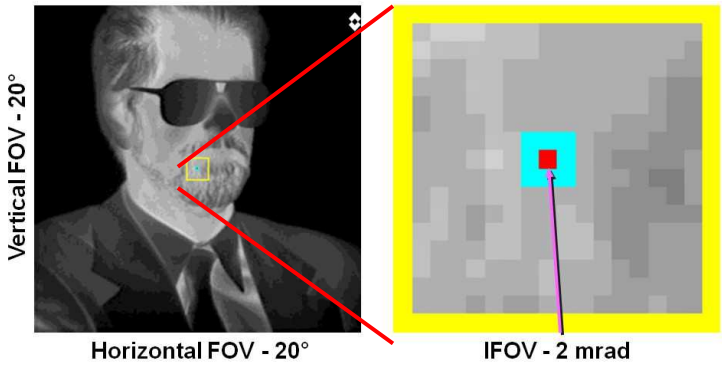
Ukoliko je poznata udaljenost od objekta snimanja, te FOV u horizontalnom i vertikalnom smjeru, moguće je izračunati najveće dimenzije objekta koje su uz korištenje tipične leće 24°×18°:

$$HFOV = 2d_{ud} \cdot \tan(\frac{24°}{2}) \quad [m]$$

$$VFOV = 2d_{ud} \cdot \tan(\frac{18°}{2}) \quad [m]$$

3.2.1.4 IFOV

IFOV (*Instantaneous Field of View*) se definira kao trenutno vidno polje kamere, odnosno određuje FOV jednog detektora (piksela) u FPA matrici. Njime se određuje prostorna razlučivost, odnosno apsolutno najmanja dimenzija objekta koju je moguće vidjeti s određene udaljenosti danom kamerom (brojem piksela i veličinom detektora) i optikom (kutom leće i fokalnom duljinom) [Minkina & Dudzik 2009]. Termin „trenutno“ se upotrebljava zbog toga što je zadovoljenje parametara IFOV-a dovoljno za teorijsko ozračenje detektora samo u jednom trenutku vremena i za jednu točku objekta uz uvjet idealne elektronike i optike.



Slika 3.21 Prikaz razlike između FOV i IFOV

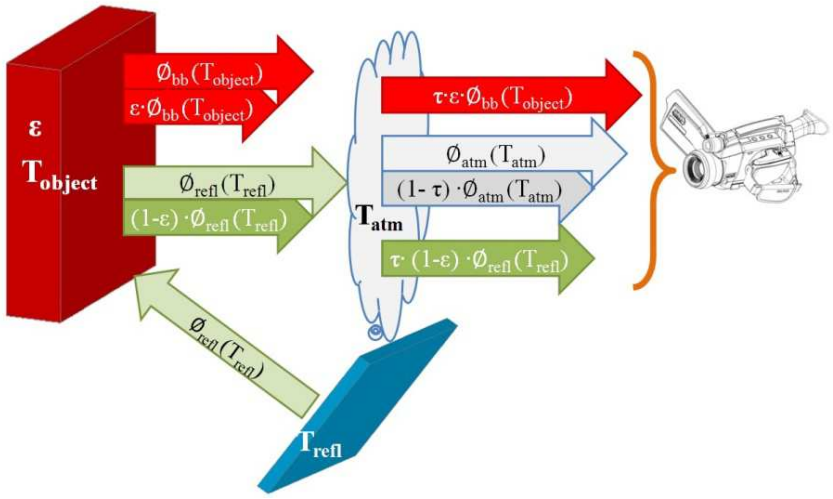
Prostorna (geometrijska) rezolucija kamere se obično izražava u miliradijanima [mrad], na primjer, uobičajena kamera s 640×480 piksela uz optiku 24°×18° ima IFOV vrijednost jednaku 0,65 mrad:

$$IFOV = \frac{24 \cdot \pi}{180 \cdot 640} = 0{,}65mrad$$

Poznavanje najmanje veličine predmeta koji se s određene udaljenosti može snimiti s danom opremom bitno je zbog toga što se stvarna temperatura promatranog objekta može podcijeniti (ukoliko je promatrani objekt topliji od okoline) zbog toga što nije ozračen cijeli detektor. Temperatura u jednom pikselu dobiva se iz integracije snage zračenja koja je pala na detektor, i ukoliko je na dijelu detektora snaga upadnog zračenja manja, proračunati će se manje temperature promatranog objekta [Minkina & Dudzik 2009].

3.3 Osnovni postupak mjerenja

Osnovni postupak mjerenja snage zračenja promatranog objekta može se opisati korištenjem koncepta radiometarskog lanca, čime se uključuju svi fenomeni koji utječu na detekciju zračenja emitiranog s objekta određene temperature, Slika 3.23 [Vollmer & Moellmann 2010].



Slika 3.22 Radiometarski lanac – osnovni postupak mjerenja [Vollmer & Moellmann, 2010]

Radiometarski lanac započinje s emisijom IC zračenja s promatranog objekta pri temperaturi T_{object}. Za opisivanje osnovnog mjernog postupka koristit će se snaga zračenja, odnosno doprinosi pojedinih fenomena snazi zračenja $\emptyset_i$ (gdje i označava mehanizam doprinosa) koja se očita na detektoru. Doprinosi snazi zračenja su povezani s radiometarskim veličinama (snagom zračenja, gustoćom toplinskog toka zračenjem, i dr.) i uključuju svojstva IC kamere kao što su FOV detektora, spektralni odziv detektora, propusnost zračenja optike IC kamere i druge [Vollmer & Moellmann 2010].

Kako se u ovom radu promatra beton koji je neproziran za IC zračenje u dugovalnom području, i koji se u dugovalnom području proglašava sivim tijelom (poglavlje 3.1.5), ovdje će se promatrati samo mjerenje zračenja s neprozirnog sivog tijela.

Snaga zračenja s promatranog objekta $\emptyset_{object}(T_{object})$ je u usporedbi sa snagom zračenja crnog tijela iste temperature $\emptyset_{bb}(T_{object})$ dana slijedećim izrazom:

$$\emptyset_{object}(T_{object}) = \varepsilon \cdot \emptyset_{bb}(T_{object})$$

Koeficijent refleksije neprozirnog sivog tijela dan je izrazom (poglavlje 3.1.6):

$$\rho = 1 - \varepsilon$$

Promatrani objekt prima zračenje iz svoje okoline koja ima temperaturu T_{amb} i reflektira snagu zračenja

$$\rho \cdot \emptyset_{amb}(T_{amb}) = (1 - \varepsilon) \cdot \emptyset_{amb}(T_{amb})$$

Temperatura okoline se često u literaturi i od strane proizvođača naziva i prividna reflektirana temperatura [FLIR Systems 2007] i zato će se u daljnjem tekstu koristiti oznaka T_{refl}.

Snaga zračenja emitirana i/ili reflektirana od promatranog objekta mora proći kroz atmosferu. Zbog toga što atmosfera upija i raspršuje IC zračenje, Slika 3.4, snaga zračenja koje dolazi do detektora je smanjena (atenuirana). Utjecaj atmosfere može se matematički opisati množenjem doprinosa snage zračenja s objekta i doprinosa od objekta reflektirane snage zračenja s koeficijentom transmisije atmosfere τ_{atm} [Vollmer & Moellmann 2010]. Ukoliko se pretpostavi da se zračenje u atmosferi atenuira samo mehanizmom apsorpcije (raspršenje je zanemareno), atmosfera temperature T_{atm} će emitirati snagu zračenja:

$$(1 - \tau_{atm}) \cdot \emptyset_{atm}(T_{atm})$$

Do detektora IC kamere dolazi ukupno zračenje koje se sastoji od doprinosa zračenja promatranog objekta, zračenja njegove okoline i zračenja atmosfere. Potrebno je naglasiti da postoji i komponenta zračenja dijelova IC kamere (optike i filtera) koja se u modernim modelima kamere zanemaruje [Minkina & Dudzik 2009]. Ukupna upadna snaga zračenja na detektoru može se definirati kao:

$$\emptyset_{det} = \tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot \emptyset_{bb}(T_{object}) + \tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \emptyset_{refl}(T_{refl}) + (1 - \tau_{atm}) \cdot \emptyset_{atm}(T_{atm})$$

Strogo govoreći, navedeni izraz za $\emptyset_{det}$ predstavlja spektralnu snagu zračenja. Za proračun signala na detektoru, ova se jednadžba treba integrirati po valnoj duljini kako bi se u obzir uzela i ovisnost odziva detektora o spektru valnih duljina (Slika 3.19) i transmisiji atmosfere [Vollmer & Moellmann 2010, Minkina & Dudzik 2009].

Snaga zračenja promatranog objekta može se izračunati prema izrazu:

$$\emptyset_{bb}(T_{object}) = \frac{\emptyset_{det}}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon} - \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \emptyset_{refl}(T_{refl}) - \frac{(1 - \tau_{atm})}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon} \cdot \emptyset_{atm}(T_{atm})$$

Vrijednost $\emptyset_{det}$ se određuje iz izmjerenog signala na detektoru, dok je ostale parametre (ε, T_{refl}, T_{atm}, τ_{atm}) potrebno odrediti neovisno o samom mjerenju i unijeti u software kamere.

Određivanje vrijednosti koeficijenta emisije ε već je opisano u poglavlju 3.1.7, dok se temperatura atmosfere T_{atm} može odrediti uobičajenim mjerenjem termometrom. Određivanje reflektirane prividne temperature T_{refl} se neće ovdje posebno opisivati, a postupak se može pronaći u literaturi [Andrassy et al. 2008].

Za određivanje transmisijskog spektra atmosfere za IC zračenje postoji nekoliko računalnih modela, od kojih su najpoznatiji LOWTRAN (*Low Resolution Transmittance*), MODTRAN (*Moderate Resolution Transmittance*) i HITRAN (*High Resolution Transmittance*) [Vollmer & Moellmann 2010]. Navedeni modeli su modeli prijenosa zračenja kroz atmosferu koji uključuju konstante apsorpcije i raspršenja zračenja za sve relevantne plinove u atmosferi i vertikalnu raspodjelu sastava, a sve kako bi se omogućilo adekvatno modeliranje atenuacije zračenja od strane plinova a služe za predviđanje transmisije atmosfere i pozadinskog zračenja [Kneizys et al. 1988]. Većina plinova koji se mogu pronaći u Zemljinoj atmosferi, imaju konstantnu ili u vremenu sporo promjenjivu koncentraciju. Jedino se koncentracija vodene pare može značajno promijeniti u relativno kratkom vremenu, te je zbog toga relativna vlažnost veličina koju je potrebno točno izmjeriti kako bi se napravila točna kompenzacija atenuacije zračenja od strane vodene pare. Nadalje, atenuacija zračenja ovisi o udaljenosti od objekta do kamere, te ju je isto tako potrebno poznavati.

Atenuacija zračenja po njezinom izvornom pravcu se opisuje Bourguer-Lambert-Beerovim zakonom koji određuje veličinu transmitiranog dijela τ zračenja kao funkciju prijeđene udaljenosti kroz neku tvar [Vollmer & Moellmann 2010]:

$$\tau(\lambda, d) = \frac{I(\lambda, d)}{I(\lambda, 0)} = e^{-\gamma(\lambda) \cdot d}$$

ovdje I označava intenzitet zračenja (zračenje po streradijanu po jedinici površine, eng. radiance), dok $\gamma(\lambda) = \alpha(\lambda) + \sigma_{sc}(\lambda)$ označava ukupni koeficijent atenuacije nastao zbog udjela apsorpcije α i raspršenja σ_{sc} (promjene smjera rasprostiranja zračenja) i određen je laboratorijskim ispitivanjima te je poznat za većinu plinova atmosfere [Vollmer & Moellmann 2010].

Temperatura promatranog objekta se određuje iz snage zračenja samog objekta $\emptyset_{object}(T_{object})$ korištenjem kalibracijske krivulje kamere.

Opisani radiometrijski lanac je vrlo osjetljiv na vanjske utjecaje na snagu zračenja koja upadne na detektor IC kamere. Isto tako vidljivo je da varijacija koeficijenta emisije promatranog objekta ili reflektirane temperature okoline zahtijeva korekciju izmjerene snage zračenja za sve piksele detektora [Vollmer & Moellmann 2010].

Dodatna optika ili filtri znatno utječu na snagu zračenja koja dolazi do detektora te mijenjaju i kompliciraju radiometrijski lanac, zbog čega su potrebne dodatne kalibracije IC kamera sa svim dodatnim uređajima u kompletu te matematička analiza kako je prikazano u [Minkina & Dudzik 2009].

3.4 Degradacija signala

Općenito postoje tri vrste degradacije signala: radiometrijsko izobličenje, geometrijsko izobličenje i šum [Maldague 2001].

Šum se definira kao nedeterministički element koji kvari mjereni signal. Po svojoj prirodi, šum nema predvidljivo vremensko ponašanje, a definiran je statističkim parametrima poput standardne devijacije.

Iako je po prirodi slab, IC signal se nalazi pod utjecajem brojnih dodatnih izvora kao što su parazitska emisija, toplinska refleksija i nasumični dolazak fotona, koji doprinose daljnjoj degradaciji signala [Maldague 2001]. Elektronički šum koji potječe od detektora može biti iz tri izvora [Ibarra-Castanedo 2005]:

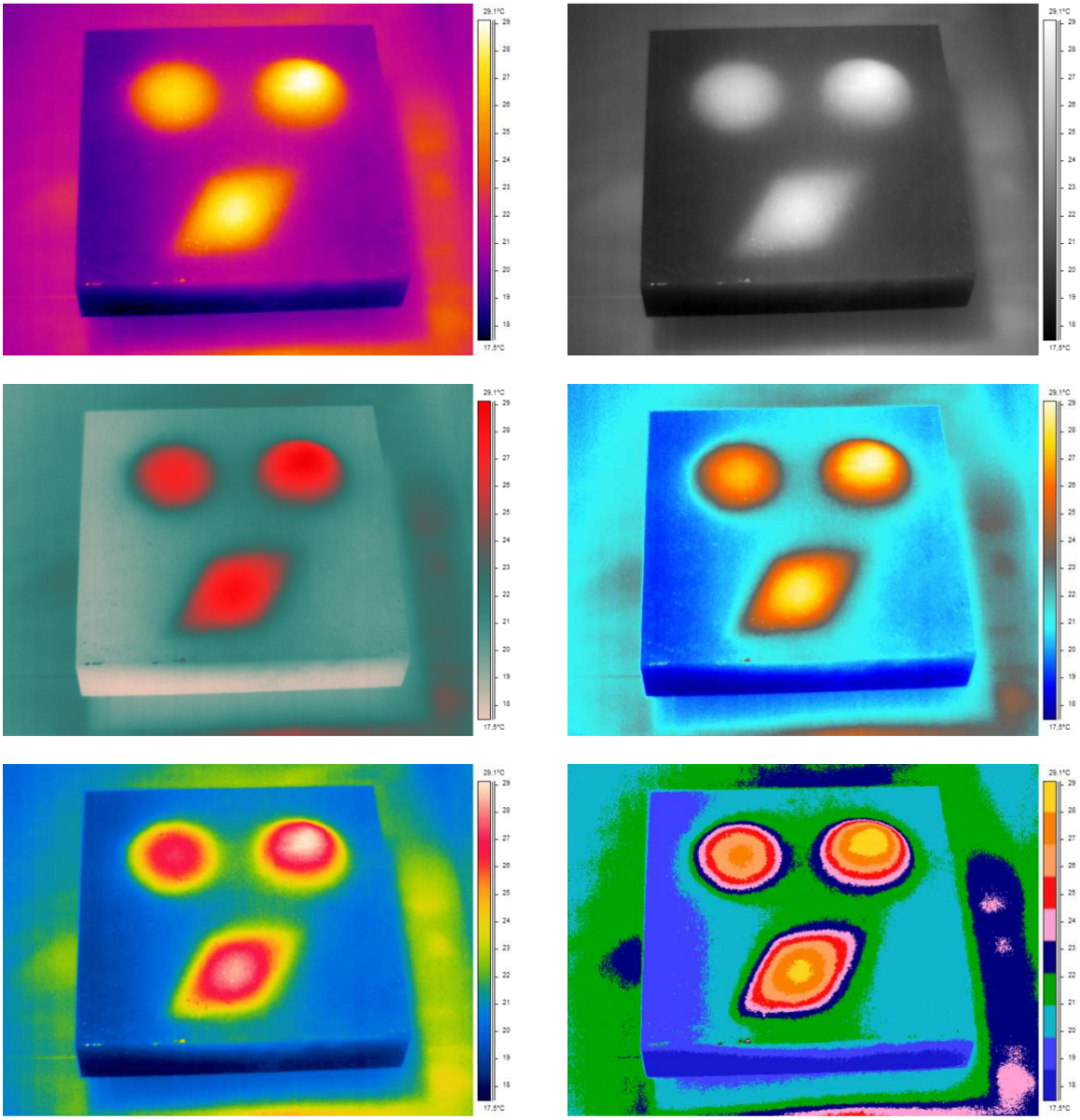
- zrnati šum (*shot noise*) – uzrokovan slučajnom varijacijom upadnog zračenja
- toplinski šum (*Johnson noise*) – uzrokovan slučajnim kretanjem elektrona u vodičima i otpornicima (može se smanjiti hlađenjem detektora)
- šum treperenja (*flicker noise*) – $1/f$ šum, šum koji ovisi o frekvenciji promatranja, njegov izvor nije u potpunosti razjašnjen, a skriva se u efektima kao što su kolebanja u broju nositelj naboja i njihovoj gibljivosti i dr. Obično se ovisnost šuma i frekvencije promatranja može napisati kao $\frac{1}{f^n}$, gdje je n obično između 0,9 i 1,35

Šum osim elektroničkog može biti:

- optički šum - nastaje iz slučajnih kolebanja upadnog zračenja
- šum od zagrijavanja – zbog nejednolike toplinske pobude (zagrijavanja) i prividnog zagrijavanja uzrokovanog refleksijama
- šum okoliša – elektromagnetske smetnje uzrokovane blizinom visokonaponskih vodova ili drugih izvora zračenja
- strukturni šum – slučajne promjene toplinskih i fizikalnih svojstava materijala

3.5 Rezultat termografskog snimanja

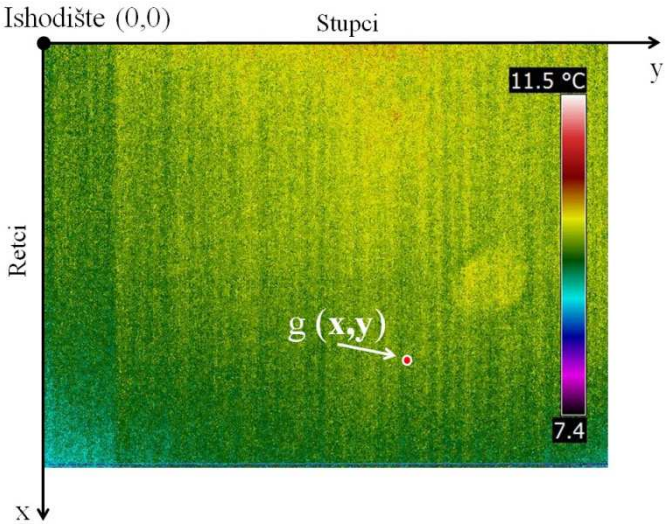
Rezultat termografskog snimanja je zapis raspodjele infracrvenog zračenja koje dolazi s površine promatranog objekta koji se jednom riječju naziva termogram. On u sivim tonovima ili nekom kodu boja daje sliku raspodjele prividne temperaturne na površini promatranog objekta, Slika 3.23.



Slika 3.23 Isti termogram u različitim paletama boja

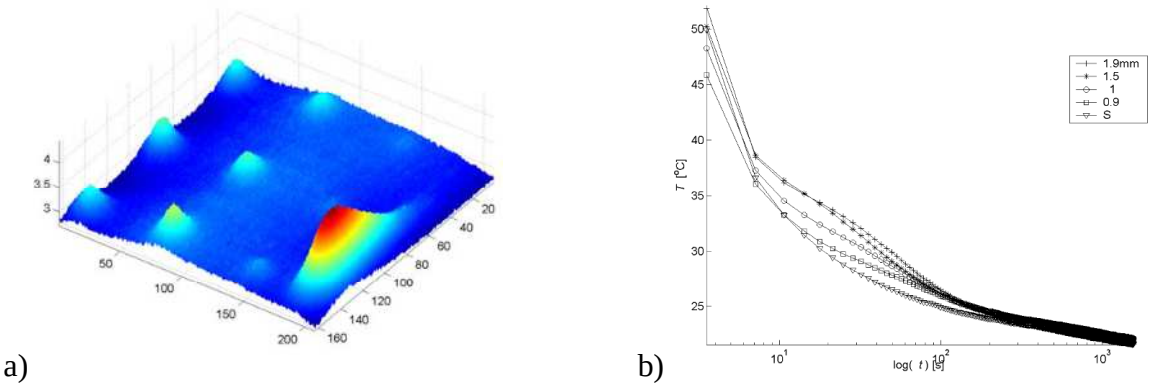
Digitalna slika, općenito se definira kao diskretizirana slika $g(x, y)$, gdje je g intenzitet promatrane veličine, a položaj na slici je određen prostornim koordinatama (x, y).Veličina g u danoj lokaciji (x_i, y_i) obično se naziva element slike ili piksel [Maldague 2001].

Termogram je, analogno prethodnoj definiciji, definiran kao dvodimenzionalna funkcija raspodjele zračenja $g(x, y)$, gdje su x i y prostorne koordinate, a vrijednost g u bilo kojoj točki (x, y) je proporcionalna zračenju, odnosno energiji emitiranoj s promatranog objekta na tom mjestu (x, y), Slika 3.24 [Maldague 2001].



Slika 3.24 Konvencija označavanja koordinata na termogramima - 2D [Maldague 2001]

Podaci prikupljeni IC kamerom mogu se osim uobičajenih 2D termograma (prikaza temperature) prikazati i u obliku amplitude, faze (ukoliko se radi o aktivnoj termografiji) nakon njihove obrade matematičkim postupcima kao što je brza Fourierova transformacija FFT. Prikaz osim 2D plohe (gdje različite boje predstavljaju intenzitet) može biti i 3D kod kojeg x i y koordinate predstavljaju plohu, a z koordinata predstavlja intenzitet promatrane vrijednosti. 1D prikaz pak se obično koristi kod prikazivanja ponašanja određene veličine tijekom vremena, Slika 3.25.



Slika 3.25 Vrste prikaza podataka, a) 3D; b) 1D vremenski razvoj

3.6 Aktivna termografija

Najvažniji uvjet za dobivanje korisnih i upotrebljivih rezultata korištenjem metode IC termografije je postojanje temperaturne razlike ili toplinskog kontrasta ΔT između unutarnjeg oštećenja u promatranom objektu i okoline tog oštećenja. Kada navedeni uvjet ne postoji, potrebno ga je postići, i tada se govori o aktivnoj termografiji.

Aktivna termografija je tehnika mjerenja metodom IC termografije koja se koristi ukoliko se promatra objekt koji je na istoj temperaturi kao i okolina, ili ukoliko se promatraju svojstva objekta ispod njegove površine [Andrassy et al. 2008]. Općenito je prihvaćeno da se aktivnom termografijom naziva svaka tehnika IC mjerenja kod koje je potrebna dodatna toplinska stimulacija objekta koji se promatra kako bi se postigla potrebna razlika u temperaturi [Maldague 2001].

Da bi aktivna termografija dala upotrebljive rezultate, potrebno je uvesti dodatni uvjet, a to su termofizikalna svojstva unutarnjih oštećenja u promatranom objektu, koja moraju biti različita od termofizikalnih svojstava materijala samog objekta. Bez zadovoljenja ovog uvjeta, detekcija oštećenja unutar promatranog objekta nije moguća [Ibarra-Castanedo 2005].

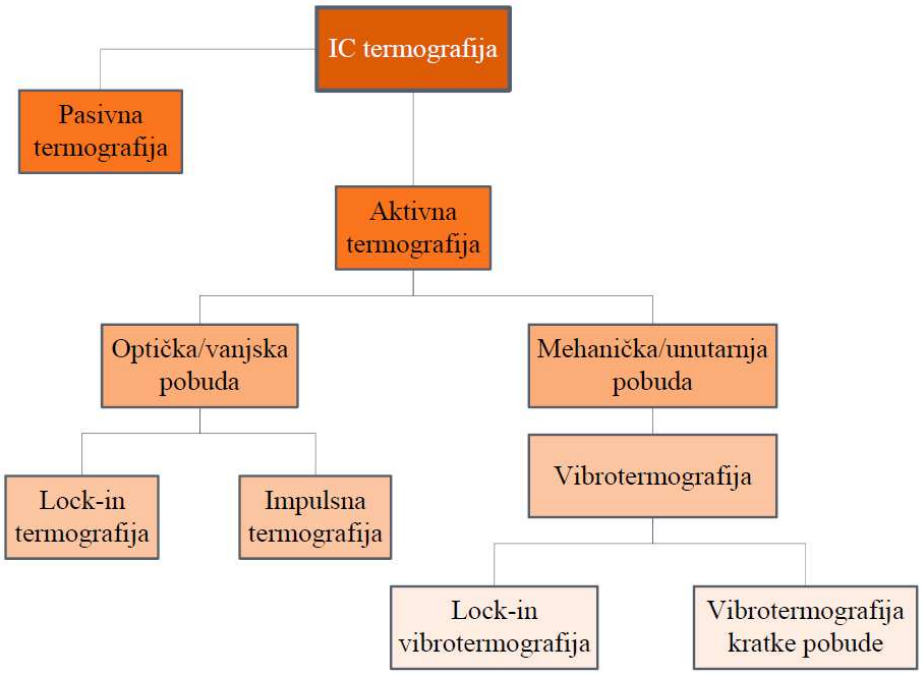
Postoji nekoliko tehnika aktivne termografije koje se mogu koristiti u nerazornom ispitivanju materijala i/ili konstrukcija, a razlikuju se u toplinskoj stimulaciji objekta koji se promatra, načinu prikupljanja i/ili obradi podataka [Ibarra-Castanedo 2005]:

- Termografija koračnog grijanja (SH) *eng. Step-Heating Thermography*
- Vibrotermografija (VT) *eng. Vibrothermography*
- Impulsna termografija (PT) *eng. Pulsed Thermography*
- Lock-in termografija (LT) *eng. Lock-in Thermography*
- Termografija faznog impulsa (PPT) *eng. Pulsed Phase Thermography*

Kao izvore energije za pobuđivanje temperaturnog kontrasta između oštećenog i neoštećenog područja u promatranom objektu može se koristiti široki spektar pobuda. Oni se mogu podijeliti na *vanjske izvore* (u slučaju da se energija predaje površini promatranog objekta, nakon čega se kroz njega prenosi dok ne stigne do oštećenja) i na *unutarnje izvore* kada se energija unosi u promatrani objekt kako bi se stimuliralo isključivo oštećenje. Vanjski izvori su obični optički uređaji kao što su ksenonske bljeskalice ili halogene lampe, dok se

kao unutarnja stimulacija koriste mehaničke oscilacije zvučnog ili ultrazvučnog izvora (Slika 3.26) [Ibarra-Castanedo et al. 2007, Zweschper et al. 2003].

Navedene tehnike aktivne termografije će u daljnjem tekstu biti ukratko opisane, dok će se naglasak dati na lock-in termografiju, koja je primarna tehnika istraživanja.



Slika 3.26 Tehnike aktivne termografije [Ibarra-Castanedo et al. 2007]

3.6.1 Toplinska difuzivnost

Toplinska difuzivnost je mjera brzine prijenosa topline kroz materijal i predstavlja omjer sposobnosti toplinske izolacije i sposobnosti očuvanja topline [Willems et al. 2006].

$$a_{diff} = \frac{\lambda_c}{\rho_m \cdot c_p} \qquad [\frac{m^2}{s}]$$

gdje je:

λ_c – toplinska provodljivost, [W/mK]

ρ_m – volumenska masa materijala, [kg/m³]

c_p – specifični toplinski kapacitet [J/kgK]

Iz manjih vrijednosti za a_{diff} slijedi sporije širenje topline u nekom materijalu. Toplinska difuzivnost će se povećati s povećanjem toplinske provodljivosti materijala i smanjiti s povećanjem količine topline potrebne za jedinično povećanje temperature objekta. Velike

vrijednosti toplinske difuzivnosti znače da promatrani objekt brzo reagira na promjene temperature, odnosno on vrlo brzo preraspodjeljuje toplinu [Vollmer & Moellmann 2010].

3.6.2 Toplinska efuzivnost

Toplinska efuzivnost se često naziva i toplinska inercija materijala, a definira se slijedećim izrazom [Willems et al. 2006]:

$$e_{eff} = \sqrt{\lambda_c \cdot \rho_m \cdot c_p} \qquad [W\sqrt{s}/m^2K]$$

Ukoliko se analizira odziv materijala na toplinu, toplinska efuzivnost predstavlja sposobnost materijala da poveća svoju temperaturu. Toplinska difuzivnost dakle određuje za koliko će se promijeniti temperatura objekta uslijed unosa određene količine topline u promatrani objekt [Vollmer & Moellmann 2010].

Kao i toplinska difuzivnost, tako i toplinska efuzivnost služi za ocjenu toplinsko tehničkog ponašanja materijala pod nestacionarnim temperaturnim graničnim uvjetima. Ukoliko je veća efuzivnost nekog materijala, onda se toplina može brže preuzeti s površine i odvoditi u materijal, što znači da će materijali s velikom efuzivnosti biti hladni pri dodiru.

3.6.3 Teorija toplinskog vala

Prije objašnjenja tehnika aktivne termografije potrebno je objasniti pojam toplinskog vala.

Nestacionarni toplinski tok u krutom tijelu je karakteriziran s dvije veličine, toplinskom difuzivnosti a_{diff} i toplinskom efuzivnosti e_{eff} [Vollmer & Moellmann 2010].

Kada se površina promatranog objekta zagrije, unutar materijala se javljaju valovi koji su visoko atenuirani (prigušeni) i raspršeni, a nazivaju se toplinski valovi [Fourier 1890, Maldague 2001]. Može se pokazati da Fouriereov zakon vođenja topline, pod pretpostavkom harmonijskog zagrijavanja površine promatranog objekta pruža harmonijsku promjenu temperaturnog polja unutar svoje strukture. Ta promjena temperature ima istu frekvenciju kao i zagrijavanja, ali ima drugu fazu i amplitudu [Vollmer & Moellmann 2010].

U slučaju polu-beskonačno velikog predmeta (plošni uzorak) na koji jednolični izvor periodično prenosi toplinu s modulacijskom frekvencijom ω, prijenos topline postaje

jednodimenzionalan, a rezultirajuća temperatura (izražena kao funkcija dubine z i vremena t) može se izraziti kao [Favro & Han 1998]:

$$T(x,t) = T_0 e^{-z/\mu} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) = T_0 e^{-z/\mu} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right)$$

gdje je μ trajanje toplinske difuzivnosti koja ovisi o toplinskoj difuzivnosti α_{diff} i frekvenciji toplinskog vala (ili toplinske stimulacije) f $[Hz]$, odnosno modulacijskoj frekvenciji $\omega = 2\pi f$ $[\frac{rad}{s}]$, a $\lambda_{tw} = 2\pi\mu$ valna duljina toplinskog vala [Maldague 2001, Vollmer & Moellmann 2010]:

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha_{diff}}{\pi \cdot f}} = \sqrt{\frac{2\alpha_{diff}}{\omega}} \qquad [m]$$

Iz navedenog izraza proizlazi da toplinski valovi niže frekvencije prodiru dublje u materijal od onih više frekvencije, a dubina penetracije će se povećati s povećanjem toplinske difuzivnosti materijala.

Brzina širenja toplinskih valova kroz materijal računa se prema izrazu:

$$v_{tw} = \lambda \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt{2\omega\alpha_{diff}}$$

Faza toplinskog vala u ovisnosti o dubini širenja u materijal promatranog objekta z računa se prema izrazu:

$$\phi_{tw}(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu}$$

Toplinski valovi se reflektiraju na granicama između materijala, samo ukoliko se radi o granici između materijala različitih vrijednosti toplinske efuzivnosti [Vollmer & Moellmann 2010]. Ukoliko se promatra granica između krutine i plina, toplinska efuzivnost krutine je puno veća od one plina, pa se krutina ponaša kao reflektor toplinskih valova za prijelaz iz plina u krutinu. Kao rezultat, svaka refleksija od unutarnjih granica mijenjat će način širenja toplinskih valova kroz promatrani objekt, što će uzrokovati promjene u distribuciji temperature na površini objekta [Vollmer & Moellmann 2010]. Toplinski valovi prikazuju valne fenomene u slučajevima refleksije, refrakcije i interferencije. Širenje toplinskih valova u

nehomogenim materijalima bit će pod utjecajem navedenih efekata te će rezultirati vremenski promjenjivim temperaturnim poljem na površini promatranog objekta.

Koeficijent refleksije R_{tw} između dva medija (medija 1 i medija 2) se u slučaju homogenih materijala računa prema slijedećem izrazu [Maldague 2001]:

$$R_{tw} = \frac{\frac{e_{diff,2}}{e_{diff,1}} - 1}{\frac{e_{diff,2}}{e_{diff,1}} + 1}$$

U slučaju prijelaza između betona i zraka (zrak je simuliran ugrađenim defektima izrađenima od XPS-a), koeficijent refleksije dan je u daljnjem tekstu (poglavlje 4.2).

Ovaj kratki pregled teorije toplinskog vala vrijedi za sve tehnike zagrijavanja, odnosno tehnike aktivne IC termografije, koje će se dalje opisati.

3.6.4 Termografija koračnog grijanja

Termografija koračnog grijanja (SH - *step heating thermography*) je tehnika aktivne termografije kod koje se mjeri rast površinske temperature promatranog objekta u vremenskim koracima, a sve tijekom primjene kontinuirane pobude dugotrajnim zagrijavanjem uz korištenje slabijih izvora topline [Maldague 2001]. Mjerenje promjene temperature nije ograničeno samo na period zagrijavanja, nego se može promatrati i nakon prestanka zagrijavanja [Brown 2005]. Evolucija površinske temperature objekta u vremenu ovisi o toplinskoj difuzivnosti unutar strukture samog objekta, koja ovisi o tome da li u unutrašnjosti postoje oštećenja [Badghaish & Fleming 2008]. Korištenjem SH tehnike mogu se ispitivati materijali manje toplinske provodljivosti i toplinske difuzivnosti, te objekti s dubljim oštećenjima. Prednost je korištenja SH termografije mala potrebna brzina prikupljanja (snimanja) termograma te niska cijena potrebnih izvora topline (IC ili halogenih lampi). Nedostatak ove tehnike je svakako otežana mogućnost jednolikog zagrijavanja cjelokupne površine promatranog objekta [Brown 2005].

Za pločasti uzorak (polubeskonačni slučaj) sastavljen od dva sloja, razvoj temperature na površini uzorka uslijed dugotrajnog zagrijavanja u ranom periodu (provođenje topline samo kroz prvi dio uzorka), vrijedi jednodimenzionalna aproksimacija prema [Murphy et al. 1992]:

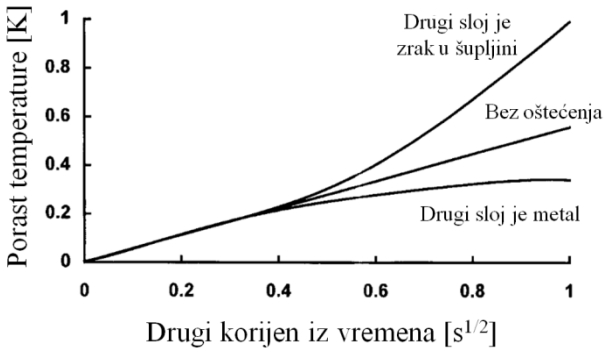
$$T(t) = C_c\sqrt{t}\left\{1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2(-\Gamma)^n \left[e^{\left(-\frac{n^2D^2}{\alpha_{diff,0}\cdot t}\right)} - \frac{nD\sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha_{diff,0}\cdot t}} erfc\left(\frac{nD}{\sqrt{\alpha_{diff,0}\cdot t}}\right)\right]\right\}$$

gdje je $\alpha_{diff,0}$ toplinska difuzivnost prvog sloja uzorka (sloja okrenutog prema toplinskoj pobudi), D je debljina prvog sloja, odnosno dubina na kojoj se nalazi oštećenje. C_c je konstanta koja je povezana s apsorpcijom energije koja dolazi od toplinske pobude. Γ je koeficijent toplinskog neslaganja (*thermal mismatch factor*), koji se definira prema [Maldague 2001]:

$$\Gamma = \frac{e_{eff,1} - e_{eff,0}}{e_{eff,1} + e_{eff,0}}$$

gdje je $e_{eff,0}$ toplinska efuzivnost prvog sloja uzorka, dok je $e_{eff,1}$ toplinska efuzivnost drugog sloja uzorka.

Ukoliko se nacrta krivulja temperaturnog rasta, na način da je os apscisa u mjerilu drugog korijena iz vremena, moguće je odrediti trenutak u vremenu kod kojeg dolazi do odstupanja krivulje razvoja temperature od idealnog polubeskonačnog slučaja za uzorak bez oštećenja, Slika 3.27. Pokazano je da je vrijeme odstupanja proporcionalno odnosu dubine oštećenja i toplinske difuzivnosti materijala prvog sloja $\frac{D}{\sqrt{\alpha_{diff}}}$, [Maldague 2001].

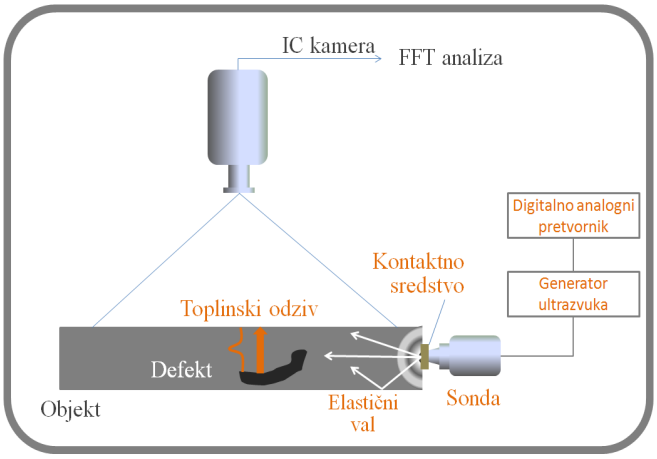


Slika 3.27 Razvoj temperature površine uzorka kao funkcija drugog korijena iz vremena [Maldague 2001]

3.6.5 Vibrotermografija

Vibrotermografija (VT) je tehnika aktivne termografije kod koje se koristi efekt oslobađanja topline uslijed trenja uzrokovanog mehaničkim vibracijama (0-25 kHz) induciranima na površini promatranog objekta. Ultrazvučni valovi putuju kroz homogeni

materijal, dok se toplina oslobađa na mjestu postojanja oštećenja kao što su pukotine i/ili delaminacije, gdje periodični valovi uzrokuju povećanje temperature na mjestima koncentracije naprezanja, (Slika 3.28) [Maldague 2001]. Drugi nazivi koji se koriste za ovu tehniku su *ultrazvučna termografija* [A. Dillenz et al. 2001] ili *termosonika* [Favro et al. 2000].



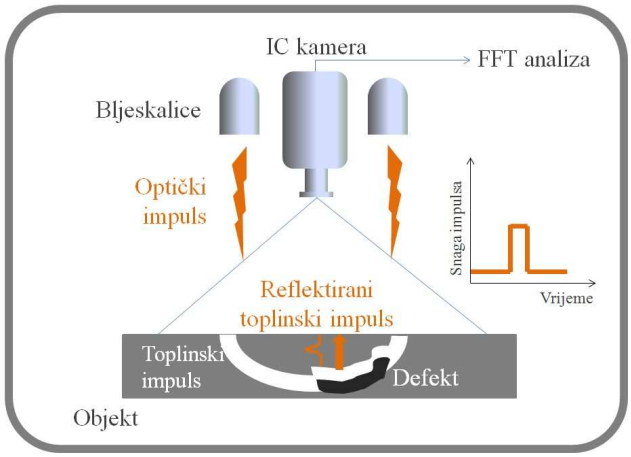
Slika 3.28 Shematski prikaz vibrotermografije [Zweschper et al. 2003]

Postoje dvije osnovne konfiguracije korištenja VT, a koje mogu biti promatrane kao analogne optičkim metodama (PT i LT) koje su opisane u daljnjem tekstu. Prva konfiguracija je *vibrotermografija kratke pobude* (eng. *burst vibrothermography*) koja je analogna PT, a druga je *lock-in vibrotermografija*, analogna LT pristupu. Kod oba navedena pristupa moguće je mijenjati (modulirati) amplitudu i frekvenciju kako bi se pokrio spektar frekvencija ultrazvuka što pridonosi otkrivanju optimalne frekvencije pobude za pojedinu primjenu [Ibarra-Castanedo et al. 2007].

U usporedbi s tehnikama koje koriste optičku toplinsku pobudu (PT, LT); kod VT, toplinski valovi moraju proći polovicu udaljenosti, zbog toga što se toplina prenosi samo od oštećenja do površine promatranog objekta, dok se kod PT i LT pristupa toplina prenosi od površine do oštećenja i natrag. Ovo čini VT vrlo brzom tehnikom, ispitivanje traje maksimalno nekoliko sekundi i pogodna je za ispitivanje relativno malih objekata na većoj dubini, pri čemu se ispitivanje mikropukotina VT tehnikom pokazalo kao najprikladnija IC tehnika [Ibarra-Castanedo et al. 2007].

3.6.6 Impulsna termografija

Impulsna termografija (PT) je tehnika kod koje se objekt promatranja toplinski pobuđuje kratkim impulsima. Koristi se kod materijala s visokom toplinskom provodljivosti (trajanje impulsa do nekoliko milisekundi), dok je kod materijala s manjom toplinskom provodljivosti toplinski impuls potrebno zadržati nekoliko sekundi na promatranom objektu [Maldague 2001]. Postupak mjerenja tehnikom PT se sastoji u tome da se promatrani objekt zagrije toplinskim impulsom, te se zatim promatra krivulja hlađenja.

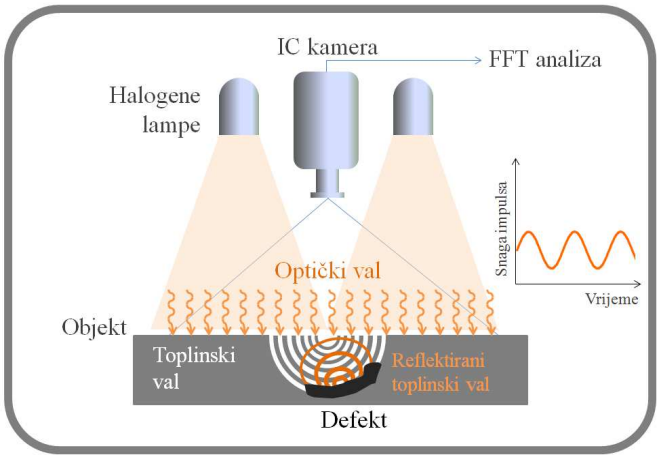


Slika 3.29 Shematski prikaz impulsne termografije [Spiessberger et al. 2010]

Kvalitativno, postupak mjerenja PT –om može se opisati na način da se temperatura materijala brzo promijeni nakon početnog toplinskog impulsa, zbog toga što toplinska fronta napreduje mehanizmom toplinske difuzivnosti (mjera za brzinu putovanja topline kroz tvar). Utjecaj na napredovanje fronte imaju gubici zračenjem i strujanjem [Maldague 2001]. Postojanje oštećenja u promatranom objektu mijenja toplinsku difuzivnost, tako da se prilikom promatranja temperature površine tijela, može pronaći različita temperatura od temperature okoliša na mjestu iznad oštećenja. Nedostatak je PT što su vidljiva samo oštećenja koja su plitko ispod površine promatranog objekta, s time da će kontrast biti vrlo slab. Empirijsko pravilo kaže da radijus najmanjeg oštećenja kojeg je moguće otkriti mora biti barem jedan do dva puta veći od njegove dubine ispod površine promatranog objekta [Vavilov & Taylor 1982].

3.6.7 Lock-in termografija

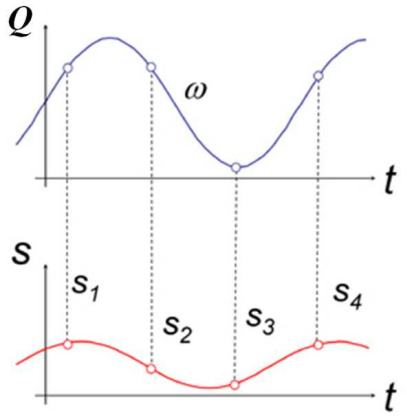
Lock-in termografija (LT) je tehnika koja se temelji na toplinskim valovima generiranima unutar uzorka [Maldague 2001]. Modulirana toplina magnitude Q unosi se na površinu promatranog objekta pri kutnoj frekvenciji ω. Ovakav način moduliranog zagrijavanja površine promatranog objekta uzrokuje generiranje toplinskih valova koji se šire kroz materijal uzorka i reflektiraju od oštećenja natrag na površinu objekta, gdje se detektiraju IC termografijom [Maldague 2001]. Ulazni parametri su magnituda i kutna frekvencija modulirane topline $[Q, \omega]$, a izlazni amplituda i faza te kutna frekvencija toplinskog vala $[A_{tw}, \phi_{tw}, \omega]$. Generiranje valova se dakle postiže periodičnim zagrijavanjem površine promatranog objekta (sinusna modulacija lampe za zagrijavanje), dok se promatra rezultirajuća oscilacija temperaturnog polja u stacionarnom stanju na površini pomoću IC termografije u sekvenci termograma [Busse 1994].



Slika 3.30 Shematski prikaz Lock-in termografije [Spiessberger et al. 2010]

Pojam Lock-in se odnosi na potrebu promatranja točne vremenske ovisnosti između izlaznog signala i referentnog ulaznog signala (npr. modulacijskog zagrijavanja) što se postiže računalnim upravljanjem procesa zagrijavanja ali i procesa snimanja termograma [Maldague 2001].

Ukoliko toplinska pobuda Q i odziv S imaju sinusoidalni oblik, mjerenjem evolucije temperature na površini promatranog objekta omogućuje se rekonstrukcija toplinskog vala i određivanje vrijednosti amplitude A_{tw} i faze toplinskog vala ϕ_{tw} za svaki piksel (x, y) iz četiri ekvidistantne točke S_1, S_2, S_3, S_4 zabilježene na površini promatranog objekta tijekom jednog ciklusa modulacije [Maldague 2001, Ibarra-Castanedo 2005, Vollmer & Moellmann 2010].



Slika 3.31 Pronalaženje vrijednosti amplitude i faze toplinskog vala [Ibarra-Castanedo 2005]

$$\phi_{tw}(x,y) = arctan\frac{S_1(x,y) - S_3(x,y)}{S_2(x,y) - S_4(x,y)}$$

$$A_{tw}(x,y) = \sqrt{[S_1(x,y) - S_3(x,y)]^2 + [S_2(x,y) - S_4(x,y)]^2}$$

Fazni prikazi vezani su uz vrijeme propagacije (napredovanja) i relativno su neosjetljivi na lokalna svojstva površine, varijacije u emisivnosti površine, refleksije iz okoliša i nejednoliko zagrijavanje [Rosencwaig & Busse 1980, Wu & Busse 1998, Busse et al. 1992, Ibarra-Castanedo 2005]. Dubina do koje se oštećenja mogu otkriti je obrnuto proporcionalna s modulacijskom frekvencijom toplinske pobude, tako da više modulacijske frekvencije ograničavaju analizu na relativno male dubine u promatranom objektu [Maldague 2001].

Vrsta materijala od kojeg je promatrani objekt izrađen, odnosno trajanje toplinske difuzivnosti, određuju dubinu do koje je moguće otkriti oštećenja. Pokazalo se da amplitudni prikaz otkriva oštećenja do dubine koja je jednaka trajanju toplinske difuzivnosti $z \approx \mu$, dok fazni prikaz omogućava otkrivanje mogućnosti oštećenja u rasponu od $1{,}5\mu$ do više od 2μ [Maldague 2001, Ibarra-Castanedo 2005].

Zbog navedenog, iako se uz konvencionalne termograme i amplitudni prikaz može koristiti, fazni prikaz je korisniji za primjenu kod nerazornih ispitivanja, naročito za kvantitativnu ocjenu stanja materijala [Sakagami & Kubo 2002].

Prije definiranja načina određivanja dubine na kojoj se nalazi oštećenje u materijalu, potrebno je definirati fazni kontrast (*eng. phase contrast*) i graničnu frekvenciju (*eng. blind frequency*).

3.6.7.1 Apsolutni fazni kontrast

Slično kao u slučaju apsolutnog temperaturnog kontrasta koji se računa kao temperaturna razlika između zone koja sadrži oštećenja i neoštećene zone, a računa se:

$$\Delta T = T_d - T_s$$

Apsolutni fazni kontrast se definira kao razlika između faze zone koja sadrži oštećenja i neoštećene zone [Ibarra-Castanedo 2005]:

$$\Delta\phi = \phi_d - \phi_s$$

3.6.7.2 Granična frekvencija

Granična frekvencija (*eng. blind frequency*) f_b je frekvencija pobude kod koje postoji dovoljno veliki fazni kontrast kako bi se detektiralo oštećenje u promatranom objektu [Ibarra-Castanedo 2005].

3.6.7.3 Kvantitativna LT

Istraživanja [Meola et al. 2004, Meola & Carlomagno 2004] predlažu rješavanje problema kvantifikacije oštećenja u materijalima korištenjem jednadžbe:

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha_{diff}}{\pi \cdot f}} = \sqrt{\frac{2\alpha_{diff}}{\omega}} \qquad [m],$$

iz koje se uz poznavanje toplinske difuzivnosti materijala i frekvencije kod koje je oštećenje moguće detektirati (granične frekvencije) može izračunati dubina na kojoj se nalazi oštećenje:

$$z = C_1\sqrt{\frac{\alpha_{diff}}{\pi \cdot f_b}} = C_1 \cdot \mu \ ,$$

gdje je C_1 konstanta korelacije koja se uzima da je $C_1 = 1{,}0$ u slučaju da se radi o prikazu amplitude, odnosno $1{,}5 < C_1 < 2{,}0$ ukoliko se radi o faznom prikazu, a često se prihvaća vrijednost $C_1 = 1{,}8$ [Ibarra-Castanedo 2005].

[Giorelo & Meola 2002] i [Meola & Carlomagno 2004] razmatraju utjecaj veličine oštećenja, debljine i toplinskih svojstava oštećenja u materijalima koji se koriste u aeronautici na rezultate određivanja dubine oštećenja. Pri tome navedena tri parametra imaju najznačajniji

utjecaj na intenzitet faze, dok su bez utjecaja na graničnu frekvenciju i na same rezultate određivanja dubine oštećenja.

Toplinska difuzivnost se može odrediti određivanjem granične frekvencije f_b pri kojoj je moguće detektirati stražnju stranu promatranog objekta, uz pretpostavku da je poznata debljina objekta. Za određivanje f_b sa stražnje strane promatranog objekta postavljen je metalni prsten, a frekvencija pobude se varira s prednje strane, do trenutka dok prsten ne postane vidljiv. Ta vrijednost se zatim koristi u izrazu:

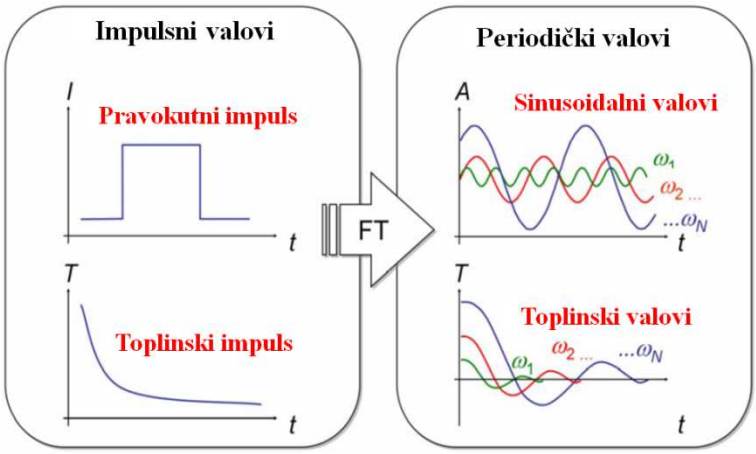
$$\alpha = \pi \cdot f_b \cdot \left(\frac{L}{C_1}\right)^2$$

gdje je L poznata debljina promatranog objekta, a $C_1 = 1{,}8$ [Giorleo et al. 2000, Meola et al. 2002].

3.6.8 Termografija faznog impulsa

Termografija faznog impulsa (PPT) je tehnika kod koje se prikupljeni podaci transformiraju iz vremenske domene u frekvencijsku domenu korištenjem jednodimenzionalne diskretne Fourierove transformacije (DFT) [Ibarra-Castanedo, Genest, Servais, et al. 2007; Maldague 2001].

PPT tehnika se smatra kao poveznica između PT i LT tehnike, s obzirom da kombinira prednosti obje navedene tehnike. Iako nije očigledno, veza između PT i LT tehnika može se uspostaviti kroz princip superpozicije, odnosno činjenicu da se svaki valni oblik, periodički ili ne, može aproksimirati sumom harmoničnih valova koji osciliraju pri različitim frekvencijama, Slika 3.32.



Slika 3.32 Eksperimentalna konfiguracija PT i LT [Ibarra-Castanedo 2005]

Impulsne forme na lijevoj strani, pravokutni impuls i krivulja hlađenja, (Slika 3.32), mogu se aproksimirati sumom sinusoidalnih valova s frekvencijama raspona od 0 do ∞ (na slici su zbog jednostavnosti prikazane samo tri harmonika).

Kod ispitivanja, zbog ograničenja opreme (minimalna i maksimalna frekvencija ispitivanja, frekvencijske rezolucije i parametara prikupljanja podataka), moguće je izvući samo određeni broj toplinskih valova iz toplinskog impulsa, pri čemu svaki toplinski val ima različitu frekvenciju, amplitudu i fazni pomak [Ibarra-Castanedo 2005].

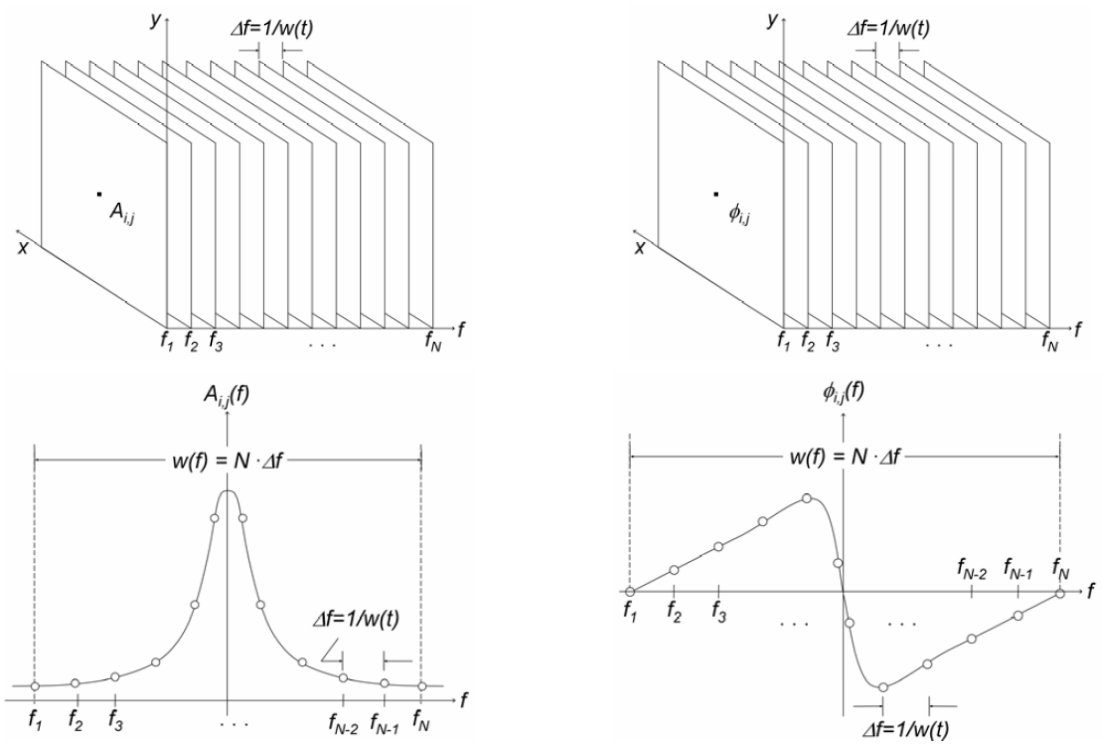
Kao tehnika za naknadnu obradu rezultata ispitivanja koristi se Fourierova transformacija:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right)} = Re_n + Im_n$$

gdje je j imaginarna jedinica ($j^2 = -1$), n određuje prirast frekvencije, Δt je interval prikupljanja podataka (mjerenja) a Re i Im su realni i imaginarni dijelovi transformacije. Realni i imaginarni dijelovi transformacije se koriste za procjenu amplitude A i faze $\emptyset$.

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \qquad \text{i} \qquad \emptyset_n = \tan^{-1}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right)$$

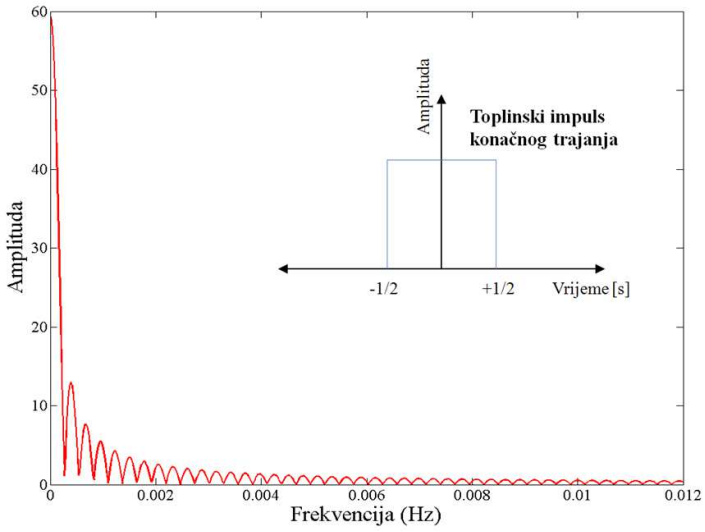
Rekonstrukcija 3D matrice može se napraviti kako je ilustrirano, Slika 3.33.



a) *b)*

Slika 3.33 Prikaz sekvenci amplitude a) i faze b) i njihovi pripadajući profili u frekvencijskom spektru za piksel (i,j) na području bez oštećenja [Ibarra-Castanedo 2005]

Matrice, Slika 3.33 se mogu prikupiti iz izraza za A_n i $\emptyset_n$ koji su primijenjeni na svaki piksel sekvence termograma. Potrebno je naglasiti da je iz sekvence od *n* termograma moguće izvući *n/2* korisne komponente frekvencije, a druga polovica spektra pruža samo višak informacija, pa se negativne frekvencije mogu odbaciti [Ibarra-Castanedo 2005].



Slika 3.34 Amplituda [dB] dugotrajnog pravokutnog toplinskog impulsa u frekvencijskoj domeni

Slika 3.34 prikazuje realni dio pripadajućeg frekvencijskog spektra za vremenski impuls određenog trajanja, odnosno prikazuje amplitudu dugotrajnog pravokutnog toplinskog impulsa za uzorak BM 1-3 s donje strane, s toplinskom pobudom na udaljenosti od 1,5 m, dobivenu nakon provedene brze Fourierove transformacije krivulje razvoja temperature na površini neoštećenog dijela uzorka.

Toplinski impulsi duljeg trajanja u vremenskoj domeni, imaju uži spektar u frekvencijskoj domeni. Dostupna energija je koncentrirana u nižim frekvencijama, a niže frekvencije prodiru dublje u uzorak [Maldague 2001].

Diskretne frekvencije f_n za koje je moguće rekonstruirati prikaze faze i amplitude dane su izrazom [Maldague 2001]:

$$f_n = \frac{n}{N\Delta}$$

Maksimalna je frekvencija ograničena brzinom prikupljanja termograma, dakle karakteristikama opreme koja se koristi, a ponajprije IC kamere, dok je minimalna frekvencija određena trajanjem eksperimenta. U primjeni, moguće je iskoristiti tek prvih nekoliko frekvencija za prikaz oštećenja zbog toga što je najveći dio energije koncentriran u niskim frekvencijama, dok više frekvencije prikazuju višu razinu šuma čime se sprječava mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorcima [Maldague 2001].

3.6.9 Termografija glavnih komponenti

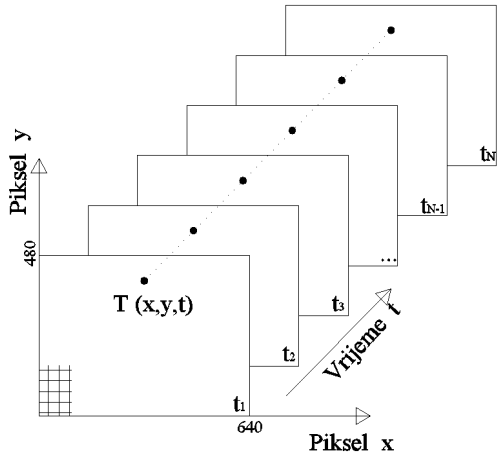
Analiza glavnih komponenti (PCA – *principal component analysis*) je statističko oruđe koje se koristi za identifikaciju uzoraka u skupovima podataka, te izražavanje podataka na način da se naglase sličnosti i različitosti određenih obrazaca ponašanja koji se pojavljuju u skupu podataka [Parvataneni 2009].

[Rajic 2002a; Rajic 2002b] predlaže korištenje tehnike koju je nazvao termografija glavnih komponenti (*principal component thermography*) pri obradi sekvenci termograma dobivenih ispitivanjem kompozitnih materijala za povećanje kontrasta prikupljenih termograma, pri čemu je kao toplinska pobuda korištena bljeskalica, odnosno proveden je postupak ispitivanja impulsnom termografijom. Ova metoda pomaže u smanjenju neželjenog šuma prisutnog u sekvenci termograma i povećanju kontrasta naknadno obrađenih termograma u usporedbi s

neobrađenim skupom termograma, a sve korištenjem statističkih modova dobivenih dekompozicijom podataka na singularne vrijednosti [Parvataneni 2009].

Kod PCA, podaci su projicirani iz njihovog izvornog vektorskog prostora u vektorski prostor vlastitih vektora kako bi se povećala varijantna i smanjila kovarijantna komponenta (postaje više negativna za svaki par vrijednosti koji se razlikuje od njihovih srednjih vrijednosti u suprotnim smjerovima), a time i identificirali obrasci ponašanja u skupu podataka.

Analiza glavnih komponenti (PCA) primijenjena na skup podataka u obliku sekvence termograma naziva se termografija glavnih komponenti (PCT). Pri tome se sekvenca termograma može smatrati kao 3D matrica koja se sastoji od N termograma, od kojih se svaki termogram sastoji od x horizontalnih elemenata (piksela) i y vertikalnih elemenata (piksela), Slika 3.35. Kako bi se primijenila PCT na sekvencu termograma , potrebno je 3D matricu pretvoriti u 2D matricu, što se postiže slijedećim postupkom.



Slika 3.35 Sekvenca od N termograma

Svaki termogram u sekvenci se može predstaviti $N_x \cdot N_y$ dimenzionalnim vektorom $\mathbf{X}$:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_x \cdot N_y}] ,$$

gdje su x_i pojedini pikseli termograma poredani jedan iza drugoga čime tvore 1D sliku.

Ukoliko se analogan postupak napravi sa svih N termograma u sekvenci, moguće je generirati 2D matricu u kojoj svaki redak predstavlja jedan termogram sekvence, a stupac zadrži N vektora pojedinih termograma. Dobivena matrica naziva se rasterska matrica (*raster-like matrix*)

Za prikupljeni skup podataka, 2D rastersku matricu, potrebno je najprije izračunati srednju vrijednost, koja se zatim oduzima od početnog skupa podataka kako bi se normalizirali podaci. Za matricu normaliziranih podataka se izračuna matrica kovarijance **Cov** prema izrazu:

$$\mathbf{Cov} = \frac{1}{N}\mathbf{X}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}$$

gdje je **X** matrica dobivena nakon normalizacije, a matrica kovarijance je dimenzija $N_x N_y$ x $N_x N_y$.

Vlastite vrijednosti i vlastiti vektori se izračunaju dijagonalizacijom matrice:

$$\mathbf{Cov_D} = \mathbf{P^{-1}}\,\mathbf{Cov}\,\mathbf{P}$$

gdje je $\mathbf{Cov_D}$ dijagonalizirana matrica s vlastitim vrijednostima na dijagonali, a **P** je matrica s vlastitim vektorima kao stupcima, ukupno ima $N_x N_y$ vlastitih vektora.

Matricu $\mathbf{Cov_D}$ potrebno je preurediti na način da su vlastiti vektori posloženi u opadajućem redoslijedu po magnitudi. U matrici vlastitih vektora **P** potrebno je napraviti sličnu promjenu redoslijeda. Vlastiti vektor s najvećom vlastitom vrijednosti je glavna komponenta za promatrani skup podataka. U najvećem broju slučajeva, više od 95% varijance je sadržano u prvih tri do pet glavnih komponenti. Korištenjem glavnih komponenti, rekonstruira se skup podataka koji sada označava sličnosti i različitosti u skupu [Parvataneni 2009].

Glavni nedostatak PCT metode je veličina podataka i trajanje proračuna ukoliko se obrađuje sekvenca termograma čija je rasterska matrica veća od 10^4, a matrica kovarijance tada prelazi 10^8.

Zbog toga se koristi kompresija pomoću dekompozicije na singularne vrijednosti, pri čemu su kod proračuni prvi koraci jednaki već opisanima kod PCA, sve do trenutka kada se dobije matrica normaliziranih podataka. Normalizacija se postiže korištenjem jednadžbi [Rajic 2002b]:

$$\hat{A}(n,m) = \frac{A(n,m) - \mu_n}{\sigma_n}$$

$$\mu_n = \frac{1}{N_t}\sum_{n=1}^{N_t} A(n,m)$$

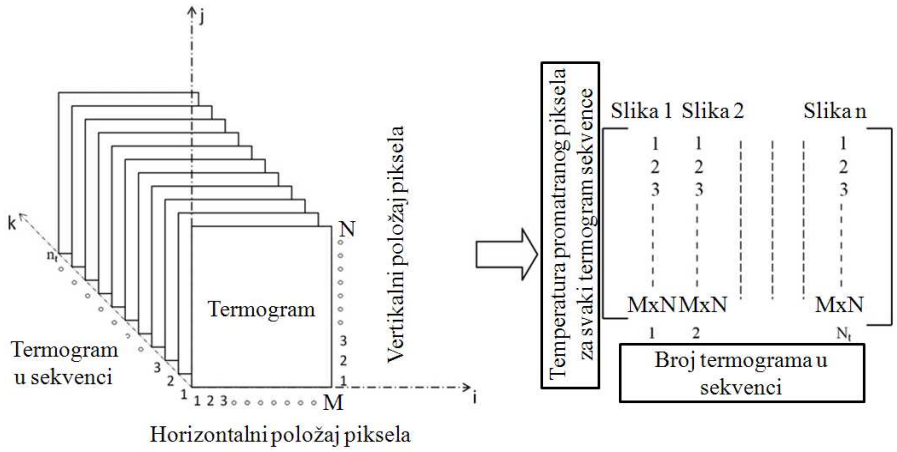
$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{N_t - 1}\sum_{n=1}^{N_t}(A(n,m) - \mu_n)^2}$$

Normalizacija u odnosu na standardnu devijaciju piksela osigurava da varijacije piksela u karakteristikama detektora IC kamere (kao što je osjetljivost) ne utječu na dekompoziciju matrice.

Na normalizirani skup podataka primjenjuje se SVD korištenjem izraza:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U\Gamma V}^{\mathrm{T}}$$

kako bi se proračunale matrice $\mathbf{U}, \mathbf{\Gamma}$ i $\mathbf{V}$ odnosno dobile glavne komponente. **A** je ovdje rasterska matrica koja se sastoji od N redaka i $N_x N_y$ stupaca, Slika 3.36, [Rajic 2002b].



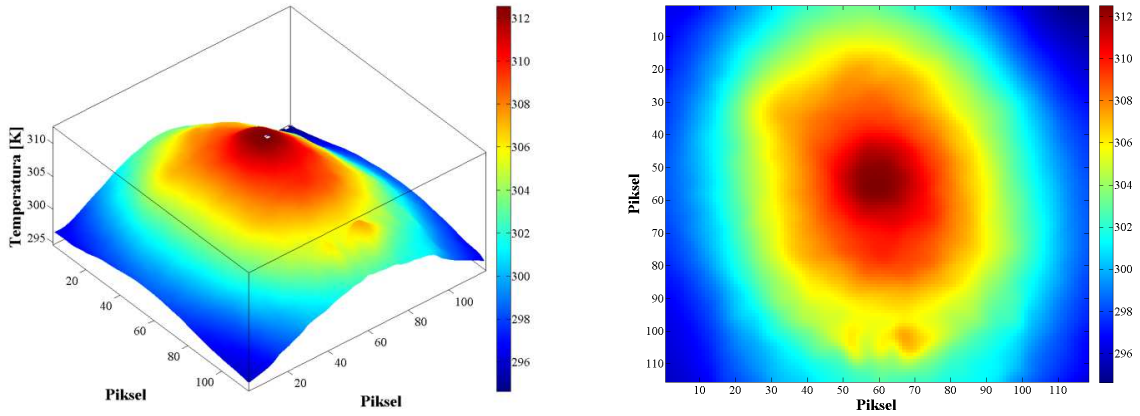
Slika 3.36 Formiranje 2D rasterske matrice iz sekvence termograma

Matrica **A** je posložena na način da stupci predstavljaju vremenske varijacije, a retci predstavljaju prostorne varijacije. Kod ovakve konfiguracije, stupci u matrici **U** predstavljaju skup ortogonalnih statističkih modova poznatih pod imenom empirijska ortogonalna funkcija (EOF – *empirical orthogonal function*). Matrica **Γ** je dijagonalna matrica sa singularnim vrijednostima na dijagonalama. Singularne vrijednosti u matrici **Γ** su vlastite vrijednosti za pripadne vlastite vektore u matrici **V**. Stupci u matrici **V** predstavljaju glavne komponente ili vlastite vektore skupa podataka, a posloženi su u opadajućem redoslijedu promatrajući magnitudu [Ivančević & Jelić 2009].

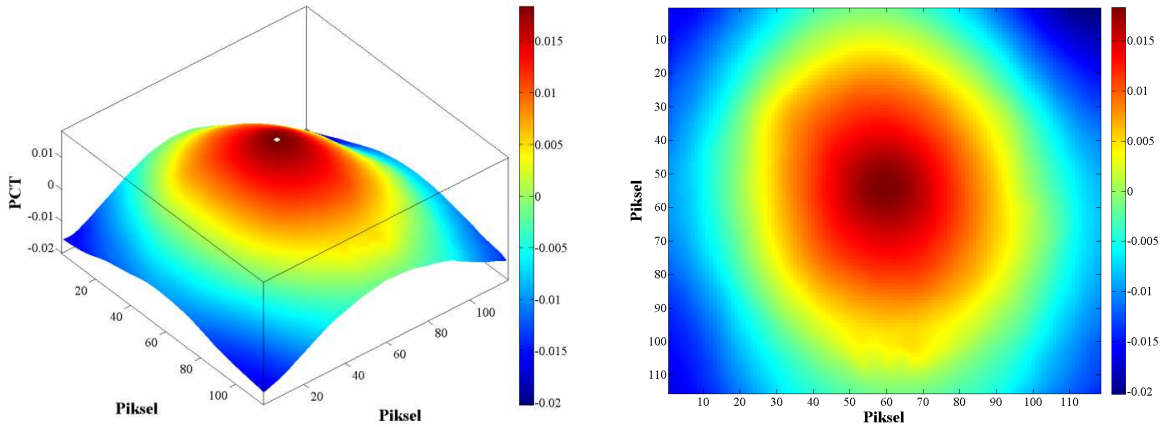
Glavne komponente (*Principal Components*), koje predstavljaju vremenske varijacije, su preuređene u retke matrice $\mathbf{V^T}$. Ukoliko se prikaže slika EOF-a, prvi EOF će predstavljati prvu najkarakterističniju varijabilnost podataka, drugi EOF će predstavljati drugu najkarakterističniju varijabilnost itd. [Ibarra-Castanedo et al., 2007].

Prvi mod je karakteriziran s prostorno jednolikim poljem s eksponencijalnim opadanjem što podsjeća na ponašanje ploče bez oštećenja, odnosno iz njega nije moguće odrediti postojanje oštećenja u uzorcima, dok je drugi mod karakteriziran nejednolikim poljem gdje se prostorna raspodjela može korelirati s kontrastnim signalom koji nastaje zbog postojanja oštećenja u uzorku [Rajic 2002b].

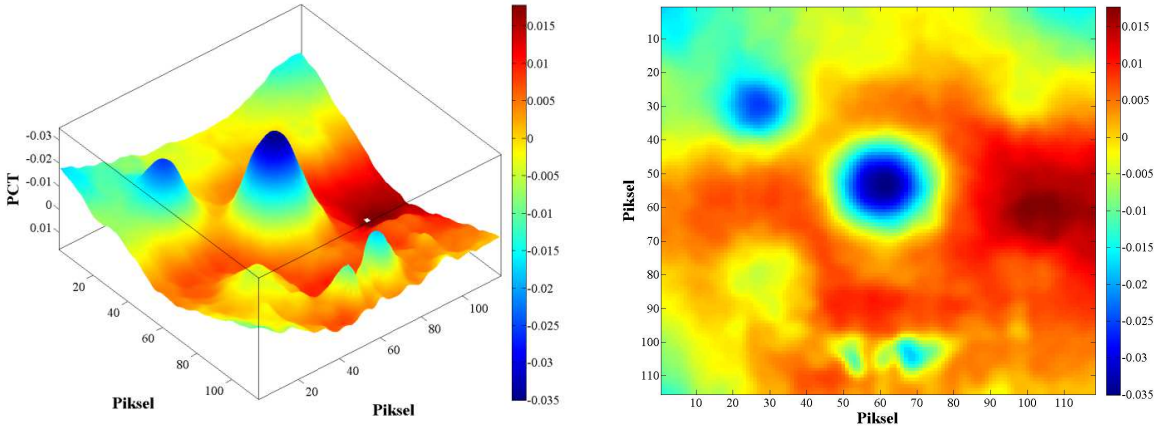
Prvi statistički mod PCT analize daje sliku sličnu onoj koja se dobije za klasični termogram, no kod drugog statističkog moda, dobije se raspodjela koja karakterizira oštećenja u promatranom materijalu, Slika 3.37 do Slika 3.39.



Slika 3.37 Termogram (3D i 2D prikaz) uzorka BM 1-1 d, udaljenost 1,5 m



Slika 3.38 PCT EOF_1 (3D i 2D prikaz) uzorka BM 1-1 d, udaljenost 1,5 m

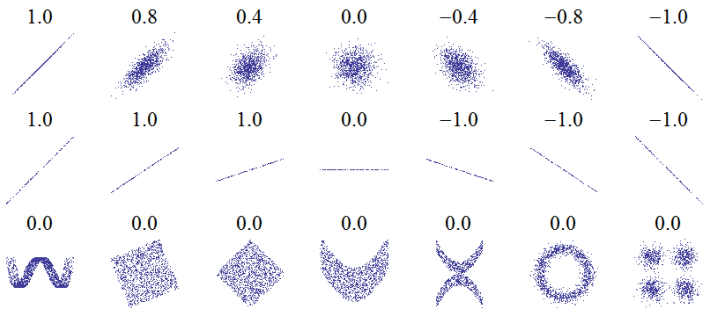


Slika 3.39 PCT EOF_2 (3D i 2D prikaz) uzorka BM 1-1 d, udaljenost 1,5 m

Nedostatak je PCT metode taj da ima svojstvo isticanja pojedinih oštećenja na uštrb drugih oštećenja koja se nalaze u uzorku [Rajic 2002b]. Dubina oštećenja može se procijeniti iz druge glavne komponente, koja je sadržana u matrici $\mathbf{V}^T$ uz uvjet da je poznata toplinska difuzivnost materijala promatranog uzorka [Rajic 2002b]. Točnije, postoji korelacija između vremena pri kojem se pojavljuje prva točka infleksije u glavnim komponentama i vremena kod kojeg se počinje pojavljivati kontrast između oštećenog i neoštećenog područja s dubinom uzorka, ukoliko se promatra odziv uzorka na toplinsku pobudu.

3.6.10 Naknadna obrada pomoću korelacijskih operatora

Tehnika korelacijskih koeficijenata koristi se u teoriji vjerojatnosti i statistici za određivanje snage i smjera linearnog odnosa između dvije varijable. [Vavilov 2004] definira korelacijsku tehniku kao tehniku za proračun koeficijenta korelacije između funkcije razvoja temperature svakog piksela i funkcije razvoja temperature odabrane referentne točke. Može se kazati da se u kontekstu IC termografije, korelacijski koeficijent odnosi na snagu i smjer linearnog odnosa između razvoja temperature referentnog piksela i razvoja temperature piksela na oštećenom području.



Slika 3.40 Korelacijski koeficijenti dvije varijable *X* i *Y* [Klein et al. 2008]

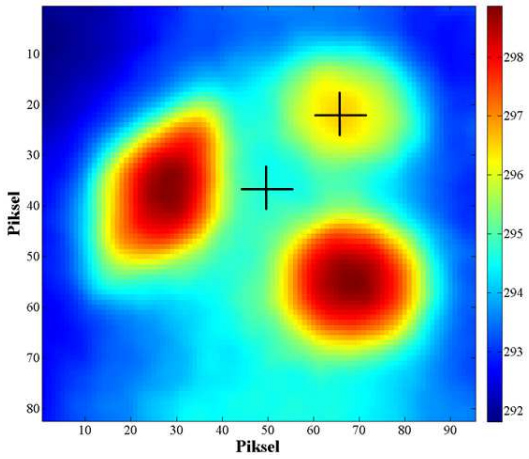
Slika 3.40 prikazuje korelograme kao prikaze točaka s koordinatama (X_i, Y_i). Očito je da se mjeri jedino linearna korelacija, jer u posljednjem redu postoji snažna korelacija između X i Y koordinate, dok je koeficijent korelacije 0 zbog toga što navedeno nisu linearne korelacije.

Slika korelacijskog koeficijenta je uglavnom osjetljiva na promjene u materijalu, dok je mnogo manje osjetljiva na nejednoliko zagrijavanje ili početnu apsorpciju topline. Neovisno o odabranom pikselu na neoštećenom području, neće se promijeniti sam korelogram, iako će se promijeniti vrijednost korelacijskog koeficijenta, što je dovoljno za kvalitativnu analizu jer je bitna samo razlika u koeficijentima između svakog pojedinog piksela.

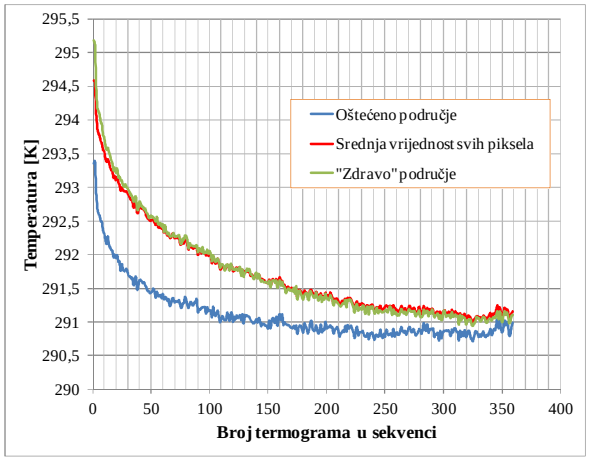
Korelogram je moguće izraditi ukoliko se usporedi razvoj temperature jednog piksela na termogramu s razvojem referentne temperature termograma. Kao referentna temperatura termograma može se uzeti razvoj srednje vrijednosti temperature svih piksela termograma u vremenu, čime se izbjegava potreba ručnog odabira piksela za referentnu temperaturu.

Slika 3.41 prikazuje termogram uzorka BM 1-3 s donje strane, kod kojeg je primijenjena toplinska pobuda s udaljenosti od 2m. Na termogramu su označena dva piksela, piksel iznad neoštećenog područja uzorka i piksel iznad oštećenog područja uzorka.

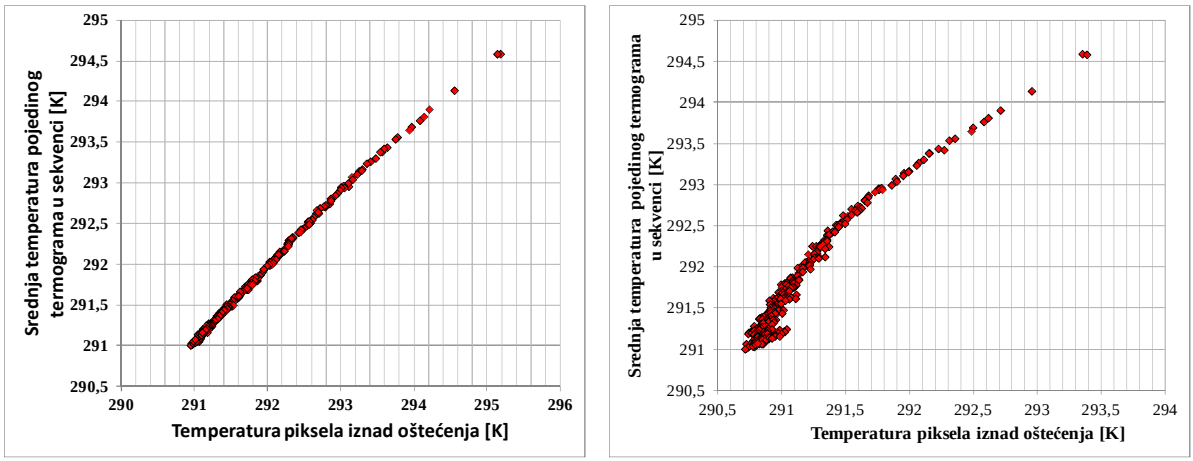
Razvoj temperature za navedena dva piksela i razvoj srednje vrijednosti temperature svih piksela termograma, Slika 3.42, korišten je za izradu korelograma, za neoštećeno i oštećeno područje uzorka, Slika 3.43.



Slika 3.41 Termogram uzorka BM 1-3 d udaljenost toplinske pobude 2m, temperatura [K]

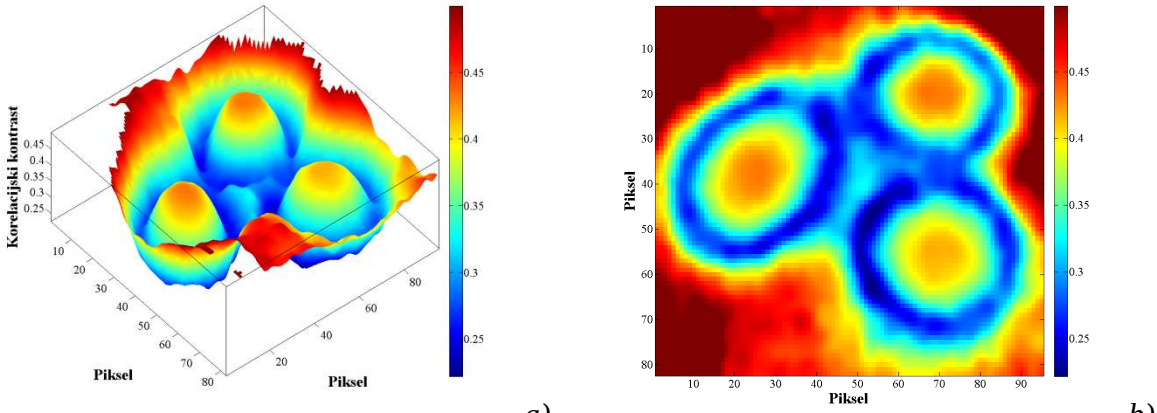


Slika 3.42 Razvoj temperature piksela, period hlađenja uzorka



a) *b)*

Slika 3.43 Korelogrami razvoja temperature uzorka BM 1-3 D udaljenost 2m; a) za neoštećeni dio uzorka; b) za oštećenje



a) *b)*

Slika 3.44 Korelirani kontrast uzorka BM 1-3 d udaljenost 2m; a) 3D prikaz; b) 2D prikaz

Slika 3.44 prikazuje korelacijski kontrast za uzorak BM 1-3 s donje strane, gdje je toplinska pobuda na udaljenosti od 2 m, pri čemu skala boja prikazuje:

$$\sqrt[5]{1 - R_r}$$

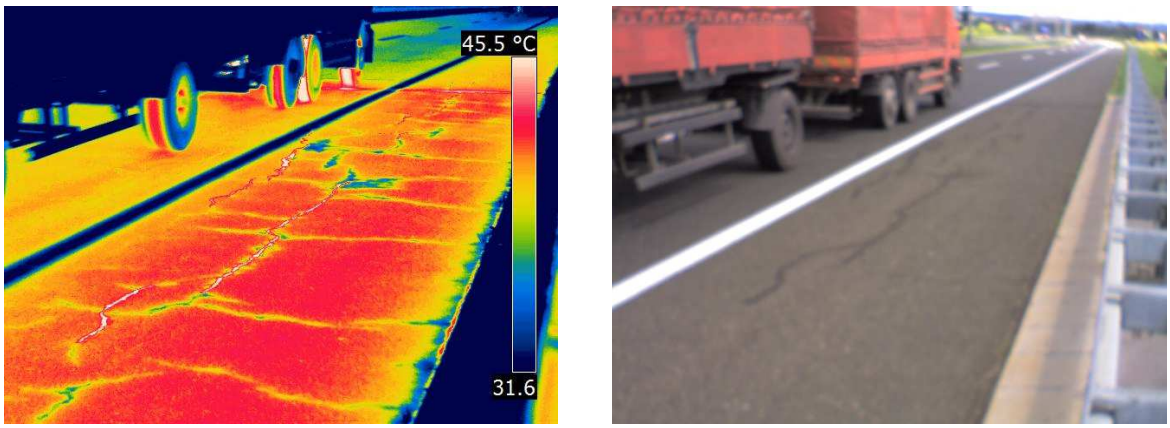
gdje je R_r izračunati koeficijent korelacije.

3.7 Mjerenje na terenu - motivacija za provođenje istraživanja

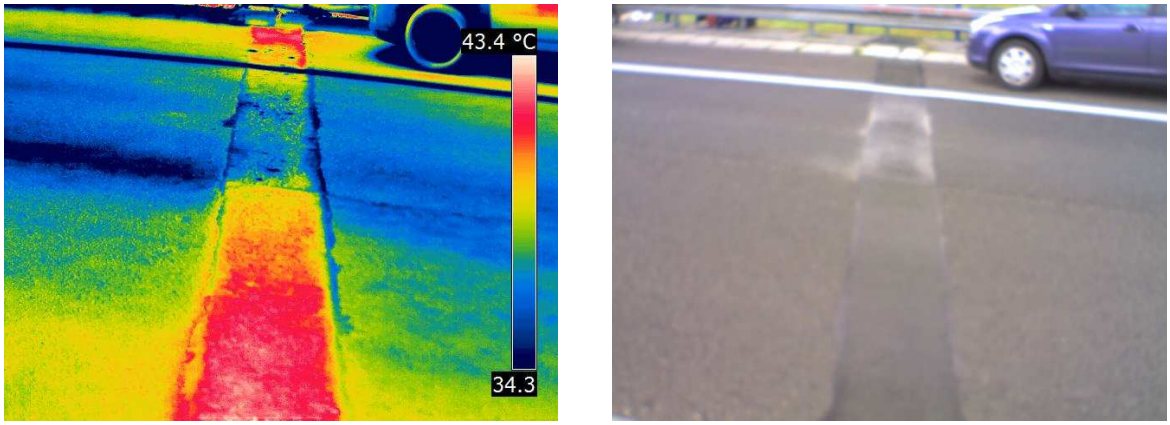
IC termografija se koristi za otkrivanje ispodpovršinskih anomalija u konstrukcijama. Uglavnom se radi o identifikaciji šupljina, delaminacija i pukotina u betonskim konstrukcijama kao što su kolničke ploče mostova [Holt & Manning, 1978], kolnici na cestama [Weil, 1991] i ploče parkirnih garaža [Weil, 1989].

Norma [ASTM:D-4788, 2003] opisuje korištenje IC termografije za otkrivanje postojanja oštećenja u kolničkim pločama mostova sa i bez asfaltnog zastora. Ističe se da će na rezultate mjerenja utjecati svojstva površine da emitira zračenje, odnosno njezin koeficijent emisivnosti koji može varirati ukoliko na površini postoje guma, ostaci ulja, tragovi oštećenja i drugi uzroci.

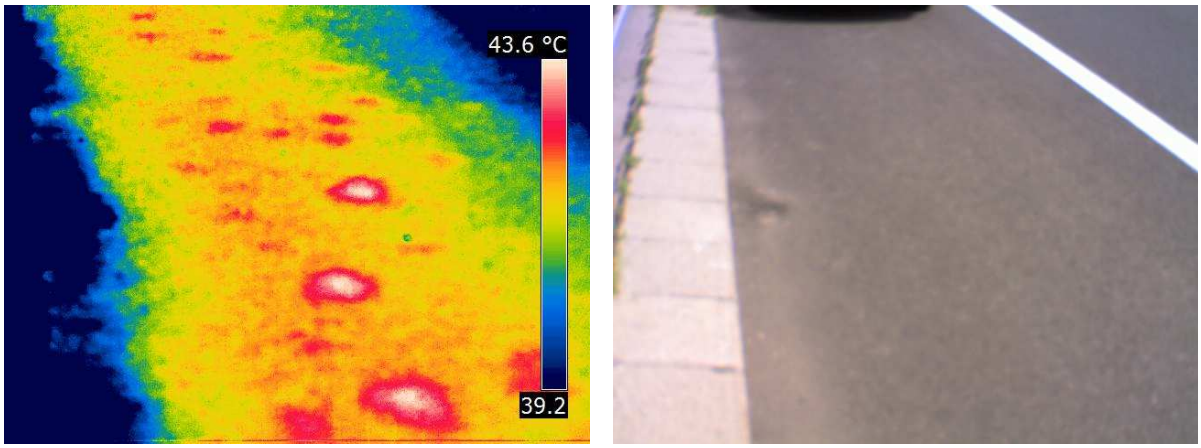
Definirani su i fizikalni parametri koji utječu na emitirano IC zračenje s promatranog objekta, a to su koeficijent emisije površine betona, temperatura površine, toplinska provodljivost betona, specifični toplinski kapacitet betona, debljina sloja koji se zagrijava i intenzitet sunčevog zračenja. Uvjeti okoliša koji su prisutni prilikom mjerenja također utječu na rezultate mjerenja. oblaci smanjuju utjecaj sunčevog zračenje tijekom dana i reflektiraju IC zračenje s površine Zemlje tijekom noći čime se usporava prijenos topline na površini betona. Optimalni vremenski uvjeti za termografsko snimanje su: vedro nebo, blagi vjetar, suha površina betona i intenzivno sunčevo zračenje [ACI, 1998]. Kako bi se dobili što točniji rezultati, potrebno je otkloniti utjecaj okoliša, odnosno očistiti površinu od blata i drugih ostataka; ne smije se ispitivati ukoliko postoji voda, led ili snijeg na površini kolnika (potrebno je osigurati sušenje površine od barem 24 sata); ne ispitivati ukoliko je brzina vjetra veća od 25 km/h; temperatura tla mora biti viša od 0°C; snimanje noću potrebno je provoditi tijekom vedre noći [ASTM:D-4788, 2003]. Nekoliko primjera termograma kolničke ploče mosta Krapina prikazuju mogućnosti, ali i problematiku termografskog snimanja, Slika 3.45 do Slika 3.48.



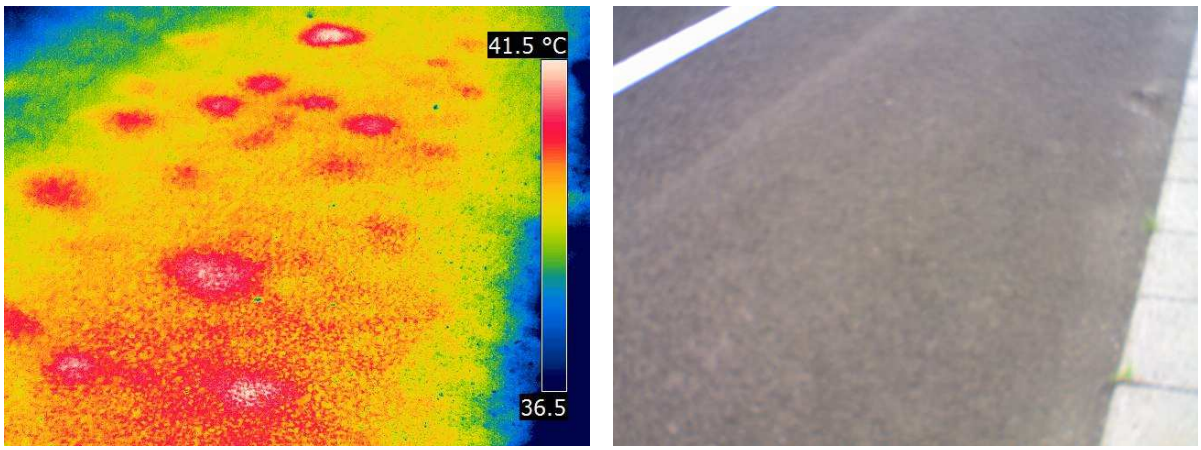
Slika 3.45 Termogram i fotografija oštećenja kolničke ploče (zaustavne trake) mosta Krapina na autocesti Zagreb - Macelj



Slika 3.46 Termogram i fotografija prijelazne naprave tipa „Silent Joint“ na mostu Krapina na autocesti Zagreb - Macelj



Slika 3.47 Termogram i fotografija oštećenja kolničke ploče mosta Krapina na autocesti Zagreb - Macelj



Slika 3.48 Termogram i fotografija oštećenja kolničke ploče mosta Krapina na autocesti Zagreb - Macelj

Iako gornje slike vrlo dobro prikazuju oštećenja koja se nalaze na kolničkoj ploči promatranog mosta, te iako su tijekom snimanja zadovoljeni svi uvjeti propisani u [ASTM:D-4788, 2003], vidljivo je da postoji značajni utjecaj koeficijenta emisije i vlage na rezultate

mjerenja. Osim zbog razlike u koeficijentu emisije različitih materijala te horizontalne signalizacije na kolniku, dolazi do razlike u koeficijentu emisije istog materijala (asfalta) na kolotrazima koji se javljaju na zastoru, što može dovesti do problema i grešaka u interpretaciji rezultata mjerenja, Slika 3.46. Također, za oštećenja koja su vidljiva, Slika 3.47 i Slika 3.48, moguća je samo kvalitativna analiza, odnosno nije moguće reći ništa više od toga da ono postoji na tom mjestu. Koja je dubina i/ili debljina oštećenja, da li se ono nalazi u sloju asfalta, betonskoj ploči ili između asfalta i betonske ploče potpuno je nejasno. Također, pokazalo se da ukoliko ne postoji izravno sunčevo zračenje na dijelove konstrukcije koja se ispituje IC kamerom, da će otkrivanje oštećenja u betonu biti vrlo teško, pa čak i nemoguće, zbog nepostojanja razlika u toplinskom toku.

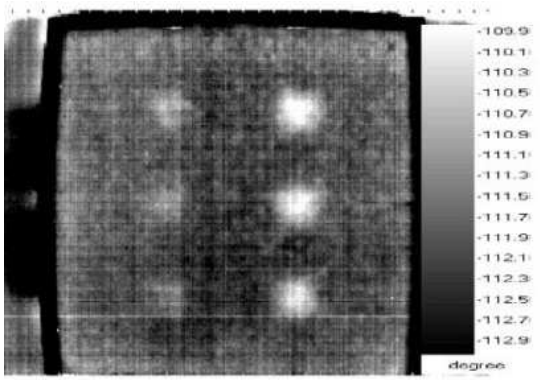
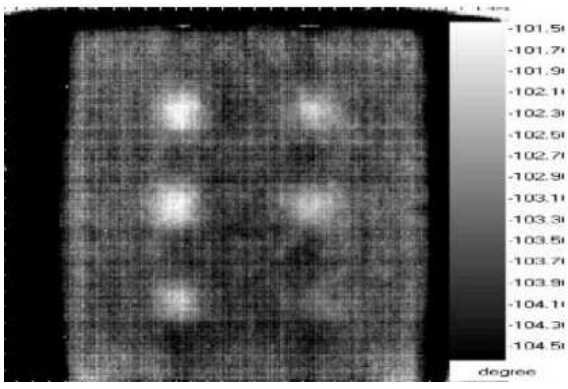
Prikladni uvjeti okoliša ključni su za postizanje toplinskog toka za koji je moguće otkriti oštećenja u konstrukciji. No i uz zadovoljenje ovih uvjeta, nije moguće otkriti sva oštećenja koja postoje u konstrukciji. [Maser & Roddis, 1990] su proveli analizu parametara koji utječu na razlike u temperaturi površine betonske ploče bez i sa ugrađenim oštećenjima, primjenjujući tehniku pasivne termografije. Zaključuju da se potreban maksimalni temperaturni gradijent smanjuje sa smanjenjem dubine delaminacije. Također maksimalni temperaturni gradijent se smanjuje s povećanjem širine pukotine. Ukoliko je delaminacija zapunjena vodom, nije bilo značajnije promjene temperaturnog polja na površini promatrane betonske ploče što znači de nije bilo moguće otkriti oštećenje. Završno zaključuju da podatke dobivene IC termografijom nije moguće koristiti za karakterizaciju oštećenja, odnosno određivanje dubine oštećenja. Pasivna termografija je uspješno primijenjena za otkrivanje defekata u vanjskoj ovojnici zgrada [E. Grinzat et al., 1998], nerazornom ispitivanju betonskih krovova [Weil & Rowe, 1998], vrednovanju delaminacije u kolničkim pločama mostova [Clark et al., 2003], otkrivanju ispodpovršinskih oštećenja u dimnjacima [Vavilov & Demin, 2002] te kod otkrivanja granica i ozbiljnosti oštećenja i homogenosti materijala usisnog bazena crpne stanice [Milovanović & Banjad Pečur, 2011].

Kao što je vidljivo iz prikazanih istraživanja, nerazorno ispitivanje betonskih konstrukcija korištenjem IC termografije, koje se temelji na pasivnoj termografiji (u promatranoj konstrukciji postoji prirodno uspostavljen nestacionarni toplinski tok), ima određeni broj ograničenja i nedostataka. Zbog toga se sve više primjenjuju tehnike aktivne termografije (kod koje je potreban izvor topline za uspostavljanje toplinskog toka) kako bi se istaknula oštećenja u konstrukciji.

3.8 Pregled stanja područja metoda i tehnika za ispitivanje betona

Postoji značajan broj radova i istraživanja u području korištenja IC termografije kod nerazornih ispitivanja ispodpovršinskih oštećenja u materijalima. Veliki dio ovih istraživanja je usmjeren na područje ispitivanja homogenih materijala visoke toplinske provodljivosti koji se koriste u zrakoplovstvu i svemirskoj industriji, kao što su aluminij, različiti polimeri i kompoziti. Istraživanja koja su usmjerena na primjenu IC termografije kao nerazorne metode u graditeljstvu su rijetka, s time da se dio istraživača usmjerio u područje FRP kompozita i problematike njihovog prianjanja, a samo dio u područje otkrivanja oštećenja u samom betonu. Pregled istraživanja bit će dan u daljnjem tekstu, s posebnim naglaskom na metode zagrijavanja koje se koriste, tehnike prikupljanja termograma (tehnike IC termografije) i tehnike analize rezultata mjerenja.

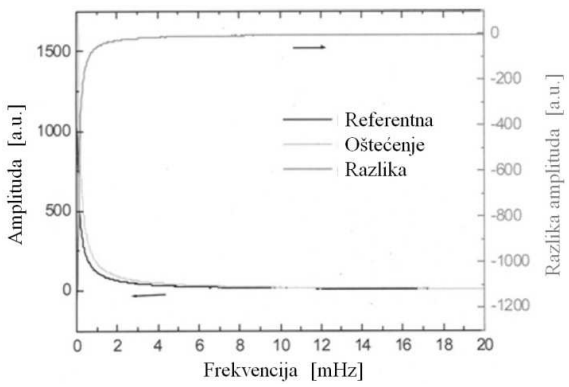
[Sakagami & Kubo, 2002] razvijaju tehniku nerazornog ispitivanja za otkrivanje delaminacija u betonskim konstrukcijama korištenjem lock-in termografije (LT) uz toplinsku pobudu uzoraka periodičnim zagrijavanjem. Uzorci od betona dimenzija 1 x 1 x 0,3 m izrađeni su na način da su u njih ugrađene simulacije oštećenja, EPS 10 x 10 cm različite debljine. Kao toplinska pobuda korištena je uljna grijalica snage 28 – 38 kW/h. Lock-in mjerenja su provedena za 11 različitih perioda zagrijavanja od 10 do 60 min, s korakom od 5 minuta, što znači da je modulacijska frekvencija (recipročna duljini trajanja zagrijavanja) između $1{,}67 \times 10^{-3}$ do $2{,}78 \times 10^{-4}$ Hz. Utvrđuje se da je moguće odrediti postojanje delaminacija u betonu korištenjem slika faznog pomaka i to za oštećenja do dubine od 10 cm, te da postoji optimalni vremenski trenutak u kojem su oštećenja najbolje vidljiva [Sakagami & Kubo, 2002].

a)  b) 

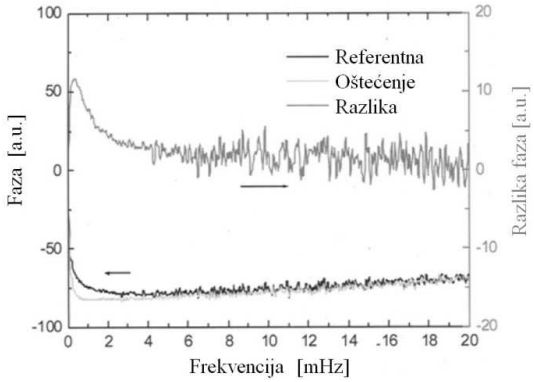
Slika 3.49 Prikazi faznog pomaka [Sakagami & Kubo, 2002] a) trajanje zagrijavanja 15 min; b) trajanje zagrijavanja 35 min

Kroz Europski projekt Onsiteformasonry (*On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings*) u sklopu petog okvirnog programa, aktivna IC termografija (impulsna termografija-IT i termografija faznog impulsa - PPT) je primijenjena kao jedna od metoda nerazornih ispitivanja povijesnih zidanih konstrukcija [ONSITEFORMASONRY, 2004]. Pri istraživanju se koristi tehnika zagrijavanja pravokutnim impulsom, koji se opisuje kao superpozicija različitih frekvencija s promjenjivim amplitudama. Kod dugog trajanja impulsa, odnosno nižih frekvencija, u uzorak se pomoću impulsa prenese više energije, odnosno kao rezultat se dobije više informacija. Ispitivani su problemi delaminacije žbuke i obloga od ziđa; karakterizacija strukture ziđa iza žbuke; otkrivanje povišene razine vlažnosti; lokacija šupljih sljubnica u ziđu; lokacija delaminacija u materijalima za sanaciju. Ističe se važnost jednolike emisivnosti na rezultate mjerenja, izbjegavanje refleksije zračenja iz okoline od promatranog objekta, izbjegavanje IC snimanja pri velikoj brzini vjetra, te utjecaj prašine na rezultate ispitivanja [ONSITEFORMASONRY, 2004]. Ističe se da je moguće samo kvalitativno odrediti dubinu oštećenja koja su locirana. Dubina utječe na maksimalni kontrast oštećenja pri interpretaciji rezultata IT tehnike, odnosno na frekvenciju pri kojoj se oštećenja pojavljuju i/ili gube u slučaju faznog prikaza kod PPT tehnike. Kvantitativne je podatke o dubini moguće dobiti samo usporedbom s numeričkim simulacijama, uz nužan uvjet da su poznata toplinska svojstva materijala objekta koji se promatra.

[Weritz et al., 2005] koriste termografiju faznog impulsa (PPT) za otkrivanje oštećenja u betonu, pri čemu za vizualizaciju oštećenja koriste vremenski pomak (fazu) i amplitudu promjene temperature na površini betona u odnosu na poznato ponašanje izvora toplinske pobude. Koristi se kvadratni impuls (toplinska pobuda od uključivanja do isključivanja djeluje s maksimalnim opterećenjem, nema postepenog uključivanja i isključivanja kao kod sinusne pobude). Kao toplinska pobuda, korištena su tri IC grijača (svaki snage 2400W), a trajanje zagrijavanja je između 3 i 60 minuta, pri čemu temperatura površine betona nije viša od 50°C. Promatrano je hlađenje uzoraka u području valnih duljina 3 do 5 μm u trajanju do 120 minuta. Izrađeni su uzorci dimenzija 150×150×50 cm s ugrađenim oštećenjima različitih veličina na dubinama od 2 do 10 cm. Iz sekvence prikupljenih termograma dobivene su krivulje razvoja temperature na mjestu gdje postoji oštećenje i na mjestu neoštećenog betona. Za ove krivulje je provedena analiza korištenjem FFT te je dobiven spektar amplitude i faze, Slika 3.50 i Slika 3.51.

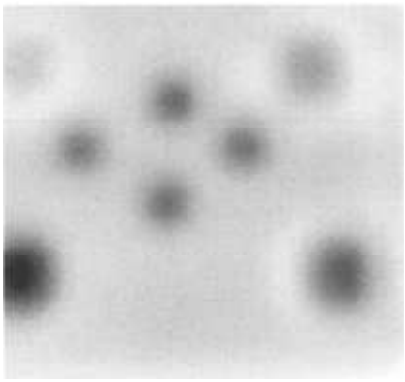


Slika 3.50 Spektar amplituda nestacionarnih krivulja hlađenja [Weritz et al., 2005]

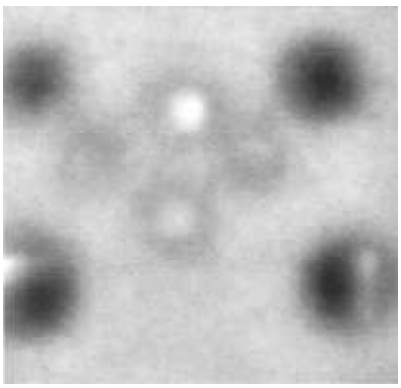


Slika 3.51 Spektar faza nestacionarnih krivulja hlađenja [Weritz et al., 2005]

Postojanje oštećenja u betonu može se odrediti iz razlike krivulja spektra amplitude za oštećeni beton i neoštećeni beton te spektra faze za oštećeni beton i neoštećeni beton, odnosno, može se odrediti frekvencija pri kojoj je oštećenje najbolje vidljivo. Zaključuje se da je mogućnost otkrivanja oštećenja ovisna o frekvenciji koja se promatra. Dublji defekti zahtijevaju višu frekvenciju kako bi postali vidljivi. Pri istoj frekvenciji fazni prikaz daje bolji kontrast u usporedbi s amplitudnim prikazom, Slika 3.52 i Slika 3.53.



Slika 3.52 Prikaz amplituda za frekvenciju 0,14 mHz [Weritz et al., 2005]



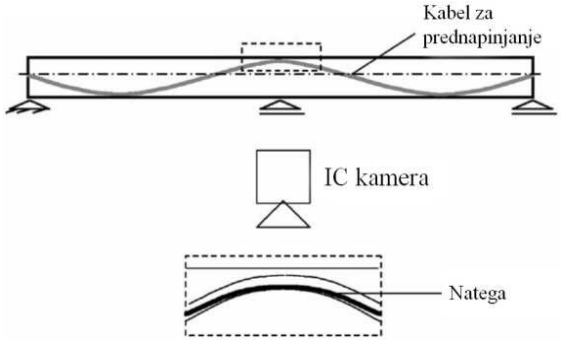
Slika 3.53 Prikaz faza za frekvenciju 0,14 mHz [Weritz et al., 2005]

[Meola et al., 2005] primjenjuje IC termografiju, ultrazvuk i geoelektrične metode za sinergijsko djelovanje nekoliko različitih nerazornih metoda kod otkrivanja oštećenja i procesa degradacije u zgradama. U tu svrhu izrađeni su uzorci zida prekrivenog žbukom dimenzija 900×900 mm, koji sadrže simulacije oštećenja izrađene od mramora, opeke i vulkanskog tufa. Također, simulirana je delaminacija žbuke, korištenjem pluta i dvoslojnog polietilena. Ističe se da zbog ograničenja opreme s kojom se raspolagalo (frekvencija prikupljanja slike od strane IC kamere je prevelika) nije moguće koristiti Lock-in termografiju za oštećenja na dubini većoj od 15 mm. Korištenjem impulsne termografije (PT) uz toplinsku

pobudu s dvije halogene lampe, svaka snage od 1 kW, dobiveni su slijedeći zaključci: vidljivost oštećenja je poboljšana tijekom procesa hlađenja; oštećenja ispod debljeg sloja žbuke postaju vidljiva nakon dužeg vremena od početka zagrijavanja; dimenzije oštećenja (promjer i debljina) utječu na mogućnost otkrivanja. Zaključuje se da je IC termografija najbrža i najlakše primjenjiva metoda za otkrivanje oštećenja u cementnim materijalima. Posebno je primjenjiva PT tehnika, jer je dala dobar kontrast kod oštećenja male debljine i što je posebno važno kod oštećenja koja imaju toplinska svojstva slična toplinskim svojstvima materijala u kojem se oštećenja nalaze [Meola et al., 2005].

Induciranje nestacionarnog prolaska topline korištenjem aktivne termografije pogodna je metoda za vizualizaciju nehomogenosti i oštećenja u građevnim konstrukcijama do dubine od 10 cm [Maierhofer et al., 2006]. Zbog visoke osjetljivosti aktivne termografije za otkrivanje oštećenja koja se nalaze na dubini između 0,1 i 10 cm, IC termografija je komplementarna metoda drugim nerazornim ispitivanjima koja se koriste u građevinarstvu, kao što su radar, ultrazvuk ili pak metoda udara i odjeka, a kod kojih se pouzdani rezultati dobivaju u slučaju dubina oštećenja počevši od 5 do 10 cm i dublje [Maierhofer et al., 2006].

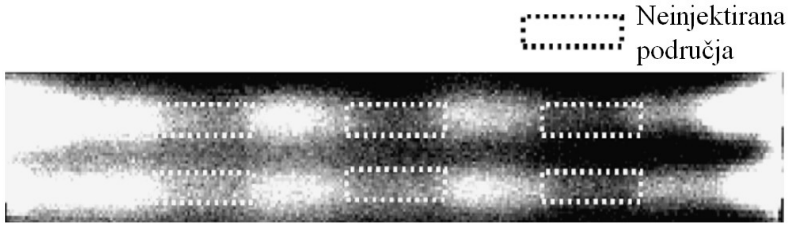
[Maierhofer, Arndt, Rollig, et al., 2006] koriste IC termografiju za otkrivanje nepotpunog injektiranja natega za prednapinjanje. Korištena je impulsna termografija za ispitivanje uzorka dužine 350 cm, s ugrađenom nategom i šupljinama dužine 45 cm u cijevima za prednapinjanje, Slika 3.54. Zaštitni sloj betona do cijevi za prednapinjanje bio je 8 cm s jedne strane i 5 cm s druge strane uzorka.



Slika 3.54 Shematski prikaz uzorka sa simuliranim mjestima lošeg injektiranja natega za prednapinjanje [Maierhofer, Arndt, Rollig, et al., 2006]

Nestacionarno stanje prolaska topline u uzorku je postignuto na tri načina: najprije je iskorištenja toplina hidratacije injekcijske smjese u cijevima pri čemu su sva mjesta lošeg injektiranja otkrivena; u drugom je slučaju uzorak zagrijavan u trajanju od 15 minuta s IC

grijačima ukupne snage 5200W pri čemu su mjesta lošeg injektiranja otkrivena samo u slučaju zaštitnog sloja od 5 cm; u trećem je slučaju kao toplinska pobuda korišten elektrootporni grijač priključen na natege (korištena je struja jakosti 15 A u trajanju od 15 min), Slika 3.55.

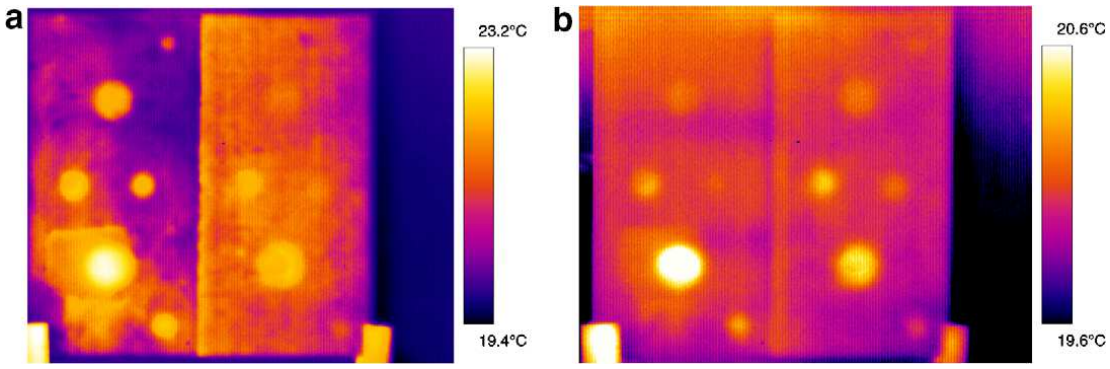


Slika 3.55 Termogram snimljen 40 min nakon početka zagrijavanja natega elektrootpornim grijačima (tamna područja su ispunjena zrakom, a svijetla s injekcijskom smjesom) [Maierhofer, Arndt, Rollig, et al., 2006]

[Meola, 2007b] koristi IC termografiju za nerazorno ispitivanje zidanih konstrukcija na laboratorijskim uzorcima zida dimenzija 90×90 cm s ugrađenim oštećenjima ispod žbuke, te uzorcima od betona dimenzija 80×80×20 cm. Definira se da je gubitak temperaturnog kontrasta na površini promatranog uzorka proporcionalan kubnoj vrijednosti dubine oštećenja, te da je radijus najmanjeg oštećenja koje je moguće otkriti jedan do dva puta veći od njegove dubine ispod površine [Maldague, 2002; Meola, 2007b]. Ističe se da vidljivost oštećenja na termogramu ovisi o nekoliko faktora kao što su geometrija oštećenja (promjer i debljina), dubina oštećenja i toplinske karakteristike oštećenja u odnosu na neoštećeni materijal, te način toplinske pobude promatranog objekta i osjetljivost IC kamere. Ograničavajući faktor za otkrivanje oštećenja je odnos signal-šum SNR (*signal to noise ratio*).

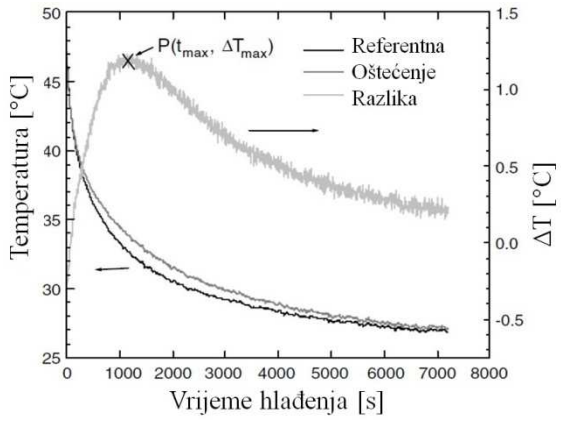
$$SNR = \frac{\overline{T_d} - \overline{T_s}}{\sigma_s}$$

gdje su $\overline{T_d}$ i $\overline{T_s}$ srednje temperature na području oštećenja, odnosno neoštećenom području, a σ_s je standardna devijacija na neoštećenom području. Ispitivanja su provedena uz toplinsku pobudu uzoraka korištenjem dvije lampe od kojih je svaka snage 1 kW pri čemu je temperatura uzoraka podignuta za 2 – 5°C u odnosu na temperaturu okoline. Snimanje je provedeno s iste strane uzorka s koje je on zagrijavan, u vremenskim razmacima od 10 s tijekom zagrijavanja i hlađenja uzoraka [Meola, 2007b], Slika 3.56.

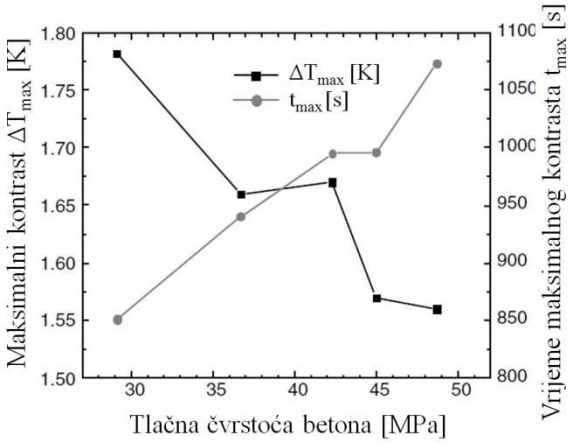


Slika 3.56 Termogram uzorka zida a) 140 s nakon početka hlađenja, b) 660 s nakon početka hlađenja uzorka [Meola, 2007b]

[Maierhofer et al., 2007] istražuju utjecaj sadržaja pora, vrste agregata i gustoće armature na mogućnost otkrivanja oštećenja u betonu. Za tu svrhu izrađuju uzorke dimenzija 100×100×30 cm sa simuliranim oštećenjima različite veličine i dubine. Betoni od kojih su izrađeni uzorci sadrže između 0,8 i 6,0 % pora, tlačna čvrstoća ispitana nakon 28 dana je između 27,4 i 48,5 MPa, a gustoća betona određena na kockama iz vlažne komore se kreće između 1,85 i 2,33 kg/dm^3. Kao toplinska pobuda, korištena su tri grijača (svaki snage 2400W), a trajanje zagrijavanja mijenjano je između 5 i 30 minuta, pri čemu je površina uzoraka zagrijana na temperaturu od 45 °C. Nakon zagrijavanja, promatran je proces hlađenja uzoraka. Rezultati ispitivanja obrađeni su kvantitativno na način da je proračunata razlika krivulja temperatura - vrijeme na površini betona iznad oštećenja i one na površini betona gdje nema oštećenja. Nakon toga je određeno vrijeme t_{max} pri kojem je razlika temperaturnih krivulja maksimalna ΔT_{max}, Slika 3.57.



Slika 3.57 Razvoj temperature površine betona iznad oštećenja i neoštećenog betona i razlika krivulja s maksimumom u točki $P(t_{max}, \Delta T_{max})$ [Maierhofer et al., 2007]



Slika 3.58 Maksimalna temperaturna razlika i vrijeme njezinog pojavljivanja kao funkcije tlačne čvrstoće betona [Maierhofer et al., 2007]

S povećanjem čvrstoće betona, maksimalni kontrast se smanjuje, dok se vrijeme njegovog pojavljivanja povećava, što se objašnjava smanjenjem toplinske provodljivosti materijala [Maierhofer et al., 2007], Slika 3.58. Ovo objašnjenje je upitno zbog toga što se toplinska provodljivost povećava s tlačnom čvrstoćom betona, odnosno njegovom gustoćom. Veći broj pora zraka smanjuje i gustoću i tlačnu čvrstoću betona, a zbog toplinskih svojstava zraka, smanjuje se i toplinska provodljivost betona. Razmak armature kako je ispitano u [Maierhofer et al., 2007], ima mali utjecaj na mogućnost otkrivanja oštećenja. Oštećenja su otkrivena neovisno od razmaka armature, što je svakako prednost pred drugim nerazornim metodama kao što je na primjer radar.

[Meola, 2007] ističe kako mogućnost otkrivanja oštećenja ovisi o debljini samog oštećenja, te ističe kako je tanka, a površinom velika oštećenja znatno teže otkriti korištenjem IC termografije. Uz način toplinske pobude objekta, toplinska svojstva materijala i samog oštećenja, osjetljivost IC sustava, važnu ulogu pri otkrivanju oštećenja ima i geometrija samog oštećenja. Geometrijski faktor F_G je funkcija promjera oštećenja d_{2r}, debljine oštećenja d i debljine promatranog objekta u kojem se oštećenje nalazi L; $F_G = f(d_{2r}, d, L)$. F_T uključuje toplinske karakteristike (toplinsku efuzivnost) materijala oštećenja $e_{eff,d}$ i materijala objekta koji se promatra $e_{eff,obj}$, $F_T = f(e_{eff,d}, e_{eff,obj})$. Uvedena je bezdimenzionalna veličina D_e koja je funkcija F_G i F_T; $D_e = f(F_G, F_T)$, a ima slijedeći oblik (za slučaj jednoslojnog materijala, kad je materijal iznad i ispod oštećenja isti):

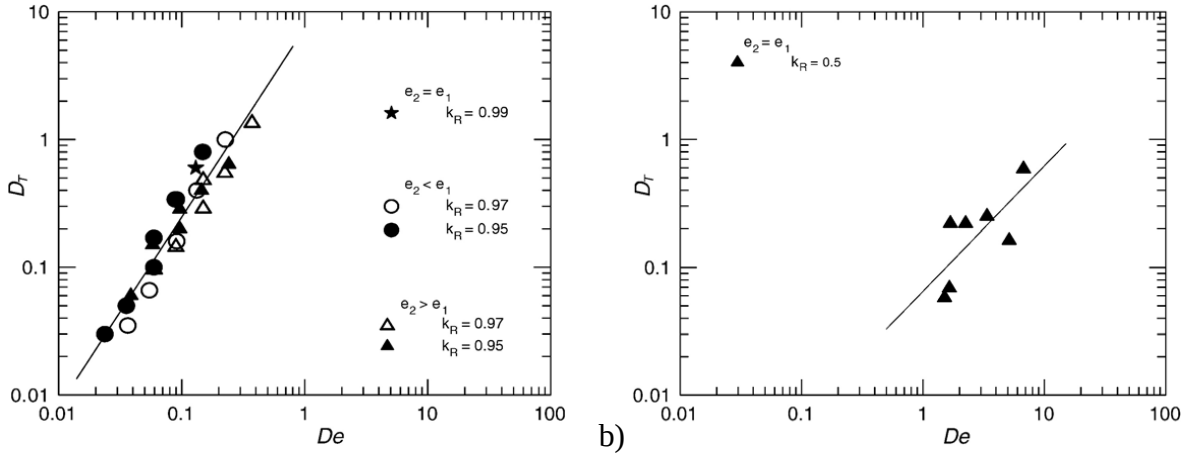
$$D_e = N_1 \left| \frac{e_{eff,obj} - e_{eff,d}}{e_{eff,obj}} \right| \frac{d}{L} \frac{d_{2r}}{D},$$

gdje je N_1 broj slojeva, (u slučaju jednoslojnog materijala $N_1 = 1$), a D je dubina na kojoj se oštećenje nalazi [Meola, 2007].

Sada je moguće postaviti odnos između uzroka (oštećenja) i posljedice (polja temperatura na površini) $D_T = f(D_e)$, gdje je D_T normalizirana razlika temperatura na površini iznad oštećenja T_d i neoštećenog betona T_s, a T_r je temperatura neoštećenog materijala prije početka zagrijavanja.

$$D_T = \frac{|T_s - T_d|}{|T_s - T_r|}$$

Također, [Meola, 2007] uvodi parametar koji naziva relativna toplinska provodljivost $\lambda_{c,rel} = \frac{\lambda_{c,s} - \lambda_{c,d}}{\lambda_{c,s}}$, te uspostavlja vezu između D_T i D_e pomoću izraza $D_T = a * {D_e}^b$, gdje su $a\ i\ b$ parametri krivulje, Slika 3.59.



Slika 3.59 Veza između D_T i D_e [Meola, 2007]; a) $\lambda_{c,rel} = 0{,}95 - 0{,}99$ (zrak u betonu); b) $\lambda_{c,rel} = 0{,}5 - 0{,}9$ (voda u betonu)

Značaj poznavanja bezdimenzionalne veličine D_e je ta da dopušta, relativno brzu procjenu toplinskog kontrasta koji će biti vidljiv na površini unutar određenog materijala tijekom toplinske pobude.

[Dupuis, 2008; Pollock et al., 2008] koriste IC termografiju za otkrivanje šupljina u cijevima za naknadno prednapinjanje. U tu svrhu izrađuju uzorke debljine 20, odnosno 30 cm, a površine 152×102 cm od kojih svaki sadrži 3 cijevi za prednapinjanje promjera 10 cm sa simuliranim šupljinama u cijevima. Toplinska pobuda uzoraka izvedena je na dva načina, kod prvog, izvor topline (IC grijalica snage 13,5 kW) zagrijava jednu stranu uzorka, dok se promjena temperature promatra s druge strane uzorka, a kod drugog se i izvor topline i IC kamera nalaze s iste strane uzorka.

[Corvaglia & Largo, 2008] razvijaju tehniku nerazornog ispitivanja kvalitete adhezije FRP traka i betona korištenjem IC termografije. Uzorci s poznatim oštećenjima su ispitivani korištenjem impulsne termografije (PT). Kao toplinska pobuda korištena je halogena lampa snage 500 W. Promatran je utjecaj udaljenosti kamere od uzorka, izvora topline od uzorka, vrijeme zagrijavanja, vrijeme nakon kraja zagrijavanja u kojem je oštećenje najbolje vidljivo. Razvijen je algoritam naknadne obrade termograma za ocjenu ozbiljnosti oštećenja korištenjem programskog paketa Matlab. Razvijeni algoritam je primijenjen kod ispitivanja kvalitete izvedbe sanacije nekoliko objekata u Italiji.

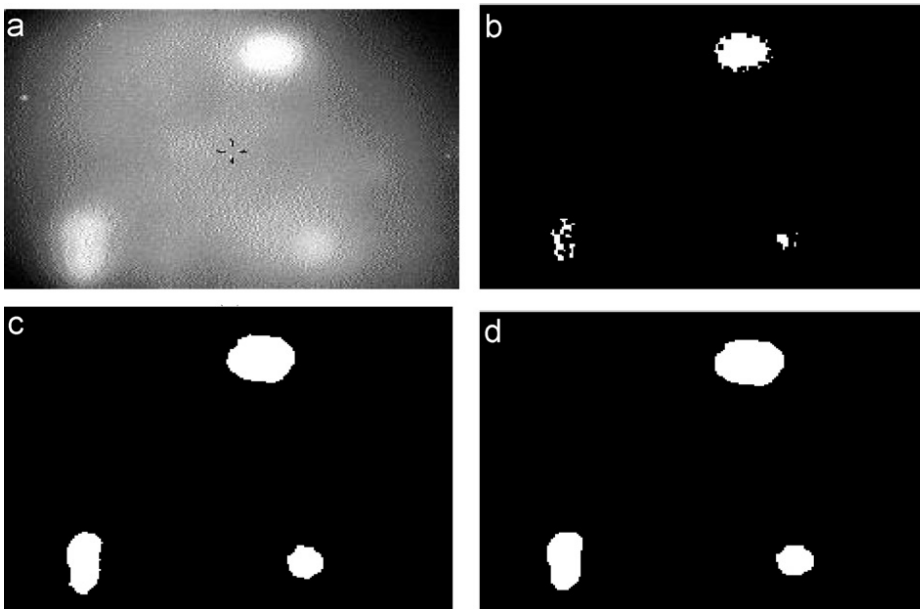
[Zi et al., 2008] izrađuju betonske uzorke 25×25×6cm sa simuliranim oštećenjima, te uzorci na kojima se ispituje delaminacija FRP traka od samog betona. Kao izvor topline za toplinsku pobudu koriste sunčevu svijetlost, halogenu lampu i IC lampu. Halogena i IC lampa su zagrijavali uzorak s visine od 3 cm u trajanju od 3 min, nakon čega su snimani termogrami u razmaku od 1 s. Kako bi se smanjio utjecaj temperature zraka na rezultate, promatraju bezdimenzionalnu promjenu temperature:

$$\Delta\bar{T} = \frac{\overline{T_d} - \bar{T}_s}{\bar{T}_s} \quad [\%]$$

kao vrijednosti potrebne za dobivanje srednjih temperatura iznad oštećenja, odnosno neoštećenog područja uzeta je srednja temperatura s malog područja promjera 2 cm, čime je smanjen i šum dobivenog signala. Zaključuju da je korištenjem halogene lampe moguće otkriti oštećenja u betonu do dubine od 2 cm, a da je korištenjem IC lampe moguće otkriti oštećenja do dubine od 3 cm, dok je i halogenu lampu i IC lampu moguće koristiti za otkrivanje delaminacije FRP traka, a Sunce nije učinkovit način toplinske pobude u ovom slučaju [Zi et al., 2008].

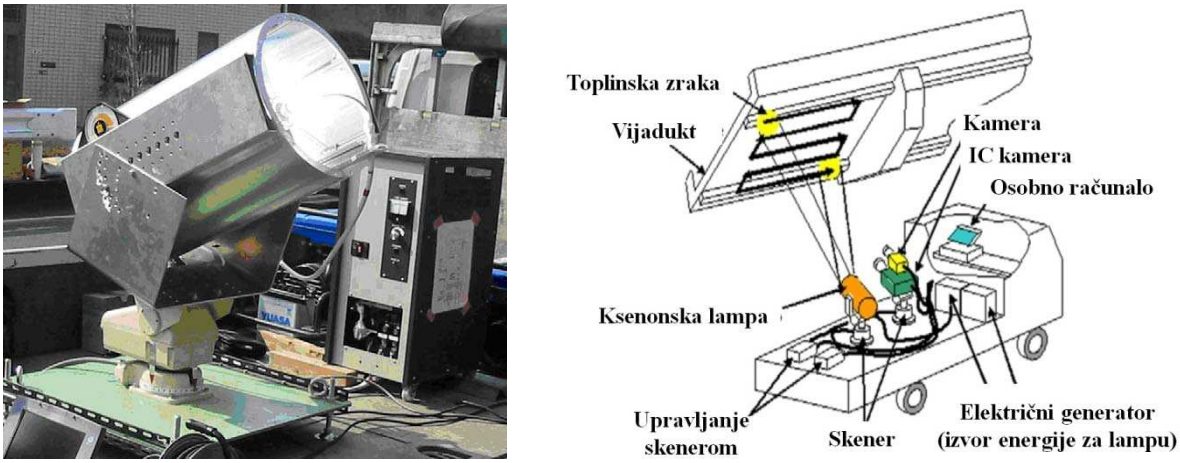
[Candoré et al., 2008] istražuju mogućnost korištenja aktivne termografije kao pomoć pri otkrivanju oštećenja u toplinskoj izolaciji zgrada. Izrađeni su uzorci od žbuke debljine 13 mm, na koju je sa stražnje strane nalijepljen EPS koji sadrži oštećenja.

[Abdel-Qader et al., 2008] razvijaju algoritam za automatizaciju traženja oštećenja u kolničkim pločama mostova korištenjem IC termografije. Koriste SRG algoritam (*seeded region growing based algorithm)* za karakterizaciju malih podpodručja na termogramima, pri čemu se određuje da li na pojedinom podpodručju termograma postoji oštećenje ili ne postoji oštećenje, bez njegove karakterizacije. U svrhu kalibracije modela, izrađuju betonske uzorke dimenzija 122×122 cm, dok je debljina uzoraka 10,16 i 20,32 cm. Kao toplinska pobuda korišteno je 6 halogenih lampi ukupne snage 3200 W. Zaključuju da je moguće otkriti oštećenja u betonu do dubine 7,62 cm, bez mogućnosti otkrivanja površinskih pukotina, Slika 3.60.



Slika 3.60 Rezultati prema [Abdel-Qader et al., 2008] a) izvorni termogram, b) zametak oštećenja (*seed image*), c) modificirani SRG algoritam, d) modificirani SRG algoritam s morfološkom korekcijom

[Kurita et al., 2009] primjenjuju IC termografiju za nerazorno ispitivanje podgleda željezničkog mosta. Kod ispitivanja, kao toplinsku pobudu koriste izbojne žarulje punjene ksenonom snage 6 kW. Sustav je izrađen na način da IC kamera prati lampu dok periodično zagrijava podgled mosta, čime se postepeno skenira cijela površina podgleda, Slika 3.61. Gustoća toplinskog toka na udaljenosti 10 m od lampe bila je 5 kW/m^2, a brzina skeniranja podgleda mosta bila je 1 m/s.



Slika 3.61 Fotografija lampe (6 kW) i shematski prikaz mjerenja skenirajućim sustavom [*Kurita et al., 2009*]

Rezultati ispitivanja analizirani su na način da su termogrami snimljeni na segmentu podgleda mosta spojeni u panoramu koja na jednom termogramu pokazuje cijeli podgled.

Utjecaj lokalnog zagrijavanja dijela površine eliminiran je na način da je izračunata prosječna temperatura svakog termograma:

$$\mathrm{T_{av}^{i}} = \frac{1}{\mathrm{N_{px}}} \sum_{\mathrm{x,y}} \mathrm{T_i(x,y)}$$

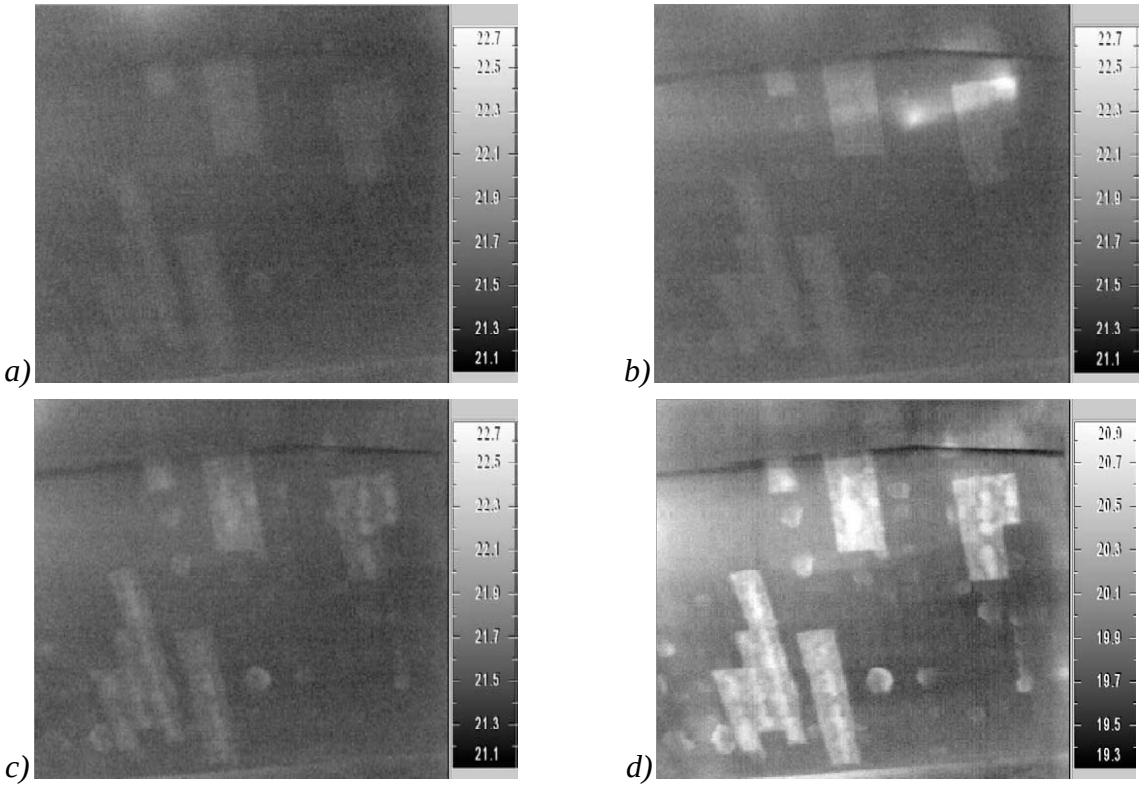
Zatim je izračunata razlika temperature $T_D^i(x,y)$ između neobrađenih podataka $T_i(x,y)$ i srednje temperature i-tog termograma $\mathrm{T_{av}^{i}}$:

$$T_D^i(x,y) = T_i(x,y) - \mathrm{T_{av}^{i}}$$

Sumarni termogram određen je kao $T_S(x,y) = \sum_{i=1}^{n} T_D^i(x,y)$, dok je „pseudo temperatura“ izračunata kao:

$$T_P(x,y) = T_S(x,y) * c + 20,$$

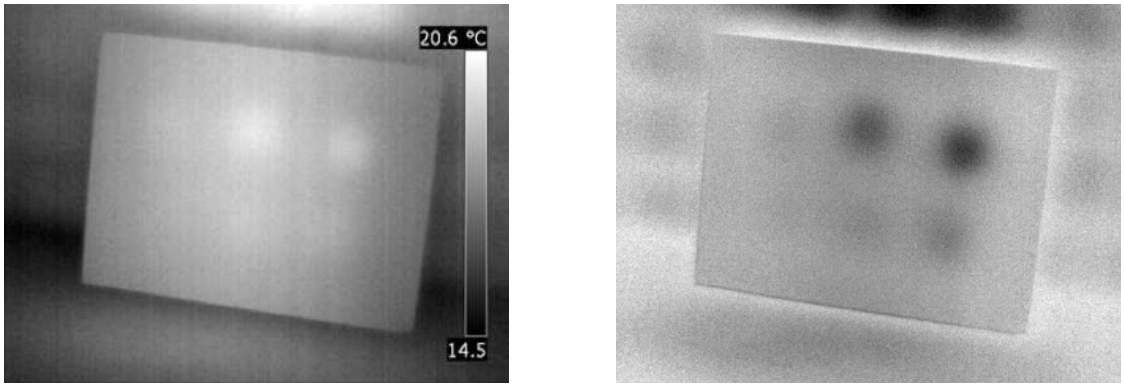
gdje je c koeficijent (<1) kojim se ujednačuje standardna devijacija temperature veličine $\mathrm{T_S(x,y)}$ i standardna devijacija neobrađenih termograma $\mathrm{T_i(x,y)}$, a 20 je dodatak kako bi se dobile temperature blizu stvarne temperature promatranog objekta.



Slika 3.62 Termogrami [Kurita et al., 2009]; a) termogram prije toplinske pobude; b) termogram tijekom toplinske pobude; c) termogram 10 s nakon toplinske pobude; d) pseudo termogram nakon analize

Iz prikazane analize, Slika 3.62, nije moguće dobiti karakteristike oštećenja (dubina i uzrok), te samim time nije poznato da li su eventualno dublja oštećenja previđena.

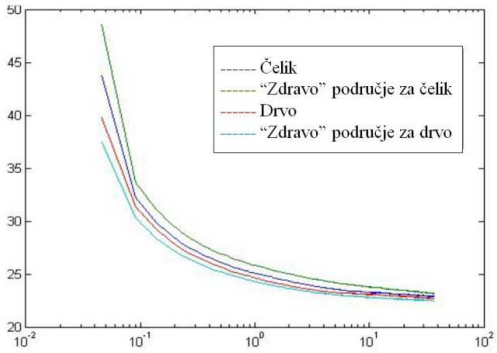
[Nahant et al., 2010] kroz projekt DEFBETIR (*Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering*) koriste IC termografiju za otkrivanje oštećenja kao što su pukotine i delaminacije u betonu te koriste komplementarne metode, ultrazvuk, GPR i vađenje valjaka za potvrdu postojanja oštećenja otkrivenih IC termografijom. U tu svrhu izrađeni su betonski uzorci dimenzija 80 x 80 cm s ugrađenim oštećenjima. Uzorci se ispituju korištenjem pasivne i aktivne termografije, pri čemu su korištena dva načina toplinske pobude korištenjem toplozračnog grijača: statično grijanje i pokretno grijanje. Utvrđuje se da statična toplinska pobuda uzrokuje nejednoliko zagrijavanje uzoraka te da promatrani uzorci trebaju biti jednoliko zagrijani kako bi se dobili pouzdani rezultati mjerenja [Nahant et al., 2010]. Dobiveno je savršeno poklapanje rezultata ispitivanja korištenjem IC termografije, ultrazvuka, GPR-a i vađenjem valjaka, što potvrđuje da IC termografija može otkriti oštećenja jednako kao što to mogu i komplementarne metode korištene u istraživanju [Nahant et al., 2010]. Kako nije uvijek moguće imati jednoliku toplinsku pobudu konstrukcije za otkrivanje oštećenja, koristi se PPT termografija i metoda druge derivacije površinske temperature u vremenu u logaritamskom mjerilu. Metoda druge derivacije, koju su razvili [Shepard et al., 2003], temelji se na izglađivanju krivulje hlađenja površine promatranog uzorka (svakog piksela sekvence termograma), nakon izglađivanja krivulje se izračunaju prva i druga derivacija krivulje hlađenja. Druga derivacija krivulje hlađenja daje bolji kontrast za otkrivanje oštećenja, Slika 3.63.



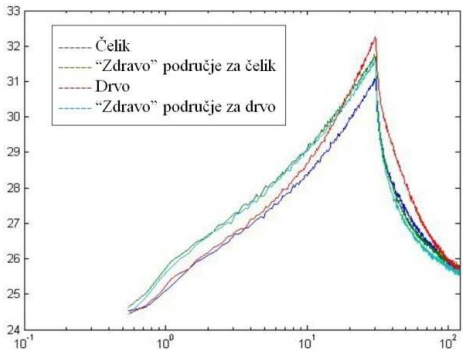
Slika 3.63 Usporedba termograma (lijevo) i rezultata druge derivacije sekvence termograma (desno) koji daje bolji kontrast [Nahant et al., 2010]

Druga derivacija krivulje hlađenja u logaritamskom mjerilu ima šiljak koji se zatim može koristiti i za određivanje dubine oštećenja [Zeng et al., 2012].

[Dumoulin et al., 2010] istražuju numeričkim modeliranjem i korištenjem PPT termografije kvalitetu prionjivosti (lijepljenja) FRP traka na betonsku podlogu. Izrađuju uzorke sa simuliranim oštećenjima. Materijali koji simuliraju oštećenja su drvo, čelik, teflon i pluto, dakle materijali različitih toplinskih svojstava (toplinske provodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta) od onih betona i FRP trake. Toplinska pobuda uzoraka provedena je na dva načina: bljeskalicama kojima je u uzorke toplinskim bljeskom trajanja 10ms uneseno 3200 J energije; te halogenim lampama ukupne snage 2000 W kojima su uzorci zagrijavani kvadratnim impulsom trajanja 10, 30 i 60 s. Pri analizi rezultata ispitivanja promatra se razvoj temperature na površini uzorka iznad oštećenja i temperature neoštećenog dijela uzorka neposredno pored oštećenja, Slika 3.64 i Slika 3.65.



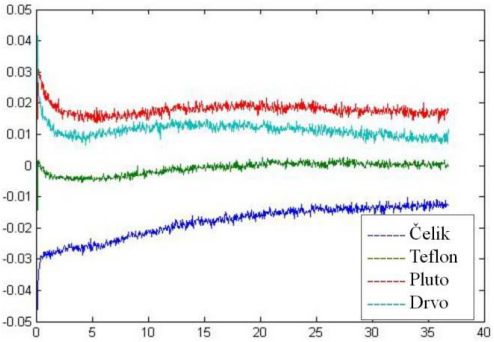
Slika 3.64 Krivulja hlađenja uzorka nakon toplinske pobude bljeskom u trajanju od 10 ms [Dumoulin et al., 2010]



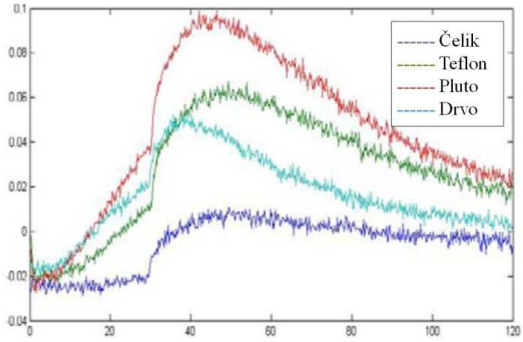
Slika 3.65 Krivulja razvoja temperature površine uzorka tijekom zagrijavanja u trajanju od 30 s i hlađenja uzorka [Dumoulin et al., 2010]

Promatran je također i razvoj temperaturnog kontrasta u vremenu, Slika 3.66 i Slika 3.67. Temperaturni kontrast je za svaki trenutak u vremenu izračunat prema izrazu:

$$\Delta\bar{T} = \frac{\overline{T_d} - \bar{T}_s}{\bar{T}_s} \quad [\%]$$



Slika 3.66 Krivulja temperaturnog kontrasta nakon toplinske pobude bljeskom u trajanju od 10 ms [Dumoulin et al., 2010]

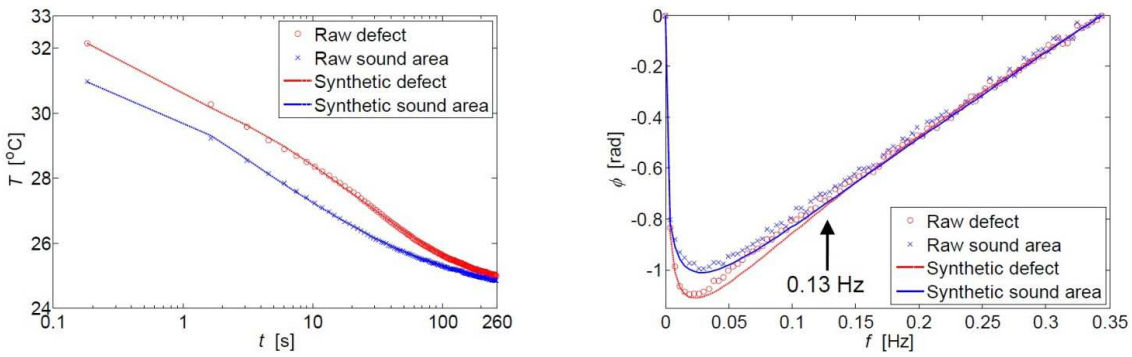


Slika 3.67 Razvoj temperaturnog kontrasta tijekom zagrijavanja u trajanju od 30 s i hlađenja uzorka [Dumoulin et al., 2010]

Zaključuje se da je toplinska pobuda korištenjem kratkog impulsa nepovoljna za otkrivanje delaminacija ispod FRP traka, zbog toga što uzrokuje mali temperaturni kontrast [Dumoulin et al., 2010]. Nakon korištenja brze Fourierove transformacije (FFT) za analizu sekvence termograma, moguće je provesti kvantifikaciju rezultata ispitivanja u smislu određivanja dubine na kojoj se nalaze oštećenja. Dubinu na kojoj se nalazi oštećenje moguće je odrediti korištenjem izraza:

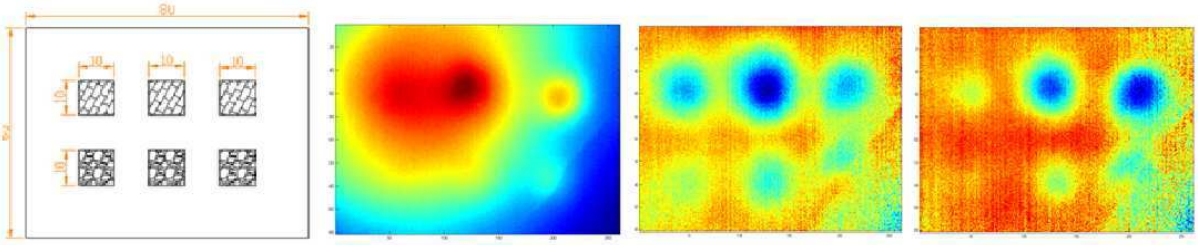
$$D = C_1 \sqrt{\frac{\alpha_{diff}}{\pi \cdot f_b}}$$

gdje je C_1 empirijski određena konstanta koja je prihvaćena da bude jednaka $C_1 = 1{,}8$; a f_b je granična frekvencija pri kojoj oštećenje postaje vidljivo [Dumoulin et al., 2010]. Granična frekvencija određena je kao frekvencija kod koje se krivulja faze piksela iznad oštećenja i neoštećenog područja počinju poklapati, što se u primjeru dogodi pri frekvenciji od 0,13 Hz, Slika 3.68.



Slika 3.68 Razvoj temperature (lijevo) i faze (desno) ovisno o frekvenciji za područje iznad oštećenja (čelik) i neoštećeno područje [Dumoulin et al., 2010]

[Van Leeuwen et al., 2011] koriste termografiju faznog impulsa (PPT) za otkrivanje oštećenja (gnijezda) u betonskim uzorcima. Betonske uzorke dimenzija 20 x 20 x 10 cm zagrijava IC grijačem snage 15 kW tijekom 20 minuta, nakon čega je snimljen termogram svakih 60 s tijekom procesa hlađenja koji je trajao 90 minuta, Slika 3.69.

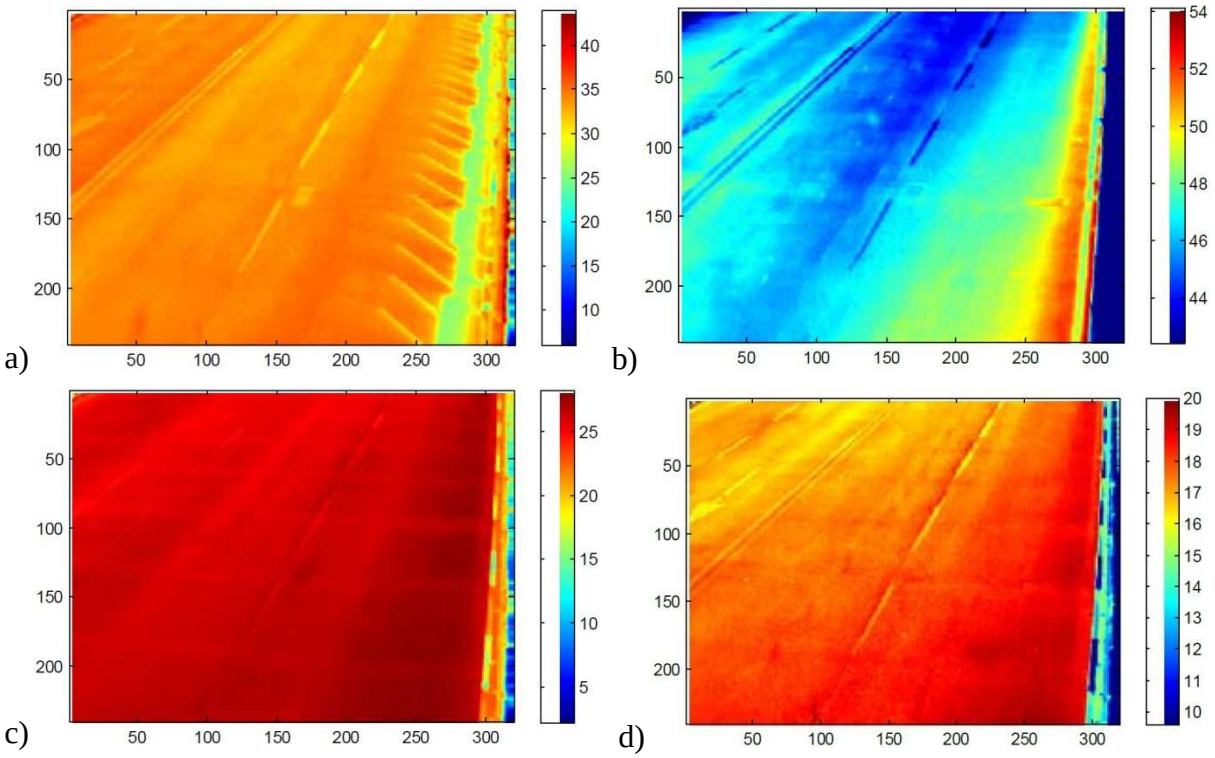


Slika 3.69 Rezultati ispitivanja [Van Leeuwen et al., 2011]; a) shema uzorka; b) termogram nakon toplinske pobude; c) fazni prikaz pri 0,000185 Hz; d) fazni prikaz pri 0,00092 Hz

Ističe se kako je PPT osjetljiva na vremenske uvjete (brzinu vjetra, sunčevo zračenje) jer uzrokuju smetnje koje smanjuju mogućnost otkrivanja oštećenja.

[Cupa et al., 2012] izrađuje laboratorijske uzorke žbuke ispod koje se nalaze ostaci freski i mozaika zbog istraživanja mogućnosti korištenja IC termografije u arheologiji. Također, ispod žbuke su ugrađena oštećenja, delaminacije, električni kablovi i čelična sidra. Kao toplinska pobuda korištene su četiri halogene lampe svaka snage 1 kW. Rezultati mjerenja IC termografijom uspoređeni su s rezultatima mjerenja korištenjem GPR-a, te zaključuju da je IC termografija primjenjiva kao metoda ispitivanja samo za dubine do nekoliko milimetara, dok se anomalije na većim dubinama mogu pouzdano otkriti samo korištenjem GPR-a.

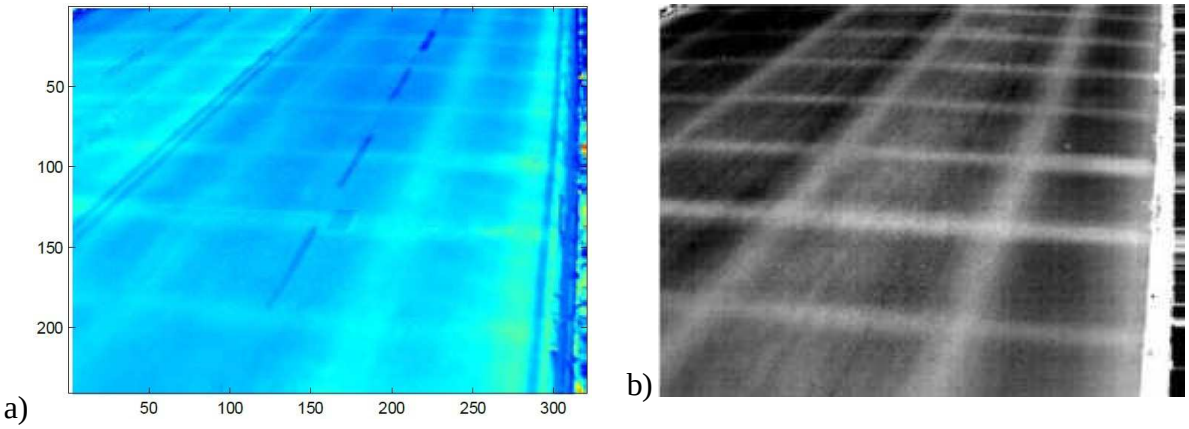
[Dumoulin & Averty, 2012] u sklopu projekta ISTIMES (*Integrated System for Transport Infrastructures surveillance and Monitoring by Electromagnetic Sensing*) primjenjuju IC termografiju pri kontinuiranom monitoringu kolničke ploče mosta u trajanju od 4 dana, uz paralelno praćenje promjene temperature i vlažnosti zraka, Slika 3.70.



Slika 3.70 Sekvenca termograma tijekom ciklusa od jednog dana; a) tijekom zagrijavanja; b) kraj procesa rasta temperature; c) tijekom procesa hlađenja; d) kraj hlađenja [Dumoulin & Averty, 2012]

Nakon toga provode FFT analizu sekvence termograma, te korištenjem SVD analize *(Singular Value Decomposition),* [Rajic, 2002] dobivaju skup ortogonalnih statističkih

modova poznatih kao empirijske ortogonalne funkcije EOF (*empirical orthogonal functions*), Slika 3.71.



Slika 3.71 Rezultati istraživanja [Dumoulin & Averty, 2012] a) Prikaz amplituda nakon FFT analize; b) prikaz treće EOF

[Largo & Angiuli, 2013] ocjenjuje učinkovitost IC termografije za kvalitativno određivanje postojanja oštećenja i nehomogenosti u ziđu ili ispod žbuke, kao i za ocjenu mogućnosti korištenja IC termografije za određivanje početka degradacije materijala i evoluciju degradacije. Ispitivanja su provedena na uzorcima kamenog ziđa (1,6 x 1,5 x 0,25 m) s ugrađenim oštećenjima poznatog položaja i veličine, dok su kao toplinska pobuda korištene četiri IC lampe svaka snage 1300 W u trajanju od 60 do 100 minuta.

3.9 Pregled stanja područja metoda i tehnika za obradu rezultata mjerenja

U ovom poglavlju će se prikazati metode obrade signala koje se koriste za karakterizaciju oštećenja kod materijala korištenih u aeronautici i svemirskoj industriji, odnosno za homogene materijale visoke toplinske provodljivosti kao što je aluminij. Smisao ovog poglavlja je da se identificiraju metode i tehnike koje su pogodne za primjenu na nehomogenim materijalima male toplinske provodljivosti, odnosno na konstrukcijama veće debljine kao što su betonske konstrukcije.

Kvantitativno određivanje dubine oštećenja provodi se kroz istraživanja u nekoliko smjerova, koriste se rezultati ispitivanja dobiveni na način da su i toplinska pobuda i IC kamera nalaze s iste strane promatranog uzorka [Zeng et al., 2012]. Mnoge metode

kvantitativnog određivanja dubine oštećenja temelje se na odnosu između dubine i karakterističnog vremena. Karakteristično vrijeme je trenutak u vremenu u kojem se javlja šiljak u dijagramu prve ili druge derivacije izglađene krivulje hlađenja površine uzorka.

Vrijeme maksimalnog temperaturnog kontrasta (PCT – *Peak Contrast Time*) je tehnika koja kaže da je vrijeme maksimalnog kontrasta proporcionalno kvadratu dubine oštećenja, a koeficijent proporcionalnosti ovisi o veličini oštećenja [Zeng et al., 2012].

Vrijeme maksimalnog nagiba (PST – *Peak Slope Time*) je trenutak kod kojeg prva derivacija krivulje temperaturnog kontrasta postiže maksimum, a proporcionalno je kvadratu dubine oštećenja, a koeficijent proporcionalnosti ne ovisi o veličini oštećenja [Zeng et al., 2012].

Vrijeme odstupanja (*deviation time*) signala s površine iznad oštećenja, u odnosu na signal iznad neoštećenog materijala, u mjerilu prirodnog logaritma, funkcija je dubine sučelja. Tako da je moguće mjeriti dubinu i/ili debljinu oštećenja mjerenjem vremena prolaska topline [Zeng et al., 2012].

Poseban je problem izbora referentne temperature površine, odnosno krivulje hlađenja površine neoštećenog materijala, gdje je moguće unijeti grešku mjerenja lošim izborom referentne temperature. Autori odabiru točku na neoštećenom materijalu blizu oštećenja kao mjesto za referentnu temperaturu. Moguće je pronaći i tehnike kod koji se koristi srednja temperatura s cijele površine uzorka kao referentna temperatura [Zeng et al., 2012].

Ukoliko se želi izbjeći određivanje referentne temperature, moguće je koristiti metodu PSDT (Peak Second Derivative Time). Krivulja druge derivacije krivulje hlađenja površine uzorka u logaritamskom mjerilu sadrži šiljak koji se može iskoristiti za određivanje dubine oštećenja [Zeng et al., 2012].

Ukoliko se promatra razvoj temperature tijekom impulsnog zagrijavanja uzoraka u logaritamskom mjerilu, moguće je dobiti dodatne informacije o oštećenjima unutar uzorka. U tom slučaju rješenje jednadžbe idealnog jednodimenzionalnog toplinskog toka:

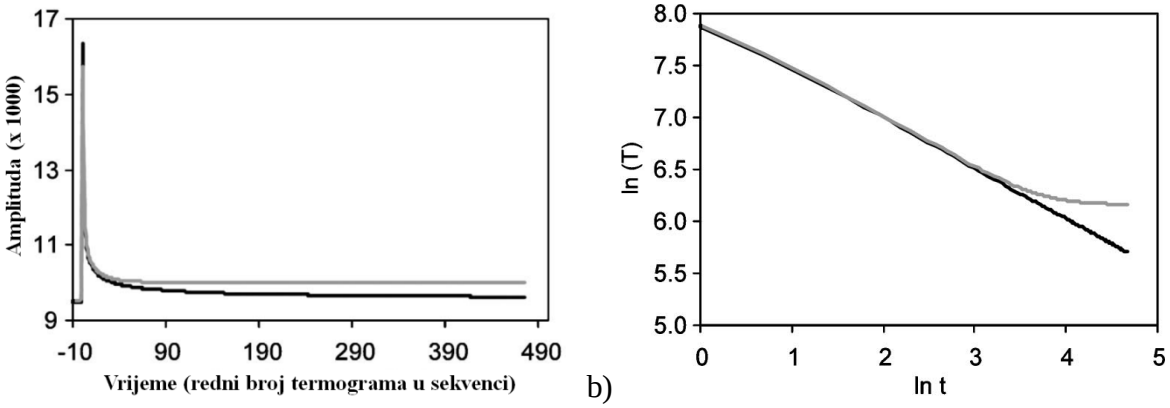
$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_{diff}} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

postaje jednadžba slijedećeg oblika:

$$ln(T) = ln\left(\frac{Q}{e_{eff}}\right) - \frac{1}{2}ln(\pi t)$$

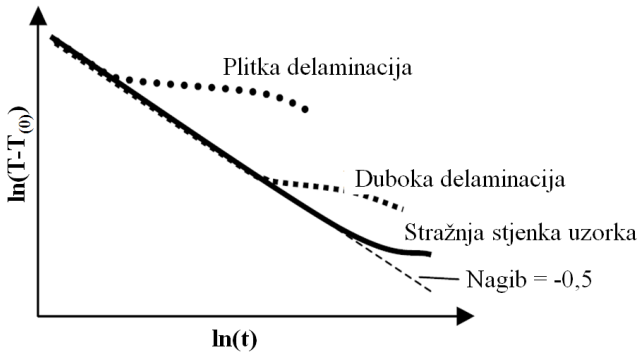
Ovakvim se prikazom dobije nekoliko prednosti [Shepard et al., 2003]:

- za uzorak bez oštećenja, gornja jednadžba u mjerilu prirodnog logaritma opisuje pravac s nagibom -0,5
- vremenska ovisnost je odvojena od topline koja se unosi u uzorak i svojstava materijala
- linearna ovisnost i konstantni nagib su invarijante (nepromjenjive veličine) s obzirom na materijal uzorka, energiju koja se unosi u uzorak ili kalibraciju kamere. S promjenom navedenih parametara, mijenjat će se samo razina odgovora.
- predvidljiv nagib i linearno ponašanje dopuštaju određivanje položaja oštećenja bez korištenja referentne točke
- promjena temperature uzorka iznad oštećenja i iznad neoštećenog dijela ne mijenja se naglo i ne odstupa od kvazi-linearnog ponašanja



Slika 3.72 Usporedba prikaza razvoja temperature na čeličnom uzorku u linearnom a) i logaritamskom mjerilu b) [Shepard et al., 2003]

Vidljivo je da je u linearnom prikazu, oštećenja moguće otkriti tek usporedbom razvoja temperature oštećenog i neoštećenog dijela uzorka, Slika 3.72a), dok je u slučaju prikaza u logaritamskom mjerilu vidljivo da se razvoj topline ponaša linearno s koeficijentom nagiba -0,5 sve do trenutka pojavljivanja oštećenja u uzorku kada temperatura odstupa od linearnog ponašanja, Slika 3.72b). Trenutak u vremenu kada temperatura u logaritamskom mjerilu počinje odstupati od linearnog ponašanja je u osnovi vrijeme maksimalnog nagiba koje se može detektirati u linearnom mjerilu [Shepard et al., 2003].



Slika 3.73 Ovisnost dubine oštećenja o ponašanju krivulje razvoja temperature u logaritamskom mjerilu [Shepard et al., 2004]

Slika 3.73 prikazuje da je vrijeme potrebno da dođe do odstupanja krivulje razvoja temperature od linearnog ponašanja ovisno o dubini na kojoj se nalazi oštećenje, iz čega se zaključuje da je moguće izmjeriti dubinu na kojoj se nalazi oštećenje, odnosno debljinu uzorka (ukoliko se promatra uzorak bez oštećenja). Istom metodom moguće je odrediti toplinsku difuzivnost materijala, ukoliko je poznata debljina promatranog uzorka [Shepard et al., 2004].

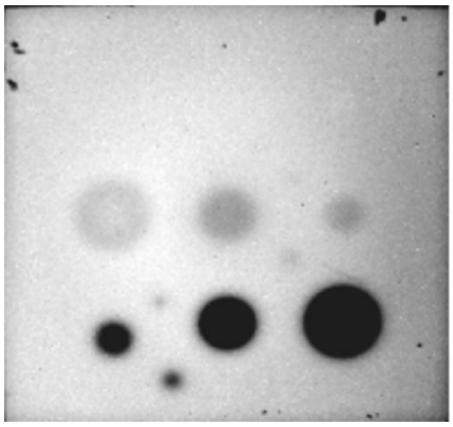
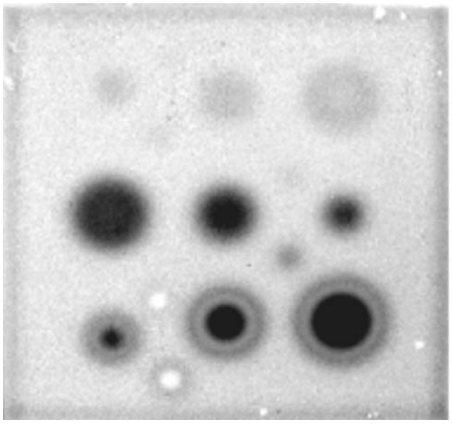
Ukoliko se dogodi slučaj da je promjer oštećenja, manji ili jednak dubini na kojoj se on nalazi, njegov signal uslijed toplinske pobude vrlo često će se izgubiti u šumu IC kamere. Također, u realnim mjerenjima podaci mogu zbog različitih utjecaja (nelinearnog odgovora kamere, pozadinskog zračenja, zagrijavanja uzorka konvekcijom) odstupati od idealnog linearnog ponašanja. Zbog toga je razvijena metoda rekonstrukcije termografskog signala (TSR metoda) [Shepard et al., 2003; Shepard et al., 2004; Shepard, 2012] kod koje su uzeti u obzir zakoni prijenosa topline vođenjem (toplinske difuzije) kako bi se iz neobrađenih termograma otklonio šum i utjecaji refleksije te nejednolike toplinske pobude uzoraka. Kako bi se to postiglo, potrebno aproksimirati logaritamsko ponašanje svakog piksela korištenjem polinomne funkcije niskog reda, obično se uzima polinom četvrtog ili petog reda [Ibarra-Castanedo et al., 2007]:

$$ln[T(t)] = \sum_{n=0}^{N} a_n[ln(t)]^n = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2[ln(t)]^2 + \cdots + a_n[ln(t)]^n$$

Koristi se polinom niskog reda, jer je on filtar koji „čuva“ izvorni oblik krivulje toplinskog odgovora i „odbacuje“ doprinos šuma. Kada je aproksimirano ponašanje svakog piksela termograma, mogu se rekonstruirati izvorni podaci korištenjem jednadžbe:

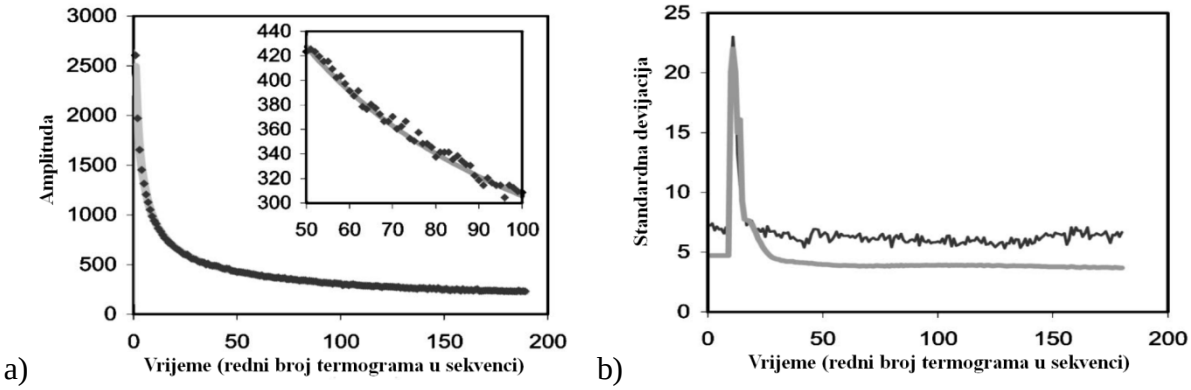
$$T(t) = exp\left(\sum_{n=0}^{N} a_n [ln(t)]^n\right)$$

Kako bi se spremila sekvenca rekonstruiranog termografskog signala (TSR - *Thermographic Signal Reconstruction*), potrebno je spremiti koeficijente korelacije a_n polinoma, bez obzira na dužinu sekvence. Kod TSR metode, nekoliko stotina termograma u neobrađenoj sekvenci dobivenoj ispitivanjem, koji predstavljaju razvoj temperaturne svakog pojedinog piksela su svedeni na skup jednadžbi. Na ovakav način rekonstruiranu sekvencu bez utjecaja šuma moguće je matematički obrađivati, tako da je moguće odrediti prikaze prve i druge derivacije ili derivacije višeg reda, provesti FFT analizu i to bez nepovoljnog utjecaja šuma, Slika 3.74.

a)  b) 

Slika 3.74 Termogram a) i prva derivacija termograma b) dobiveni nakon impulsne pobude (PT) čelične ploče [Shepard et al., 2003]

Slika 3.75a) prikazuje usporedbu razvoja temperature jednog piksela u vremenu iznad neoštećenog područja uzorka kako je dobiveno iz neobrađene sekvence termograma (crne točke) i rekonstruiranog signala (TSR) dobivenog gore opisanim postupkom. Vidljivo je odlično poklapanje rezultata ispitivanja (R^2=0,99942). Slika 3.75b) prikazuje standardnu devijaciju područja 15×15 piksela iznad neoštećenog područja kao funkciju vremena. Vidljivo je da rekonstruirana sekvenca i podaci imaju manju varijaciju rezultata od termograma do termograma, a i manju standardnu devijaciju unutar jednog termograma.



a) b)

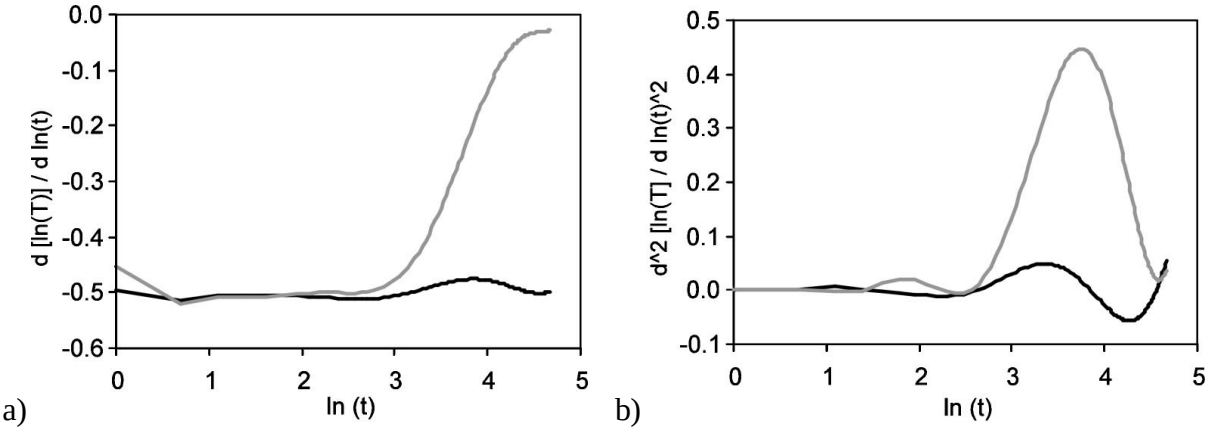
Slika 3.75 Usporedba signala neobrađene sekvence termograma (crno) i rekonstruirane sekvence termograma (sivo) [Shepard et al., 2003]

Korištenjem TSR signala moguće je odrediti derivacije razvoja temperature za svaki piksel termograma, Slika 3.76. Prva derivacija ima oblik:

$$\frac{dln(T)}{dln(t)} = \sum_{n=0}^{N} n a_n [ln(t)]^{n-1}$$

a druga derivacija ima oblik:

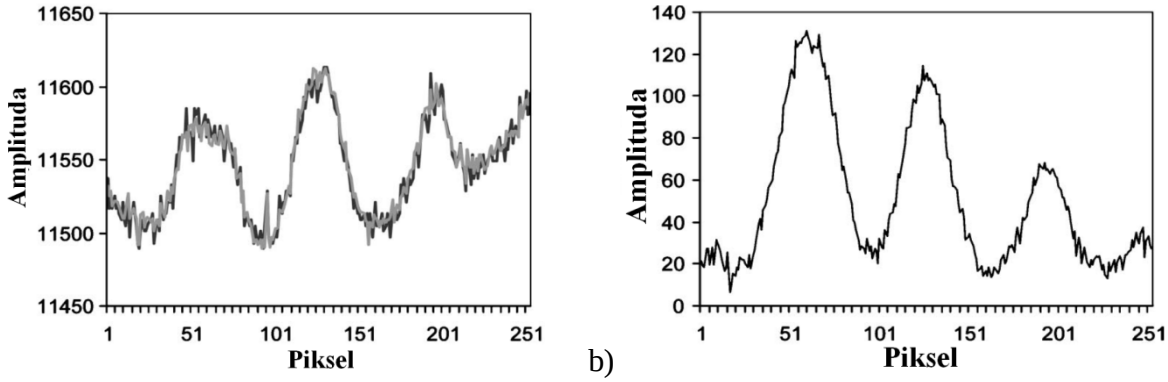
$$\frac{d^2 ln(T)}{d[ln(t)]^2} = \sum_{n=0}^{N} (n^2 - n) a_n [ln(t)]^{n-2}$$



a) b)

Slika 3.76 Prikaz TSR signala jednog piksela iznad neoštećenog područja (crno) i oštećenog područja (sivo) na uzorku čelika a) prva derivacija signala; b) druga derivacija signala [Shepard et al., 2003]

Korištenjem prve i/ili druge derivacije TSR signala moguće je smanjiti mutnoću (neizoštrenost) koja se javlja na termogramu zbog difuzije topline u ravnini uzorka. To se objašnjava činjenicom da derivacije daju maksimum ranije nego klasični termogrami, što je derivacija višeg reda, ranije će dati svoj maksimum [Shepard et al., 2003].



a) b)

Slika 3.77 a) Usporedba neobrađenih podataka (crno) i TSR podataka (sivo) prema položaju piksela na liniji koja prolazi kroz središte oštećenja (934 ms nakon zagrijavanja); b) prva derivacija TSR podataka za istu liniju [Shepard et al., 2003]

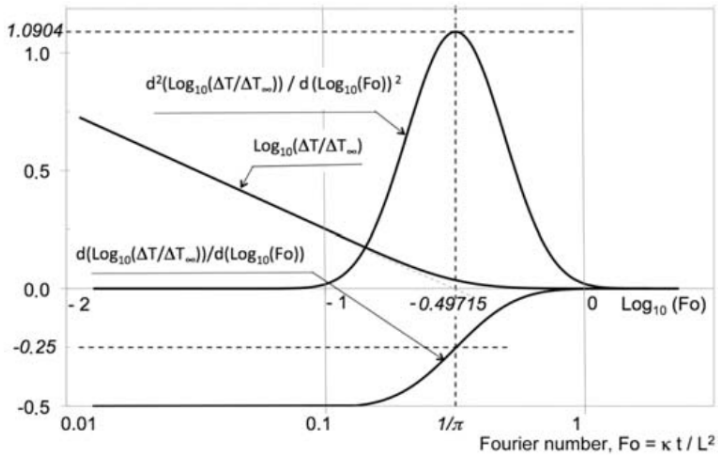
Slika 3.77 prikazuje kako se korištenjem prve derivacije na TSR podatake povećao SB kontrast (*Signal to Background*), odnosno kontrast između signala na području iznad oštećenja i neoštećenog područja. Povećanjem SB kontrasta se smanjuje utjecaj nejednolikog zagrijavanja i ujednačuje temperatura neoštećenog područja.

[Shepard, 2012] opisuje da maksimum druge derivacije krivulje razvoja temperature jednog piksela daje preciznu indikaciju o trenutku u vremenu kada upadna energija na prednju stranu uzorka dođe do stražnje strane uzorka. Druga se derivacija za pločasti uzorak koji adijabatski provodi toplinu, može aproksimirati Gaussovom funkcijom. [Shepard, 2012] karakterizira ponašanje druge derivacije krivulje razvoja temperature piksela iznad oštećenja u uzorku ovisno o tome da li samo oštećenje ima veću ili manju toplinsku provodljivost te da li je granica oštećenja adijabatska ili nije.

[Balageas, 2010] ocjenjuje mogućnost kvantitativnog korištenja TSR metode za mjerenje debljine uzorka ili mjerenje toplinske difuzivnosti materijala promatranog uzorka. TSR metodu primjenjuje na homogeni pločasti uzorak s adijabatskim granicama. Balageas koristi dekadski logaritam umjesto prirodnog logaritma kako bi prikazao razvoj temperature na površini uzorka, a rezultate daje u ovisnosti od Fourierovog broja:

$$Fo = \frac{\alpha_{diff} \cdot t}{L^2}$$

U tom slučaju [Balageas, 2010] daje prvu i drugu derivaciju krivulje razvoja temperature svakog pojedinog piksela po Fourierovom broju. Slika 3.78 prikazuje razvoj temperature jednog piksela nakon zagrijavanja uzorka, njegovu prvu i drugu derivaciju u mjerilu dekadskog logaritma.



Slika 3.78 Razvoj temperature piksela i njegova prva i druga derivacija u log-log domeni za pločasti uzorak s adijabatskim granicama [Balageas, 2010]

Vidljivo je da se krivulja razvoja temperature može podijeliti u tri dijela, pravac s nagibom -0,5 koji je u skladu s pretpostavkom polu-beskonačnog medija, nakon čega slijedi prijelazni dio krivulje zbog konačne debljine uzorka, koji karakterizira postepeno smanjivanje nagiba krivulje, te konačno adijabatski plato zbog izotermnog stanja ploče.

Kod realnog uzorka, adijabatski plato je zamijenjen s postepenim povratkom uzorka u početno stanje ($\Delta T_\infty = 0$).

Također, [Balageas, 2010] uspoređuje ispitivanje toplinske difuzivnosti materijala korištenjem reflektne tehnike (kamera je na istoj strani uzorka kao i toplinska pobuda) s transmisijskom tehnikom mjerenja (kamera je na suprotnoj strani uzorka od strane gdje je toplinska pobuda), te uspoređuje rezultate mjerenja toplinske difuzivnosti s metodom prema [Parker et al., 1961].

[Usamentiaga et al., 2012] uspoređuju više različitih metoda i tehnika toplinske stimulacije za nerazorno ispitivanje korištenjem IC termografije CFRP kompozita koji se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji. Koriste tri tehnike toplinske pobude uzoraka (impulsna termografija PT, termografija koračnog grijanja SH i vibrotermografija VT) te šest metoda naknadne obrade rezultata ispitivanja (fitanje polinoma, prva i druga derivacija, faza diskretne Fourierove transformacije, metoda traženja statističkog momenta trećeg reda – asimetričnost i metoda traženja statističkog momenta četvrtog reda - kurtičnost).

Asimetričnost slučajne varijable je mjera nagnutosti distribucije vjerojatnosti na lijevu ili desnu stranu, Slika 3.79 a). Negativna asimetričnost znači da su podaci pomaknuti prema

lijevo, a pozitivna asimetričnost znači da su podaci mjerenja pomaknuti prema desno. Asimetričnost (*skewness*) α_3 se definira kao:

$$\alpha_3 = \frac{m_3}{{\sigma_s}^3} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{X})^3}{(N-1){\sigma_s}^3},$$

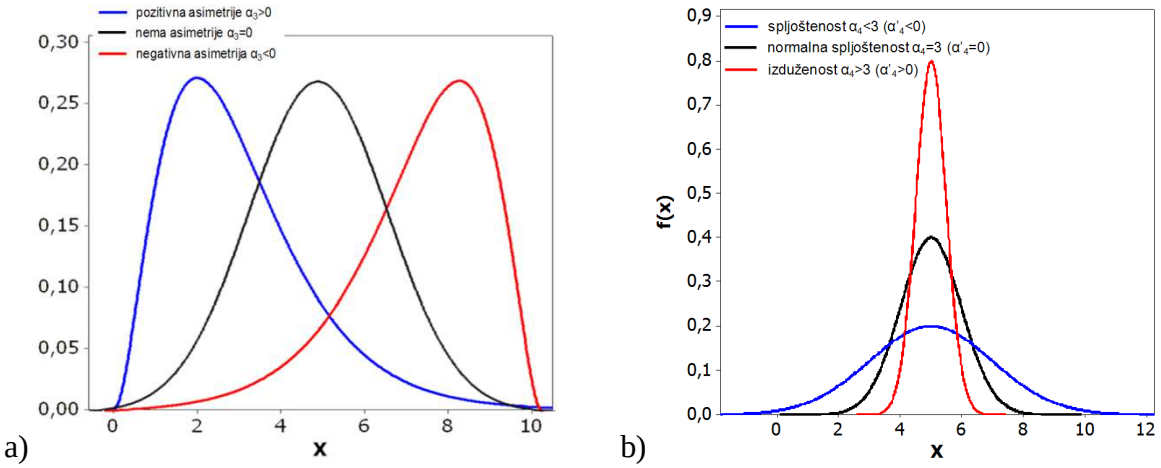
gdje su x_i pojedinačni rezultati mjerenja, $\bar{X}$ srednja vrijednost rezultata mjerenja, σ_s standardna devijacija rezultata mjerenja, a N ukupni broj mjerenja.

U slučaju primjene na rezultate mjerenja IC termografijom, asimetričnost m_3 se primjenjuje na razvoj temperature pojedinog piksela u sekvenci termograma, x_i je temperatura određenog piksela za pojedini trenutak u vremenu i [Usamentiaga et al., 2012].

Kurtičnost (spljoštenost) α_4 slučajne varijable je mjera spljoštenosti distribucije vjerojatnosti, Slika 3.79b). Podaci s visokom kurtičnosti imaju karakterističan šiljak, dok podaci s niskom kurtičnosti imaju spljošten vrh. Kurtičnost se definira kao:

$$\alpha_4 = \frac{m_4}{{\sigma_s}^4} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{X})^4}{(N-1){\sigma_s}^4}$$

U slučaju primjene na rezultate mjerenja IC termografijom, kurtičnost m_4 se primjenjuje na razvoj temperature pojedinog piksela u sekvenci termograma, x_i je temperatura određenog piksela za pojedini trenutak u vremenu i [Usamentiaga et al., 2012].

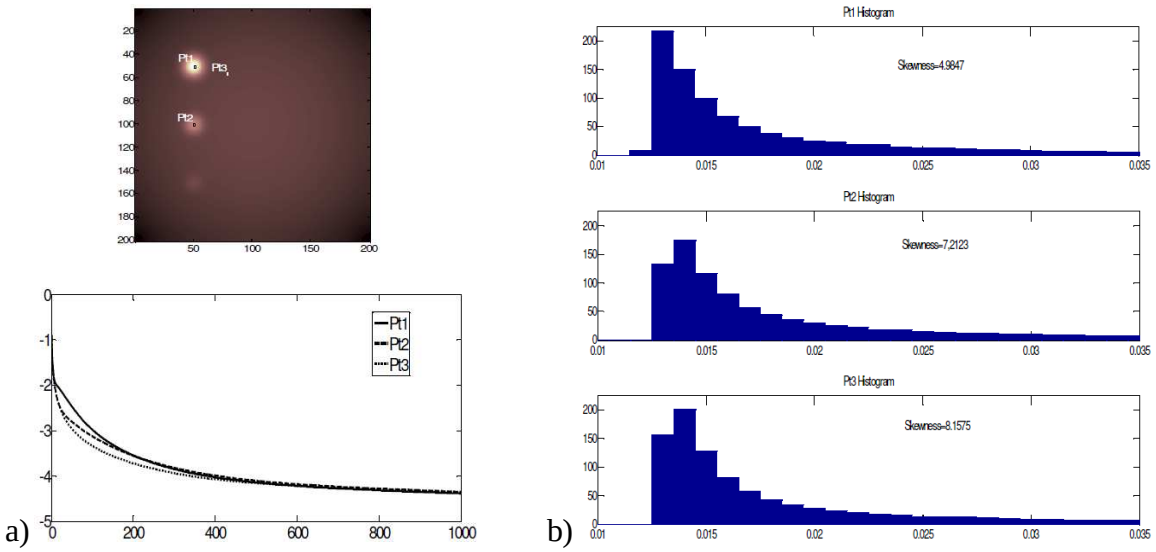


Slika 3.79 a) Asimetričnost, b) kurtičnost (spljoštenost) distribucije [Usamentiaga et al., 2012]

[Usamentiaga et al., 2012] kod PT tehnike koriste dvije bljeskalice koje omogućuju unos energije od 6 kJ u trajanju od 1 ms u uzorak. U slučaju SH tehnike koriste tri halogene lampe

svaka snage 1000 W u dvije konfiguracije (45% i 90% toplinskog kapaciteta lampi). Toplinska pobuda u obje konfiguracije je u trajanju od 10 s, dok je nakon isključivanja lampi promatran period hlađenja uzorka u trajanju od 15 s. Kod VT tehnike koriste ultrazvuk snage 4000 W, iako je korišten samo do 7% kapaciteta. Korištene su tri sonde, a trajanje cjelokupnog eksperimenta je 20 s.

[Madruga et al., 2008] koriste metodu obrade rezultata nazvanu asimetričnost (*skewness*) pri ispitivanju dubine oštećenja u CFRP kompozitima, pri čemu oštećenja imaju različite geometrijske karakteristike, a uzorci su podvrgnuti jednolikoj i nejednolikoj toplinskoj pobudi. Kako bi se mogla izračunati asimetričnost, potrebno je napraviti korak predprocesuiranja, koji se sastoji u tome da se svaki piksel termograma pretvori u stupac matrica, a redak matrice sadrži vremenski razvoj temperature pojedinog piksela. Potrebno je proračunati asimetričnost svakog retka matrice (svakog piksela) , pri čemu je x_i temperatura svakog piksela u trenutku vremena i.

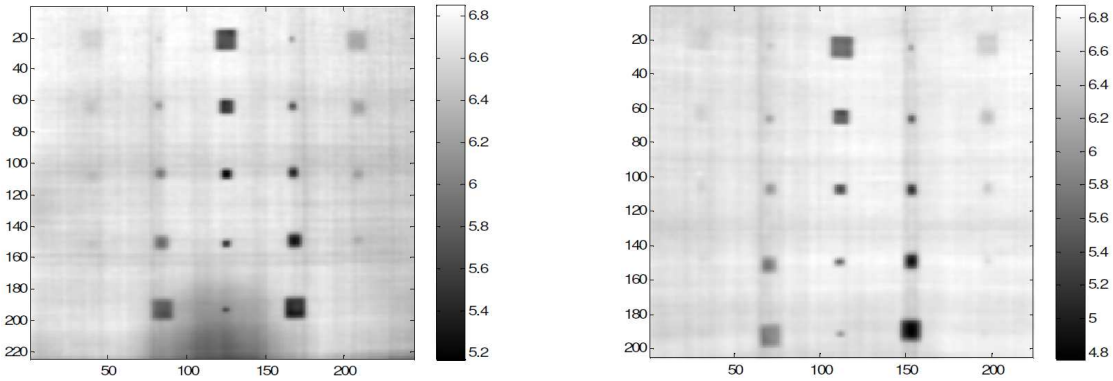


Slika 3.80 a) Razvoj temperature tri piksela u vremenu; b) histogrami promatrana tri piksela [Madruga et al., 2008]

Slika 3.80 prikazuje razvoj temperature tri piksela termograma u vremenu, podaci su dobiveni iz 1000 termograma sekvence. Pikseli Pt1 i Pt2 su pikseli na dijelu uzorka koji sadrži oštećenje, dok piksel Pt3 odgovara neoštećenom području uzorka. Iz histograma navedena tri piksela vidljivo je da su distribucije vjerojatnosti pozitivne, odnosno desno asimetrične i da je asimetričnost različita za svaki od promatranih piksela. Piksel Pt3 (iznad neoštećenog područja ima najveću asimetričnost, a kod piksela s područja uzorka koje sadrži oštećenja, asimetričnost se povećava s dubinom oštećenja. Može se dakle zaključiti da

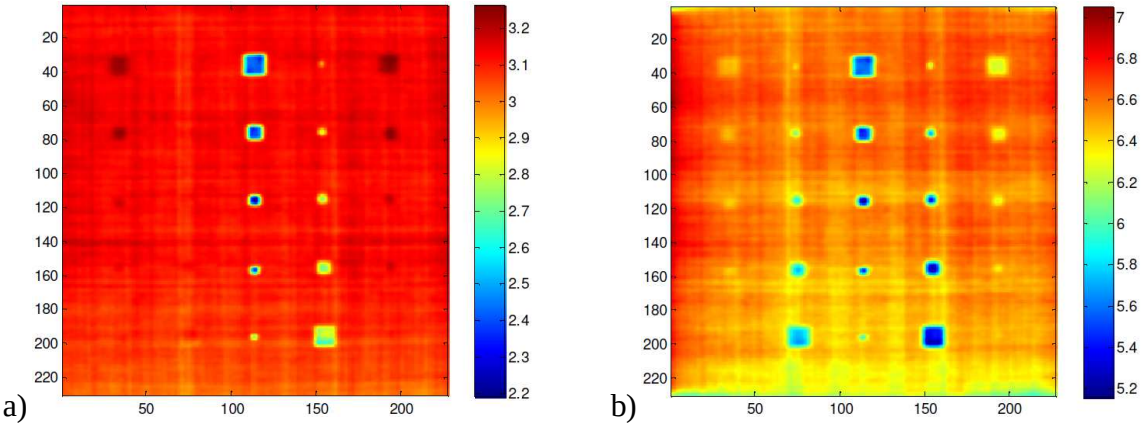
asimetričnost distribucije podataka prikupljenih iz razvoja površinske temperature uzoraka ovisi o postojanju oštećenja unutar uzorka i o samoj dubini oštećenja [Madruga et al., 2008].

Korištenjem metode obrade sekvence termograma pomoću asimetričnosti (*skewness*) dobiven je bolji kontrast između oštećenih i neoštećenih područja na termogramu, samo najmanja i najdublja oštećenja nisu vidljiva. Vidljiva je i sama struktura CFRP uzoraka, čime se otkriva anizotropna priroda CFRP-a, Slika 3.81.



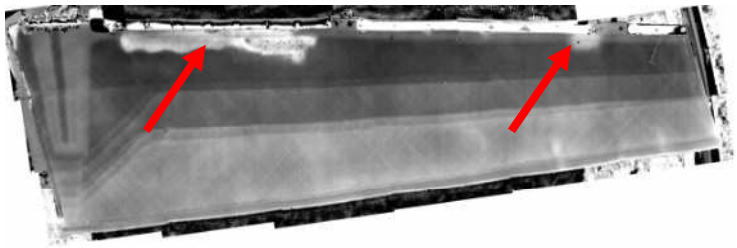
Slika 3.81 Prikazi asimetričnosti (skewness) za uzorke CFRP-a s nejednolikim zagrijavanjem [Madruga et al., 2008]

Utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzoraka postoji, Slika 3.81 (donji dio je zagrijavan više od gornjeg dijela), no unatoč tome, kontrast između oštećenog i neoštećenog područja u skewness prikazu je dovoljno velik da je moguće locirati oštećenja. Utjecaj broja termograma u obrađivanoj sekvenci utječe na mogućnost otkrivanja oštećenja korištenjem metode asimetričnosti (*skewness*). Ukoliko je broj termograma u sekvenci premali, neće biti moguće otkriti sva oštećenja, te on mora biti dovoljno velik. Prema [Madruga et al., 2008] to je minimalno 1200 termograma kod ispitivanja uzorka od CFRP-a, Slika 3.82.



Slika 3.82 Prikazi asimetričnosti (skewness) za uzorke CFRP-a a) 300 termograma u sekvenci; b)1800 termograma u sekvenci [Madruga et al., 2008]

[Genest et al., 2007] izrađuju uzorke od panela saćaste strukture za određivanje učinkovitosti različitih tehnika ispitivanja i obrade rezultata IC termografije primijenjene na kontrolu kvalitete, traženje kondenzirane vlage i korozije u vertikalnim repnim površinama zrakoplova, točnije u kormilu smjera. Uspoređivane su slijedeće metode: pasivna termografija, impulsna termografija (PT), Lock-in termografija (LT), Vibrotermografija (VT) koje su uspoređivane s rezultatima dobivenima metodom ultrazvuka koja je dokazana kao pouzdana metoda za navedenu upotrebu. Kao metode za obradu rezultata ispitivanja koriste se PPT tehnika (analiza brzom Fourierovom transformacijom – FFT) i TSR tehnika (prva i druga derivacija rekonstruiranog signala) koje su se pokazale kao najprikladnije za otkrivanje oštećenja. LT tehnika se pokazala kao neprikladna za otkrivanje svih oštećenja koja postoje u uzorcima (maksimalna dubina 2,2 mm), a dodatni nedostatak je trajanje ispitivanja, koje je u trajanju od sat vremena pri jednoj frekvenciji znatno duže od ispitivanja od nekoliko sekundi u slučaju PT tehnike. Korištenjem VT nije bilo moguće otkriti kondenziranu vodu u saćastoj strukturi panela, te je ograničena na postojanje delaminacije u materijalu koja uzrokuje generiranje topline uslijed vibracija, što nije uvijek slučaj. Pokazalo se da VT tehnika daje rezultate koji nisu otkriveni niti jednom drugom tehnikom ispitivanja, ali zbog nepostojanja korelacije s drugim rezultatima, potrebno je postojanje oštećenja i/ili problema potvrditi razornom metodom.

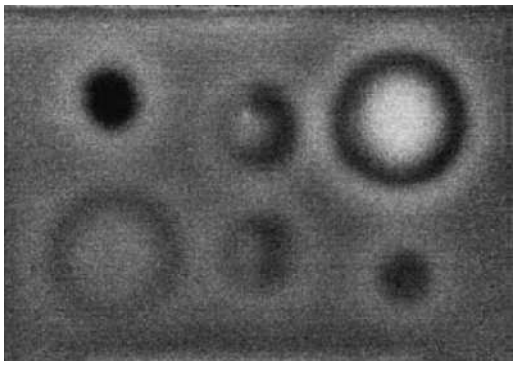
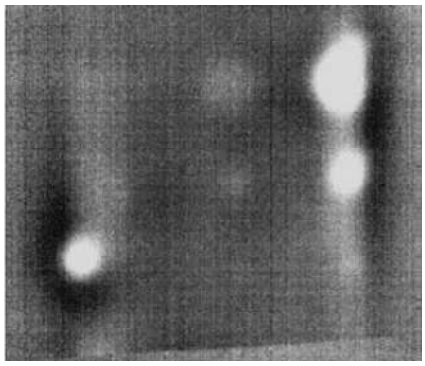


Slika 3.83 Druga derivacija rezultata impulsne termografije pri 0,367s [Genest et al., 2007]

[Vavilov & Marinetti, 2009] uspoređuju rezultate simulacije i eksperimentalne verifikacije pojedinih značajki impulsne termografije kao tehnike za otkrivanje oštećenja kod visokovodljivih (duraluminij) i materijala niske toplinske provodljivosti (čelik) uzrokovanih korozijom. Za naknadnu analizu distribucije temperature na površini uzorka i kvalitativnih rezultata ispitivanja koristi termografiju faznog impulsa (PPT), dinamičku toplinsku tomografiju (DTT) i analizu glavnih komponenti (PCA – *Principal component analysis*)

PT tehnika za pronalaženje oštećenja u materijalima s visokom toplinskom provodljivosti kao što su paneli od duraluminija, može se smatrati pouzdanom tehnikom, dok se za

ispitivanje čelika, autori ograđuju i naglašavaju potrebu za dodatnim ispitivanjima. Korištenjem numeričke simulacije za određivanje očekivanja rezultata ispitivanja, moguće je optimizirati trajanje toplinske pobude uzoraka, snagu toplinske pobude kako bi se dobili rezultati ispitivanja s najboljim toplinskim kontrastom. Iako teorijska razmatranja pretpostavljaju da bi mogućnost otkrivanja oštećenja trebala biti jednaka razini šuma termografskog sustava, što je u slučaju ispitivanja [Vavilov & Marinetti, 2009] 4% za duraluminij i 6% za čelik, kod oštećenja promjera 16 mm, minimalno smanjenje presjeka koje je otkriveno je smanjenje od 14% za duraluminij i 25% za čelik.

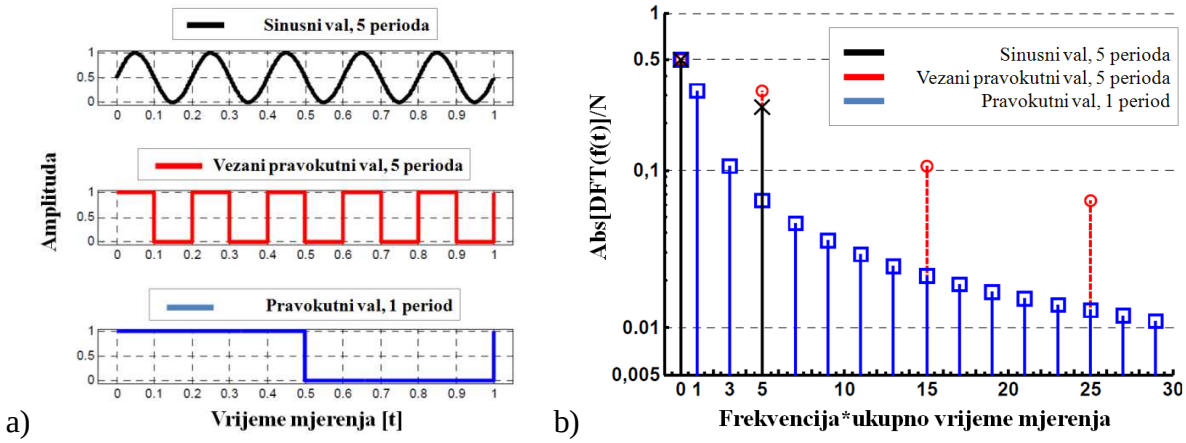
a)  b) 

Slika 3.84 Usporedba rezultata ispitivanja (druga glavna komponenta) za a) duraluminij; b) čelik [Vavilov & Marinetti, 2009]

[Vavilov, 2010] koristi IC termografiju za ispitivanje toplinske difuzivnosti uzoraka kompozita ugljičnih vlakana i epoksidne smole korištenjem modificirane Parkerove metode. Promatra se toplinska difuzivnost uzoraka u tri dominantna smjera (x,y,z) pri čemu je za određivanje difuzivnosti u x i y smjeru korištena tehnika koju su predložili [Krapez et al., 2004]. Ističe se mogućnost karakterizacije oštećenja u materijalu korištenjem inverznih postupaka za određivanje dubine oštećenja, odnosno kod određivanja lateralnih dimenzija oštećenja, koriste se tehnike mjerenja udaljenosti između ekstrema prve derivacije i korištenje FWHM tehnike (*Full Width, Half Maksimum technique*). [Vavilov, 2010] određuje i prikazuje iznose teorijske granične vrijednosti za otkrivanje zračnih šupljina u kompozitima ugljičnih vlakana i epoksidne smole, keramici i GFRP kompozitima pri korištenju različitih tehnika toplinske pobude i snimanja s prednje i stražnje strane uzorka.

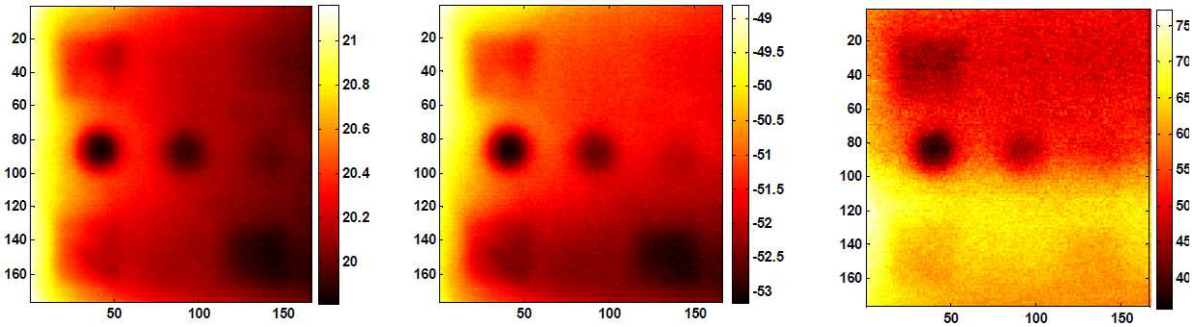
[Pitarresi, 2012] koristi lock-in korelacijsku shemu koja se primjenjuje na dobivene rezultate razvoja površinske temperature uzorka u vremenu te pomoću koje je moguće pronaći fazu i amplitudu signala. Pri tome se koristi diskretna Fourierova transformacija za filtraciju signala, čime se mogu izdvojiti harmonici skriveni u šumu signala ili su modulirani s prijenosnicima niskih frekvencija tijekom prijelaznog (nestacionarnog) stanja. Pri tome se

koristi IC kamera (3-5μm) niske temperaturne rezolucije (NETD=0,12K), niske frekvencije snimanja (0,8 Hz) te halogene lampe (snage 1500W) bez elektroničke regulacije emitiranja topline. Uzorci korišteni u istraživanju su GFRP paneli debljine 12 mm koji se obično koriste u brodogradnji, što je predstavljalo posebni izazov s obzirom na to da se toplinska pobuda ručno kontrolirala (impulsi topline su u trajanju od nekoliko sekundi) i činjenicu da su u analizi potrebne niske frekvencije, u redu veličina od nekoliko mHz [Pitarresi, 2012]. Kao toplinska pobuda koristi se halogena lampa, koja je modulirana tako da su toplinski impulsi pravokutni, što je postignuto tako da je optički put između lampe i uzorka periodički prekidan zaslonom. Ističe se prednost ovakve toplinske pobude uzoraka pred PPT tehnikom (jedan impuls), jer se unosi više toplinske energije u uzorak, dok u usporedbi s klasičnom LT tehnikom (sinusna pobuda) pravokutni valovi daju veći broj harmonika koje se tada mogu selektivno koristiti za otkrivanje oštećenja na različitim dubinama u uzorku. Slika 3.85 prikazuje spektar snage tri načina toplinske pobude (tri vala): sinusni val (5 perioda), vezani pravokutni valovi (5 perioda) i pravokutni val (1 period), koji su uneseni u uzorak u istom vremenskom razdoblju t. Vidljivo je da osim što vezani pravokutni valovi imaju neznatno veću unesenu snagu na glavnim frekvencijama nositeljima od sinusnog vala, sekundarne frekvencije nositelji imaju značajnu snagu. Jedan pravokutni val ima veliki broj sekundarnih frekvencija nositelji pri nižim frekvencijama od vezanih pravokutnih valova.



Slika 3.85 Usporedba a) analiziranih valova toplinske pobude; b) relativnih normaliziranih spektara snage [Pitarresi, 2012]

Korištenjem LT tehnike s vezanim pravokutnim valovima toplinske pobude, moguće je jednostavnije provođenje ispitivanja zbog prikupljanja rezultata nekoliko frekvencija, čime se omogućuje otkrivanje oštećenja na više dubina, što znatno skraćuje trajanje ispitivanja.

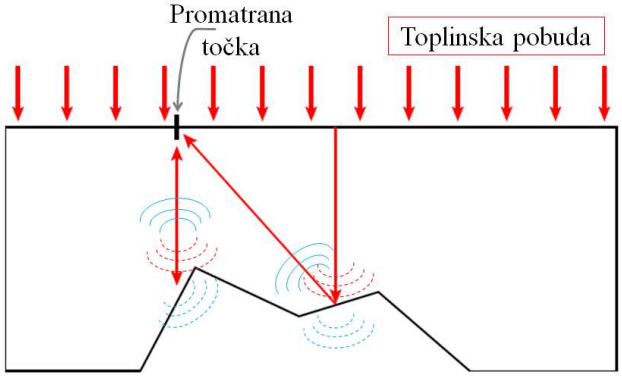


$f_r = 1{,}67\ mHz$ $f_r = 3{,}3\ mHz$ $f_r = 16{,}7\ mHz$

Slika 3.86 Fazni prikazi dobiveni korištenjem tri različite lock-in frekvencije (f_r), pri čemu je glavna frekvencija nosioc $f_c = 16{,}7\ mHz$ [Pitarresi, 2012]

[Goetschel et al., 2012] naglašavaju da su poboljšanje slike i smanjenje šuma ključni koraci za kvantitativnu rekonstrukciju veličine oštećenja i dubine na kojoj se oštećenje nalazi. Najčešće metode poboljšanja slike su Gaussov filtar i medijan filtar (prostorno poboljšanje) ili filtar pokretnog prosjeka (*moving average filter*) za poboljšanje u vremenu. [Goetschel et al., 2012] predlažu algoritam za poboljšanje slike i smanjenje šuma koji se temelji na analitičkom rješenju jednadžbe provođenja topline te slijede pristup TSR tehnike [Shepard et al., 2003]. Predlažu dekompoziciju krivulje razvoja temperature u elementarna rješenja, pri čemu koeficijenti korelacije imaju fizikalno značenje te označavaju doprinose temperaturi s različitih dubina i položaja.

Razmatra se kvantitativni model za temperaturni kontrast na pojedinoj točki površine uzorka koji pretpostavlja superpoziciju toplinskih valova koji se šire u jednom smjeru i odbijaju od pozadine uzorka ili pak oštećenja. Doprinos pojedinog toplinskog vala površinskoj temperaturi varira u intenzitetu i u udaljenosti koju je val prošao prije nego što je došao do točke na površini uzorka koja se promatra.



Slika 3.87 Razvoj temperature na površini uzorka može se promatrati kao superpozicija više toplinskih valova [Goetschel et al., 2012]

Ukupna temperatura površine uzorka sastoji se od nadolazećeg toplinskog vala koji se prenosi kroz polubeskonačni uzorak i doprinosa reflektiranog toplinskog vala [Goetschel et al., 2012].

[Bajorek & Nowakowski, 2012] koriste toplinsku tomografiju (TT) za određivanje unutarnje strukture promatranog objekta. Pod nazivom toplinska tomografija podrazumijeva se rekonstrukcija i vizualizacija unutarnje strukture 3D objekta kroz promatranje toplinskih svojstava, a temelji se na rješavanju inverznog problema toplinskog toka nastalog zbog prisilne toplinske pobude. Ukoliko je poznato temperaturno polje na površini promatranog uzorka i njegova promjena u vremenu nakon toplinske pobude, moguće je odrediti unutarnju strukturu korištenjem TT metode.

Toplinska tomografija dopušta: prikaz promatranog uzorka u slojevima na određenoj dubini ispod površine, smanjenje utjecaja šuma na površini uzorka na kvalitetu termograma, povećanje pouzdanosti otkrivanja oštećenja, određivanje dubine oštećenja s razumnom točnosti [Swiderski, 2009]. Od dva pristupa toplinskoj tomografiji, „klasični“ se pristup sastoji od usporedbe površinske temperature iznad oštećenja s temperaturom referentne točke, točke na površini iznad dijela gdje ne postoji oštećenje. Drugi pristup ne koristi referentnu točku te je nazvan „toplinska tomografija bez referentne točke“ (*no-reference tomography*). Tomografiju bez referentne točke je moguće provesti zbog toga što se referentna temperatura može dobiti modeliranjem korištenjem teorijskih rješenja jednadžbi provođenja topline ili korištenjem aproksimacije krivulje razvoja temperature polinomima višeg reda. Pri aproksimaciji se pretpostavlja da je krivulja razvoja temperature na području uzorka bez oštećenja monotona, dok će ona na području uzorka s oštećenjem imati određene perturbacije (poremećaje) koje će se pojaviti u polinomima višeg reda. Ideju toplinske tomografije bez referentne točke predložio je [Vavilov, 2006].

Iz gore navedenog, jasno je da se TT metoda temelji na činjenici da su oštećenja koja se nalaze na većim dubinama karakterizirana dužim vremenom t_m (optimalnim vremenom promatranja) potrebnim da se postigne maksimum razlike temperature ΔT oštećenog i neoštećenog područja na uzorku. Ukoliko je dostupna kalibracijska krivulja između vremena t_m i dubine oštećenja, moguće je distribuciju u vremenu t_m pretvoriti u distribuciju dubine. Dokazano je da je najveći mogući broj slojeva na koji se uzorak može po dubini raspodijeliti pet, i da debljina slojeva bližih površini uzorka može biti manja od debljine slojeva na većoj dubini uzorka [Swiderski, 2009].

Uvedeno je nekoliko posebnih sintetičkih prikaza nazvanih maksigrami (*maxigrams*) i vrijemegrami (*timegrams*) koji su rezultati analize metodom toplinske tomografije,a koji su povezani s debljinom oštećenja i dubinom na kojoj se oštećenje nalazi [Swiderski, 2009].

Maksigram je sintetička slika koja prikazuje distribuciju maksimalnih vrijednosti odabranog parametra, na primjer ΔT_m maksigram prikazuje sve piksele kad je njihov ΔT u odnosu na neku referentnu vrijednost maksimalan.

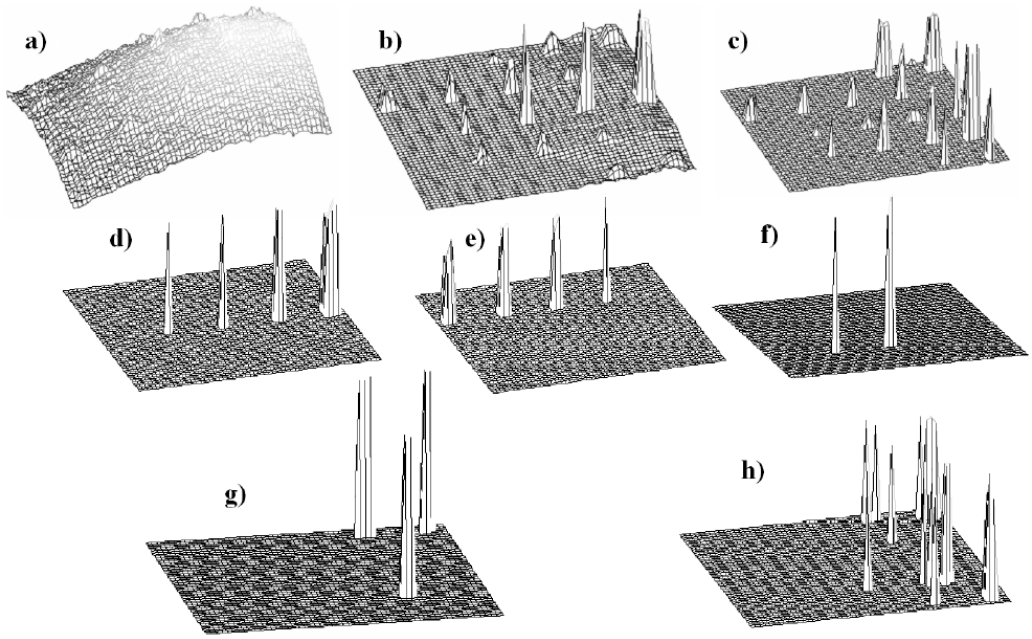
Vrijemegram je sintetička slika koja prikazuje distribuciju vremena t_m za svaki piksel, odnosno vremena kada je postignuta maksimalna vrijednost ΔT u odnosu na neku referentnu vrijednost.

Postoji nekoliko izraza koji povezuju optimalno vrijeme promatranja t_m s dubinom na kojoj se nalazi oštećenje. Na primjer, rješenje jednadžbe 1D provođenja topline u polu-beskonačnom tijelu nakon djelovanja Diracovog pulsa kaže da je optimalno vrijeme promatranja t_m funkcija kvadrata dubine D na kojoj se nalazi oštećenje [Maldague, 2001]:

$$t_m \approx \frac{D^2}{\alpha_{diff}}$$

Toplinski tomogram je slika na kojoj su prikazane sve vrijednosti t_m piksela u odabranom intervalu $t_{m,1} \dots t_{m,2}$, što znači da je toplinske tomograme moguće dobiti „prekrojavanjem“ odgovarajućih vrijemegrama [Swiderski, 2009].

[Swiderski, 2009] koristi uzorke 300×300×2 mm izrađene od 10 slojeva CFRP kompozita i koji sadrži 25 oštećenja od teflona različitih dimenzija i koja se nalaze na različitim dubinama u uzorku. Pretpostavljeno je da su toplinska svojstva CFRP kompozita po dubini uzorka $\lambda_c = 0{,}64\frac{W}{mK}, \alpha_{diff} = 5{,}2 \times 10^{-7}\frac{m^2}{s}$; a u ravnini uzorka $\lambda_c = 1{,}28\frac{W}{mK}, \alpha_{diff} = 10{,}4 \cdot 10^{-7} m^2/s$. Kao toplinska pobuda korištene su dvije bljeskalice, od koji svaka može unijeti energiju od 3,2 kJ (trajanje impulsa 5 ms). Podaci su prikupljani IC kamerom koja radi u području valnih duljina od 3 do 5 μm. Slika 3.88 prikazuje rezultate klasične toplinske tomografije, maksigrama i vrijemegrama u usporedbi sa neobrađenim termogramom dobivenim nakon ispitivanja.



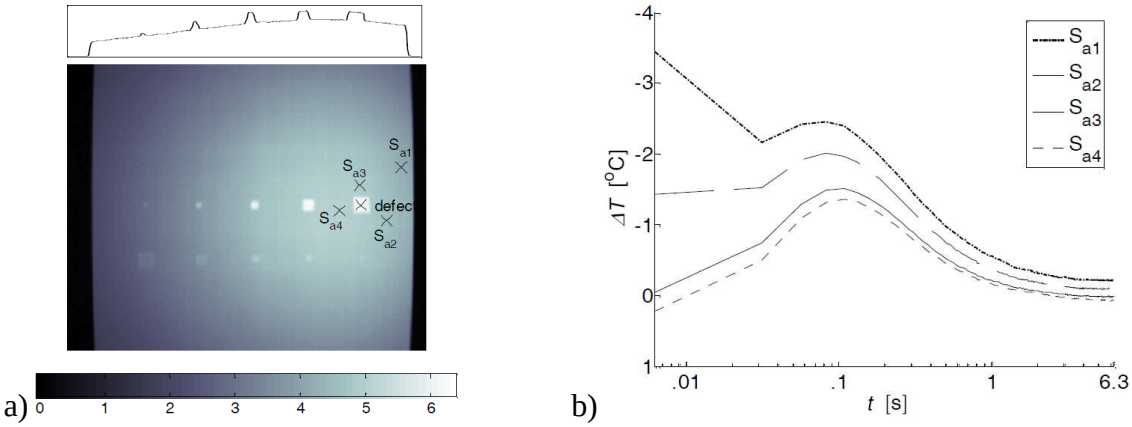
Slika 3.88 Rezultati toplinske tomografije a) termogram; b) maksigram; c) vrijemegram; d) tomogram (sloj 0,24 - 0,31 mm); e) tomogram (sloj 0,42 – 0,54 mm); f) tomogram (sloj 0,60 – 0,66 mm); g) tomogram (sloj 0,67 – 0,69 mm); h) tomogram (sloj 0,71 – 0,90 mm) [Swiderski, 2009]

[Ibarra-Castanedo et al., 2007] opisuju cjelokupni postupak obrade rezultata mjerenja u slučaju primjene aktivne termografije, uključujući predprocesuiranje rezultata mjerenja kako bi se rekonstruirala slika sa smanjenim šumom, „mrtvim“ pikselima i jasna slika oko rubova, a sve na primjeru ispitivanja uzoraka od CFRP-a s ugrađenim oštećenjima.

Od tehnika naknadne obrede rezultata ispitivanja, ističe se tehnika temperaturnog kontrasta (*Thermal Contrast Technique*) kod koje se računa razlika temperatura između temperature piksela iznad neoštećenog područja i oštećenog područja na termogramu:

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_s(t)$$

pri čemu je najveći nedostatak potreba određivanja neoštećenog područja na uzorku. Čak i ukoliko je određivanje neoštećenog područja jasno i jednostavno, može doći do znatnih varijacija u rezultatima ispitivanja ukoliko se definira neko drugo neoštećeno područje, pa čak i ukoliko je ono u neposrednoj blizini oštećenog područja, Slika 3.89.



Slika 3.89 Rezultati tehnike temperaturnog kontrasta za odabrane točke sa termograma (a) [Ibarra-Castanedo et al., 2007]

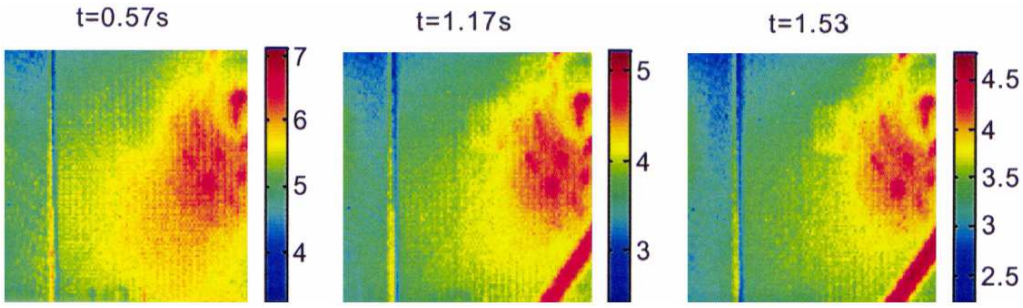
Navedeno može biti posljedica nejednolikog zagrijavanja uzorka, kao što je vidljivo sa termograma i profila temperatura, Slika 3.89a). Problem određivanja neoštećenog područja moguće je riješiti korištenjem tehnike diferencijalnog apsolutnog kontrasta (*differential absolute contrast* – DAC) [Pilla et al., 2002] kod koje se idealna temperatura neoštećenog područja proračunava lokalno pod pretpostavkom da se kod prvih nekoliko termograma promatrana točka ponaša kao neoštećeno područje. Pri tome je potrebno najprije definirati vrijeme t' kao vrijeme potrebno od početka toplinske pobude (trenutka kad je impuls topline u PT termografiji poslan prema uzorku) do trenutka kada prvo oštećenje postane vidljivo u sekvenci termograma, u trenutku t' oštećenje još uvijek nije vidljivo. Na ovaj način je lokalna temperatura neoštećenog područja identična temperaturi oštećenog područja.

$$T_s(t') = T_d(t') = \frac{Q}{e_{eff}\sqrt{\pi \cdot t'}}$$

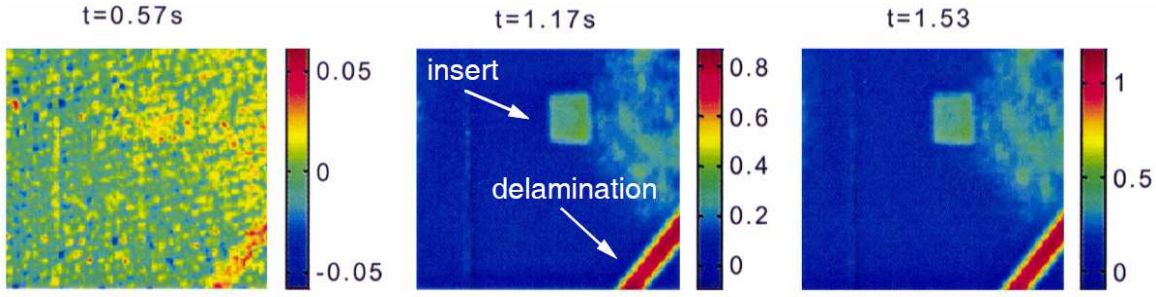
iz čega slijedi da je jednadžba apsolutnog kontrasta za DAC tehniku:

$$\Delta T_{DAC}(t) = T_d(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t')$$

Slika 3.90 i Slika 3.91 prikazuju učinkovitost DAC tehnike pri otkrivanju oštećenja u uzorcima kompozita grafit-epoksi. Dok se na neobrađenim termogramima u određenim trenucima u vremenu ne može utvrditi postojanje oštećenja, već je moguće odrediti samo delaminaciju na dijelu uzorka, na DAC prikazima moguće je vrlo pouzdano odrediti postojanje umetka u slojevima uzorka.



Slika 3.90 Neobrađeni termogrami uzoraka kompozita grafit-epoksi u različitim trenucima t [Pilla et al., 2002]

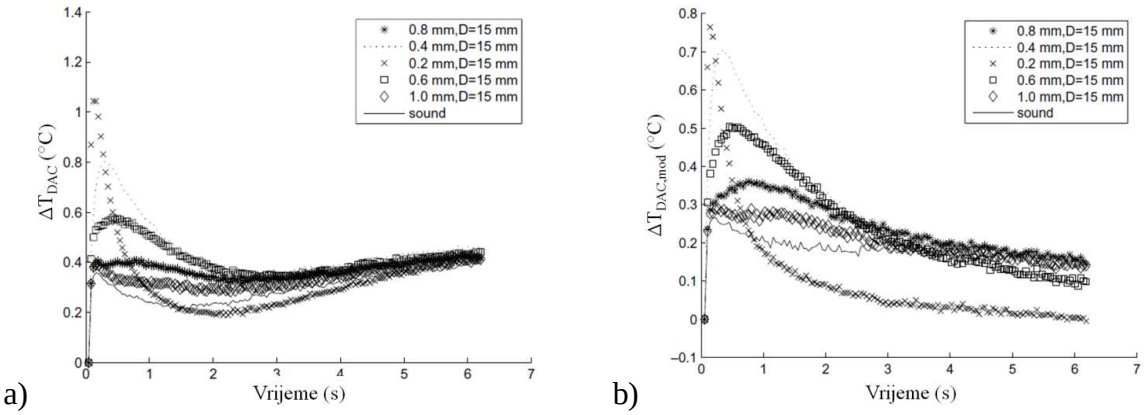


Slika 3.91 Prikazi uzoraka kompozita grafit-epoksi nakon obrade rezultata mjerenja DAC tehnikom [Pilla et al., 2002]

U slučaju kad su uzorci deblji ili kad je potrebno promatrati uzorke nakon što je proteklo više vremena (DAC tehnika u ovim slučajevima odstupa od točnih rezultata), predložena je modificirana DAC tehnika koja se temelji na modelu konačne ploče i teoriji toplinskih kvadrupola koja eksplicitno uključuje debljinu ploče L u rješenje. Za dobivanje rješenja prema slijedećem izrazu, koristi se inverzna Laplaceova transformacija [Benítez et al., 2008]:

$$\Delta T_{DAC,mod}(t) = T_d(t) - \frac{\mathcal{L}^{-1}\left[coth\sqrt{\frac{pL^2}{\alpha_{diff}}}\right]_t}{\mathcal{L}^{-1}\left[coth\sqrt{\frac{pL^2}{\alpha_{diff}}}\right]_{t'}} \cdot T(t')$$

gdje je $\mathcal{L}^{-1}$ oznaka za inverznu Laplaceovu transformaciju, a p je Laplaceova varijabla.



Slika 3.92 Usporedba rezultata dobivenih primjenom klasične DAC tehnike a) i rezultata dobivenih modificiranom DAC tehnikom b) za uzorke CFRP-a [Benítez et al., 2008]

Slika 3.92 prikazuje usporedbu naknadne obrade rezultata ispitivanja dobivenih primjenom klasične DAC tehnike i rezultata dobivenih primjenom modificirane DAC tehnikom za uzorke CFRP-a.

Korištenjem tehnike termografije faznog impulsa (*Pulsed Phase Thermography* –PPT) moguće je rezultate ispitivanja transformirati iz vremenske u frekvencijsku domenu korištenjem jednodimenzionalne diskretne Fourierove transformacije (DFT) [Ibarra-Castanedo et al., 2007; Maldague, 2001]:

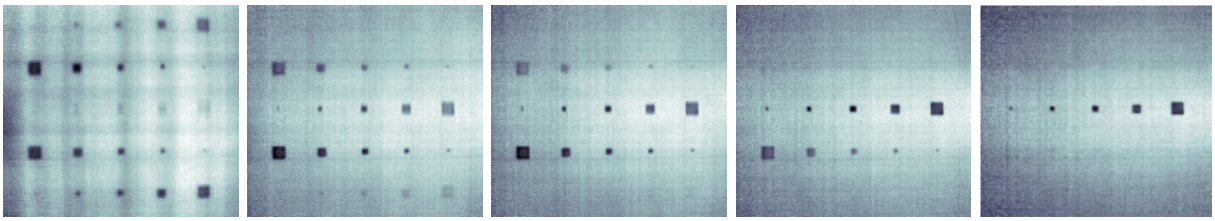
$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right)} = Re_n + Im_n$$

gdje je j imaginarna jedinica ($j^2 = -1$), n određuje prirast frekvencije, Δt je interval prikupljanja podataka (mjerenja) a Re i Im su realni i imaginarni dijelovi transformacije. Realni i imaginarni dijelovi transformacije se koriste za procjenu amplitude A i faze $\emptyset$:

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \qquad \text{i} \qquad \emptyset_n = \tan^{-1}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right)$$

DFT se može koristiti kao tehnika obrade rezultata PT, LT i VT tehnika aktivne termografije s obzirom da se može primijeniti na svaki valni zapis. Fazni prikaz je naročito zanimljiv kod nerazornih ispitivanja, s obzirom da je pod manjim utjecajem refleksija, varijacije u koeficijentu emisije, geometrije površine uzorka i nejednolikog zagrijavanja od neobrađenih termograma. Slika 3.93 prikazuje fazne prikaze rezultata ispitivanja pri različitim frekvencijama. Vidljivo je da oštećenja koja se nalaze na većoj dubini postaju pri višim

frekvencijama nevidljiva, dok su oštećenja bliža površini gotovo nevidljiva na nižoj frekvenciji.



a) b) c) d) e)

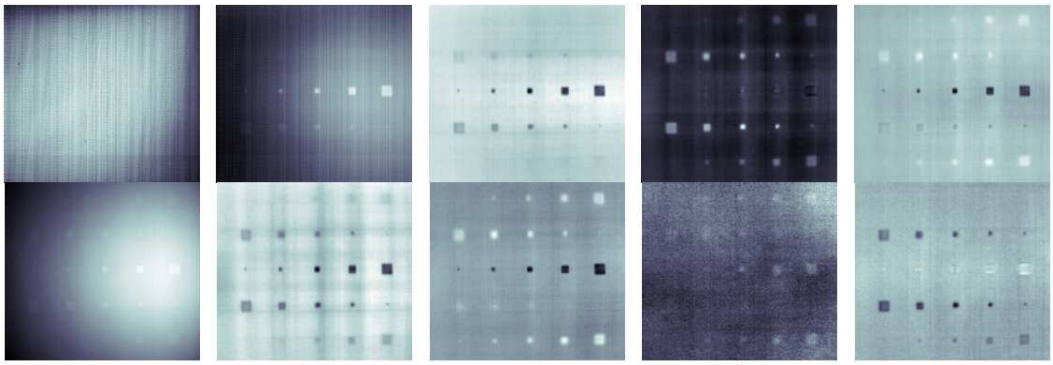
Slika 3.93 Rezultati PPT tehnike (fazni prikaz) pri frekvenciji a) 0,15 Hz; b) 0,47 Hz; c) 0,63 Hz; d) 1,10 Hz; e) 2,21 Hz [Ibarra-Castanedo et al., 2007]

Nedostatak PPT tehnike očituje se u šumu koji postaje značajan na višim frekvencijama, te je često potrebno izvršiti otklanjanje šuma pri obradi rezultata mjerenja.

Dekompozicija na singularne vrijednosti (SVD – *Singular Value Decomposition*) je alternativna tehnika koja se koristi za dobivanje prostorne i/ili vremenske promjene podataka dobivenih u matričnom obliku. SVD je transformacija koja se temelji na svojstvenom vektoru koji tvori ortonormirani prostor. SVD matrice **A** ($MxN\ matrica, M > N$) može se izračunati kako je opisano u poglavlju 2.9.7:

Kako bi se SVD primijenila na rezultate ispitivanja IC termografijom, potrebno je 3D matricu termograma, koja predstavlja vremensku i prostornu varijaciju, preurediti u 2D matricu **A** tipa *MxN*, što je moguće ostvariti na način da se termogrami za svaki vremenski trenutak preurede da vremenska varijacija temperature predstavlja stupac u matrici **A**, dok prostorna varijacija predstavlja retke.

Slika 3.94 prikazuje rezultate naknadne obrade sekvence termograma korištenjem (PCA – *Principal Component Analysis*) tehnike za nekorigirane termograme (gornji red) i predprocesuirane termograme (od svakog termograma u sekvenci je oduzet hladni termogram).



Slika 3.94 Obrade rezultata ispitivanja korištenjem PCA tehnike za nekorigirane rezultate (gornji red) i predprocesuirane podatke (oduzimanje hladnog termograma): a) EOF_1, b) EOF_2; c) EOF_3; d) EOF_4; e) EOF_5 [Ibarra-Castanedo et al., 2007]

Kad se govori o kvantifikaciji, odnosno karakterizaciji oštećenja, [Ibarra-Castanedo et al., 2007] predlaže nekoliko metoda koje se uglavnom temelje na kalibraciji bilo temeljeno na numeričkom modelu ili pak uzorcima s poznatim oštećenjima.

Dubina na kojoj se nalazi oštećenje D može se odrediti iz krivulja temperaturnog kontrasta, pri čemu se uz očitan maksimalni kontrast ΔT_{max} i vrijeme njegovog pojavljivanja t_{max} iz procesa kalibracije dobiju parametri C_1 i C_2 [Ibarra-Castanedo et al., 2007].

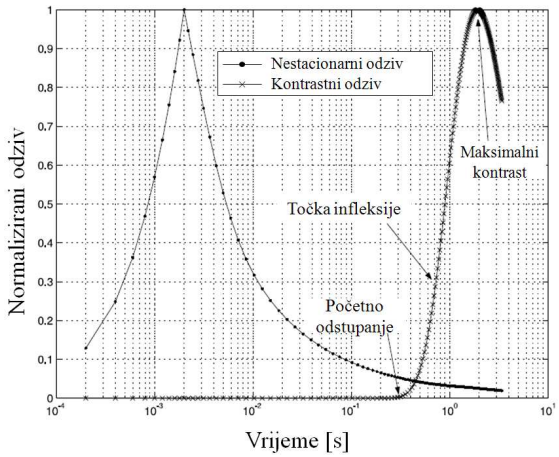
$$D = C_1 \cdot \sqrt{t_{max}} \cdot \Delta T_{max}^{C_2}$$

Eksperimentalno je dokazano da postoji linearni odnos između dubine na kojoj se nalazi oštećenje D i drugog korijena inverzne vrijednosti granične frekvencije f_b, odnosno frekvencije pri kojoj postoji dovoljan kontrast u faznom prikazu da oštećenje bude vidljivo [Ibarra-Castanedo et al., 2007; Meola & Carlomagno, 2004] uz empirijske konstante C_3 i C_4 te poznatu toplinsku difuzivnost neoštećenog materijala.

$$D = C_3 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{diff,s}}{\pi \cdot f_b}} + C_4$$

Određivanje veličine oštećenja se općenito može postići određivanjem konture oštećenja u trenutku najvećeg nagiba krivulje temperaturnog kontrasta, u trenutku maksimalnog temperaturnog kontrasta ili u trenutku kada oštećenje postaje vidljivo (izlazi iz šuma), kako bi se izbjeglo lateralno vođenje topline (lateralna toplinska difuzija) koja povećava veličinu oštećenja [Ibarra-Castanedo et al., 2007].

Dubina oštećenja u slučaju PCA tehnike može se procijeniti iz druge glavne komponente, koja je sadržana u matrici $\mathbf{V}^{\mathrm{T}}$ uz uvjet da je poznata toplinska difuzivnost materijala promatranog uzorka [Rajic 2002b]. Karakteristična vremena (Slika 3.95) te točka infleksije mogu se koristiti kao indikator dubine oštećenja.



Slika 3.95 Temperaturni odziv i kontrast s označenim relevantnim karakterističnim vremenima [Rajic 2002b]

[Ringermacher et al. 1998] koriste vrijeme pojavljivanja točke infleksije za određivanje preostale debljine materijala pomoću izraza:

$$t_{infl} = 3{,}622\frac{L^2}{\pi^2\alpha_{diff}}$$

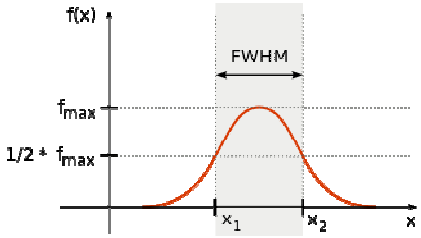
gdje je L preostala debljina uzorka (uzorak ima rupe s njegove jedne strane).

Korištenjem sličnog pristupa [Rajic 2002b] koristi vrijeme početnog odstupanja (ID – *initial deviation*) za određivanje dubine oštećenja na uzorcima kompozita grafit-epoksi:

$$t_{ID} = 1{,}149\frac{L^2}{\pi^2\alpha_{diff}}$$

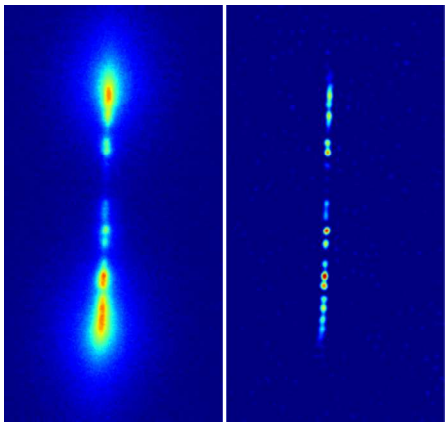
[Almond et al., 1996] predstavljaju iterativnu tehniku za određivanje lateralne veličine oštećenja, koja se sastoji u određivanju konture oštećenja za svaku kontrastnu sliku pri FWHM (*Full Width Half Maximum*) amplitudi. Nakon toga se može postaviti korelacija veličine oštećenja kao funkcije drugog korijena iz vremena, a ekstrapolacijom krivulje za vrijeme nula, dobije se razumna pretpostavka veličine oštećenja.

FWHM je parametar koji se koristi za opisivanje širine „izbočine“ na krivulji, a dana je kao udaljenost između dvije točke na krivulji kod kojih se postiže polovica maksimalne vrijednosti. Krivulja može biti i temperatura dobivena iz prikaza profila na termogramu.



Slika 3.96 Shematski prikaz parametra FWHM na krivulji [Almond et al., 1996]

[Holland & Renshaw, 2010] se usredotočuju na problem poboljšanje lateralne rezolucije oštećenja u promatranom uzorku. Uvjetno se može problem nazvati „izoštrenje slike“ iako to nije sasvim korektan naziv s fizikalnog stajališta, Slika 3.97.



Slika 3.97 Neobrađeni i obrađeni termogram, pukotina u uzorku titana, dobivena VT tehnikom [Holland & Renshaw, 2010]

Autori koriste algoritam koji se temelji na jednadžbi provođenja topline za poboljšanje i analizu termograma, ne koristi se uobičajeni proces inverzije toplinske difuzije, čime se izbjegavaju poteškoće povezane s inverzijom provođenja topline.

[Ibarra-Castanedo & Maldague, 2005] istražuju mogućnosti da se pomoću naknadne obrade rezultata PPT tehnikom dobiju karakteristike oštećenja, veličina i njihova dubina ispod površine na uzorcima izrađenima od CFRP-a, GFRP-a i aluminija. Predlaže se izraz za dubinu na kojoj se nalazi oštećenje u slučaju loše prikupljene sekvence termograma, za koje je nemoguće određivanje granične frekvencije f_b:

$$D = C_5 \cdot \emptyset_d \sqrt{\frac{\alpha_{diff,d}}{\pi \cdot f_{b'}}},$$

gdje su $\emptyset_d$ vrijednost faze za oštećeno područje uzorka, a $\alpha_{diff,d}$ je toplinska difuzivnost materijala oštećenja, a $f_b{}'$ prividna granična frekvencija koja se uzima kao frekvencija prag kod koje je moguća detekcija oštećenja, a C_5 koeficijent regresije.

Kako je intenzitet faze također povezan s veličinom i debljinom oštećenja, gornja jednadžba neće davati korektne rezultate u slučaju oštećenja na istoj dubini, ali koji su različite veličine. Kako bi se uzele u obzir varijacije veličine oštećenja [Ibarra-Castanedo, 2005] predlaže korištenje normaliziranih parametara.

Normalizirani promjer $d_{2r,n}$ računa se prema izrazu:

$$d_{2r,n} = \frac{d_{2r}}{D}\sqrt{\frac{\alpha_{diff,\mathrm{II}}}{\alpha_{diff,\perp}}},$$

gdje su d_{2r} promjer kružnog oštećenja, a $\alpha_{diff,\mathrm{II}}$ i $\alpha_{diff,\perp}$ toplinska difuzivnost materijala paralelno i okomito na toplinski tok [Ibarra-Castanedo, 2005].

Normalizirano trajanje toplinske difuzivnosti definirano je kao:

$$\mu_n = \frac{\mu_d}{\mu_s} = \frac{\sqrt{\frac{\alpha_{diff,s}}{\pi \cdot f_b}}}{\sqrt{\frac{\alpha_{diff,d}}{\pi \cdot f_b}}},$$

gdje su μ_d i μ_s trajanje toplinske difuzivnosti oštećenog područja i neoštećenog područja uzorka.

Sada je moguće izračunati normalizirani promjer oštećenja uzimajući u obzir varijacije u veličini oštećenja u slučaju loše prikupljene sekvence termograma [Ibarra-Castanedo, 2005].

$$d_{2r,n} = C'_{5,n} \cdot \emptyset_{min} \cdot \mu'_n ,$$

gdje je $C'_{5,n}$ koeficijent regresije, $\emptyset_{min}$ minimalna vrijednost faze promatranog oštećenja, a μ'_n je normalizirano trajanje difuzivnosti određeno za prividnu graničnu frekvenciju.

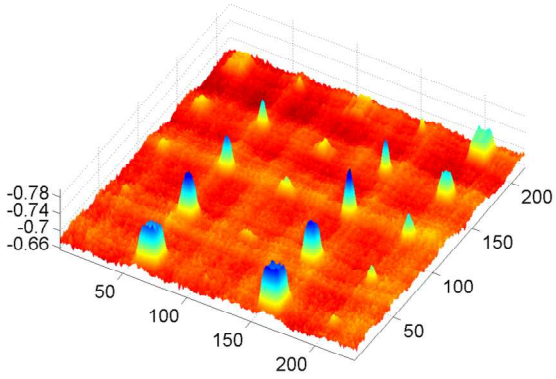
Normalizirana dubina oštećenja može se izračunati prema izrazu:

$$D_n = C_6 \cdot \mu_n ,$$

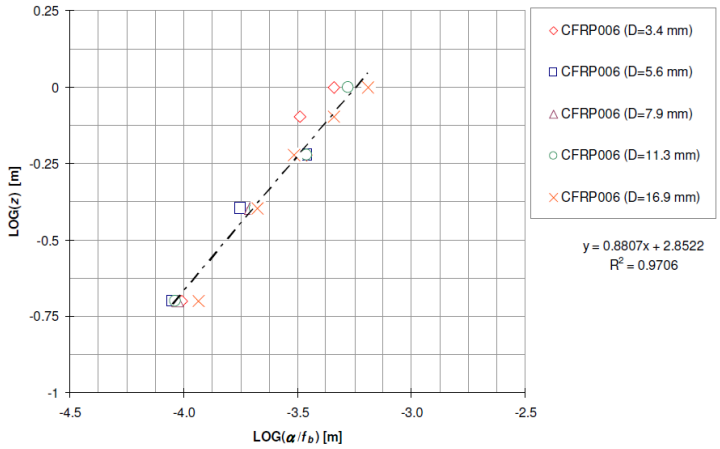
gdje je C_6 koeficijent regresije [Ibarra-Castanedo & Maldague, 2005].

Slika 3.98 je fazni prikaz CFRP uzorka sa simuliranim oštećenjima prikazan za frekvenciju 0,3 Hz, a prikazuje kako se intenzitet faze mijenja s veličinom oštećenja iako su ona na istoj

dubini (0,8 mm za oštećenja na desnoj strani slike). Intenzitet faze se smanjuje sa smanjenjem ekvivalentnog promjera oštećenja.



Slika 3.98 Fazni prikaz CFRP uzorka sa simuliranim oštećenjima, frekvencija 0,3 Hz [Ibarra-Castanedo & Maldague, 2005]



Slika 3.99 Prikaz ovisnosti dubine oštećenja i granične frekvencije f_b [Ibarra-Castanedo & Maldague, 2005]

Slika 3.99 prikazuje u logaritamskom mjerilu odnos između dubine na kojoj se nalazi oštećenje u uzorku od CFRP-a i omjera toplinske difuzivnosti materijala uzorka i granične frekvencije f_b kod koje je oštećenje otkriveno. Rezultati ispitivanja su aproksimirani pravcem, korištenjem regresijske analize metodom najmanjeg kvadrata, te je iz njih moguće odrediti koeficijent C_3 i C_4 iz jednadžbe:

$$D = C_3 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{diff,s}}{\pi \cdot f_b}} + C_4$$

[Grinzato & Vavilov, 1998] uvode izraze za određivanje relativnog gubitka debljine presjeka zbog korozije čelika. Predlažu općeniti izraz:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta T_{3D}(x,y,t)}{1+\Delta T_{3D}(x,y,t)},$$

gdje je $\Delta T_{3D}(x,y,t)$ temperaturni kontrast u slučaju 3D prijenosa topline, a $\Delta T(x,y,t)$ temperaturni kontrast u slučaju 1D prijenosa topline za piksel s koordinatama (x,y) u trenutku vremena t:

$$\Delta T_{3D}(x,y,t) = \frac{\Delta T(x,y,t)}{(K_x \cdot K_y)},$$

Koeficijenti K_x i K_y određuju lateralni toplinski tok u x i y smjeru:

$$K_x = 1 - e^{\left(-\frac{0{,}6 d_x}{d}\right)},$$

$$K_y = 1 - e^{\left(-\frac{0{,}6 d_y}{d}\right)},$$

gdje su d_x i d_y dimenzije oštećenja u lateralnom smjeru (u slučaju kružnih oštećenja uzima se promjer oštećenja d_{2r}, a d je debljina oštećenja). Navedeni izrazi su empirijski, te vrijede u slučaju čeličnih uzoraka zagrijavanih toplinskim impulsom kratkog trajanja kako je opisano u [Grinzato & Vavilov, 1998].

[Omar et al., 2010] ističu kako aproksimacija krivulja hlađenja, kao što je to slučaj kod TSR tehnike, nije efektivna metoda naknadne obrade rezultata mjerenja u slučaju kada je toplinska pobuda kontinuirana, kao u slučaju dugotrajnog grijanja halogenim lampama ili u slučaju pasivne termografije.

Self-referencing tehnika naknadne obrade rezultata mjerenja je tehnika kojom se proračunava matrica temperaturnog kontrasta i vrijeme pojave maksimalnog kontrasta korištenjem okolnih (susjednih) piksela promatranog piksela. Matematički se tehnika može opisati na slijedeći način [Omar et al., 2010]:

$$\Delta T(i,j,t) = T_{pix}(i,j,t) - T_{surr(i,j)}(t),$$

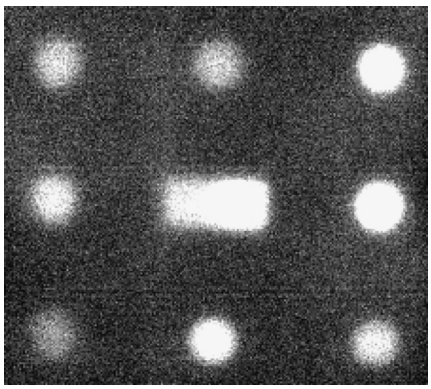
gdje su $T_{pix}(i,j,t)$ temperatura piksela (i,j) u trenutku vremena t, a $T_{surr(i,j)}(t)$ je srednja temperatura okoline piksela (i,j) u promatranom trenutku vremena t. Veličina okoline promatranog piksela treba biti dovoljno veća od veličine promatranog oštećenja, kako bi se osigurala stabilna vrijednost srednje vrijednosti temperature na jezgri oštećenja, a istovremeno dovoljno malena da bude ograničena na što manje područje oštećenja u uzorku.

Osnovne prednosti Self-referencing tehnike su: eliminiranje potrebe za odvojeno određivanje referentnog termograma (svaki termogram je referenciran na podatke o temperaturi svojih piksela); eliminiranje nejednolikog zagrijavanja uzoraka, promjena u koeficijentu emisije površine uzorka ili varijacijama geometrije uzorka; eliminiranje potrebe prethodnog poznavanja neoštećenog područja na termogramu [Omar et al., 2010].

[Omar et al., 2010] kombiniraju pristup Self-referencing tehnike za određivanje termograma u sekvenci koji imaju maksimalni kontrast, te zatim primjenjuju PCA analizu za termograme s maksimalnim kontrastom kod ispitivanja sendvič panela debljine 0,686 mm s tri načina toplinske pobude (halogene lampe, bljeskalica, indukcijsko zagrijavanje).

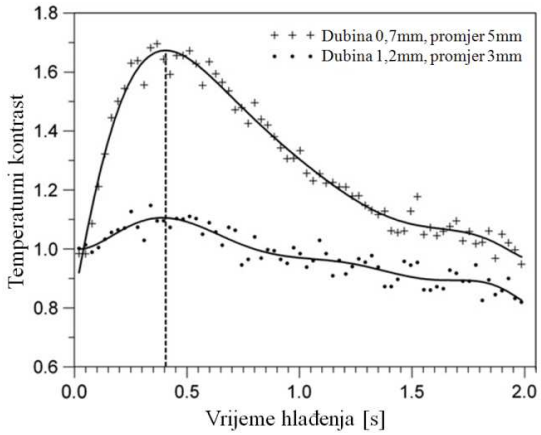
[Zeng, Li, et al., 2012] proučavaju učinkovitost postojećih metoda kvantifikacije rezultata mjerenja kao što su PCT, PST i PSDT, u slučaju kada oštećenje u uzorku nije ispunjeno zrakom. Rezultati iz numeričkih modela su uspoređeni s rezultatima termografskog ispitivanja uzorka izrađenog od čelika, kod kojeg su rupe na istoj dubini od površine uzorka ispunjene s različitim materijalima (zrak, voda, vosak i ulje) kako bi se simulirala oštećenja s različitim sučeljkom. Slika 3.100 prikazuje termogram uzorka 1 s nakon toplinske pobude uzorka bljeskalicom. Očigledno je da postoji razlika u temperaturi oštećenja (rupa) iako su na istoj dubini (1,1 mm) ispod površine uzorka, a sve uzrokovano različitim materijalima koji ispunjavaju rupe.

Zaključuje se da se PST i PSDT metode naknadne obrade rezultata mjerenja mogu koristiti za određivanje dubine na kojoj se nalazi oštećenje ukoliko se ne radi o klasičnom sučeljku materijala i zraka, te da navedene metode imaju grešku do 10 %. S druge strane, na rezultate dobivene PCT metodom, utječe uz samo veličinu oštećenja i vrsta sučeljka, odnosno vrsta tvari koja ispunjava oštećenje, te rezultati odstupaju i do 90% od stvarne vrijednosti.

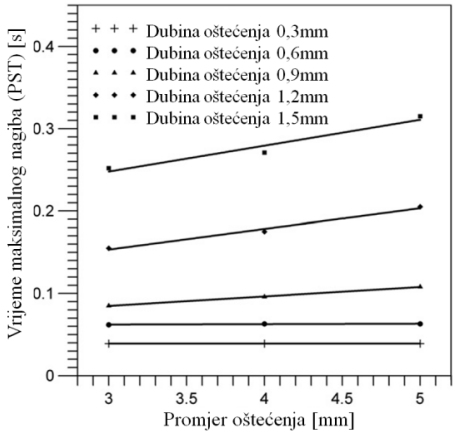


Slika 3.100 Termogram čeličnog uzorka sa različitim sučeljima [Zeng, Li, et al., 2012]

[Wysocka-Fotek et al., 2012] predlažu dvije neovisne eksperimentalne metode za određivanje veličine i dubine na kojoj se oštećenje nalazi. Veličina oštećenja određena je na temelju površinske distribucije temperature u trenutku kada je derivacija temperature jednaka nuli, dok je dubina oštećenja određena iz ovisnosti temperaturnog kontrasta između oštećenog i neoštećenog područja i vremena hlađenja, a sve na pločama od austenitnog čelika. Literatura. kako je i u ovom radu istaknuto predlaže korištenje vremena maksimalnog nagiba krivulje temperaturnog kontrasta (maksimuma prve derivacije), kao parametra za određivanje dubine oštećenja neovisnog o veličini oštećenja (Slika 3.101). U suprotnosti s literaturom, [Wysocka-Fotek et al., 2012] pokazuju da je navedena tvrdnja istinita samo u slučaju oštećenja koja imaju veliku površinu u odnosu na njihovu dubinu (Slika 3.102).

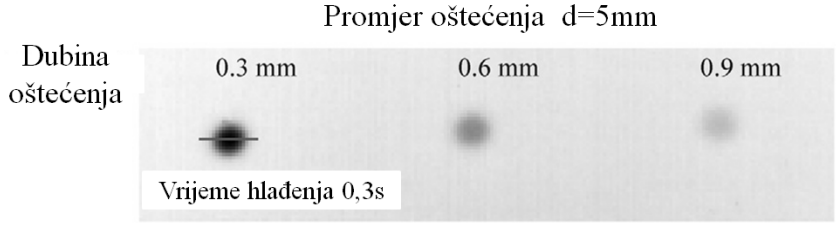


Slika 3.101 Krivulje temperaturnog kontrasta imaju svoj maksimum u istom trenutku vremena za dva različita oštećenja [Wysocka-Fotek et al., 2012]



Slika 3.102 Vrijeme maksimalnog temperaturnog kontrasta u usporedbi s promjerom oštećenja i dubinom na kojoj se oštećenje nalazi [Wysocka-Fotek et al., 2012]

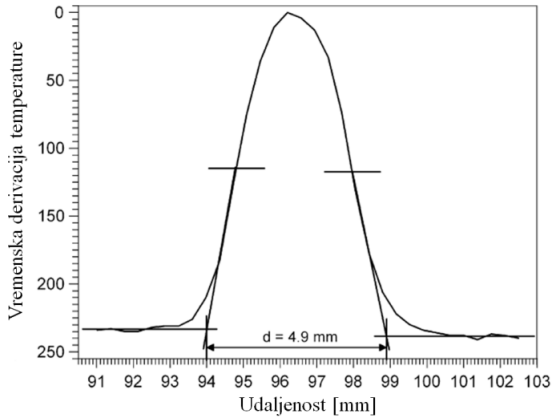
[Wysocka-Fotek et al., 2012] predlažu korištenje distribucije vremenske derivacije površinske temperature za određivanje veličine oštećenja.



Slika 3.103 Distribucija vremenske derivacije temperature [Wysocka-Fotek et al., 2012]

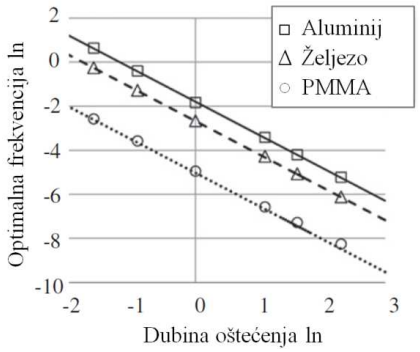
Slika 3.103 prikazuje primjer korištenja prve derivacije promjene površinske temperature austenitnog čelika u kojem se nalazi oštećenje promjera 5mm na različitim dubinama, u

trenutku 0,3 s nakon završetka toplinske pobude (bljeska). Ukoliko se uzme profil temperature kroz sredinu oštećenja (kako je prikazano, Slika 3.103), te se na polovici maksimalne promjene temperature odrede tangente na krivulju, razmak između sjecišta tangenti i ekstrapoliranih linija srednje vrijednosti derivacije temperature s lijeve i desne strane od promatranog maksimuma daje promjer oštećenja, Slika 3.104.



Slika 3.104 Profil vremenske derivacije temperature korištene za određivanje promjera oštećenja [Wysocka-Fotek et al., 2012]

[Ishikawa et al., 2013] određuju razliku faze na oštećenom području i neoštećenom području uzorka ΔØ, te traže frekvenciju pri kojoj je ΔØ maksimalan (optimalnu frekvenciju). Kao uzorak koristi se ploča od PMMA (polimetilmetakrilat) s ugrađenim oštećenjima. PMMA je materijal male toplinske difuzivnosti, a ispitivan je PPT tehnikom. Postavljaju jednodimenzionalni i dvodimenzionalni numerički model za određivanje optimalne frekvencije za aluminij, željezo i PMMA, koji rezultiraju linearnim odnosom u log-log mjerilu između optimalne frekvencije i dubine oštećenja, s koeficijentom smjera pravca -1,5, Slika 3.105.



Slika 3.105 Odnos optimalne frekvencije i dubine oštećenja iz 1D modela [Ishikawa et al., 2013]

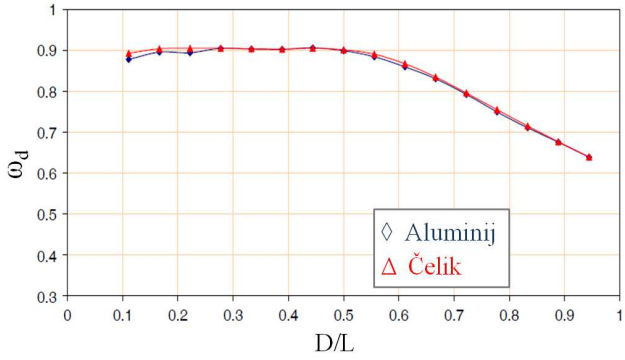
Utvrđeno je da se rezultati 1D numeričkog modela vrlo dobro poklapaju s jednadžbom:

$$\ln(f_{opt}) = 0{,}5ln\left(\frac{\alpha_{diff} h_{cc}}{\rho_m c_p}\right) - 1{,}5\ln(D) - 0{,}96$$

koja je dobivena provođenjem dimenzionalne analize. Pokazano je da navedeni izraz vrijedi i za 2D probleme ukoliko je oštećenje dovoljno veliko.

Dobivene optimalne frekvencije iskorištene su za izradu faznih prikaza uzoraka od PMMA, te je utvrđeno da je moguće otkriti oštećenja do dubine od 5-6mm, za razliku od istraživanja na koje se pozivaju autori, a kod kojih su otkrivena oštećenja do dubine maksimalno 3-3,5mm, a korištene su višestruko veće frekvencije [Ishikawa et al., 2013].

[Vageswar et al., 2010] određuju smanjenje debljine stijenke metala (nastalo zbog erozije ili korozije), korištenjem metode maksimalnog nagiba krivulje kontrasta, a temeljeno na transmisijskoj tehnici snimanja sekvenci termograma tijekom PT termografije. Koriste analitički 1D model nestacionarnog provođenja topline za određivanje koeficijenta proporcionalnosti ω_d između vremena kod kojeg se javlja maksimalni kontrast i dubine na kojoj se nalazi oštećenje.



Slika 3.106 Teorijsko rješenje za odnos faktora ω_d i odnosa dubine oštećenja i debljine uzorka [Vageswar et al., 2010]

gdje je $\omega_d = \frac{\pi^2 \alpha_{diff} t}{D^2}$, a vrijeme maksimalnog nagiba krivulje temperaturnog kontrasta moguće je tada izračunati prema:

$$t_d = \frac{0{,}9D^2}{\pi^2 \alpha_{diff}} \qquad za \qquad \frac{D}{L} < 0{,}5\ ,$$

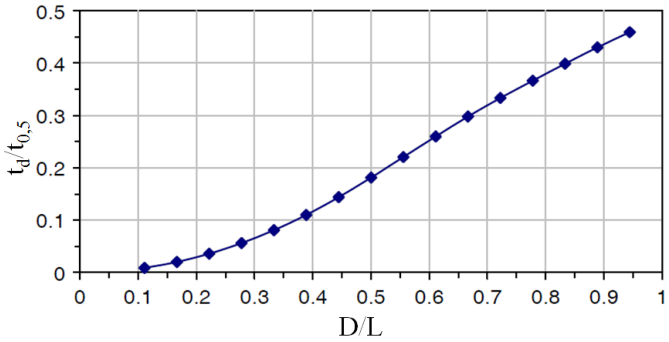
$$t_d = \frac{C_1 D^2}{\pi^2 \alpha_{diff}} \qquad za \qquad \frac{D}{L} > 0{,}5\ ,$$

gdje je C_1 faktor proporcionalnosti koji je potrebno očitati iz grafa, Slika 3.106, kako bi se za poznato vrijeme maksimalnog temperaturnog kontrasta odredila dubina oštećenja.

Nedostatak korištenja navedenog izraza je sama činjenica da je potrebno unaprijed poznavati dubinu na kojoj se nalazi oštećenje. Ukoliko pak je poznato vrijeme $t_{0,5}$ potrebno da se postigne 50% maksimalne temperature uzorka na neoštećenom dijelu stražnje površine uzorka (koje je moguće izmjeriti), moguće je koristiti izraz, [Vageswar et al., 2010]:

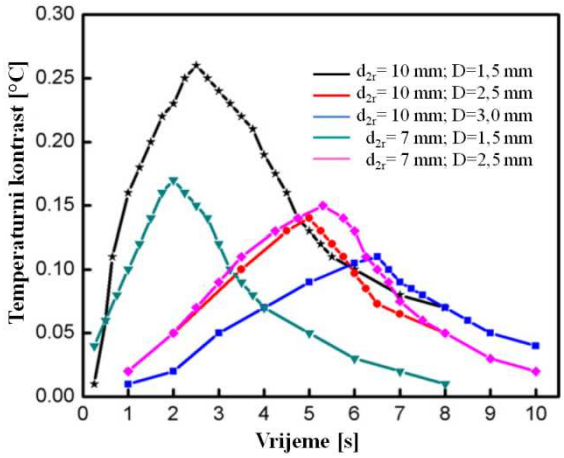
$$\frac{t_d}{t_{0,5}} = \frac{C_1}{1{,}38}\left(\frac{D}{L}\right)^2,$$

gdje se određivanjem C_1 iz grafa, Slika 3.106, dobiva slijedeći trend, Slika 3.107.

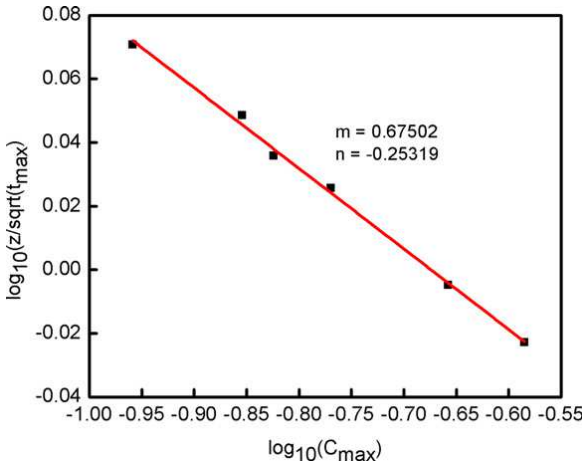


Slika 3.107 Odnos omjera karakterističnih vremena i omjera preostale debljine oštećenog i debljine neoštećenog dijela uzorka [Vageswar et al., 2010]

[Lahiri et al., 2012] koriste LT i PT tehnike za kvantifikaciju oštećenja u uzorcima izrađenima od GFRP-a, gume velike gustoće (HDR – *high density rubber*), gume male gustoće (LDR – *low density rubber*) i kompozita gume male gustoće i aluminija (LDRAl – *low density rubber - aluminum*). Istražuju odnos između faznog kontrasta i temperaturnog kontrasta za oštećenja na različitim dubinama u uzorku. Kod korištenja LT tehnike istražuju optimalnu frekvenciju za ispitivanje postojanja oštećenja u uzorku, te zaključuju da se s povećanjem dubine oštećenja, povećava fazni kontrast, dok se temperaturni kontrast smanjuje. Zaključuje se da oštećenja koja imaju odnos promjera i dubine manji od 1 ne mogu biti otkrivena [Lahiri et al., 2012]. Slika 3.108 prikazuje temperaturni kontrast kao funkciju vremena za oštećenja različitih promjera na različitim dubinama u GFRP uzorku, pri čemu je vidljivo smanjenje temperaturnog kontrasta i povećanje vremena t_{max} u kojem se on pojavljuje, u slučaju oštećenja jednakog promjera, a na različitim dubinama.



Slika 3.108 Temperaturni kontrast kao funkcija vremena za različita oštećenja u GFRP uzorku [Lahiri et al., 2012]



Slika 3.109 Odnos omjera dubine oštećenja i korijena i vremena t_{max} te vrijednosti C_{max} u logaritamskom mjerilu [Lahiri et al., 2012]

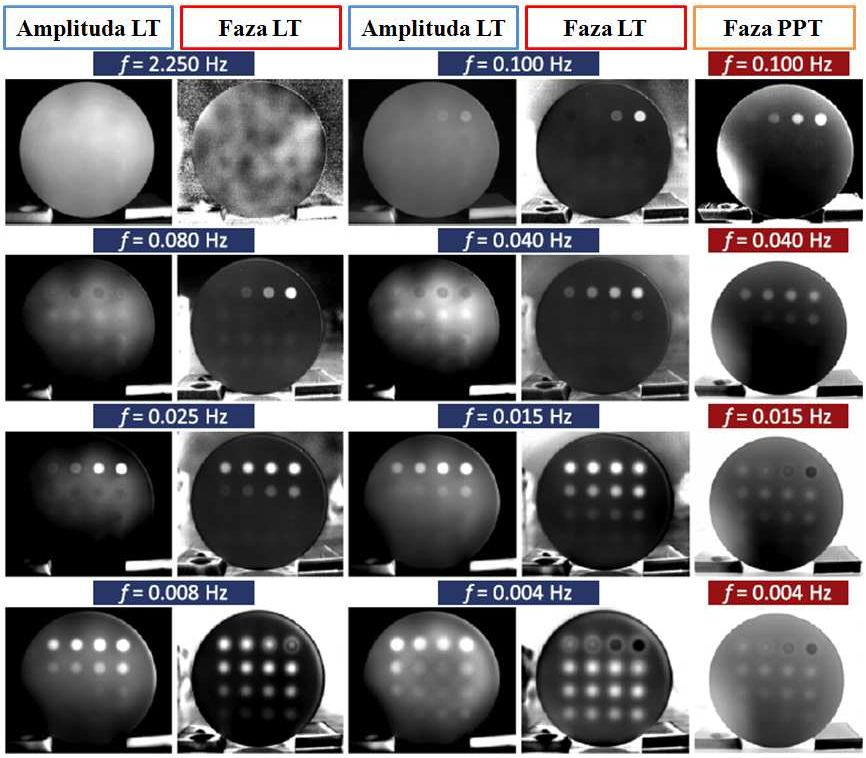
Slika 3.109 prikazuje odnos omjera dubine oštećenja i korijena i vremena t_{max} kod kojeg se postiže maksimalni kontrast te vrijednosti maksimalnog kontrasta (ovdje označen kao C_{max}) u logaritamskom mjerilu. Nakon određivanja vrijednosti koeficijenta nagiba i odsječka pravca korelacije, i provedene kalibracije (korištenjem poznatih vrijednosti dubine svakog pojedinog oštećenja) određene su dubine oštećenja korištenjem jednadžbe [Lahiri et al., 2012]:

$$D = m\sqrt{t_{max}} \cdot (C_{max})^n$$

pri čemu je dobiveno odlično podudaranje rezultata mjerenja dubine oštećenja i poznatih vrijednosti.

[Montanini, 2010] koristi LT i PPT tehniku za karakterizaciju oštećenja u uzorcima izrađenima od PMMA, debljine 8 mm, promjera 120 mm. Naknadnom obradom rezultata ispitivanja dobiveni su fazni prikazi iz kojih je određena dubina i veličina oštećenja, te je procijenjena nesigurnost mjerenja. Također, diskutira glavne značajke i ograničenja pristupa koji se temelji na jednodimenzionalnoj aproksimaciji toplinskog toka, kao i metrološke aspekte vezane na moguće smetnje koje se javljaju pri mjerenju. Provodi mjerenje toplinske difuzivnosti materijala pomoću Parkerove metode pri kojoj se određuje toplinska difuzivnost iz krivulje nestacionarne promjene temperature uzorka nakon impulsne toplinske pobude, a kao razlog navodi nedostupnost i čestu nepouzdanost korištenja literaturne vrijednosti ovog parametra.

Slika 3.110 prikazuje rezultate mjerenja korištenjem LT i PPT tehnike, fazne prikaze i prikaze amplitude dobivene iz rekonstruiranih toplinskih valova pri različitim modulacijskim frekvencijama (korištenjem LT tehnike) i fazne prikaze dobivene nakon provođenja DFT transformacije sekvenci termograma dobivene nakon impulsne toplinske pobude.



Slika 3.110 Rezultati mjerenja korištenjem LT i PPT tehnike, fazni prikaz i prikaz amplitude pri različitim frekvencijama [Montanini, 2010]

Vidljivo je da je pri frekvenciji od 4 mHz, moguće otkriti i najdublja oštećenja (3,6 mm), iako je kontrast prilično smanjen zbog značajnog smanjenja faznog pomaka. Također, kod vrlo niskih frekvencija, dobiva se dojam neizoštrenosti slike koje nastaje zbog značajnog lateralnog širenja topline u uzorku, (Slika 3.110). Oštećenja na manjoj dubini u uzorku (prvi redak oštećenja) doživljavaju obrat u fazi, koji se događa zbog podudaranja modulacijske frekvencije i trajanja toplinske difuzivnosti [Montanini, 2010]. Kod PPT tehnike obrat u fazi se događa pri višoj frekvenciji nego u slučaju LT tehnike. Ovo se objašnjava činjenicom da je toplinski impuls kod PPT tehnike konačnog trajanja, što znači da dostavljena energija i amplituda pobude nisu jednoliko distribuirane po cijelom frekvencijskom spektru, već da je energija koncentrirana u niskim frekvencijama. Ovime se aktivira kompleksni trodimenzionalni mehanizam provođenja topline, a kao posljedica se javlja obrat u fazi na višoj frekvenciji [Montanini, 2010].

Zaključuje se da je ispitivanje PPT tehnikom brže od ispitivanja LT tehnikom zbog potrebe LT tehnike da se ispituje pri više modulacijskih frekvencija što oduzima puno vremena. Rezultati ispitivanja PT tehnikom (fazni kontrast) su lošiji, od onih dobivenih LT tehnikom, odnosno ne prikazuju oštećenja na većoj dubini. Kao još jedan nedostatak PPT tehnike navodi se činjenica da mora postojati temperaturna razlika između dva sukcesivna termograma u sekvenci kako bi se moglo odrediti postojanje oštećenja, što drugim riječima znači da je za otkrivanje oštećenja na većoj dubini potrebno veće zagrijavanje uzorka [Montanini, 2010].

Za određivanje frekvencije kod koje dolazi do prve pojave oštećenja u faznom prikazu, postavlja se prag kontrasta faze definiran kao:

$$C_{TR} = \frac{2\sigma_{b,s} + 2\sigma_{b,d}}{S_b},$$

gdje je $\sigma_{b,d}$ standardna devijacija šuma na području oštećenja, $\sigma_{b,s}$ standardna devijacija pozadinskog šuma na neoštećenom području uzorka, dok je S_b prosječna vrijednost faznog kuta u neoštećenom području uzorka (pri čemu se uzela razina pouzdanosti od 95%). Ovaj izraz vrijedi u slučaju da je šum na neoštećenom području uzorka jednak šumu na oštećenom području uzorka. Pri tome se uzima da oštećenje postoji ukoliko je fazni kontrast C veći od praga kontrasta C_{TR} [Montanini, 2010]:

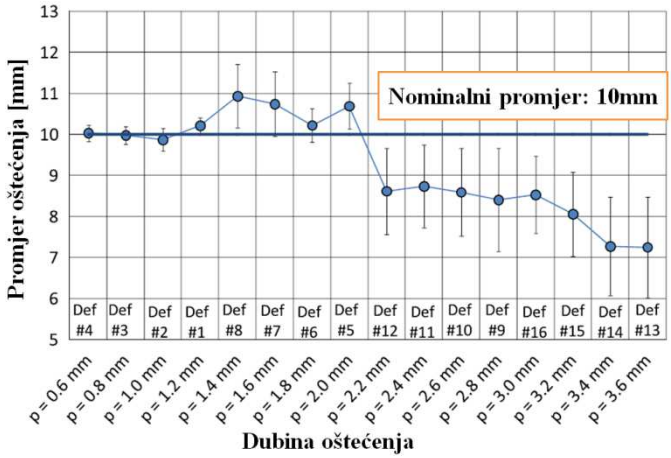
$$C > C_{TR}$$

Dubina na kojoj se nalazi oštećenje određena je korištenjem izraza:

$$D = 1{,}8 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{diff}}{\pi \cdot f_{TR}}},$$

gdje je f_{TR} frekvencija pri kojoj je oštećenje prvi put vidljivo.

Veličinu oštećenja određuje u trenutku maksimalnog faznog kontrasta C_{max}, na način da se izmjeri veličina oštećenja nakon kalibracije termograma (određivanja veličine piksela na uzorku koji se ispituje), Slika 3.111.



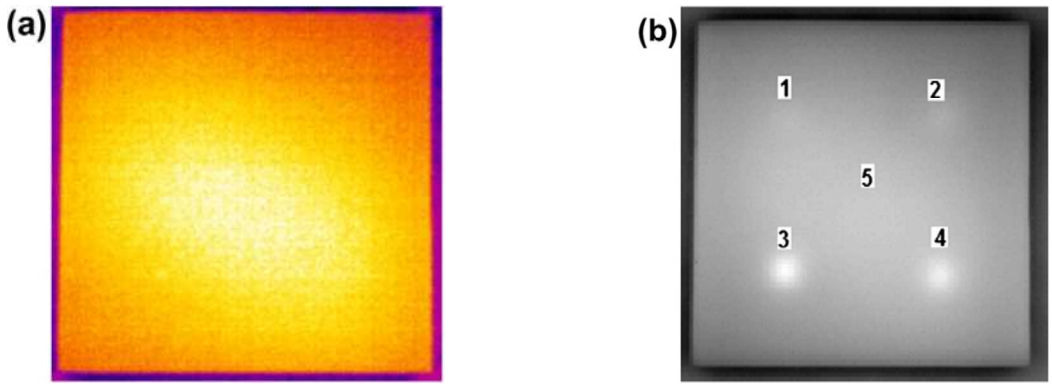
Slika 3.111 Usporedba nominalne vrijednosti veličine oštećenja i rezultata dobivenih korištenjem IC termografije za različite dubine oštećenja [Montanini, 2010]

[Grys, 2012] koristi tehniku dugotrajnog impulsa (trajanja 120 s) kao toplinsku pobudu za koju koristi 2 lampe sa žarnom niti, snage 250W. Tijekom obrade rezultata mjerenja, koristi samo sekvencu termograma tijekom perioda zagrijavanja.

Kao tehniku predprocesuiranja koristi standardni kontrast prema [Maldague, 2001]:

$$SC_{x,y}(t) = \frac{T_{x,y}(t) - T_{x,y}}{T_s(t) - T_s(t_0)},$$

gdje je t_0 „hladni termogram“ snimljen u trenutku vremena neposredno prije početka toplinske pobude uzorka.



Slika 3.112 a) Termogram (t=4s); b) prikaz standardnog kontrasta pri 120 s, s označenim oštećenjima 1-4 i neoštećenim područjem 5 [Grys, 2012]

Slika 3.112 prikazuje termogram i prikaz standardnog kontrasta uzorka, iz kojih je vidljivo nejednoliko zagrijavanje uzorka. Oštećenje označeno s 1 i 2 su slabo vidljivi, što je potaklo istraživanje prikladnijeg temperaturnog kontrasta koji bi omogućio otkrivanje oštećenja na

većoj dubini. Istražuju se dva temperaturna kontrasta, filtrirani kontrast (FC – *filtered contrast*) i relativni filtrirani kontrast (RFC – *relative filtered contrast*)

FC i RFC su definirani pomoću slijedećih izraza [Grys, 2012]:

$$FC_{x,y}(t) = T_{x,y}(t) - filter(T_{x,y}(t))$$

$$RFC_{x,y}(t) = \frac{T_{x,y}(t) - filter(T_{x,y}(t))}{filter(T_{x,y}(t)) - T_0},$$

gdje je T_0 temperatura piksela prije zagrijavanja uzorka. Kao filtar se koristi Gaussov filtar implementiran u diskretnoj domeni. Gaussovi filtri različitih veličina konstruiraju se korištenjem Gaussovih funkcija različitih standardnih devijacija Gaussove distribucije. Što je standardna devijacija veća, veća je i veličina Gaussovog filtra, tj. zamućenje koje njegova konvolucija sa slikom uzrokuje.

Kao prednosti RFC-a navode se malena osjetljivosti na nejednoliko zagrijavanje uzorka. Nije potrebno apriori određivanje neoštećenog područja na termogramu. Moguće je definirati relativni filtrirani kontrast iz kojeg je moguće odrediti dubinu oštećenja korištenjem metode najmanjih kvadrata i jednodimenzionalnog modela provođenja topline kroz uzorak [Grys, 2012]. Standardna devijacija Gaussovog filtra koju je potrebno odabrati utječe na osjetljivost pri otkrivanju oštećenja i na točnost određivanja dubine oštećenja [Grys, 2012].

3.10 Korištenje termografskih tehnika za mjerenje toplinskih svojstava

Razvijeno je nekoliko tehnika ispitivanja toplinske provodljivosti, toplinske difuzivnosti i toplinske efuzivnosti materijala kod kojih se iz promjene površinske temperature (koja se mjeri IC kamerom) mogu proračunati spomenuta svojstva promatranog materijala. U ovom će se poglavlju prikazati pregled literaturnih vrijednosti za navedena toplinska svojstva betona te pregled istraživanja u području mjerenja toplinskih svojstava koja su primijenjena u sklopu istraživanja.

3.10.1 Literaturne vrijednosti toplinske difuzivnosti betona

Kako su uzorci koji se promatraju u ovom istraživanju izrađeni od betona, vrijednosti dobivene ispitivanjem uspoređene su s literaturnim vrijednostima za beton. Tablica 3.8 pokazuje da rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona jako variraju od autora do autora. Vidljivo je da se vrijednosti kreću od $3{,}7\times10^{-7}$ m^2/s [Xu & Chung, 2000] do $2{,}19\times10^{-6}$ m^2/s [Lamond & Pielert, 2006], što je interval od jednog reda veličina. Do ovakvih razlika dolazi zbog različitog sastava betona (različite vrste i udjeli agregata u betonu), te zbog toga što su pojedini autori ispitivali suhi beton (nakon sušenja na zraku i do konstantne mase) dok su drugi ispitivali vlažni beton (kondicioniran i ispitivan u vodenoj kupki ili do određenog postotka vlažnosti). Jedan od važnijih faktora koji utječe na toplinsku difuzivnost betona je zasigurno i njegova volumenska masa. Ovdje će se istaknuti da autori deklariraju različite vrijednosti toplinske difuzivnosti za otprilike jednaku vrijednosti volumenske mase betona. Vrlo često se također izbjegava napomenuti da li je beton, pa tako i volumenska masa ispitivana u vlažnom ili suhom stanju.

Tablica 3.8 Literaturne vrijednosti toplinske difuzivnosti za beton

Izvor	**Volumenska masa [kg/m^3]**	**Vrijednost toplinske difuzivnosti za beton [$\times10^{-7}$ m^2/s]**	**Napomena**
[Mehta & Monteiro, 2006]	-	12,78	vapnenac
	-	13,05	dolomit
[Long & Sayma, 2009]	-	8,0	beton uobičajene gustoće
	-	4,0	aerirani beton
[Berge, 2009]	2400	6,67	
[Bentz et al., 2011]	2100-2300	9,9	
[Vollmer & Moellmann, 2010]	-	6,6	

Izvor	Volumenska masa [kg/m^3]	Vrijednost toplinske difuzivnosti za beton [×10^{-7} m^2/s]	Napomena
[Lamond & Pielert, 2006]	-	21,9	kvarcni agregat
	-	16,9	agregat od kvarcita
	-	15,28	agregat od vapnenca
	-	6,94	agregat od bazalta
	-	3,33 – 4,44	cementna pasta; sobna temperatura
[Morabito, 2001]	-	12,0	agregat od vapnenca, na 40°C
[ACI Committee 122, 2002]	1600	4,9	Proračunate vrijednosti za dostupne λ_c, ρ, c_p ,agregat od vapnenca; mjereno na suhom uzorku
	1762	5,36	
	1922	5,86	
	2083	6,15	
	2243	6,73	
[Xu & Chung, 2000]	1990	3,7	cementna pasta
[Neville, 1996]	-	5,5 – 15,5	obični beton
[Brown, 2005]	2500	5,6	vlažni beton
	2400	5,3	suhi beton

Kako je zaključeno da toplinska difuzivnost betona ovisi o toplinskoj provodljivosti, volumenskoj masi i vlažnosti betona, pri deklariranju toplinske difuzivnosti, potrebno je deklarirati navedene tri veličine, te mineraloški sastav agregata od kojeg je izrađen promatrani beton. Kako specifični toplinski kapacitet betona ovisi o temperaturi na kojoj je ispitan, u obzir je potrebno uzeti i taj parametar. Ukoliko je veličina toplinske difuzivnosti ulazni parametar za proračune betona u primjeni, potrebno je odrediti njezinu vrijednost poštujući stvarne uvjete u kojima će se beton u primjeni nalaziti.

3.10.2 Literaturne vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta betona

Promatrajući literaturne vrijednosti za specifični toplinski kapacitet c_p betona, Tablica 3.9, vidljivo je da također postoji rasipanje rezultata od 835 – 1170 J/kgK. Iako nije naglašeno, pretpostavlja se da je jedan od razloga zašto postoji navedena razlika činjenica da je beton ispitivan u vodom zasićenom stanju, a kod drugih autora se radi o ispitivanju suhog betona. Također uzrok može biti postojanje agregata različitih mineraloških sastava, te ispitivanje specifičnog toplinskog kapaciteta pri različitim temperaturama.

Tablica 3.9 Literaturne vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta za beton

Izvor	**Volumenska masa [kg/m^3]**	**Vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta za beton [J/kgK]**	**Napomena**
[Mehta & Monteiro, 2006]	-	900 - 1000	
[Moran et al., 2011]	2300	880	kameni agregat
[ACI Committee 122, 2002]	1600	879,2	
	1762	879,2	
	1922	879,2	
	2083	921,1	
	2243	921,1	
[Vollmer & Moellmann, 2010]	500-5000	840	pri 20°C
[Hall, 2010]	2200	880	pri 20°C
[Ashby, 2011]	-	835-1050	tipični beton
[Underwood & Yik, 2004]	2400	840	
[Kumaran, 2001]	2200±100	840	pri 27,2°C
[Berge, 2009]	2400	875	
[Bentz, 2000]	2350	1000	
[Azenha et al., 2006]	-	800-1170	
[Xu & Chung, 2000]	1990	703	cementna pasta
[Bentz et al., 2011]	2250-2400	850-910	
[Bosnjak, 2000]	-	850 – 1150	obični beton
[Brown, 2005]	2500	1280	vlažni beton
	2400	800	suhi beton

3.10.3 Literaturne vrijednosti toplinske provodljivosti betona

Ukoliko se promatraju literaturne vrijednosti toplinske provodljivosti betona, Tablica 3.10, vidljivo je da se one kreću od 0,69 – 3,3 W/mK. Na vrijednost toplinske provodljivosti betona ponajprije utječu vlažnost betona, gustoća i temperatura te mineraloški sastav agregata iz kojeg je beton izrađen.

Tablica 3.10 Literaturne vrijednosti toplinske provodljivosti betona

Izvor	Volumenska masa [kg/m^3]	Vrijednost toplinske provodljivosti za beton [W/mK]	Napomena
[Mehta & Monteiro, 2006]	-	2,6 – 3,3	agregat od vapnenca
	-	3,2	agregat od dolomita
[ACI Committee 122, 2002]	1600	0,69	agregat od vapnenca; mjereno na suhom uzorku
	1762	0,83	
	1922	0,99	
	2083	1,18	
	2243	1,39	
	2400	1,63	
[Illston & Domone, 2001]	-	1,4	suhi beton
[Moran et al., 2011]	2300	1,4	kameni agregat
[Long & Sayma, 2009]	-	1,4	beton uobičajene gustoće
	-	0,15	aerirani beton
[Vollmer & Moellmann, 2010]	-	0,5-2,0	
[Ashby, 2011]	-	0,8-2,4	tipični beton
[Lamond & Pielert, 2006]	-	2,2	agregat od vapnenca; vlažan
	-	1,7	agregat od vapnenca; 50% relativne vlažnosti
	-	1,4	agregat od vapnenca; suhi
	-	2,9	agregat od pješčenjaka; vlažan
	-	2,2	agregat od pješčenjaka; 50% relativne vlažnosti
	-	1,4	agregat od pješčenjaka; suhi
	2500	3,3	agregat od dolomita, mokri
	2450	3,2	agregat od vapnenca, mokri
[Berge, 2009]	-	1,75	
[Morabito, 2001]		2,67	agregat od vapnenca, na 40°C

Izvor	Volumenska masa [kg/m^3]	Vrijednost toplinske provodljivosti za beton [W/mK]	Napomena
[Gorse & Highfield, 2009]	-	1,28	beton općenito
	2300	1,63	teški beton
	2100	1,40	
	2000	1,13	beton uobičajene gustoće
	1400	0,51	srednje težak beton
	1200	0,38	lagani beton
[Underwood & Yik, 2004]	2400	2,16	
[Kumaran, 2001]	2200±100	1,2	pri 27,2°C
[Bentz, 2000]	2350	1,5	
[Azenha et al., 2006]	-	1,2 - 2,5	
[Bentz et al., 2011]	2100-2300	1,7-2,1	agregat od vapnenca
[Xu & Chung, 2000]	1990	0,52	cementna pasta; 2,32% pora, flash diffusivity metoda
[Bentz, 2007]	-	2,1 - 2,2	
[Bosnjak, 2000]	-	1,2 – 3,0	normalni beton
[Brown, 2005]	2500	1,8	vlažni beton
	2400	1,0	suhi beton

Često se toplinska provodljivost betona zbog pojednostavljenja korelira s volumenskom masom betona. Tako [ACI Committee 122, 2002] definira korelaciju između toplinske provodljivosti betona u suhom stanju (sušenog u sušioniku) prema izrazu:

$$\lambda_c = 0{,}072 * e^{0{,}00125*\rho_{m,dry}}$$

[ACI Committee 122, 2002] navodi ovaj izraz uz napomenu da on najbolje korelira sa stvarnim rezultatima ispitivanja u rasponu volumenskih masa 320 – 1600 kg/m^3, dok se betoni s volumenskim masama izvan navedenog raspona nešto lošije uklapaju u navedenu korelaciju.

Ukoliko se promatra beton određene vlažnosti, potrebno je korigirati toplinsku provodljivost u suhom stanju za utjecaj vlažnosti. [ACI Committee 122, 2002] predlaže korištenje slijedećeg izraza za određivanje toplinske provodljivosti:

$$\lambda_{c,kor} = \lambda_c \left[1 + \frac{(6\rho_m - \rho_{m,dry})}{\rho_{m,dry}}\right],$$

gdje su ρ_m volumenska masa materijala pri određenoj vlažnosti, $\rho_{m,dry}$ volumenska masa suhog materijala. Navedeni izraz implicira da se toplinska provodljivost betona povećava za 6% kod svakog povećanja vlažnosti betona za 1%, mjereno po masi.

Ukoliko se promatra korekcija toplinske provodljivosti prema [HRN EN ISO 10456, 2008], izmjerene vrijednosti korigiraju se prema slijedećem izrazu, uz korištenje koeficijenata, Tablica 3.11 i :

$$\lambda_{c2} = \lambda_{1c} \cdot F_T \cdot F_m \cdot F_a$$

pri čemu je faktor korekcije za temperaturu:

$$F_T = e^{f_T(T_2 - T_1)}$$

f_T – koeficijent korekcije zbog temperature

T_1 – temperatura prvog skupa podataka

T_2 – temperatura drugog skupa podataka

Tablica 3.11 Koeficijent korekcije za temperaturu prema [HRN EN ISO 10456, 2008]

Tip proizvoda	***Toplinska provodljivost (W/m^{2}K)***	***Koeficijent korekcije f_T (1/K)***
Lagani beton	*0,100*	*0,003*
	0,150	*0,002*
	0,400	*0,001*
Beton uobičajene gustoće, pečena glina i mort	*svi*	*0,001*

Faktor korekcije za vlažnost materijala, ukoliko je sadržaj vlage dan kao % mase, iznosi:

$$F_m = e^{f_u(u_2 - u_1)}$$

f_u – koeficijent korekcije zbog vlažnosti materijala, dano % mase

u_1 – maseni sadržaj vlage prvog skupa podataka

u_2 – maseni sadržaj vlage drugog skupa podataka

Faktor korekcije ukoliko je sadržaj vlage dan kao % mase:

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}$$

f_ψ - koeficijent korekcije zbog vlažnosti materijala, dano % volumena

ψ_1 - volumni sadržaj vlage prvog skupa podataka

ψ_2 - volumni sadržaj vlage drugog skupa podataka

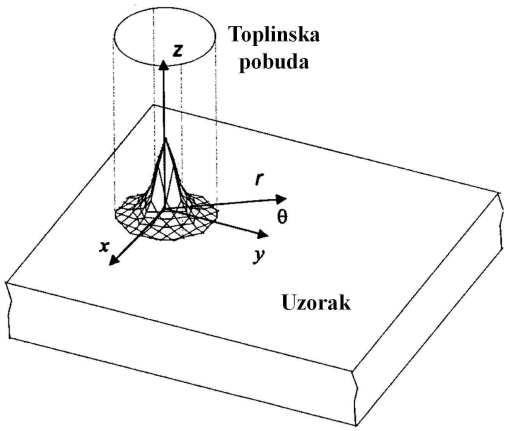
Tablica 3.12 Koeficijent korekcije za vlažnost prema [HRN EN ISO 10456, 2008]

Tip proizvoda	***Sadržaj vlage, u (kg/kg)***	***Koeficijent korekcije, f_u (kg/kg)***
Aerirani beton iz autoklava	*0-0,25*	*4,0*
Pečena glina	*0-0,25*	*10,0*
Tip proizvoda	***Sadržaj vlage, Ψ (m^3/m^3)***	***Koeficijent korekcije, f_ψ (m^3/m^3)***
Beton od agregata normalne gustoće i umjetni kamen	*0-0,25*	*4,0*

3.10.4 Mjerenje toplinske difuzivnosti

Razvijene su metode IC termografije za mjerenje toplinske difuzivnosti u rastresitim materijalima [Cernuschi et al., 1999], izotropnim [Krapez, 1999; Welch et al., 1987] i anizotropnim pločama [Zhoung et al., 1999; Krapez et al., 1996]. Toplinska difuzivnost može biti određena analizom vremenskog razvoja temperature ili prostorne distribucije faznih slika prednje ili stražnje strane uzoraka [Cernuschi et al., 2001]. Prilikom mjerenja, uzorak može biti pobuđen točkastim izvorom topline [Bisson & Fournier, 1998; Krapez & Gardette, 1998; Salazar et al., 1996], Gaussovom zrakom [Cernuschi et al., 2001], kružnim i prstenastim izvorom [Demange et al., 1997] te linijskim izvorom [Osiander et al., 1998; Welch & Johnson, 1999], a predloženo je i korištenje linijskih pomičnih izvora [Winfree et al., 2001] te izvora sa slučajnom distribucijom [Batsale, 2002].

[Cernuschi et al., 2001] uvode teorijsko rješenje za distribuciju temperature na beskonačnoj ploči debljine L čija je prednja strana trenutno zagrijana Gaussovom zrakom radijusa R_G (koja je definirana kao udaljenost na kojoj zraka gubi svoj intenzitet za faktor $1/e^2$) ukoliko su zanemareni gubici topline, a promatra se stražnja strana uzorka.

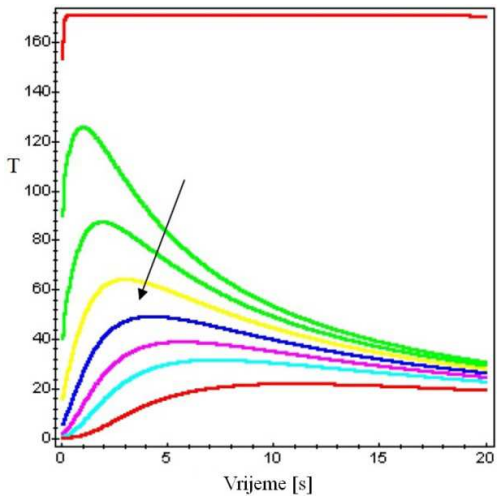


Slika 3.113 Skica koordinatnog sustava [Cernuschi et al., 2001]

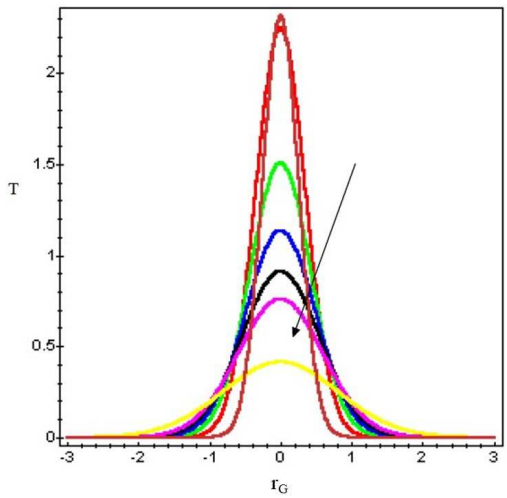
$$T(r_G, L, t) = \frac{2Q}{e_{eff}\sqrt{\pi^3 t}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\frac{((2n-1)L)^2}{4 \cdot a_{diff} \cdot t}} \frac{1}{\left(R_G^2 + 8 \cdot a_{diff} \cdot t\right)} e^{-\frac{2r_G^2}{R_G^2 + 8 \cdot a_{diff} \cdot t}}$$

gdje je z dubina unutar uzorka, a r_G udaljenost od središta Gaussove zrake.

Slika 3.114 prikazuje temperaturu različitih točki na površini promatranog uzorka (različite udaljenosti od središta Gaussove zrake) kao funkciju vremena, kako je opisano gornjom jednadžbom, gdje je povećanje udaljenosti u smjeru strelice. Slika 3.115 prikazuje prostornu distribuciju temperature na stražnjoj strani uzorka kao funkciju udaljenosti od središta Gaussove zrake u različitim trenucima vremena (1-10 s) gdje je povećanje vremena u smjeru strelice.



Slika 3.114 Ovisnost temperature o udaljenosti od središta Gaussove zrake u vremenu [Cernuschi et al., 2001]



Slika 3.115 Ovisnost temperature o udaljenosti od središta Gaussove zrake [Cernuschi et al., 2001]

Predložena tehnika mjerenja toplinske difuzivnosti se sastoji od najbolje aproksimacije prostorne raspodjele temperature, u određenim trenucima vremena, korištenjem Gaussove funkcije $f(x) = a + be^{-\frac{(x-c)^2}{2d^2}}$, Slika 3.115. Prostorna raspodjela dobije se povlačenjem linije kroz središte točke grijanja, promatrano sa stražnje strane uzorka.

Moguće je dobiti vrijednost parametra b^2 (iz Gaussove funkcije) za svaki trenutak vremena t:

$$b^2 = R_G^2 + 8\alpha_{diff} \cdot t$$

Toplinsku difuzivnost α_{diff} materijala je moguće odrediti, kao koeficijent nagiba pravca u metodi linearne regresijske aproksimacije parova (b^2, t_i), ukoliko je poznat radijus zrake koja zagrijava uzorak i trenutka u vremenu od početka zagrijavanja za koji je dobivena promatrana raspodjela temperature. Prema [Cernuschi et al., 2001; Maillet, Lachi, & Degiovanni, 1990], kako bi se moglo zanemariti efekte konačnog trajanja toplinske pobude, potrebno je zadovoljiti slijedeće uvjete:

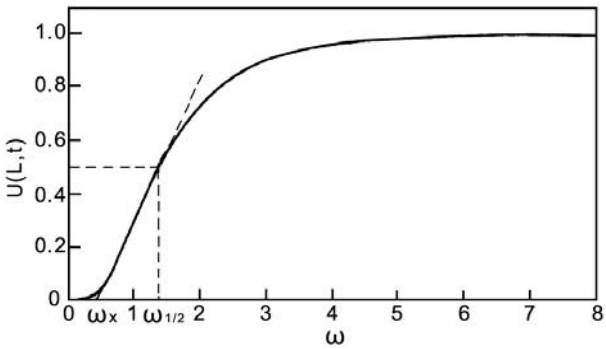
$$\frac{\alpha_{diff} \cdot t_h}{L^2} < 0{,}05\,,$$

s time da vrijeme mjerenja temperature bude $t > 10 \cdot t_h$.

[Parker et al., 1961] predlažu metodu toplinskog impulsa (*flash diffusivity method*) za mjerenje toplinske difuzivnosti homogenih materijala, pri čemu se kratkotrajni toplinski impuls, u usporedbi s vremenom mjerenja temperature površine, nanosi na prednju površinu uzoraka, a mjeri se promjena temperature sa stražnje strane uzorka. Ukoliko se zanemare gubici topline, temperatura stražnje površine promatranog uzorka iznosi, Slika 3.116:

$$U(L,t) = \frac{\Delta T(L,t)}{\Delta T_{Max}} = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n e^{-n^2\omega}\,,$$

gdje je $\Delta T(L,t)$ razlika između temperature na površini uzorka i temperature uzorka prije ispitivanja u trenutku t, a ΔT_{Max} je maksimalna razlika između temperature na površini uzorka i temperature uzorka prije ispitivanja. $\omega = \pi^2 \cdot \alpha_{diff} \cdot t/L^2$, n je cijeli broj, a L je debljina uzorka.



Slika 3.116 Bezdimenzionalni razvoj temperature stražnje strane uzorka [Wróbel & Rdzawski, 2009]

[Parker et al., 1961] predlaže određivanje toplinske difuzivnosti kao nagiba tangente na krivulju, Slika 3.116, u točki za koju je $U(L,t) = 0{,}5$. Norma [HRN EN 821-2, 2008] predlaže da se provjeri i sukladnost rezultata mjerenjem nagiba tangente u točki $U(L,t) = 0{,}3;\ \omega = 0{,}99$.

[Bison et al., 2012] koriste tri različite tehnike za mjerenje toplinske difuzivnosti opeke iz 14. stoljeća.

Transmisijska je tehnika ona kod koje se jedna strana promatranog materijala zagrijava toplinskim impulsom koji se dobiva uključivanjem i isključivanjem halogene lampe snage 1000 W. Preporuča se da se sa stražnje strane uzorka postigne takvo povećanje temperature uzorka iznad temperature okoline da odnos signal-šum bude veći od 10 (20dB), najbolje 100 (40 dB) [Bison et al., 2012]. Promjena temperature stražnje strane uzorka debljine 1 cm je praćena korištenjem IC kamere, pri čemu se prikuplja sekvenca termograma u vremenu. Za analizu se koristi prikladni analitički model (nelinearna metoda najmanjih kvadrata) koji se uklapa u podatke dobivene ispitivanjem.

$$\min_x \|f(\mathbf{x},t) - data(t)\| ,$$

gdje je t vrijeme, a **x** je vektor optimiziranih parametara

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3] = \left[\frac{Q_P}{h_{cc}}, \frac{\alpha_{diff}}{L^2}, \frac{h_{cc}L}{\lambda_c}\right],$$

a modelska funkcija $f(\mathbf{x},t)$ je dana analitičkim rješenjem toplinske diferencijalne jednadžbe za debljinu uzorka $L\,[m]$, izmjenu topline s okolišem određenu koeficijentom $h_{cc}\ [W/m^2K]$, toplinskom difuzivnosti $\alpha_{diff}\ [m^2/s]$, toplinskom provodljivosti $\lambda_c\ [W/mK]$,

te uz uvjet jednostranog zagrijavanja uzorka sa specifičnom snagom Q_P $[W/m^2]$ tijekom vremena t_h, a mjereno sa stražnje strane [Bison et al., 2012]:

$$f(\mathbf{x},t) = x_1 \sum_{i=1}^{\infty} 2\frac{sin(\mu_i)}{\mu_i + sin(\mu_i)cos(\mu_i)} exp(-x_2\mu_i^2 t)[exp(x_2\mu_i^2 t_h) - 1]\,,$$

ovdje μ_i^2 označava $i-$to rješenje transcendentne jednadžbe $\mu \cdot tg(\mu) = x_3 = Bi$, gdje je Bi Biotov broj.

Biotov broj (Bi) je bezdimenzionalna veličina koja se koristi u proračunima labilnog stanja prijenosa topline, a definiran je kao [Galović, 2003]:

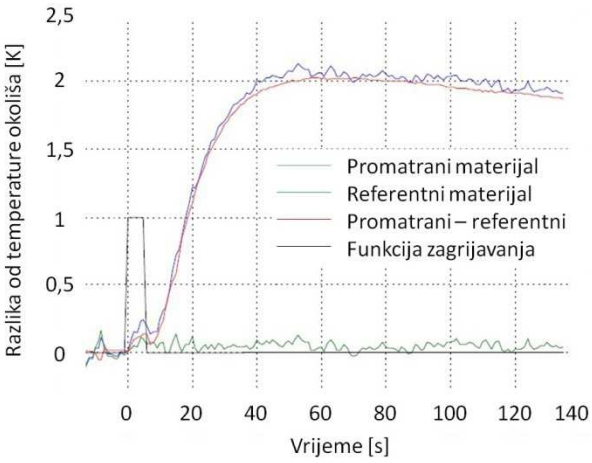
$$Bi = \frac{h_{cc} \cdot \frac{V}{A_s}}{\lambda_c},$$

gdje veličina $\mathrm{L_0 = V/A_s}$, u gornjoj jednadžbi označuje tzv. karakterističnu linearnu dimenziju krutine, koja za valjak iznosi:

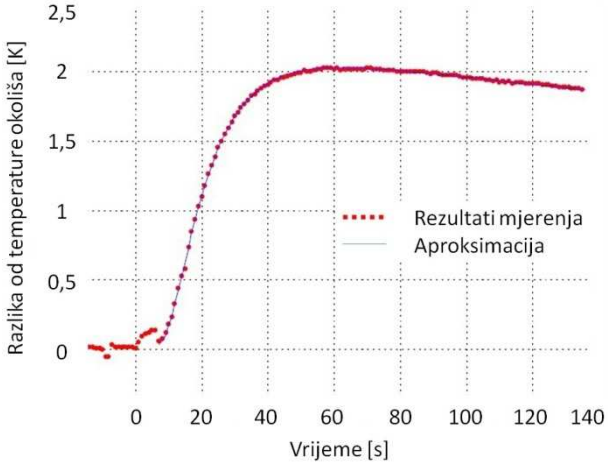
$$\mathrm{L_0 = \frac{V}{A_s} = \frac{r^2\pi \cdot v_v}{2r\pi \cdot (r + v_v)} = \frac{rv_v}{2(r + v_v)}},$$

gdje je $\mathrm{v_v}$ visina valjka, r polumjer valjka. Koeficijent izmjene topline s okolišem h_{cc} određen je kao $h_{cc} = 8\,[W/m^2K]$, uz uvjet da je brzina vjetra jednaka 0 m/s, suha rezultirajuća temperatura jednaka 20°C i koeficijent emisije betona jednak $\varepsilon = 0{,}95$, te da je toplinski tok u horizontalnom smjeru.

Zagrijavanjem uzorka opeke debljine 1 cm korištenjem halogene lampe snage 1000 W u trajanju od 5 s i mjerenjem promjene temperature na njegovoj stražnjoj strani, te mjerenjem temperature na referentnom materijalu (kamenom bloku koji je zaštićen od zagrijavanja) dobiveni su slijedeći rezultati, Slika 3.117 i Slika 3.118 [Bison et al., 2012]:



Slika 3.117 Prikaz temperaturnih profila iznad temperature okoliša [Bison et al., 2012]



Slika 3.118 Prikaz rezultata ispitivanja i aproksimacijske krivulje [Bison et al., 2012]

Signal koji dolazi s nezagrijanog referentnog materijala oduzet je od signala dobivenog s promatranog uzorka, a sve s ciljem kako bi se smanjio šum signala. Toplinska difuzivnost je izražena kao srednja vrijednost 12 mjerenja preko parametra $x_2 = \frac{\alpha_{diff}}{L^2}$, odnosno izračunata je toplinska difuzivnost:

$$\alpha_{diff} = x_2 L^2$$

Refleksijska tehnika analizira povećanje lokaliziranog mjesta na površini na koju upada zraka svjetlosti (laser valne duljine 1064 nm). Ovom metodom se difuzivnost materijala mjeri samo ukoliko je toplinska provodljivost materijala jednaka u svim smjerovima (izotropni materijal). IC kamerom se promatra promjena temperature materijala u sekvenci termograma tijekom točkastog zagrijavanja (trajanje zagrijavanja 500μs na površini promjera 1cm, dostavljena energija 4J), te se promatra širenje temperaturnog polja na površini koja se zagrijava. Korištenjem kosinusne transformacije analizira se dobivena sekvenca termograma, a vremenski razvoj svake komponente transformacije podijeljen s kontinuiranom komponentom opada eksponencijalno s vremenskom konstantom koja je ovisna o toplinskoj difuzivnosti materijala [Bison et al., 2012].

$$log\left(\frac{\theta(k_n,t)}{\theta(0,t)}\right) = c(k_n) - \alpha_{diff} k_n^2 t \qquad k_n = \frac{2\pi n}{N \cdot \Delta x} \qquad n = [0: N-1]$$

Kako bi se izračunala toplinska difuzivnost, potrebno je poznavati valni vektor k_n, što je moguće kad se napravi prostorna kalibracija IC kamere, odnosno kad se odredi veličina piksela Δx na promatranom tijelu.

Ängstromova tehnika koristi dva peltierova elementa za naizmjenično zagrijavanje i hlađenje uzorka s jedne strane. Na taj način se generiraju toplinski valovi koji se šire kroz uzorak te ih je moguće karakterizirati mjerenjem IC termografijom [Bison et al., 2012].

$$\Delta T(z,t) = A_0 e^{-k_0 z} + A_1 e^{-k_1 z} sin(\omega t - k_2 z + \psi)$$

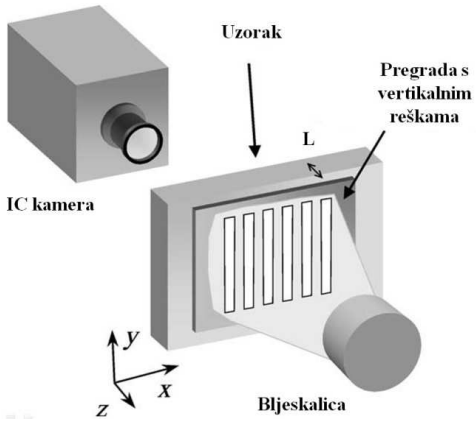
$$\Delta T(z,t) = T(z,t) - T_{amb} \qquad v = \frac{h_{cc} p}{S \cdot c_p \cdot \rho_m} \qquad \omega = 2\pi f$$

$$k_0 = \sqrt{2 \frac{h_{cc}}{\lambda_c} \frac{p}{S}} \qquad k_1 = \sqrt{\frac{v + \sqrt{v^2 + \omega^2}}{2\alpha_{diff}}} \qquad k_2 = \sqrt{\frac{v - \sqrt{v^2 + \omega^2}}{2\alpha_{diff}}}$$

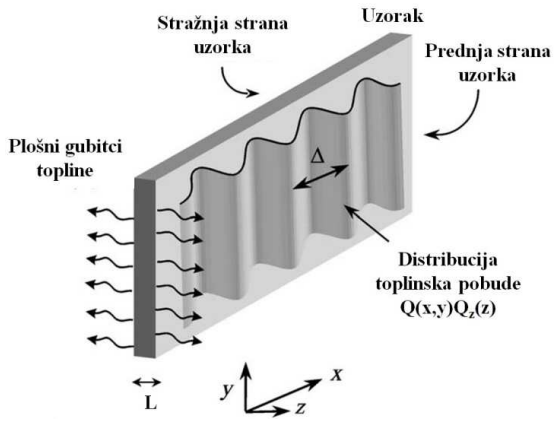
gdje je p opseg, a S površina presjeka promatranog uzorka u smjeru normale s obzirom na smjer širenja toplinskih valova, f je frekvencija osciliranja peltierovih elemenata (frekvencija zagrijavanja i hlađenja uzorka). $k_0,\ k_1, k_2$ su konstante koje se određuju analizom sekvence termograma, iz kojih se može odrediti toplinska difuzivnost materijala i parametar *v* koji je vezan s izmjenom topline s okolinom:

$$\alpha_{diff} = \frac{\omega}{2} \frac{1}{k_1 k_2} \qquad v = \frac{\omega}{2} \frac{k_1^2 - k_2^2}{k_1 k_2}$$

[Krapez et al., 2004] ističe kako se toplinska difuzivnost materijala može mjeriti klasičnom metodom bljeska. Impulsni izvor zračenja (laser ili bljeskalica) se koristi za zagrijavanje jedne strane uzorka dok se temperatura mjeri s iste ili sa suprotne strane uzorka korištenjem termočlanaka ili beskontaktno, metodom IC termografije. Predlaže korištenje pregrade s vertikalnim ili horizontalnim reškama između izvora toplinske pobude i samog uzorka, Slika 3.119, Slika 3.120. Ovom tehnikom je moguće mjeriti toplinsku difuzivnost u ravnini i po debljini promatranog anizotropnog uzorka [Krapez et al., 2004].



Slika 3.119 Mjerenje toplinske difuzivnosti metodom bljeska uz korištenje pregrade s vertikalnim reškama [Krapez et al., 2004]

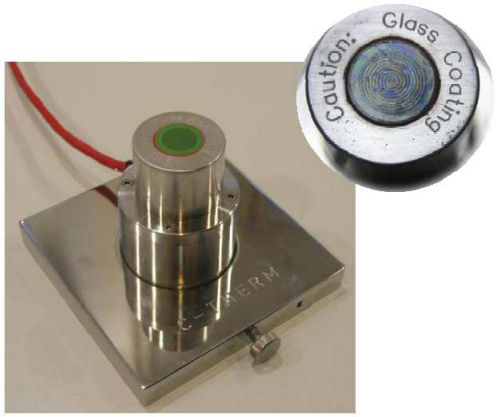


Slika 3.120 Periodična distribucija topline na uzorak [Krapez et al., 2004]

3.10.5 Mjerenje toplinske provodljivosti betona metodom vrućeg diska

Ispitivanje toplinske provodljivosti betona provedeno je korištenjem uređaja Mathis Tci.

Senzor Mathis TCi uređaja je spiralni grijač sa zaštitnim prstenom (Slika 3.121), čija je svrha generiranje topline iznad spiralnog grijača te se na taj način aproksimira jednodimenzionalni toplinski tok u smjeru senzor - uzorak. Senzor najprije zagrijava uzorak, a zatim se mjeri reakcija uzorka na toplinsku pobudu.



Slika 3.121 Senzor Mathis Tci uređaja

Mjerenje toplinske provodljivosti kao i efuzivnosti zapravo je posredno, jer TCi uređaj mjeri promjenu napona ΔU za poznatu jakost struje I koja se dovodi u senzor i poznati otpor senzora R [Milovanovic et al., 2011]. Iz toga se može izračunati promjena napona iz izraza:

$$U = I \cdot R$$

Ako je poznata promjena temperature senzora u vremenu, a pritom postoji ovisnost između promjene temperature i promjene napona, onda je potrebno pretpostaviti njihovu međusobnu linearnu ovisnost, kako bi se iz promjene temperature mogla dobiti ekvivalentna promjena napona. Pritom se koriste koeficijenti temperaturnog otpora (TCR-*temperature coefficient of resistivity*) i koristi izraz [C-Therm, 2002]:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_{TCR} \cdot T) = R_0 + A \cdot T\ ,$$

gdje su:

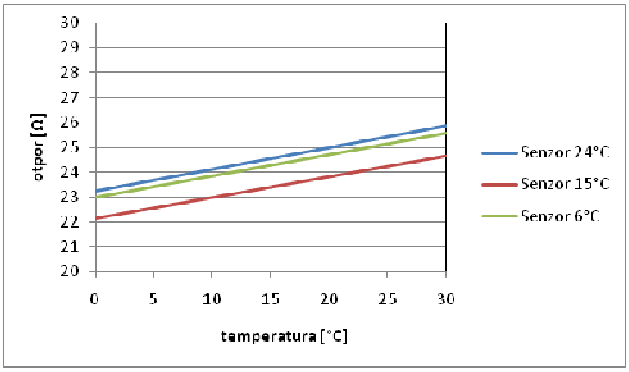
$R(T)$ - otpor senzora na temperaturi T ,

R_0 - otpor senzora na temperaturi 0 °C,

T - temperatura senzora,

α_{TCR} - TCR (temperature coefficient of resistivity),

A - nagib pravca korelacije (otpor-temperatura) (Slika 3.122).



Slika 3.122 Linearna ovisnost otpora senzora i njegove temperature

Ako se uvede pretpostavka jednodimenzionalnog toplinskog toka i ako se zanemari otpor na kontaktu između senzora i uzorka, promjena temperature izračunava se iz izraza [C-Therm, 2002]:

$$\Delta T = \frac{1{,}1284 \cdot G\sqrt{t}}{e_{eff,1} + e_{eff,2}},$$

gdje su:

$\Delta T\ [\,°C]$ - promjena temperature na površini senzora,

$G\ [W/m^2]$ - gustoća toplinskog toka koji se sa senzora prenosi na uzorak,

$t\ [s]$ - vrijeme mjereno od početka procesa,

$e_{eff,1}\ [W\sqrt{s}/m^2K]$ - ekvivalentna toplinska efuzivnost senzora,

$e_{eff,2}\ [W\sqrt{s}/m^2K]$ – toplinska efuzivnost mjerenog materijala.

Uvrsti li se izraz za $R(T) = R_0 + A \cdot T$ u izraz $U = I \cdot R$, dobiva se $U = I \cdot (A \cdot T)$ i iz toga se izrazi $T = \frac{V}{I \cdot A}$. Tada je moguće izjednačiti lijevu stranu s jednadžbom za ΔT iz čega se dobiva izraz:

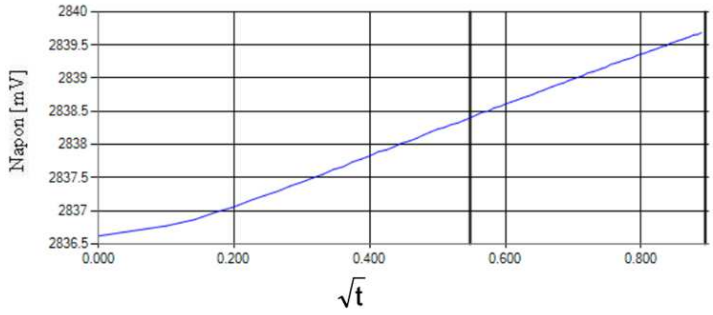
$$\Delta V(t) = \frac{1{,}1284 \cdot I \cdot A \cdot G\sqrt{t}}{e_{eff,1} + e_{eff,2}}$$

što se može pisati u obliku:

$$\Delta V(t) = m \cdot \sqrt{t}$$

Pri čemu je m nagib pravca koji opisuje promjenu napona u odnosu na korijen vremena (Slika 3.123) i iznosi [C-Therm, 2002]:

$$m = \frac{1{,}1284 \cdot I \cdot A \cdot G}{e_{eff,1} + e_{eff,2}}$$



Slika 3.123 Promjena napona senzora u vremenu [C-Therm, 2009]

U kratkom vremenskom periodu svi parametri s desne strane dobivene jednadžbe za proračun parametra m su konstantni pa se efuzivnost uzorka može izračunati iz izraza dobivenog iz prethodnih jednadžbi, kako slijedi:

$$\frac{1}{m} = M \cdot e_{eff,2} + C_{TCi}$$

gdje su:

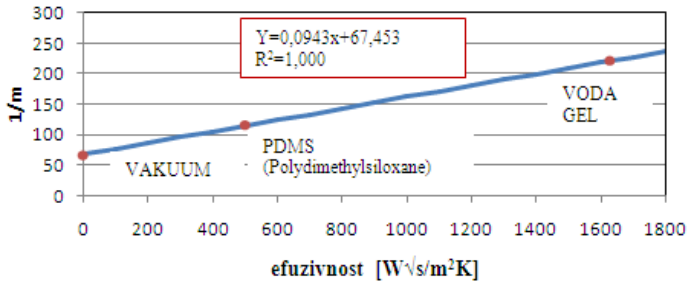
M - nagib kalibracijske krivulje efuzivnosti i jednak je:

$$M = \frac{1}{1{,}1284 \cdot I \cdot A \cdot G}$$

C_{TCi} - koeficijent senzora koji je jednak:

$$C_{TCi} = \frac{e_{eff,1}}{1{,}1284 \cdot I \cdot A \cdot G}$$

Koeficijente M i C_{TCi} daje signal senzora dobiven kad je senzorom mjeren materijal poznate efuzivnosti, odnosno kad je senzor kalibriran. Kalibracijske krivulje su pravci dobiveni mjerenjem efuzivnosti u tri točke, za tri različita materijala, (Slika 3.124).



Slika 3.124 Odnos $1/m$ i toplinske efuzivnosti [C-Therm, 2002]

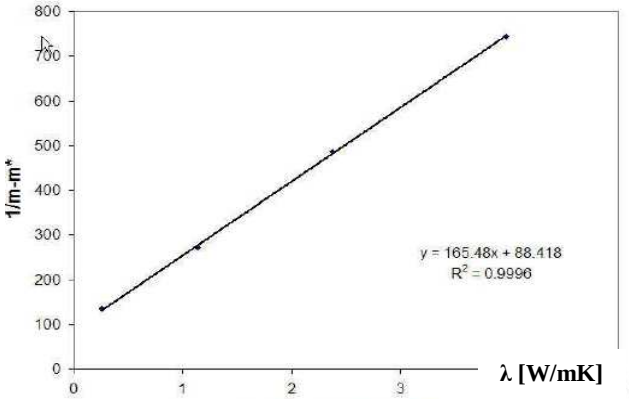
Toplinska provodljivost λ_c se računa i kalibrira pomoću algoritma koji se označava sa m^* i pritom se koristi iterativni proces za kalibraciju senzora iz poznatog podatka za toplinsku provodljivost nekog drugog materijala. Kalibracijski postupak generira vrijednost m^* takvu da vrijedi izraz:

$$\frac{1}{m - m^*} = \alpha_m \cdot \lambda_c + z_m \,,$$

gdje su:

α_m - nagib pravca kalibracije,

z_m - odsječak pravca kalibracije na osi x (Slika 3.125).



Slika 3.125 Izgled kalibracijske krivulje za toplinsku provodljivost [C-Therm, 2002]

3.10.6 Mjerenje toplinske efuzivnosti betona komparativnom metodom

[Bison et al., 2012] mjere toplinsku efuzivnost koristeći komparativnu metodu. Promatrani uzorak se određeno vrijeme zagrijava halogenom lampom. U slučaju uzorka veće debljine (polubeskonačna aproksimacija), temperatura površine uzorka raste proporcionalno kvadratnom korijenu vremena i apsorbiranoj snazi zračenja Q_P, a obrnuto proporcionalno toplinskoj efuzivnosti materijala uzorka:

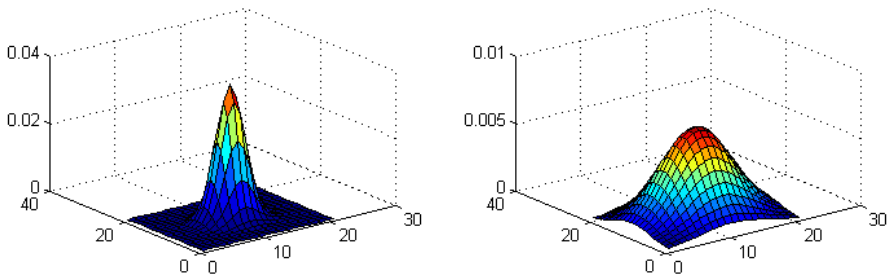
$$T(t) = 2\frac{Q_P}{\varepsilon}\sqrt{\frac{t}{\pi}} \qquad e_{eff} = \sqrt{\lambda \rho_m c_p}$$

Ukoliko je uzorak poznate efuzivnosti, jednake obrade površine (jednake boje i emisivnosti), može se pretpostaviti da oba uzorka apsorbiraju jednaku snagu i tada se toplinska efuzivnost promatranog uzorka nepoznate efuzivnosti može izraziti kao [Bison et al., 2012]:

$$e_{eff}^{unknown} = e_{eff}^{reference}\frac{T_{reference}}{T_{unknown}}$$

3.11 Obrada i analiza slike

Gaussov filtar je niskopropusni frekvencijski filtar (engl. *low-pass filter*) čiji je impulsni odziv Gaussova funkcija. U obradi i analizi digitalne slike ovaj se filtar još naziva i Gaussovo zamućivanje (engl. *Gaussian blur*, *Gaussian smoothing*), jer se njime propuštaju niske, a zagušuju visoke frekvencije na slici. Gaussovi filtri različitih veličina konstruiraju se korištenjem Gaussovih funkcija različitih standardnih devijacija Gaussove distribucije. Što je σ veća, veća je i veličina Gaussovog filtra, tj. zamućenje koje njegova konvolucija sa slikom uzrokuje, Slika 3.126.



Slika 3.126 Dvodimenzionalan izgled konvolucijske maske Gaussovog filtera za σ=1 i σ=4

Budući da je Gaussova funkcija uvijek različita od nule, Gaussov filtar teoretski ima beskonačne dimenzije. U praksi filtri ipak nisu beskonačni, pa je i ovaj filtar potrebno aproksimirati nekim konačnim filtrom. Aproksimacija se temelji na 3-sigma pravilu koje kaže da se 99.73% vrijednosti koje se nalaze unutar Gaussove distribucije nalaze unutar $\pm 3\sigma$ područja od sredine te distribucije.

U dvije dimenzije, Gaussov filtar dan je s jednadžbom:

$$G(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

gdje su x i y koordinate slike i σ je standardna devijacija odgovarajuće distribucije vjerojatnosti [Nixon & Aguado, 2008]

Medijan filtar je nelinearni filtar koji rangira piksele unutar određene prethodno definirane slike pri čemu se vrijednost za središnji piksel zamjenjuje s medijanom vrijednosti svih piksela definirane okoline promatranog piksela. Medijan filtar se koristi kao efektivna metoda za uklanjanje izoliranog šuma i mrtvih piksela, a bez zamućenja oštrih rubova slike [Larsen, 2011].

4 EKSPERIMENTALNI RAD

U ovom poglavlju, razmatra se postava eksperimenta i program ispitivanja koji je proveden u okviru laboratorijskih istraživanja. Detaljna analiza o opremi i načinu prikupljanja rezultata ispitivanja također će se prikazati u ovom poglavlju.

4.1 Planiranje i provedba istraživanja

Pregledom literature analiziran je pristup pojedinih istraživača, te je na temelju rezultata tih istraživanja provedenih na betonu, određena veličina uzoraka. Veličina uzoraka je s jedne strane definirana mogućnošću prenošenja uzoraka (ograničene su dimenzije i masa samih uzoraka) i kondicioniranja u predviđenim uvjetima, a da su s druge strane uzorci dovoljno veliki da se mogu simulirati stvarna oštećenja, bez utjecaja rubova ili oštećenja međusobno na temperaturno polje. Istražen je utjecaj razmaka armature na mogućnost otkrivanja oštećenja koja se nalaze na dubini većoj od debljine zaštitnog sloja. Također, analiziran je utjecaj svojstava betona (gustoće i vlažnosti) te utjecaj toplinskih svojstava betona na mogućnost provođenja mjerenja.

U svrhu ispitivanja, izrađene su tri vrste uzoraka s oštećenjima poznate veličine i oblika koja su smještena na poznatim dubinama unutar armiranobetonskih uzoraka. Pri tome se varirala veličina i dubina simuliranog oštećenja kako bi se odredio utjecaj geometrijskih karakteristika i dubine oštećenja na mogućnost detekcije infracrvenom termografijom.

Korišten je slijedeći oblik pri označavanju uzoraka $\boldsymbol{BM\ x-y}$, gdje "$\boldsymbol{x}$" označava betonsku mješavinu, dok "$\boldsymbol{y}$" označava vrstu oštećenja u uzorku.

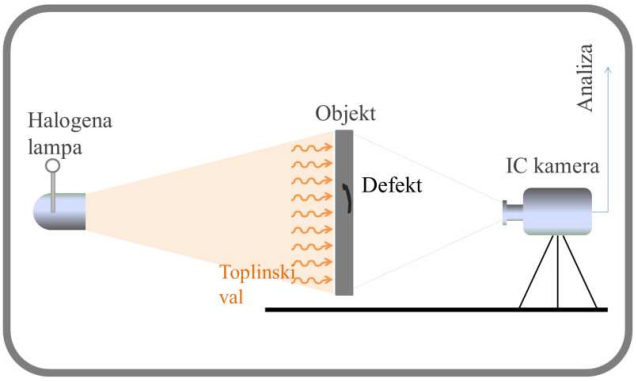
Laboratorijski uzorci oblika ploča su dimenzija 50×50×10 cm, a izrađeni su od tri razreda betona, na način da su za sva tri razreda simulirana jednaka oštećenja u pločama. Mješavine betona imaju sljedeće oznake:

- BM 1-y čiji je cilj bio simulirati beton loše kvalitete koji se može pronaći na stvarnim konstrukcijama.
- BM 2-y čiji je cilj bio simulirati beton normalne kvalitete, odnosno najčešći beton koji se pojavljuje na stvarnim konstrukcijama
- BM 3-y čiji je cilj bio simulirati beton iznimne kvalitete, odnosno beton velike čvrstoće i velike toplinske provodljivosti.

Istražena je optimalna metoda toplinske pobude uzoraka koja omogućuje ispitivanje postojanja oštećenja na većim dubinama unutar betonskih uzoraka, tj. metoda koja će omogućiti zadovoljavajuću razlučivost oštećenja. Pri tome je istražena lock-in tehnika (LT) i tehnika koračnog grijanja kao tehnika toplinske pobude. Lock-in tehnika (LT) je odbačena zbog nemogućnosti razlučivanja oštećenja u uzorku, te je primijenjena tehnika koračnog zagrijavanja (SH).

Tehnika koračnog zagrijavanja (SH) je primijenjena u dvije konfiguracije: transmitivnom i reflektnom metodom mjerenja.

Pri tome je u slučaju transmitivne tehnike trajanje toplinske pobude 120 minuta, s praćenjem i perioda hlađenja uzoraka u trajanju od 60 minuta. Toplinska pobuda provedena je halogenom lampom snage 1000 W s udaljenosti 2,0 m od površine betonskih uzoraka, a udaljenost kamere od uzorka iznosila je 1,45 m, Slika 4.1 i Slika 4.2.



Slika 4.1 Shematski prikaz transmitivne metode mjerenja



Slika 4.2 Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 2,0 m od površine uzorka, transmitivna metoda ispitivanja

Udaljenost toplinske pobude odabrana je kao optimalna udaljenost s obzirom na jednoliko zagrijavanje uzorka, a da se pri tome zadrži relativno velika mogućnost zagrijavanja uzorka od strane toplinske pobude. Uzorci su postavljani tako da je uvijek strana uzorka označena kao gornja strana okrenuta prema toplinskoj pobudi, a donja strana okrenuta prema IC kameri.

Ispitivanja reflektnom metodom mjerenja su provedena kod toplinske pobude u trajanju od 60 minuta, s praćenjem i perioda hlađenja uzoraka u trajanju od 60 minuta. Toplinska pobuda halogenom lampom snage 1000 W provedena je s udaljenosti 1,5; 2,0 i 3,0 m od površine betonskih uzoraka, Slika 4.3, Slika 4.4.



Slika 4.3 Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 1,5 m od površine uzorka



Slika 4.4 Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 3,0 m od površine uzorka

Za prethodnu i naknadnu obradu rezultata ispitivanja su razvijeni algoritmi i vlastite funkcije te programi (poznati kao M-datoteke) u kodu MATLAB-a, koji su služili za pojedine korake analize rezultata.

Metode naknadne obrade rezultata ispitivanja, sekvence termograma, koje su analizirane u ovom radu, koriste se u području zrakoplovstva, svemirske industrije za lokaciju oštećenja u materijalima te određivanje njihove veličine i dubine, s razmatranjem mogućnosti primjene pojedinih metoda u području građevinarstva.

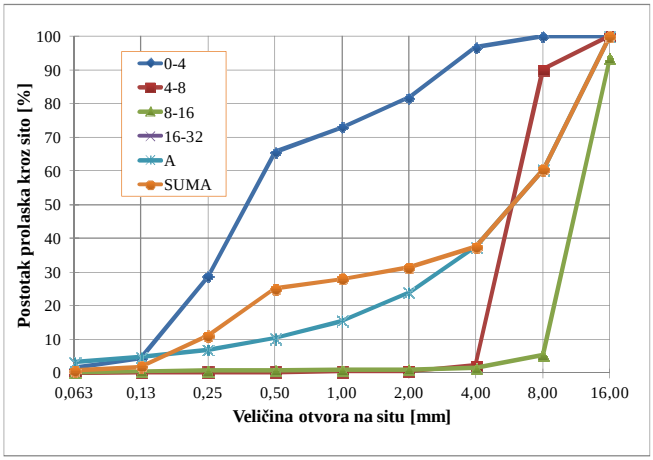
Tehnike koje su korištene kod naknadne obrade rezultata ispitivanja, odnosno otkrivanje postojanja oštećenja su: termografija koračnog grijanja (SH); termografija faznog impulsa (PPT), pri čemu je razmatran fazni i amplitudni prikaz; termografija glavnih komponenti (PCA) te tehnika naknadne obrade rezultata ispitivanja pomoću korelacijskih operatora.

4.2 Eksperimentalni poligon

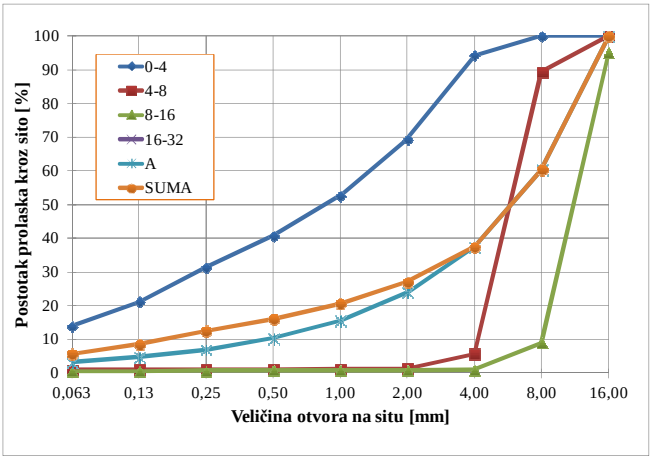
4.2.1 Beton za laboratorijske uzorke ploča

Predviđeno je da će svježi beton prilikom ugradnje imati konzistenciju S3 (100-150 mm), mjerenu slijeganjem prema [HRN EN 12350-2:2009]. Sastavi betona za sve tri mješavine, dani su u daljnjem tekstu.

Pri izradi betona za uzorke ispitivane u ovom radu korišten je prirodni agregat, porijeklo Smontara te drobljeni agregat dolomit, porijeklo Očura, granulometrijskog sastava kako je pokazano u daljnjem tekstu, Slika 4.5, Slika 4.6.



Slika 4.5 Granulometrijski sastav prirodnog agregata, Smontara



Slika 4.6 Granulometrijski sastav drobljenog agregata, Očura

Za izradu betona za uzorke oznake BM 1-y korišten je cement CEM III 32,5, te prirodni agregat, Smontara, D_{max}=16 mm, granulometrijskog sastava prikazanog u tablici 3.2., uz dodatak aeranta (0,1 % na masu cementa) kako bi se dobilo što više pora u betonu, koje bi

posljedično smanjile toplinsku provodljivost samog betona. Cilj je ove mješavine bio da se simulira beton loše kvalitete.

Tablica 4.1 Sastav betona za mješavinu BM 1-y

	Komponenta		**Masa [kg]**	**Gustoća [kg/dm^3]**	**Volumen [dm^3]**
	Cement		271,43	3,01	90,18
	Voda		190	1	190,00
	v/c	0,7	-	-	-
	Zrak (%)	7	-	-	70,00
Dodatak	Aerant (% m_c)	0,1	0,27	1	0,27
Agregat	0 - 4 mm	37,5 %	657,67	2,7	243,58
	4 - 8 mm	22,7 %	398,11	2,7	147,45
	8 - 16 mm	42,5 %	745,36	2,7	276,06
	Suma		2262,85	2,263	1000

Mješavina BM 2-y izrađena je korištenjem cementa CEM I 42,5R, te drobljenog agregata, dolomit Očura, granulometrijskog sastava prikazanog u tablici 3.3, uz dodatak plastoaeranta (0,5% na masu cementa) kako bi se postigla željena obradljivost i željena količina pora u betonu. Cilj izrade ove mješavine bio je simulirati beton normalne kvalitete, odnosno najčešći beton koji se pojavljuje na stvarnim konstrukcijama.

Tablica 4.2 Sastav betona za mješavinu BM 2-y

	Komponenta		**Masa [kg]**	**Gustoća [kg/dm^3]**	**Volumen [dm^3]**
	Cement		345,45	3,01	114,77
	Voda		190	1	190
	v/c	0,55	-	-	-
	Zrak (%)	5	-	-	50
Dodatak	Plastoaerant Melcret SPA (% m_c)	0,5	1,73	1	1,73
Agregat	0 - 4 mm	38 %	696,91	2,85	244,53
	4 - 8 mm	21 %	379,73	2,81	135,14
	8 - 16 mm	43 %	777,55	2,81	276,71
	Suma		2391,37	2,39	1000

Mješavina BM 3-y izrađena je korištenjem cementa CEM I 52,5N, te drobljenog agregata, dolomit Očura, granulometrijskog sastava prikazanog u tablici 3.4, uz dodatak

superplastifikatora (1,0% na masu cementa) kako bi se postigla željena obradljivost i željena količina pora u betonu, te silikatna prašina, za postizanje strukture betona sa što manje pora. Cilj izrade ove mješavine bio je simulirati beton iznimne kvalitete, odnosno beton velike čvrstoće i visoke toplinske provodljivosti.

Tablica 4.3 Sastav betona za mješavinu BM 3-y

Komponenta			Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]
	Cement		425,00	3,01	141,20
	Voda		170	1	170
		v/c 0,4	-	-	-
	Zrak	1	-	-	10
Dodatak	Superplastifikator (% m_c)	1	4,25	1,1	3,86
	Silikatna prašina (% m_c)	7	29,75	2,2	13,52
Agregat	0 - 4 mm	38 %	716,32	2,85	251,34
	4 - 8 mm	21 %	390,30	2,81	138,90
	8 - 16 mm	43 %	799,19	2,81	284,41
	Suma		2534,81	2,535	1000

4.2.2 Program ispitivanja

Tablica 4.4 daje program ispitivanja svježeg i očvrslog betona za svaku od tri mješavine betona izrađene u svrhu predmetnog istraživanja.

Tablica 4.4 Program ispitivanja svježeg i očvrslog betona

	Vrsta ispitivanja	Norma	Broj uzoraka	Broj ispitivanja	Dimenzije uzoraka (mm)
Svježi beton	Slijeganje	HRN EN 12350-2	1	1	-
	Sadržaj pora	HRN EN 12350-7	1	1	-
	Gustoća	HRN EN 12350-6	1	1	-
	Temperatura svježeg betona	HRN U.M1.032	1	1	-
Očvrsli beton	Gustoća očvrslog betona	HRN EN 12390-7	3	3	150×150×150
	Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3	3	3	150×150×150
	Koeficijent vodoupojnosti pri djelomičnom uranjanju	HRN EN ISO 13057	3	3	Ø100/50
	Plinopropusnost	HRN EN 993-4	3	3	Ø100/50

	Vrsta ispitivanja	Norma	Broj uzoraka	Broj ispitivanja	Dimenzije uzoraka (mm)
Toplinska svojstva betona	Toplinska provodljivost (TCi)	-	3	9	Ø100/50
	Toplinska efuzivnost (TCi)	-	3	9	Ø100/50
	Toplinska efuzivnost (komparativna metoda)	-	3	9	Ø100/50
	Toplinska difuzivnost	analiza prema [Parker et al., 1961]	3	1	Ø100/10
	Koeficijent emisije	prema [Orlove 1982]	3	3	Ø100/50
Otkrivanje oštećenja transmitivnom metodom		-	3	2	500×500×100
Otkrivanje oštećenja reflektnom metodom		-	3	6	500×500×100

Pri tome se broj uzoraka (Tablica 4.4) odnosi na broj uzoraka samo za jednu mješavinu betona, dok se broj ispitivanja odnosi na broj ispitivanja svakog pojedinog uzorka.

Dodatno su ispitivane i površinska vlažnost očvrslog betona korištenjem kontaktnog vlagomjera te vlažnost i temperatura zraka, a sve u trenutku ispitivanja postojanja oštećenja transmitivnom i reflektnom tehnikom.

4.2.3 Laboratorijski uzorci ploča

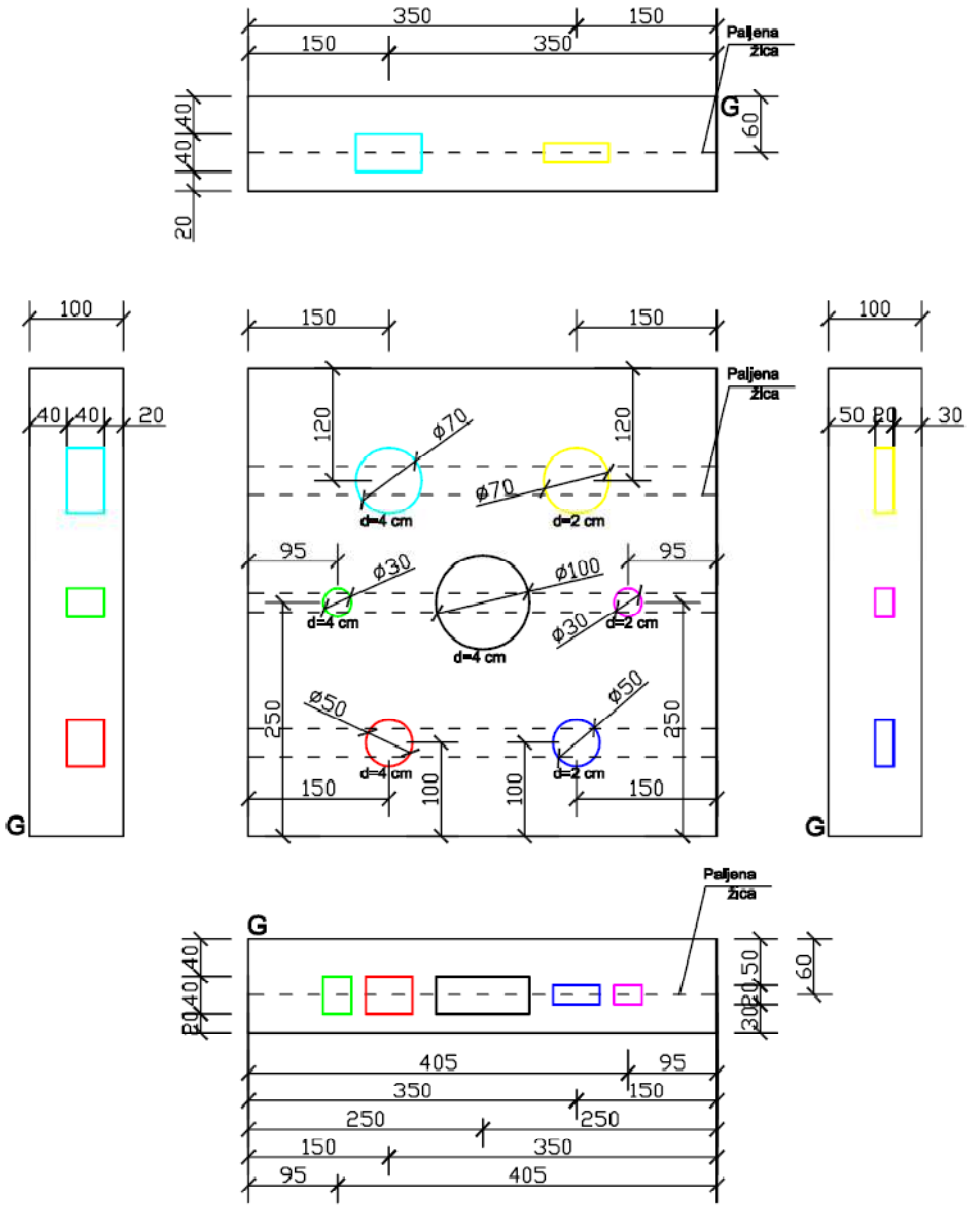
U svrhu ispitivanja, korištene su tri vrste uzoraka s oštećenjima poznate veličine i oblika koja su smještena na poznatim dubinama unutar armiranobetonskih uzoraka. Unutar uzoraka mijenjala se veličina i dubina simuliranog oštećenja kako bi se odredio utjecaj geometrijskih karakteristika i dubine oštećenja na mogućnost detekcije infracrvenom termografijom.

Laboratorijski uzorci oblika ploča su dimenzija 50×50×10 cm, a izrađeni su od tri razreda tlačne čvrstoće betona, na način da su za sva tri razreda simulirana jednaka oštećenja u pločama.

Koristi se slijedeći oblik pri označavanju uzoraka $\boldsymbol{BM\ x-y}$, gdje "$\boldsymbol{x}$" označava betonsku mješavinu, dok "$\boldsymbol{y}$" označava vrstu oštećenja u uzorku, kako je prikazano u daljnjem tekstu, Slika 4.7, Slika 4.8, Slika 4.9.

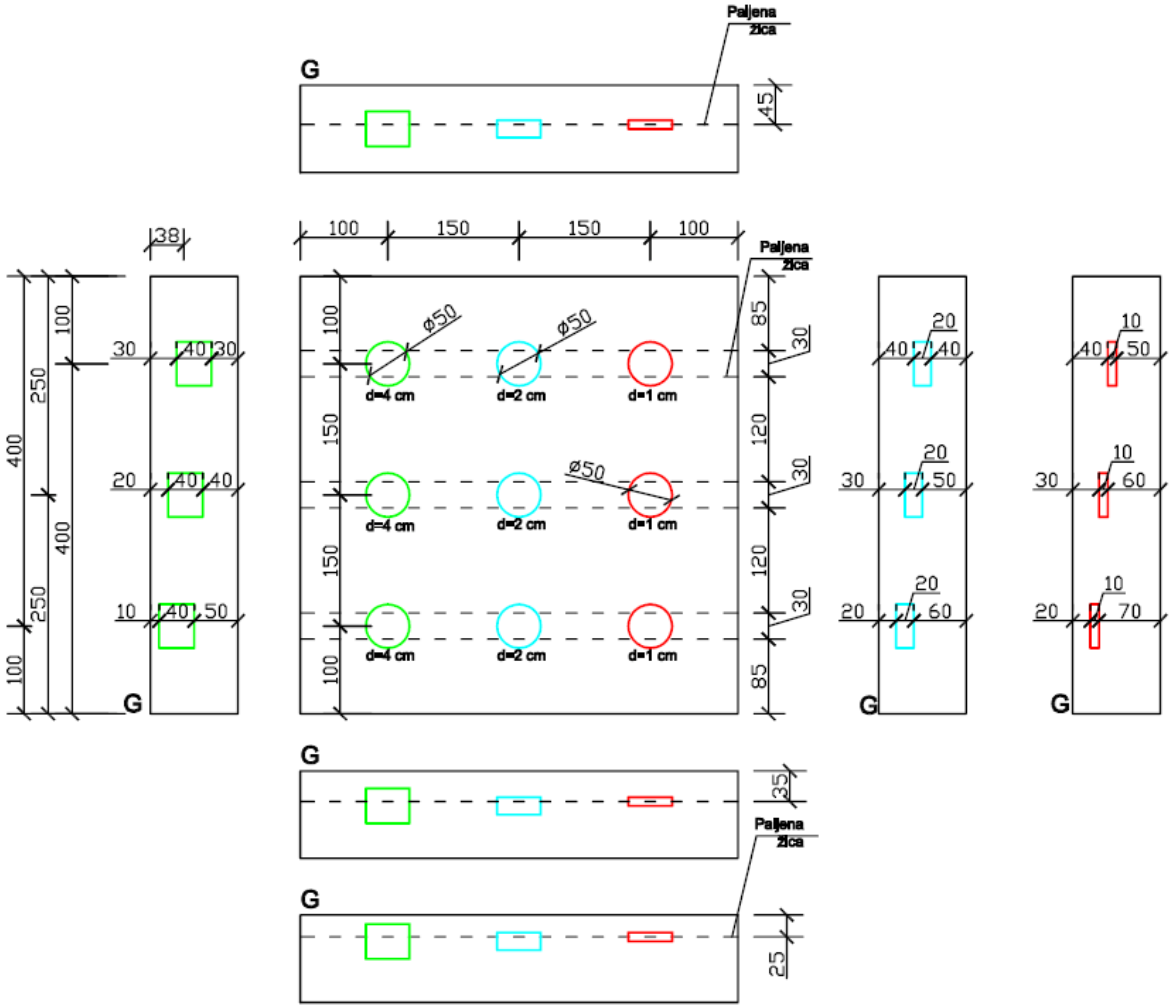
Osnovni razlog za izradu laboratorijskih uzoraka je definiranje metodologije provođenja ispitivanja, te ispitivanje uzoraka u što više različitih termo-higrometrijskih uvjeta u kojima konstrukcija može biti podvrgnuta u stvarnim uvjetima. Za ovakva ispitivanja, potrebno je da uzorci budu dovoljno maleni kako bi se njima moglo rukovati i kondicionirati u predviđenim uvjetima, a s druge strane, dovoljno veliki da se mogu simulirati stvarna oštećenja, bez utjecaja rubova ili oštećenja međusobno na temperaturno polje.

Ploča BM x-1, Slika 4.7, sadrži simulacije oštećenja u obliku diska debljine 20 i 40 mm te različitih promjera (30, 50, 70 i 100 mm), a služi za određivanje ovisnosti debljine i promjera oštećenja o mogućnosti detekcije. Ploča je napravljena na takav način da su s gornje strane oštećenja na dubini od 40 mm, odnosno 50 mm, a s donje strane ploče, oštećenja su na dubini od 20 mm, odnosno 30 mm.



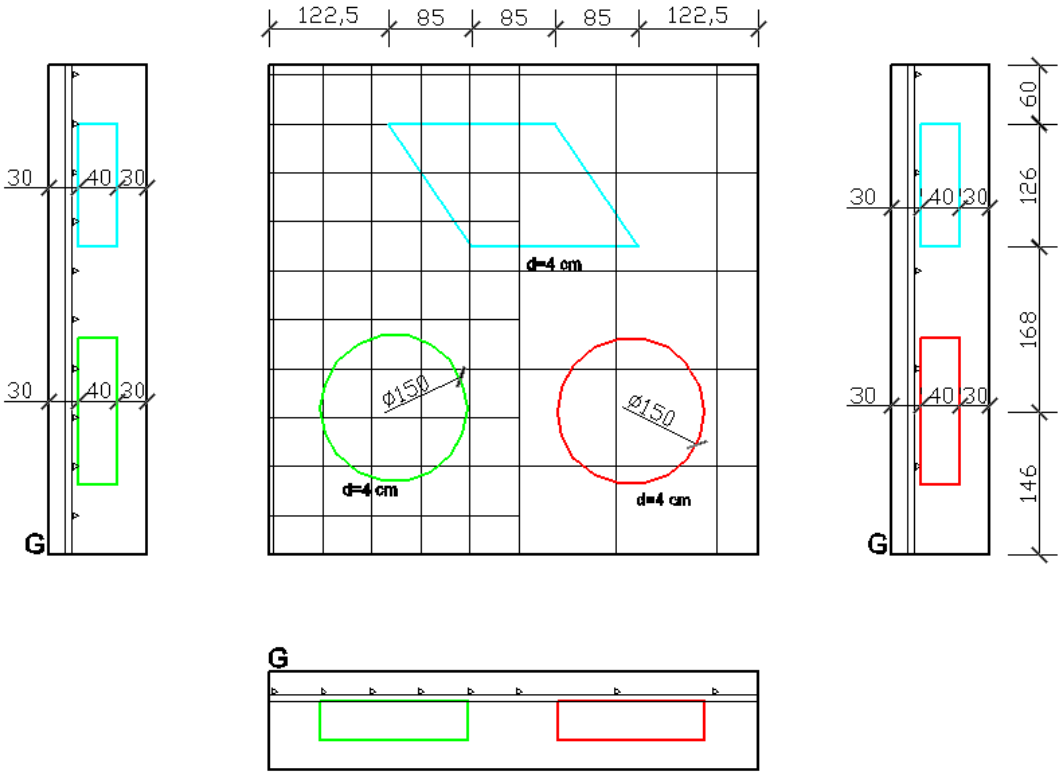
Slika 4.7 Položaj simuliranih defekata BM x-1 – utjecaj promjera defekata

Ploča BM x-2, Slika 4.8, sadrži simulacije oštećenja u obliku diska promjera 50 mm te različitih debljina (10, 20, i 40 mm), a služi za određivanje ovisnosti debljine oštećenja o mogućnosti detekcije. Oštećenja (d = 40 mm) se nalaze na dubini 10, 20 i 30 mm od gornje strane ploče, donosno 30, 40 i 50 mm od donje strane ploče. Oštećenja (d = 20 mm) se nalaze na dubini 20, 30 i 40 mm od gornje strane ploče, donosno 40, 50 i 60 mm od donje strane ploče. Oštećenja (d = 10 mm) se nalaze na dubini 20, 30 i 40 mm od gornje strane ploče, donosno 50, 60 i 70 mm od donje strane ploče.



Slika 4.8 Položaj simuliranih defekata BM x-2 – utjecaj debljine defekata na detekciju

Ploča BM x-3, Slika 4.9, sadrži simulacije dva oštećenja u obliku diska promjera 150 mm debljine 40 mm od kojih se jedan disk nalazi ispod armature s međusobnim razmakom šipki od 50 mm, promjer šipki je 8 mm, a drugi disk se nalazi ispod armature s međusobnim razmakom šipki od 100 mm. Također, u ploči se nalazi i oštećenje u obliku romba čija se polovica nalazi ispod armature na razmaku od 50 mm, a druga polovica ispod šipki na međusobnom razmaku od 100 mm. Ploča BM x-3 služi za određivanje utjecaja armature na mogućnosti detekcije. Oštećenja se nalaze na dubini 30 mm od gornje strane ploče, odnosno 30 mm od donje strane ploče, gdje ne postoji armatura.



Slika 4.9 Položaj simuliranih defekata BM x-3 – utjecaj razmaka armature na detekciju defekata

Konačni izgled kalupa s ugrađenim oštećenjima neposredno prije miješanja i ugradnje betona, Slika 4.10 do Slika 4.12.



Slika 4.10 Fotografija defekata BM x-1



Slika 4.11 Fotografija defekata BM x-2



Slika 4.12 Fotografija defekata BM x-3

Za izradu ploča korištena je oplata od vodootporne panel ploče debljine 20 mm, Slika 4.13. Za izradu simuliranih šupljina u eksperimentalnim uzorcima odabran je ekstrudirani polistiren (XPS) koji ima slijedeća svojstva, Tablica 4.5, Slika 4.14:

Tablica 4.5 Svojstva XPS-a [Willems et al. 2006]

Gustoća [kg/m^3]	**Toplinska provodljivost [W/mK]**	**Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]**	**Toplinska difuzivnost [m^2/s]**	**Toplinska efuzivnost [J/m^{2}Ks$^{1/2}$]**
50	0,040	1500	$5{,}33\times10^{-7}$	54,77



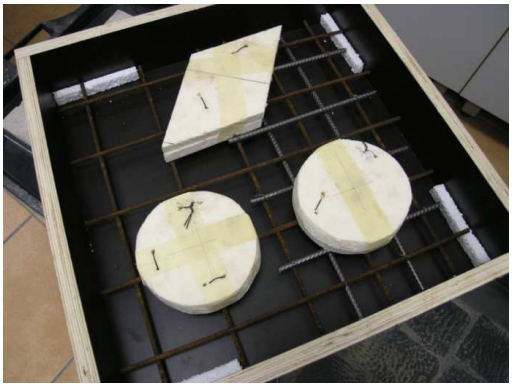
Slika 4.13 Kalupi za izradu laboratorijskih uzoraka, ploča BM x-1 do BM x-3



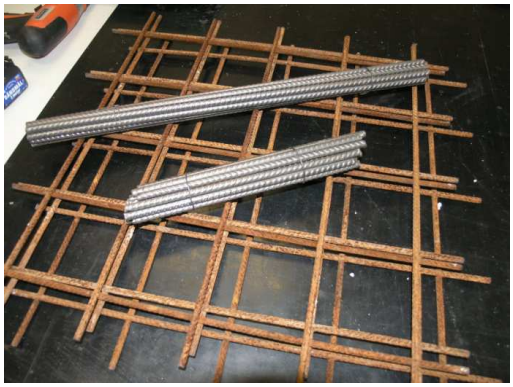
Slika 4.14 Simulacije oštećenja od XPS-a

Toplinska svojstva XPS-a vrlo su slična toplinskim svojstvima zraka koji se obično nalazi u oštećenjima unutar betona. Također, XPS ne upija vodu što znači da će svojstva ostati jednaka i nakon betoniranja, te kondicioniranja uzoraka.

Kako bi se osigurao točan položaj simulacija oštećenja u kalupu, korištena je paljena žica, čijim se zatezanjem postiglo željeno učvršćenje kako pri betoniranju ne bi došlo do pomicanja simulacija oštećenja, Slika 4.15. U slučaju ploče BM x-3 korištena je armaturna mreža Q-386 (100×100mm; Ø 7mm) te šipke rebraste armature Ø 8mm, za pričvršćenje simulacije oštećenja, Slika 4.16.



Slika 4.15 Učvršćenje simulacije oštećenja korištenjem paljene žice



Slika 4.16 Armatura korištena za izradu uzoraka oznake BM x-3

Slika 4.17 do Slika 4.19 prikazuju svih devet uzoraka izrađenih za laboratorijska ispitivanja:



Slika 4.17 Uzorci mješavine BM 1-y



Slika 4.18 Uzorci mješavine BM 2-y

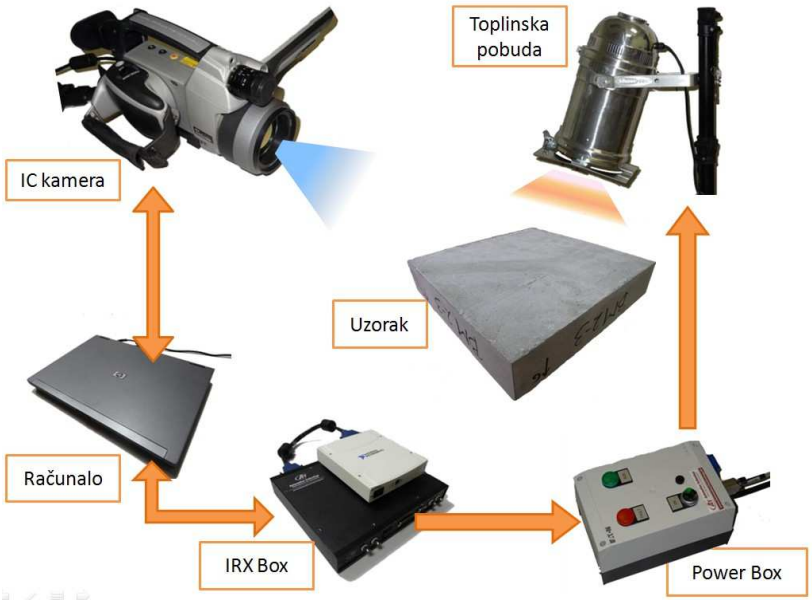


Slika 4.19 Uzorci mješavine BM 3-y

4.3 Mjerna oprema

4.3.1 Sustav IrNDT

Za provođenje mjerenja u ovome radu korišten je sustav IrNDT, proizvođača Automation Technology GmbH, koji koristi tehniku Lock-in, tehniku koračnog zagrijavanja i tehniku impulsne termografije za nerazorno ispitivanje uzoraka dok se kao toplinska pobuda koristi halogena lampa. Ovakva mjerna oprema omogućuje proučavanje utjecaja magnitude i faze toplinskih valova na uzorak, a nužna je za točno praćenje vremenske ovisnosti između izlaznog signala i referentnog ulaznog signala. Detaljniji opis navedenih tehnika mjerenja ovdje opisanom opremom dan je u poglavlju 3.6. U daljnjem tekstu dan je opis svakog pojedinog uređaja s njihovim detaljnim karakteristikama i računalnog programa koji su sastavni dijelovi sustava IR-NDT, Slika 4.20.



Slika 4.20 Shematski prikaz sustava IrNDT

4.3.2 Infracrvena kamera

Za provođenje mjerenja korištena je infracrvena kamera FLIR ThermaCAM P640 (Slika 4.21), sa svojstvima kako je prikazano u daljnjem tekstu, Tablica 4.6.



Slika 4.21 Termovizijska kamera FLIR P 640

Tablica 4.6 Tehničke karakteristike kamere FLIR P640 [FLIR 2012]

Karakteristika kamere	**Vrijednost**
Spektralni raspon	7,5 - 13 µm
Razlučivost IC detektora	640×480 piksela
Vidno polje (FOV)	24°×18°
Minimalna fokalna udaljenost	0,3 m
Prostorna razlučivost	0,65 mrad za leću 24°
Temperaturna razlučivost (NETD)	60 mK pri 30°C
Frekvencija obnove slike	30 Hz
Točnost mjerenja	± 2 °C ili ± 2% očitanja
Temperaturni opseg	-40°C do +120°C 0°C do +500°C 300°C do 2000°C

FLIR P640 IC kamera radi u dugovalnom spektru valnih dužina (7,5 – 13 µm). Osjetnik kamere je takozvani nehlađeni mikrobolometar, što je zapravo FPA (*Focal Plane Array*) detektor sastavljen od 307200 (640×480) zasebnih detektora. Bolometri su načelno vrlo osjetljivi otpornički termometri koji pri promjeni temperature mijenjaju električni otpor, detaljnije su objašnjeni u poglavlju 3.2.1.1, [Andrassy et al. 2008]. Kamera je pomoću elektroničkog sučelja za aktivnu termografiju povezana s računalom te sustavom za toplinsku pobudu uzoraka.

4.3.3 Elektroničko sučelje za aktivnu termografiju

IRX-Box je elektroničko sučelje, Slika 4.22, između IC kamere, računalnog programa kojim se upravlja procesom ispitivanja i sustava za toplinsku pobudu. IRX-Box upravlja ulaznim i izlaznim signalom kako bi uskladilo rad IC kamere i sustava za toplinsku pobudu.

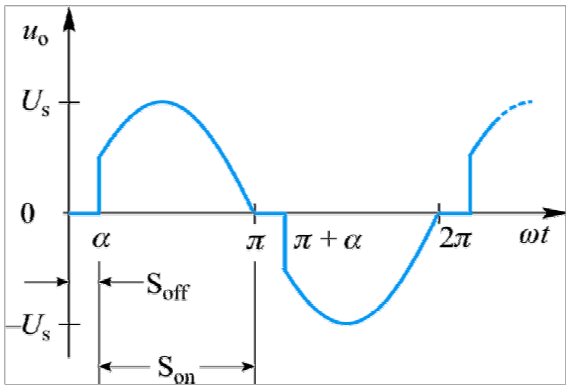
Nelinearni električni signal za modulaciju (usklađivanje rada) izvora toplinske pobude (halogene lampe) generira se u IRX-Box-u sustava. Modulacijski signal kontrolira snagu izvora topline, odnosno u vremenu, količinu toplinske energije koja dolazi do uzorka koji se ispituje [Boritu et al. 2011].



Slika 4.22 IRX-Box elektroničko sučelje

4.3.4 Power Box

Power Box je zapravo jednofazni regulator napona, odnosno izmjenično-izmjenični pretvarač napona koji vrši pretvorbu izmjeničnog napona određene frekvencije u niži napon iste frekvencije. Sklopka S uključuje svaku poluperiodu izmjeničnog napona U, no s određenim kašnjenjem α u odnosu na početak sinusoide ulaznog napona. Na taj se način „odsijecaju“ dijelovi poluvala sinusoidalnog napona. Kao rezultat se dobije izlazni signal smanjene vrijednosti [Kezić 2007].



Slika 4.23 Princip rada jednofaznog regulatora napona [Šunde 2011]

Power Box (Slika 4.25), dakle, služi za kontrolu napona izvora izmjenične struje, odnosno uz IRX Box služi za kontrolu toplinske pobude (halogene lampe). Ovisno o postavkama

ispitivača u računalnom programu, IRX-Box generira napon od 0 do 10 V koji dolazi do Power Box-a, a čime se posljedično kontrolira snaga toplinske pobude od 0 % do 100 %.



Slika 4.24 Power Box

4.3.5 Halogena Lampa

Kao toplinska pobuda korištena je halogena lampa snage 1000 W (PAR reflektor – eng. *parabolic aluminized reflector*), koja je pogodna za homogeno zagrijavanje površine do 1 m^2, Slika 4.25. Lampom se upravlja elektronički putem računalnog programa i preko IRX-Box-a koji usklađuje njezin rad s sekvencom snimanja IC kamere.



Slika 4.25 Halogena lampa korištena pri ispitivanjima

4.3.6 Uređaj Mathis TCi

Ispitivanje toplinske provodljivosti betona provedeno je korištenjem uređaja Mathis TCi. Uređaj se sastoji od tri osnovna dijela, a to su senzor, kontrolna jedinica i računalo (Slika 4.26) kojima se prvenstveno mjere toplinska provodljivost i efuzivnost.



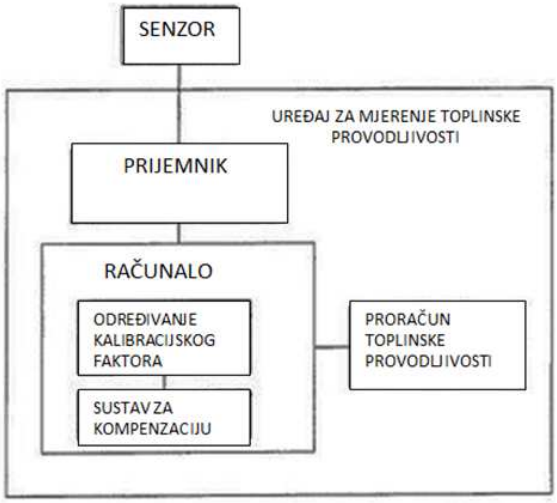
Slika 4.26 Uređaj Mathis TCi [C-Therm, 2009]

Uređaj može mjeriti široki raspon vrijednosti toplinske provodljivosti: od 0 do 100 W/mK ili efuzivnosti od 0 do 19000 W/m²K uključujući uzorke u čvrstom stanju, tekućem stanju, praškaste materijale i paste. Raspon temperature okoliša u kojem uređaj normalno funkcionira iznosi od -50 do 200 °C. Projektiran je za rad u laboratorijskom okruženju, a jedna od namjena mu je kontrola kvalitete materijala u proizvodnim pogonima. Kućište senzora je od nehrđajućeg čelika, površina gornjeg djela od stakla, te RTV-temperaturno vulkaniziranog silikona za brtvljenje koji služi kao zaštitna barijera staklene površine, Slika 4.27 [Mikulić, Milovanović, & Gabrijel, 2013].



Slika 4.27 Senzor Mathis Tci uređaja

Shematski prikaz rada uređaja za mjerenje toplinske provodljivosti Mathis TCi Slika 4.28.



Slika 4.28 Shematski prikaz rada uređaja Mathis TCi

Senzor Mathis TCi uređaja je spiralni grijač sa zaštitnim prstenom (Slika 4.27), čija je svrha generiranje topline iznad spiralnog grijača čime se aproksimira jednodimenzionalni toplinski tok u smjeru senzor - uzorak. Senzor najprije zagrijava uzorak, a zatim se mjeri reakcija uzorka na toplinsku pobudu. Način funkcioniranja uređaja objašnjen je detaljnije u poglavlju 3.11.5.

5 REZULTATI I ANALIZA ISPITIVANJA

5.1 Svojstva betona u svježem stanju

Neposredno prije ugradnje betona u laboratorijske uzorke ploča izmjerena su svojstva svježeg betona prema [HRN U.M1.032: 1981][HRN EN 12350-2:2009][HRN EN 12350-7: 2009][HRN EN 12350-6:2009], Tablica 5.1.

Tablica 5.1 Svojstva betona u svježem stanju

Mješavina	Temperatura betona [°C]	Slijeganje [mm]	Sadržaj pora [%]	Gustoća [kg/m^3]
BM 1-y	25,2	140	10,5	2194,0
BM 2-y	26,6	105	4,6	2382,7
BM 3-y	27,5	150	1,4	2545,6

Nakon betoniranja, uzorci su čuvani u laboratoriju, a bili su pokriveni polietilenskom folijom kako bi se spriječila evaporacija vode.



Slika 5.1 Izgled uzorka neposredno nakon betoniranja



Slika 5.2 Uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće

Nakon raskalupljivanja (1 dan nakon miješanja) uzorci su preneseni u vlažnu komoru u kojoj se održava konstantna vlaga od 95% i temperatura 20 °C.

5.2 Svojstva očvrslog betona

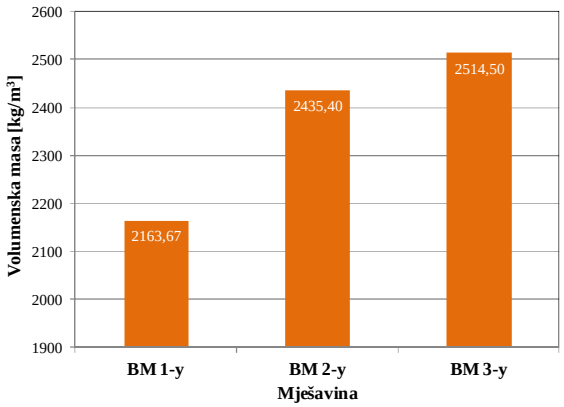
U svrhu karakterizacije očvrslog betona od kojeg su izrađene eksperimentalne ploče, provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće (prema [HRN EN 12390-3: 2005]) i gustoće (prema [HRN EN 12390-7: 2005] pri starosti od 28 dana na betonskim kockama dimenzija (150x150x150) mm, Slika 5.3, Slika 5.4 i Tablica 5.2.

Tablica 5.2 Rezultati ispitivanja volumenske mase očvrsnulog betona

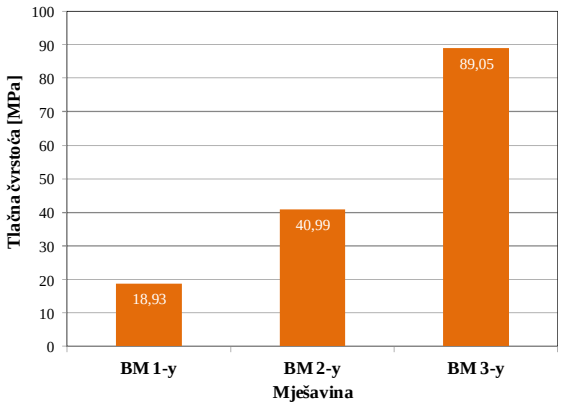
Mješavina	**Volumenska masa uzorka iz vlažne komore**		**Volumenska masa osušenog uzorka**	
	Srednja vrijednost [kg/m^3]	Standardna devijacija [kg/m^3]	Srednja vrijednost [kg/m^3]	Standardna devijacija [kg/m^3]
BM 1-y	2163,67	13,36	1995,19	44,06
BM 2-y	2435,40	4,61	2325,57	11,71
BM 3-y	2514,50	13,49	2410,71	1,05

Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće očvrsnulog betona

Mješavina	**Tlačna čvrstoća**	
	Srednja vrijednost [MPa]	Standardna devijacija [MPa]
BM 1-y	18,93	1,12
BM 2-y	40,99	1,39
BM 3-y	89,05	1,19



Slika 5.3 Volumenska masa betona iz vlažne komore



Slika 5.4 Tlačna čvrstoća betonskih mješavina

Uz to, ispitivana je i plinopropusnost, te apsorpcija i kapilarno upijanje uzoraka, kako bi se odredila poroznost očvrsnulog betona. Uzorci za navedena ispitivanja su dimenzija $\emptyset\,100/50\,mm$, a ispiljeni su iz valjka $\emptyset\,100/200\,mm$, Slika 5.5. Ispitivanja su provedena nakon isušivanja uzoraka na 105 °C.

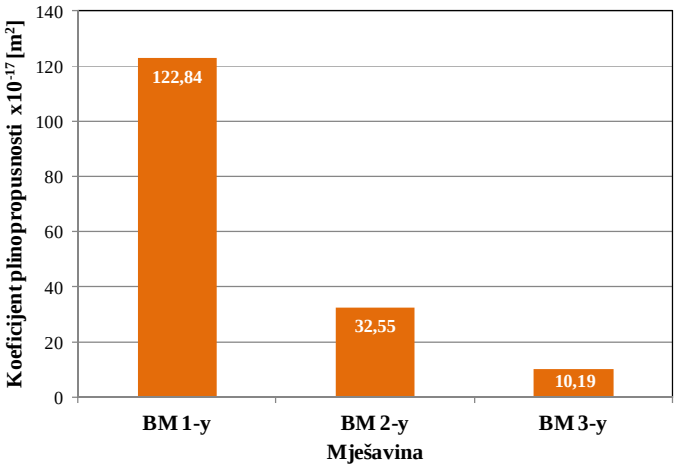


Slika 5.5 Uzorci ispiljeni za ispitivanje plinopropusnosti, apsorpcije i kapilarnog upijanja

Ispitivanje plinopropusnosti provedeno je prema [HRN EN 993-4, 2008]. Uz rezultate ispitivanja dana je i ocjena rezultata plinopropusnosti i ocjena kvalitete betona, Tablica 5.4. Slika 5.6 prikazuje usporedbu srednjih vrijednosti koeficijenata plinopropusnosti betona korištenih u ovom radu.

Tablica 5.4 Rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona uzoraka

Koeficijent plinopropusnosti						**Ocjena kvalitete betona**
Mješavina	Uzorak pojedine mješavine					
	BM x-y-1 [m^2]	BM x-y-2 [m^2]	BM x-y-3 [m^2]	Srednja vrijednost [m^2]	Standardna devijacija [m^2]	
BM 1-y	$1{,}49\times10^{-15}$	$1{,}16\times10^{-15}$	$1{,}03\times10^{-15}$	$1{,}23\times10^{-15}$	$2{,}36\times10^{-16}$	Loš
BM 2-y	$4{,}71\times10^{-16}$	$3{,}26\times10^{-16}$	$1{,}80\times10^{-16}$	$3{,}25\times10^{-16}$	$1{,}45\times10^{-16}$	Srednji
BM 3-y	$4{,}26\times10^{-17}$	$1{,}06\times10^{-16}$	$1{,}57\times10^{-16}$	$1{,}02\times10^{-16}$	$5{,}75\times10^{-17}$	Srednji



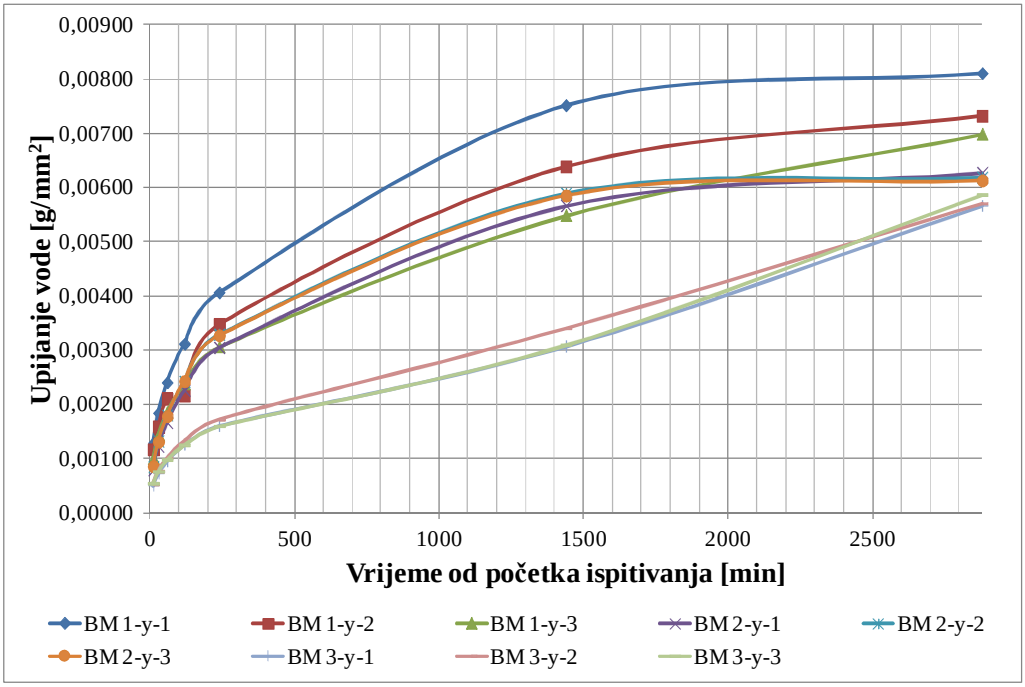
Slika 5.6 Rezultati ispitivanja plinopropusnosti uzoraka betona

Rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona, Tablica 5.4 i Slika 5.6, prikazuju očekivane vrijednosti plinopropusnosti za betone korištene u ovom radu.

Tablica 5.5 prikazuje ispitivanje kapilarnog upijanja očvrsnulog betona koje je provedeno prema normi [HRN EN 13057, 2003], pri čemu se mjeri brzina upijanja ili visina penetracije (dizanja) vode, kada je vodi omogućeno da bude apsorbirana u suhi beton pod zanemarivim vanjskim pritiskom.

Tablica 5.5 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja betona

Oznaka uzorka	t (min)		0	12	30	60	120	240	1440	2880
			10:35	10:47	11:05	11:35	12:35	14:35	10:35	10:35
	Promjer (mm)	Visina (mm)	md (g)	mw (g)	mw (g)	mw (g)	mw (g)	mw (g)	mw (g)	mw (g)
BM 1-y-1	99,13	50,46	774,36	784,28	788,51	792,86	798,36	805,65	832,28	836,84
BM 1-y-2	99,29	49,8	756,61	765,61	768,86	772,86	773,32	783,47	805,96	813,22
BM 1-y-3	99,51	50,54	805,47	813,24	816,59	819,85	823,95	829,26	848,08	859,77
BM 2-y-1	99,65	52,14	943,59	949,71	953,10	956,50	961,14	967,29	987,71	992,47
BM 2-y-2	99,66	50,01	902,11	908,68	912,37	916,11	920,93	927,72	948,01	950,30
BM 2-y-3	99,82	50,49	922,97	929,62	933,17	936,88	941,90	948,50	968,68	970,86
BM 3-y-1	99,63	50,52	942,18	946,07	947,82	949,64	951,96	954,69	966,10	986,30
BM 3-y-2	99,52	50,38	936,66	940,74	942,59	944,46	946,93	950,03	963,08	981,00
BM 3-y-3	99,4	51,28	951,53	955,69	957,38	959,07	961,20	963,88	975,52	996,99

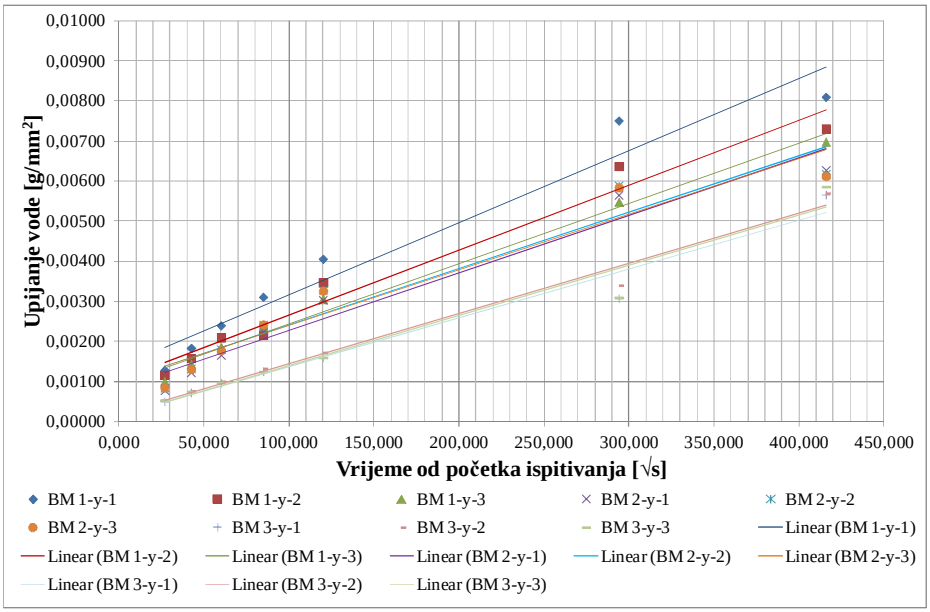


Slika 5.7 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja uzoraka betona kao funkcije vremena [min]

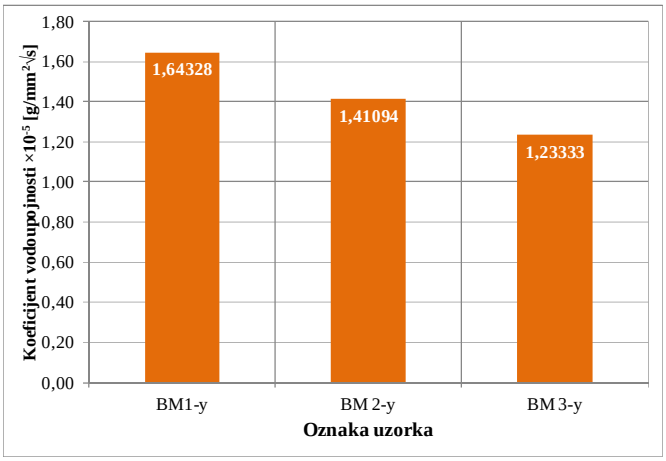
Rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona, Tablica 5.6 i Slika 5.8, Slika 5.9, prikazuju očekivane vrijednosti koeficijenta vodoupojnosti za betone korištene u ovom radu.

Tablica 5.6 Rezultati ispitivanja vodoupojnosti uzoraka betona

Uzorak	Koeficijent vodoupojnosti ispitivanog uzorka	Koeficijent vodoupojnosti betona [g/mm$^2\sqrt{s}$]	Standardna devijacija [g/mm$^2\sqrt{s}$]
BM 1-y-1	$1{,}79913\times10^{-5}$	$1{,}64328\times10^{-5}$	$1{,}48257\times10^{-6}$
BM 1-y-2	$1{,}62670\times10^{-5}$		
BM 1-y-3	$1{,}50401\times10^{-5}$		
BM 2-y-1	$1{,}43537\times10^{-5}$	$1{,}41094\times10^{-5}$	$2{,}24464\times10^{-7}$
BM 2-y-2	$1{,}40621\times10^{-5}$		
BM 2-y-3	$1{,}39123\times10^{-5}$		
BM 3-y-1	$1{,}22105\times10^{-5}$	$1{,}23333\times10^{-5}$	$2{,}1183\times10^{-7}$
BM 3-y-2	$1{,}22115\times10^{-5}$		
BM 3-y-3	$1{,}25779\times10^{-5}$		



Slika 5.8 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja uzoraka betona kao funkcija √s

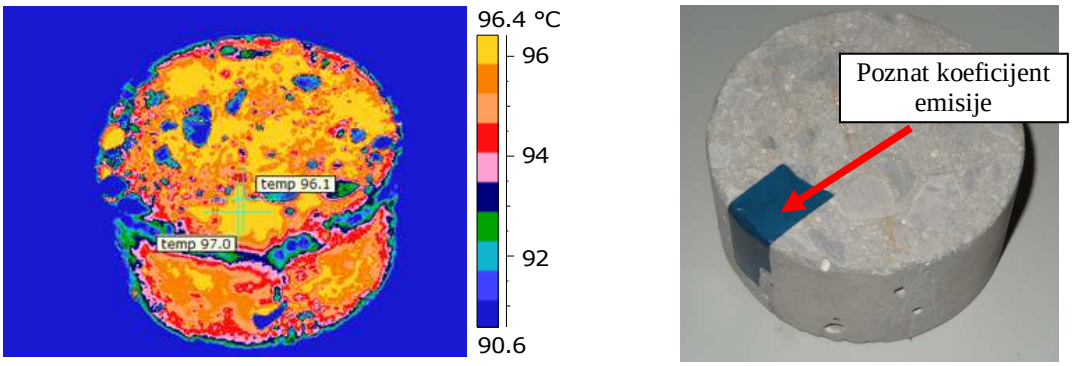


Slika 5.9 Srednje vrijednosti koeficijenata vodoupojnosti uzoraka betona

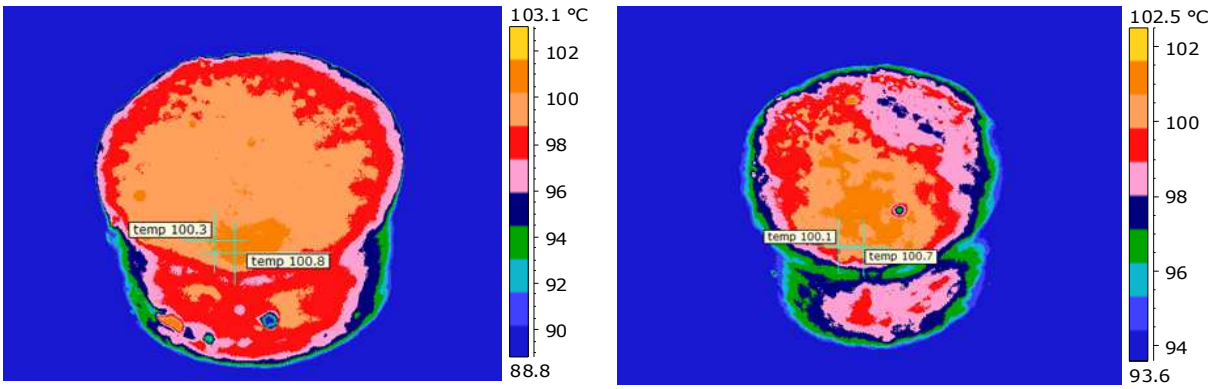
5.3 Koeficijent emisije betona

Iako je u poglavlju 3.1.7 dan pregled literaturnih vrijednosti koeficijenta emisije betona, kako je pokazano, one su često bez dodatnih informacija o tome za koje područje valnih duljina su izmjerene, pri kojoj temperaturi su izmjerene i koliki je bio kut promatranja tijela prilikom mjerenja. Mjerenje koeficijenta emisije je provedeno postupkom prema Orlove-u, kako je opisano u poglavlju 3.1.7.

Udaljenost uzorka od leće kamere prilikom mjerenja koeficijenta emisije bila je $d_{ud} = 50\,cm$. Temperatura zraka prilikom mjerenja emisivnosti $T_o = 23{,}0°C$. Uzorci su prije ispitivanja zagrijavani u sušioniku na $105°C$. Iz svake od mješavina (BM 1-y, BM 2-y, BM 3-y) izrađena su po tri uzorka oblika valjka, na koje je zalijepljena traka s poznatim koeficijentom emisije $\varepsilon = 0{,}95$. Na svakom od uzoraka izmjeren je koeficijent emisije, te je izražena srednja vrijednost i standardna devijacija ispitivanja



Slika 5.10 Uzorak BM 1-y-1 za mjerenje koeficijenta emisije betona



BM 2-y-3 BM 3-y-2

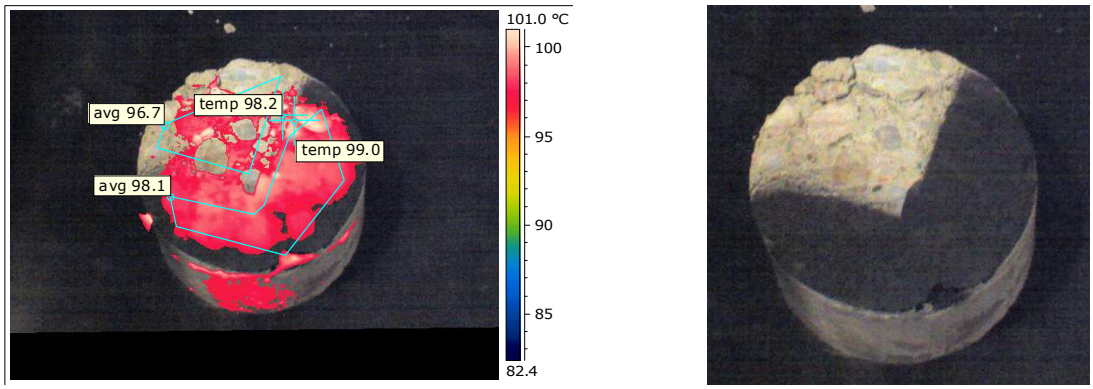
Slika 5.11 Uzorci za mjerenje koeficijenta emisije betona

Tablica 5.7 Izmjerene vrijednosti koeficijenta emisije za korištene uzorke betona pri temperaturi od 100 °C

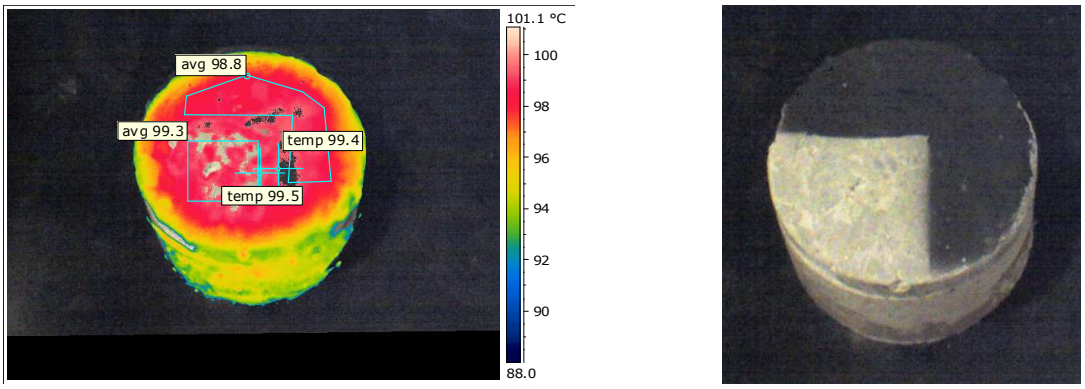
	Mješavina	BM 1-y	BM 2-y	BM 3-y
Koeficijent emisije ε	Srednja vrijednost	0,931	0,950	0,946
	Standardna devijacija	0,0112	0,0068	0,0055

Iz prikazanih termograma ispitivanja koeficijenta emisije, Slika 5.11, vidljivo je da je vrlo teško razlikovati električarsku traku od betona, te je vrlo teško odrediti mjesto na traci i betonu koja su dovoljno blizu jedna drugome da imaju jednaku stvarnu temperaturu i da se može odrediti koeficijent emisije betona. Također, vidljivo je da zrna agregata imaju drugačiju (nižu) prividnu temperaturu od cementne paste, što je izravna posljedica manjeg koeficijenta emisije, Slika 5.10.

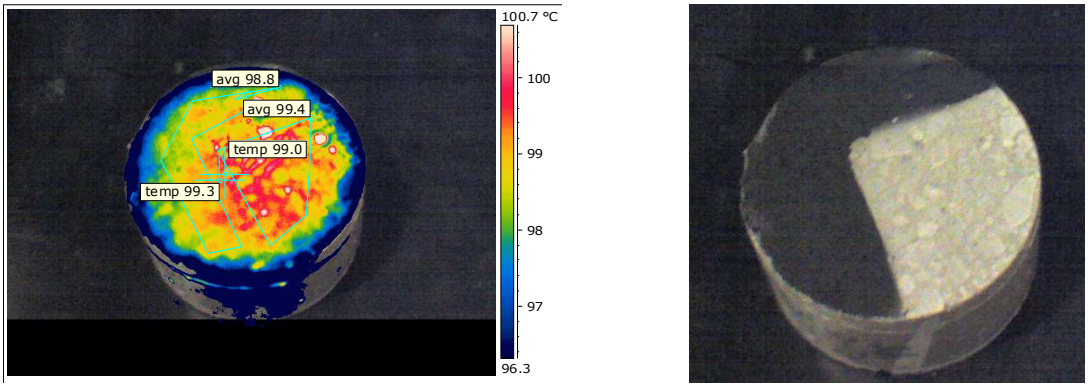
Prosječna vrijednost koeficijenta emisije određena je zbog toga na uzorcima kojima je površina obojana mat bojom visokog koeficijenta emisije ($\varepsilon = 0{,}95$), te je određena srednja vrijednost temperature na površini neobojenog i obojenog dijela betona iz čega slijedi određivanje koeficijenta emisije na način kako je gore opisano, Slika 5.14 - Slika 5.13.



Slika 5.12 Termogram i uzorak BM 1-y-2 za mjerenje koeficijenta emisije betona



Slika 5.13 Termogram i uzorak BM 2-y-1 za mjerenje koeficijenta emisije betona



Slika 5.14 Termogram i uzorak BM 3-y-3 za mjerenje koeficijenta emisije betona

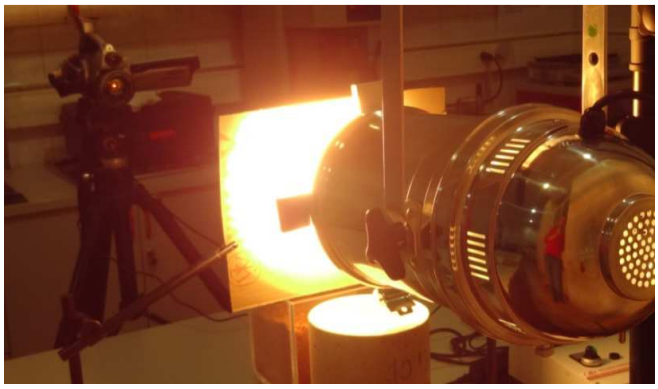
Tablica 5.8 Izmjerene prosječne vrijednosti koeficijenta emisije betona (temperatura 100 °C)

Mješavina	BM 1-y	BM 2-y	BM 3-y
Koeficijent emisije ε	0,928	0,957	0,958

Dobivene vrijednosti koeficijenta emisije, Tablica 5.8, koristit će se u daljnjim razmatranjima u ovome radu.

5.4 Ispitivanje toplinske difuzivnosti betona

Ispitivanje toplinske difuzivnosti betona provedeno je tehnikom zagrijavanja uzorka s jedne strane i praćenjem razvoja temperature na njegovoj suprotnoj površini, Slika 5.15.



Slika 5.15 Sustav za ispitivanje toplinske difuzivnosti

Uzorak je zagrijavan Par 64 reflektorom, u kojem se nalazi halogena lampa snage 1000W. Ispitivanje toplinske difuzivnosti provedeno je na uzorcima betona u obliku diska promjera 10 cm, a debljine 1 cm, Slika 5.16. Točne dimenzije svakog pojedinog uzorka prikazane su u daljnjem tekstu, Tablica 5.9. Uzorci su isušeni, te su prilikom pripreme ispitne konfiguracije nekoliko dana držani u laboratoriju pri relativnoj vlažnosti između 25 i 35%. Korištena su dva načina ispitivanja, kod prvog, nakon prestanka zagrijavanja nije spriječeno daljnje djelovanje

zračenja iz zagrijane lampe, dok je kod drugog načina, nakon zagrijavanja, između lampe i uzorka postavljen zaslon koji sprječava zračenje.



Slika 5.16 Tipični uzorci za ispitivanje toplinske difuzivnosti betona

Tablica 5.9 Debljine uzoraka za ispitivanje toplinske difuzivnosti betona

BM 1-y	**BM 1-y-1**	**BM 1-y-2**	**BM 1-y-3**
Debljina uzorka [mm]	11,76 9,82 10,52 11,78 12,48 9,84 10,59 11,21 10,18 11,71	10,00 9,66 10,76 10,39 9,70 10,47 10,38 9,72 10,62 10,46	10,83 11,19 10,35 10,27 11,35 10,93 9,87 11,45 10,57 9,42
Srednja vrijednost [mm]	10,99	10,22	10,62
Standardna devijacija [mm]	0,927	0,409	0,657
BM 2-y	**BM 2-y-1**	**BM 2-y-2**	**BM 2-y-3**
Debljina uzorka [mm]	9,15 8,67 9,00 10,65 8,63 8,76 9,06 10,46 8,65 8,83 9,72 9,71	11,46 10,28 10,12 11,46 10,75 10,02 9,85 10,69 9,97 10,14	6,57 6,09 5,51 6,27 6,34 6,31 5,81 6,36 5,64 6,17
Srednja vrijednost [mm]	9,27	10,47	6,11
Standardna devijacija [mm]	0,704	0,595	0,344
BM 3-y	**BM 3-y-1**	**BM 3-y-2**	**BM 3-y-3**
Debljina uzorka [mm]	10,25 10,71 9,79 9,75 11,11 10,19 9,52 10,90 9,81 9,43	9,01 9,30 10,02 9,18 8,85 9,56 9,96 8,87 9,96 9,84	9,21 8,88 9,29 9,08 8,84 9,30 9,26 8,82 9,43 9,46
Srednja vrijednost [mm]	10,15	9,46	9,16
Standardna devijacija [mm]	0,590	0,471	0,239

Zaslon je izrađen od XPS-a debljine 3cm koji je presvučen aluminijskom folijom niskog koeficijenta emisije i okrenut prema lampi, kako bi reflektirao zračenje nakon isključivanja lampe i time spriječio dodatno zagrijavanje uzorka, Slika 5.17. Slika 5.18 prikazuje način postavljanja uzoraka pred reflektor u slučaju ispitivanja toplinske difuzivnosti bez korištenja zaslona tijekom hlađenja. Uzorci su tijekom zagrijavanja udaljeni od same lampe 25 cm. U slučaju korištenja zaslona nakon procesa zagrijavanja, odnosno tijekom hlađenja, uzorak je bio udaljen 15 cm od reflektora, odnosno ukupno 40 cm od same lampe, a zaslon je postavljen između lampe i samog uzorka, Slika 5.19.



Slika 5.17 Zaslon za sprječavanje dodatnog zagrijavanja uzorka zračenjem nakon isključivanja lampe



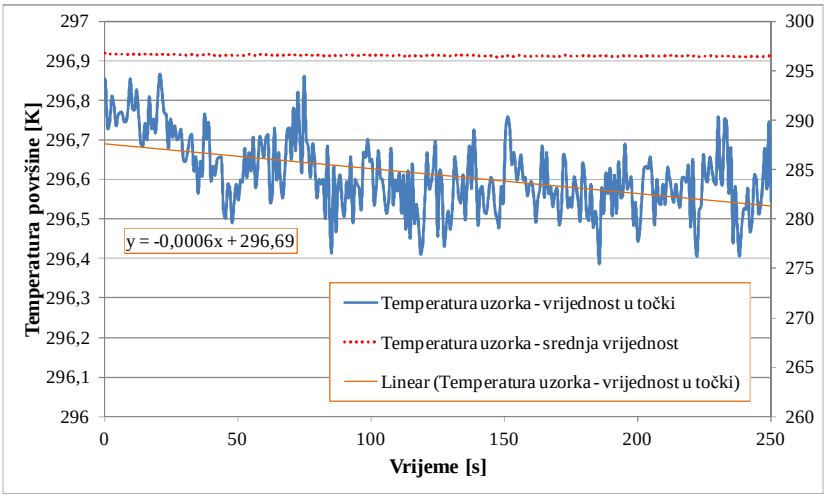
Slika 5.18 Primjer postavljanja uzorka pred reflektor, bez korištenja zaslona tijekom hlađenja



Slika 5.19 Primjer postavljanja uzorka pred reflektor, uz korištenje zaslona tijekom hlađenja

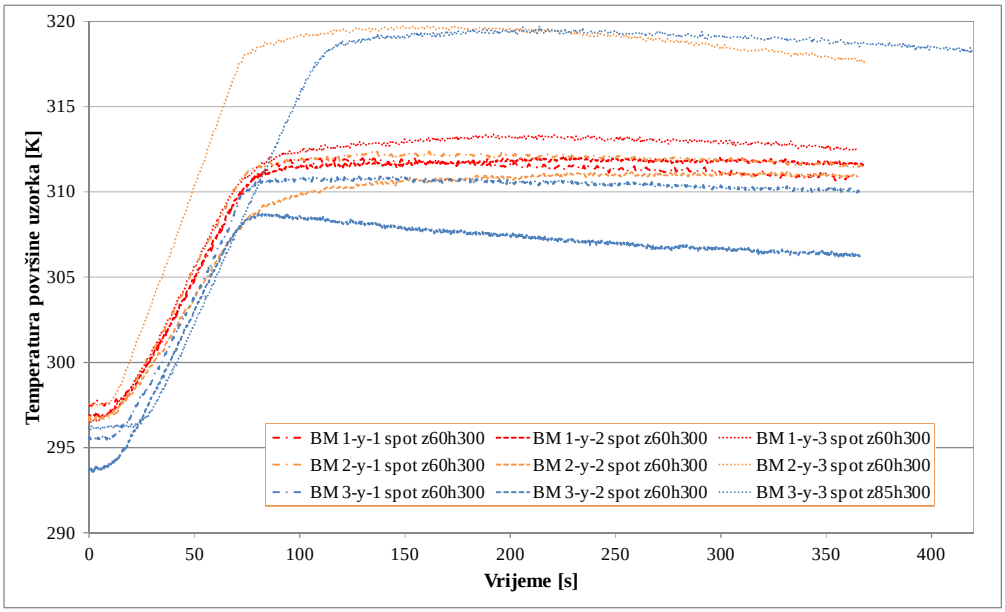
Slika 5.20 prikazuje promjenu temperature uzorka betona tijekom ispitivanja djelotvornosti zaslona izrađenog od XPS-a i aluminijske folije. Ispitivanje djelotvornosti zaslona provedeno je na način da je zaslon zagrijavan pod maksimalnim opterećenjem lampe u trajanju od 60 s, a nakon toga je lampa isključena te je promatrana daljnja promjena temperature na uzorku u trajanju od 180 s. Plava linija predstavlja temperaturu uzorka u Kelvinima u slučajno odabranoj točki na uzorku, uz korištenje detaljne skale temperature, a oscilacije predstavljaju šum mjerenja. Isprekidana crvena linija predstavlja srednju vrijednost temperature uzorka, uz korištenje grublje mjerne skale temperature.

Vidljivo je da se temperatura uzorka ne mijenja značajno tijekom procesa zagrijavanja, odnosno procesa hlađenja uzorka. Može se zaključiti da je zaslon djelotvoran te da se može koristiti kao zaštita od zračenja koje zagrijava uzorak nakon isključivanja lampe, zbog njezine visoke temperature.



Slika 5.20 Temperatura na površini uzorka - zaslon između lampe i uzorka

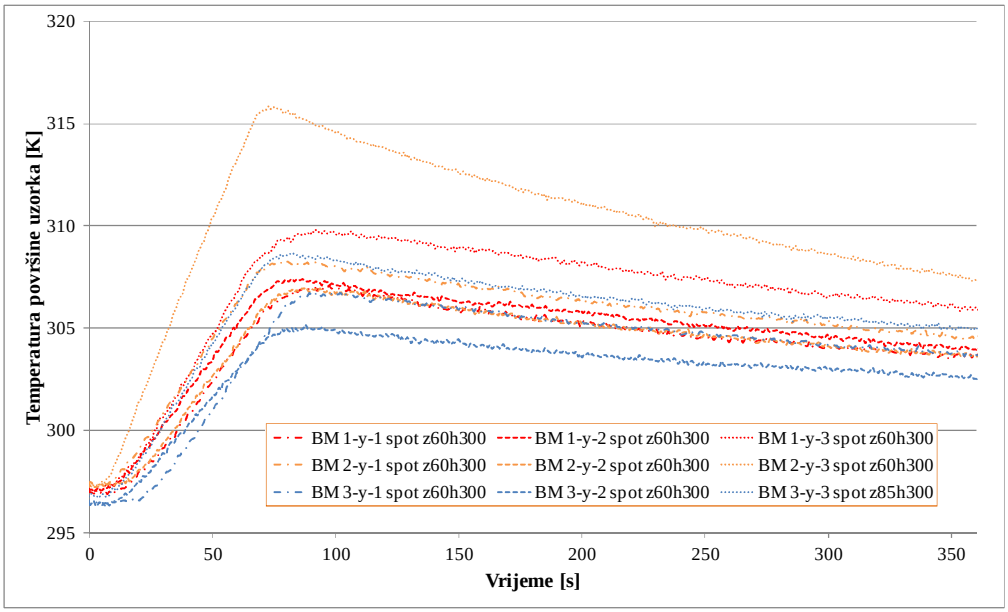
Prilikom ispitivanja toplinske difuzivnosti, uzorci betona oblika diska su zagrijavani punim opterećenjem lampe tijekom 60 s, te je zatim promatrano njihovo hlađenje, bez i uz korištenje zaslona, kako je prethodno spomenuto. Udaljenost kamere od uzoraka bila je 1 m, reflektirana temperatura iznosila je $T_{refl} = 22{,}5\ °C$, dok je temperatura zraka bila $T_{amb} = 21{,}5\ °C$, a relativna vlažnost zraka $RH = 30{,}9\ \%$. Promjena temperature mjerena je brzinom od 3,5 termograma u sekundi (frekvencija 3,5 Hz).



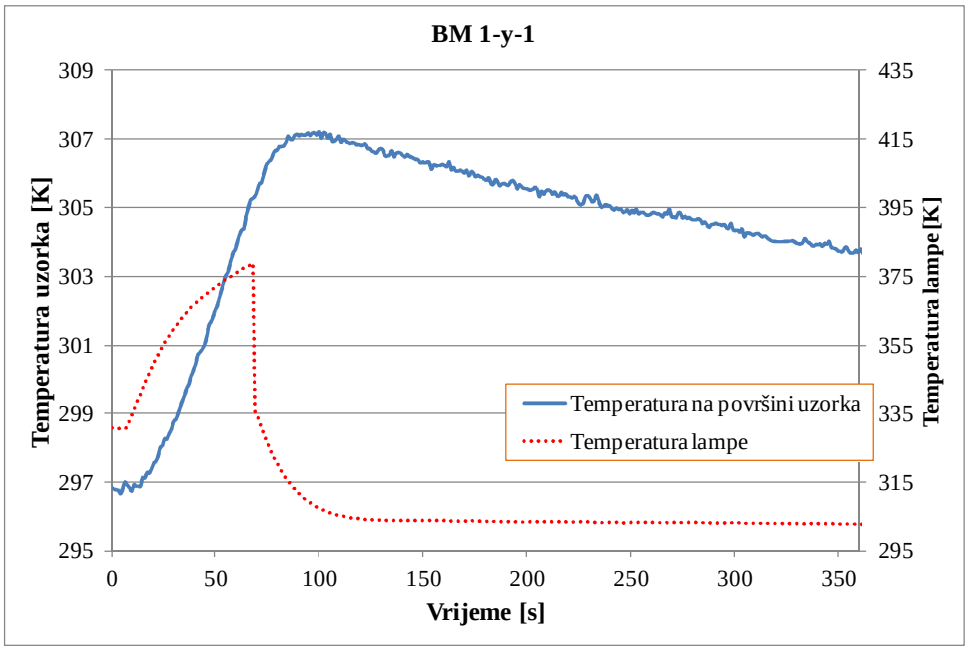
Slika 5.21 Temperature površina uzoraka tijekom ispitivanja toplinske difuzivnosti bez korištenja zaslona

Slika 5.21 prikazuje razvoj temperature na površini uzoraka tijekom ispitivanja toplinske difuzivnosti betona. Pri svim uzorcima je vidljiv linearni rast temperature tijekom procesa zagrijavanja uzoraka, te blagi nastavak rasta temperature nakon isključivanja lampe. Ovaj rast se objašnjava zagrijavanjem uzoraka zbog zračenja vruće lampe. Uzorak BM 2-y-3 ima drugačiju krivulju zagrijavanja zbog njegove male debljine u usporedbi s ostalim uzorcima, srednja vrijednost debljine uzorka je 6,11 mm. Uzorak BM 3-y-3 ima drugačiju krivulju zagrijavanja zbog dužeg trajanja zagrijavanja (85 s) u odnosu na ostale uzorke.

U slučaju uzorka BM 2-y-3 s korištenjem zaslona, Slika 5.22, nagli razvoj temperature na stražnjoj strani uzorka određen je njegovom malom debljinom, Tablica 5.9. Nakon isključivanja izvora toplinske pobude, temperatura stražnje površine nastavlja rasti istom brzinom, dok se ne postigne maksimum nakon čega se hladi prema Newtonovom zakonu hlađenja, Slika 5.22. Debljina uzorka varira zbog fizičkih poteškoća u njihovom rezanju, no sama debljina ne smatra se problematičnom zbog toga što proračun toplinske difuzivnosti uzima u obzir debljinu uzorka.



Slika 5.22 Temperature površina uzoraka tijekom ispitivanja toplinske difuzivnosti uz korištenje zaslona

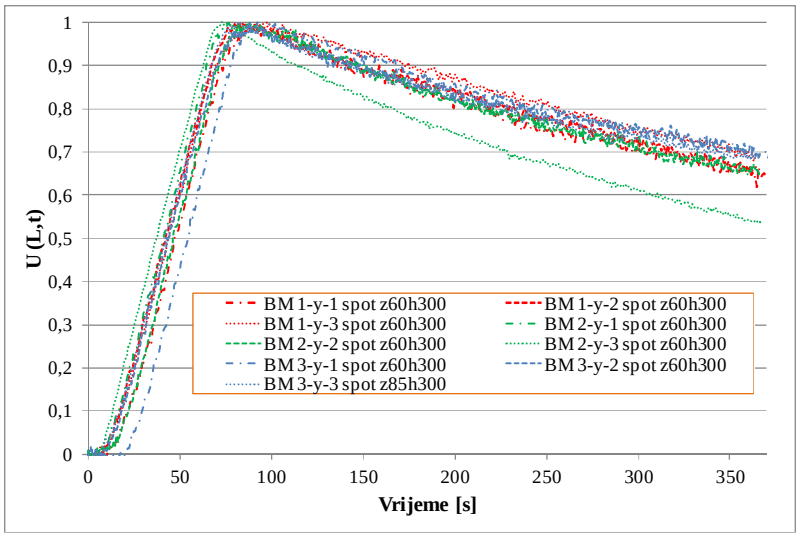


Slika 5.23 Razvoj temperature površine uzorka i temperature lampe uz korištenje zaslona, uzorak BM 1-y-1

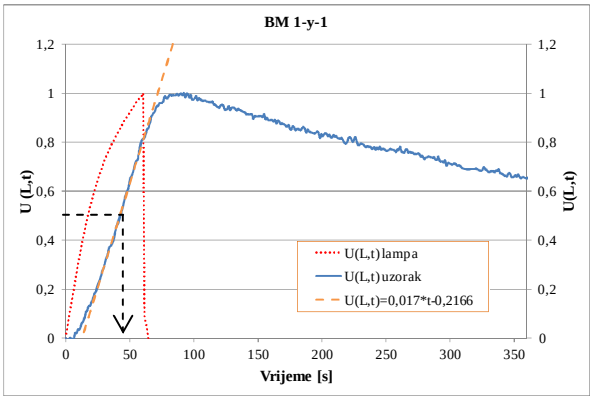
Iz prikazanih krivulja, Slika 5.21 i Slika 5.22 zaključeno je da je potrebno eliminirati utjecaj dodatnog zagrijavanje uzorka zračenjem zbog visoke temperature lampe nakon trenutka kad je ona isključena, zbog produženja vremena postizanja maksimalne temperature stražnje strane uzorka što izravno utječe na rezultate mjerenja.

Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti korišteni u daljnjem tekstu će zbog toga biti samo oni dobiveni analizom rezultata mjerenja uz korištenje zaslona nakon isključivanja lampe.

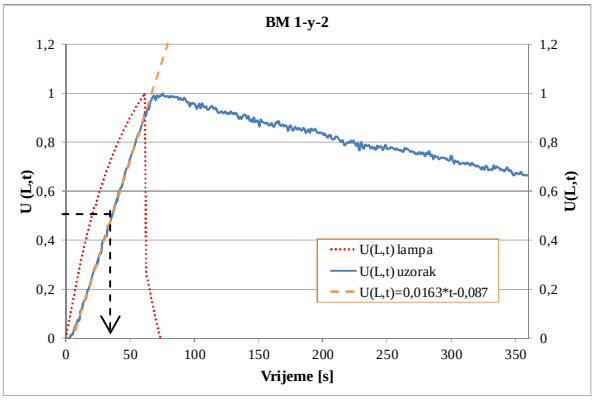
Normalizacijom krivulja razvoja temperature na stražnjoj površini uzorka dobiva se bezdimenzionalna vrijednost $U(L,t)$. $U(L,t)$ je izračunata kako je prikazano u poglavlju 3.11.1, $U(L,t) = \frac{\Delta T(L,t)}{\Delta T_{Max}}$. Slika 5.25 do Slika 5.33 prikazuju linearnu regresijsku analizu uzlaznog dijela krivulje aproksimacije krivulje $U(L,t)$, te je za svaki uzorak očitano vrijeme potrebno da se postigne 30% maksimalne temperature uzorka $t_{0,3}$, 50% maksimalne temperature uzorka $t_{0,5}$ te 70% maksimalne temperature uzorka $t_{0,7}$, mjereno od trenutka kad je počelo zagrijavanje uzorka.



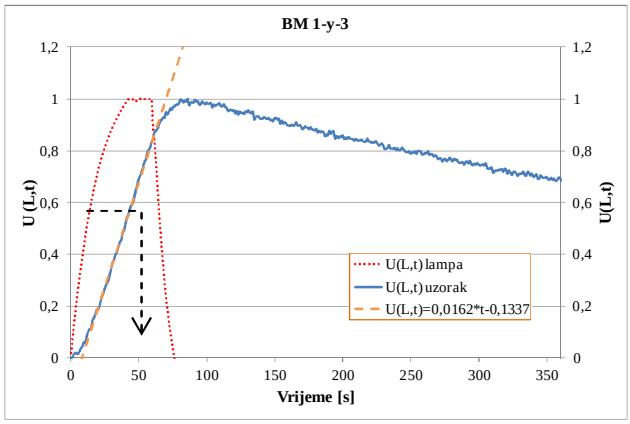
Slika 5.24 Razvoj bezdimenzionalne vrijednosti U(L,t) u vremenu sa stražnje strane uzoraka



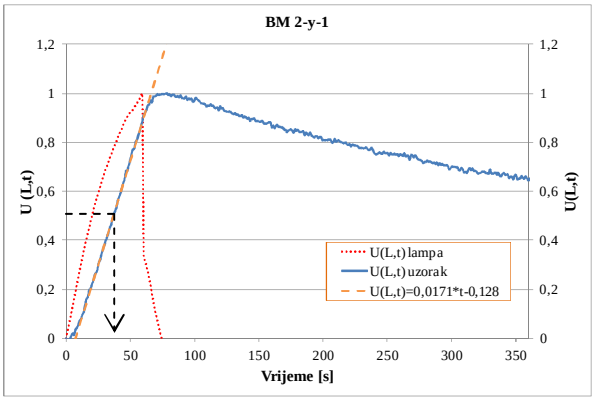
Slika 5.25 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 1-y-1, promatrano od početka zagrijavanja



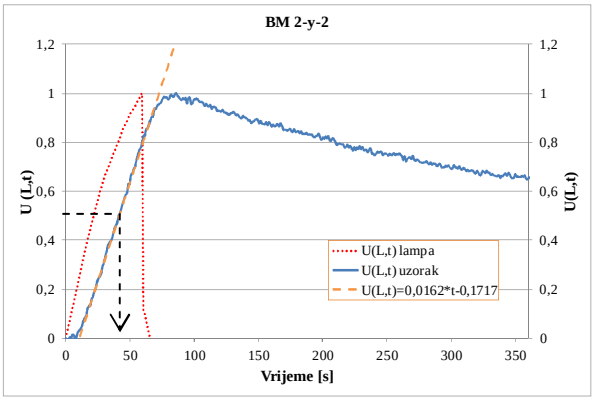
Slika 5.26 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 1-y-2, promatrano od početka zagrijavanja



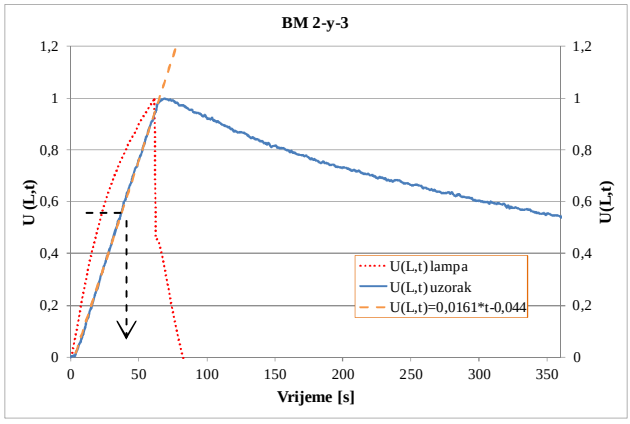
Slika 5.27 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 1-y-3, promatrano od početka zagrijavanja



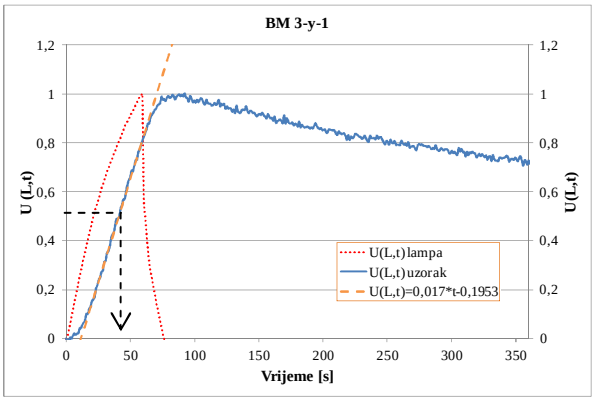
Slika 5.28 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 2-y-1, promatrano od početka zagrijavanja



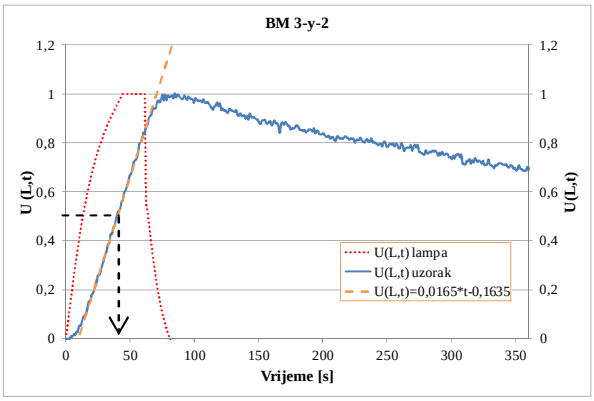
Slika 5.29 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 2-y-2, promatrano od početka zagrijavanja



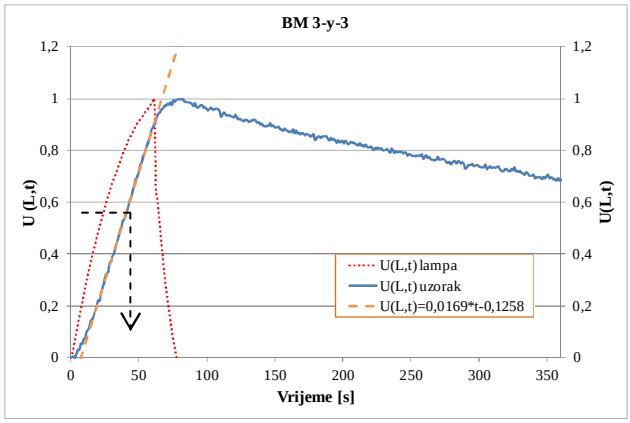
Slika 5.30 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 2-y-3, promatrano od početka zagrijavanja



Slika 5.31 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 3-y-1, promatrano od početka zagrijavanja



Slika 5.32 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 3-y-2, promatrano od početka zagrijavanja



Slika 5.33 Razvoj U(L,t) na stražnjoj strani uzorka BM 3-y-3, promatrano od početka zagrijavanja

Rezultati očitanja bezdimenzionalne vrijednosti $U(L,t)$ te proračun rezultata ispitivanja toplinske difuzivnosti uz analizu prema [Parker et al., 1961], te debljinu uzoraka prema mjerenju, Tablica 5.9, dani su u daljnjem tekstu, Tablica 5.10.

Vrijednosti toplinske difuzivnosti dobivene su iz poznate debljine uzorka L i vremena potrebnog za postizanje 30, 50 i 70% maksimalne temperature sa suprotne strane uzorka ($t_{0,3}, t_{0,5}\ i\ t_{0,7}$). Prema teorijskim razmatranjima [HRN EN 821-2, 2008; Parker et al., 1961; Wróbel & Rdzawski, 2009; ASTM E 1461-01, 2001; MICULESCU et al., 2008; Albers et al., 2001], bilo koja točka na krivulji $U(L,t) \rightarrow t$ analizira se korištenjem slijedeće jednadžbe:

$$\alpha_{diff} = \frac{W_x L^2}{\pi^2 t_x}$$

Za $t_{0,3}$, $W_{0,3}$ iznosi 0,999; za $t_{0,5}$, $W_{0,5}$ iznosi 1,370, dok za $t_{0,7}$, $W_{0,7}$ iznosi 1,894 [HRN EN 821-2].

Tablica 5.10 Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona BM 1-y uz analizu prema [Parker et al., 1961]

U(L,t)	**0,3**	**0,5**	**0,7**	**Debljina uzorka**	**Toplinska difuzivnost prema Parkeru [*10^{-7} m^2/s]**		
t_x	$t_{0,3}$ (s)	$t_{0,5}$ (s)	$t_{0,7}$ (s)	L [m]	$t_{0,3}$	$t_{0,5}$	$t_{0,7}$
BM 1-y-1	30,388	42,153	53,918	0,01099	4,0223	3,9766	4,2980
BM 1-y-2	23,742	36,012	48,282	0,01022	4,4494	4,0228	4,1482
BM 1-y-3	26,772	39,117	51,463	0,01062	4,2666	4,0045	4,2080
		Srednja vrijednost [m^2/s]			**4,2461**	**4,0013**	**4,2181**
		Standardna devijacija [m^2/s]			0,21429	0,023293	0,075420
		Koeficijent varijacije [%]			5,05	0,58	1,79

Tablica 5.11 Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona BM 2-y uz analizu prema [Parker et al., 1961]

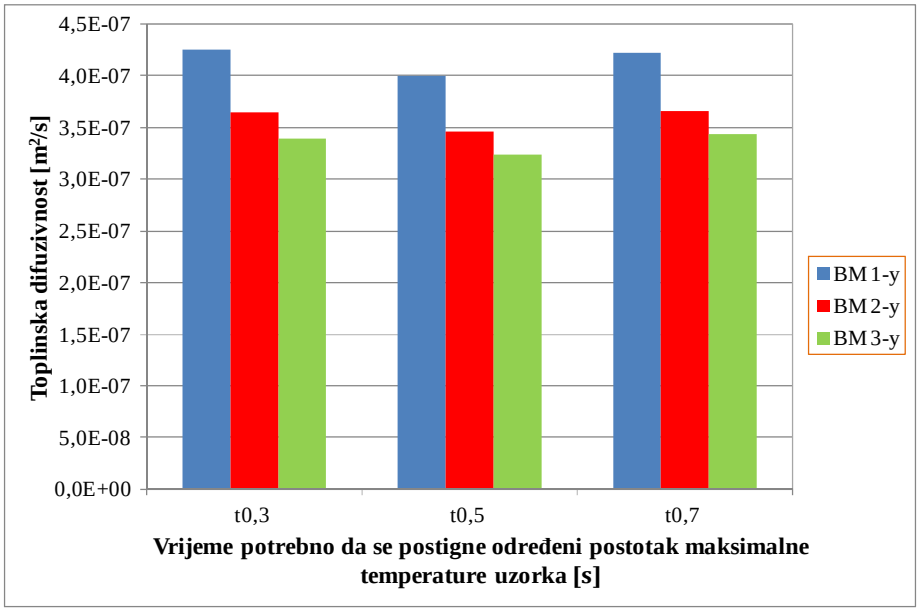
U(L,t)	**0,3**	**0,5**	**0,7**	**Debljina uzorka**	**Toplinska difuzivnost prema Parkeru [*10^{-7} m^2/s]**		
t_x	$t_{0,3}$ (s)	$t_{0,5}$ (s)	$t_{0,7}$ (s)	L [m]	$t_{0,3}$*10^{-7}	$t_{0,5}$	$t_{0,7}$
BM 2-y-1	25,029	36,725	48,421	0,00927	3,4783	3,2509	3,4088
BM 2-y-2	29,117	41,463	53,809	0,01047	3,8136	3,6727	3,9125
BM 2-y-3	21,366	33,789	46,211	0,00611	1,7668	1,5322	1,5488
		Srednja vrijednost [m^2/s]			**3,6460**	**3,4618**	**3,6606**
		Standardna devijacija [m^2/s]			0,23712	0,29824	0,35620
		Koeficijent varijacije [%]			6,50	8,62	9,73

Tablica 5.12 Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona BM 3-y uz analizu prema [Parker et al., 1961]

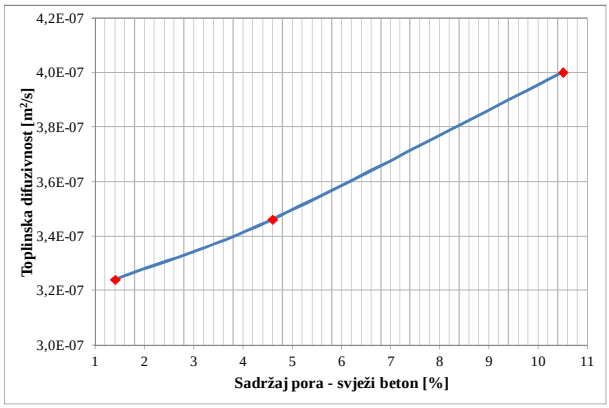
U(L,t)	**0,3**	**0,5**	**0,7**	**Debljina uzorka**	**Toplinska difuzivnost prema Parkeru [*10^{-7} m^2/s]**		
t_x	$t_{0,3}$ (s)	$t_{0,5}$ (s)	$t_{0,7}$ (s)	L [m]	$t_{0,3}$	$t_{0,5}$	$t_{0,7}$
BM 3-y-1	29,135	40,900	52,665	0,01015	3,5763	3,4937	3,7510
BM 3-y-2	28,091	40,212	52,333	0,00946	3,2212	3,0859	3,2781
BM 3-y-3	25,195	37,030	48,864	0,00916	3,3686	3,1432	3,2931
		Srednja vrijednost [m^2/s]			**3,3887**	**3,2410**	**3,4407**
		Standardna devijacija [m^2/s]			0,17839	0,22075	0,26883
		Koeficijent varijacije [%]			5,26	6,81	7,81

Vidljivo je da se vrijednost toplinske difuzivnosti dobivene za ispitivanje betona BM 1-y (Tablica 5.10), BM 2-y (Tablica 5.11) i BM 3-y (Tablica 5.12) uklapa u donje (minimalne) vrijednosti toplinske difuzivnosti kako je dano pregledom literature, kao što je opisano u poglavlju 3.11.1. To se može objasniti činjenicom da je u uzorcima postojala minimalna količina vlage (osušeni su i nakon toga nekoliko dana ostavljeni u prostoru s relativnom vlagom zraka između 25 i 35%). Također, beton je izrađen od dolomita koji se ubraja među vrste agregata koji imaju srednju toplinsku provodljivost, [Mehta & Monteiro, 2006], a time i toplinsku difuzivnost.

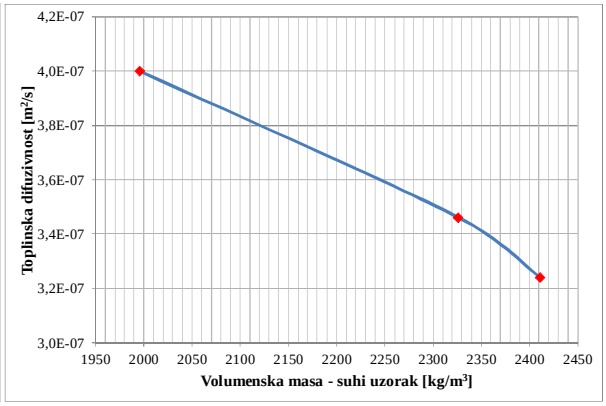
Ukoliko se kao mjerodavna vrijednost toplinske difuzivnosti uzme mjerenje u trenutku kada je bezdimenzionalna veličina $U(L,t)$ postigla 50% maksimalne temperature ($t_{0,5}$), mjereno od trenutka početka zagrijavanja uzorka, može se definirati odnos toplinske difuzivnosti betona u suhom stanju i njegovih fizikalnih i mehaničkih svojstava, Slika 5.35 do Slika 5.38.



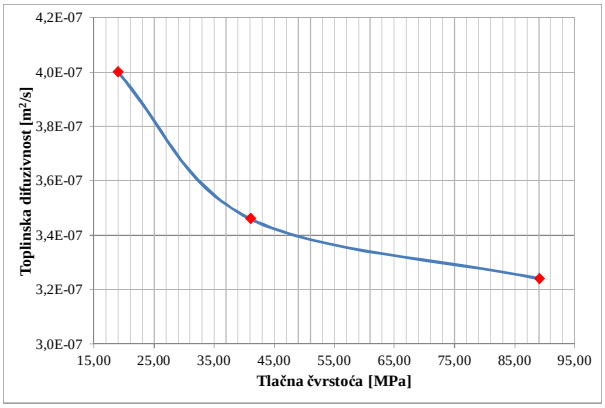
Slika 5.34 Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja toplinske difuzivnosti betona, uz analizu rezultata prema [Parker et al., 1961]



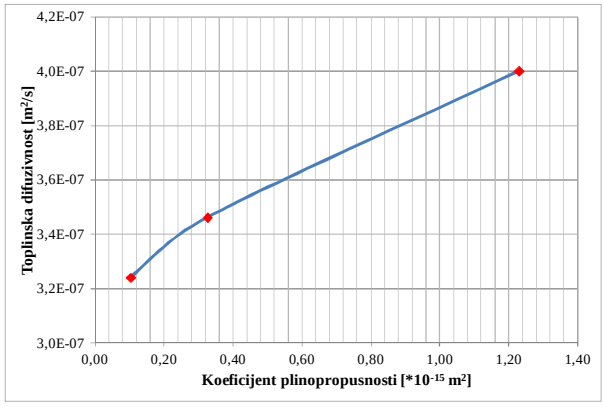
Slika 5.35 Odnos toplinske difuzivnosti i sadržaja pora u svježem betonu



Slika 5.36 Odnos toplinske difuzivnosti i volumenske mase očvrslog betona – suhi uzorak



Slika 5.37 Odnos toplinske difuzivnosti i tlačne čvrstoće betona (28 dana)



Slika 5.38 Odnos toplinske difuzivnosti i koeficijenta plinopropusnosti betona

Vidljivo je iz prikazanog da toplinska difuzivnost betona ovisi o njegovoj volumenskoj masi, na način da toplinska difuzivnost pada s porastom volumenske mase betona u suhom stanju, Slika 5.36. Jednako tako može se vidjeti da toplinska difuzivnost očvrslog betona opada sa smanjenjem sadržaja pora svježeg betona, Slika 5.35, odnosno plinopropusnosti očvrslog betona, Slika 5.38. Povećanjem tlačne čvrstoće betona ispitane nakon 28 dana, toplinska difuzivnost betona se također smanjuje, Slika 5.37. Navedeni rezultati su u skladu s teorijskim postavkama i međuovisnosti toplinske difuzivnosti α_{diff}, toplinske provodljivosti λ_c, specifičnog toplinskog kapaciteta c_p i volumenske mase materijala ρ_m.

5.5 Vrijednost toplinske provodljivosti prema ACI-u

Ukoliko se primjeni izraz prema [ACI Committee 122, 2002], (detaljnije opisano u poglavlju 3.11.3) za beton koji se ispituje u ovom radu, toplinske provodljivosti bit će, Tablica 5.13:

$$\lambda_c = 0{,}072 * e^{0{,}00125*\rho_{m,dry}}$$

Tablica 5.13 Toplinska provodljivost suhog betona proračunata prema [ACI Committee 122, 2002]

Uzorak	Volumenska masa suhog betona [kg/m^3]	Toplinska provodljivost suhog betona [W/mK]
BM 1-y	1995,19	0,87
BM 2-y	2325,57	1,32
BM 3-y	2410,71	1,47

5.6 Mjerenje toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti betona nestacionarnom metodom vrućeg diska

Prilikom ispitivanja, korišteni su uzorci u obliku valjka promjera 10 cm, koji su bili potopljeni u vodi 3 dana prije ispitivanja uz korištenje vode kao kontaktnog sredstva, Slika 5.39.



Slika 5.39 Ispitivanje toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka betona

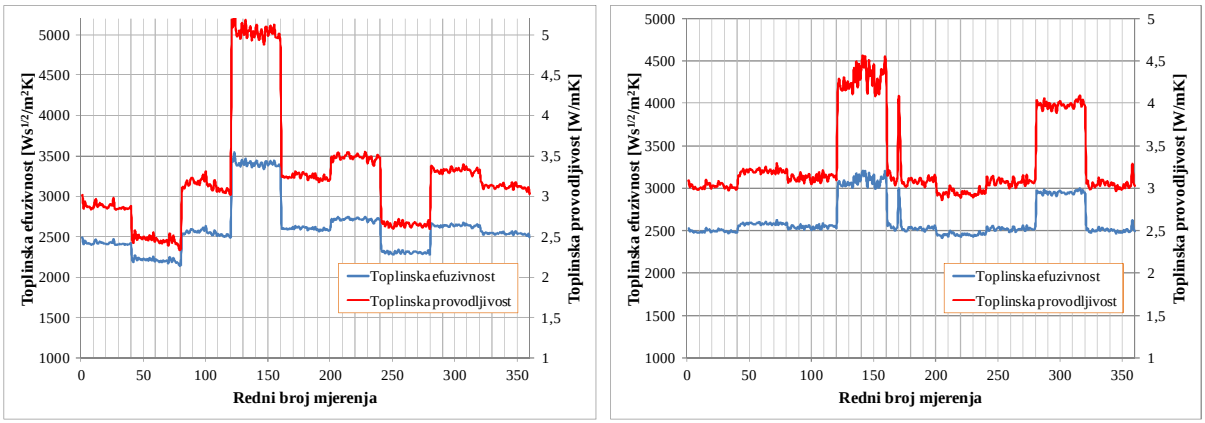


Slika 5.40 Prikaz površine uzorka za ispitivanje toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti betona

Ispitivanja uzorka provedena su na 9 slučajno odabranih mjesta na uzorku, čime se pokušalo dobiti srednju vrijednost ispitivanja na što reprezentativniji način.

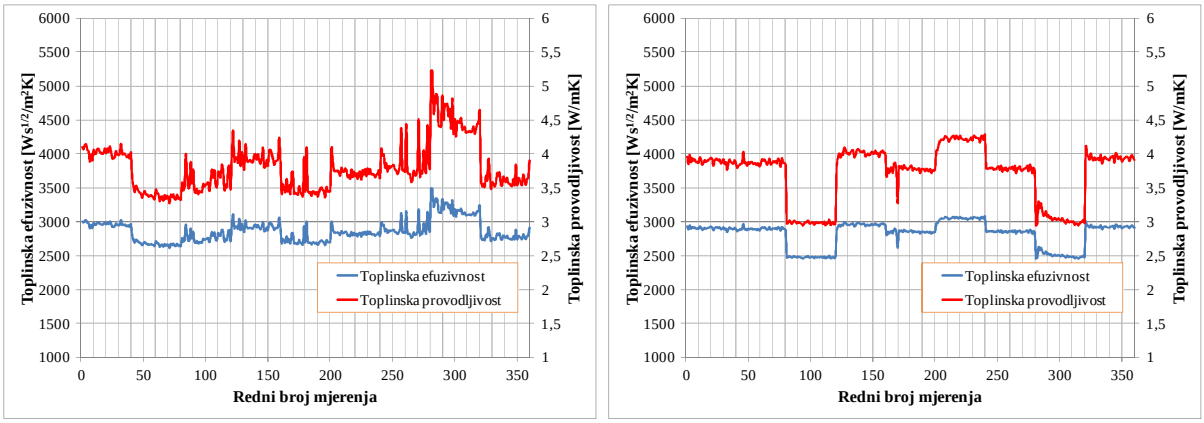
Potreba za ovakvim načinom ispitivanja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti proizlazi iz veličine senzora (promjer diska je 17 mm) u odnosu na veličinu i oblik zrna agregata u betonu koja iznosi 16 mm. Također, beton je kompozit izrađen od agregata i cementne paste, pri čemu svaka komponenta kompozita ima drugačiju toplinsku provodljivost i efuzivnost, a u ovom radu su zanimljiva toplinska svojstva betona kao cjeline. Iz navedenog proizlazi da fizički nije moguće ispitati toplinska svojstva samo jednog od konstituenata betona, a da drugi ne utječe na rezultate mjerenja, Slika 5.40.

Rezultati ispitivanja za po dva uzorka iz svake vrste betona dani su u daljnjem tekstu, Slika 5.41 - Slika 5.43.



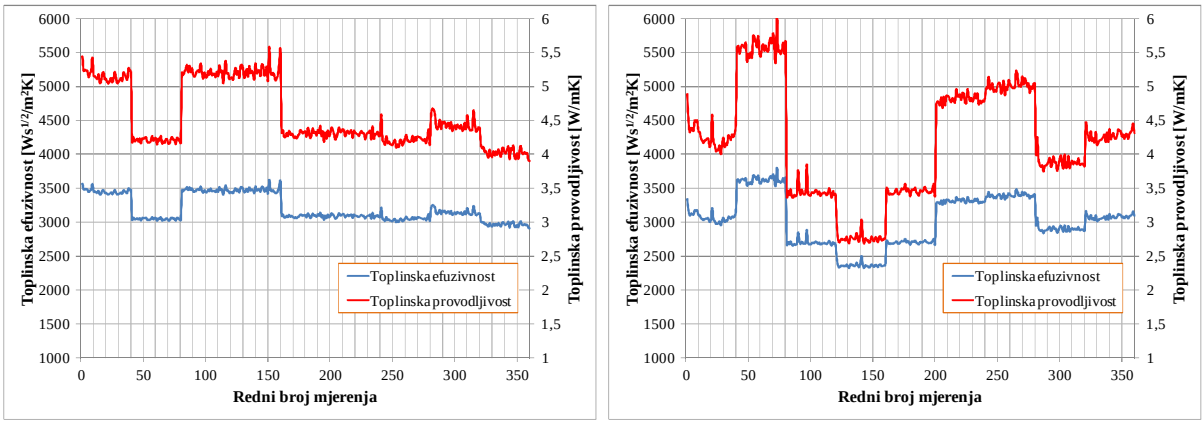
a) b)

Slika 5.41 Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka: a) BM 1-y-1; b) BM 1-y-2



a) b)

Slika 5.42 Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka: a) BM 2-y-2; b) BM 2-y-3



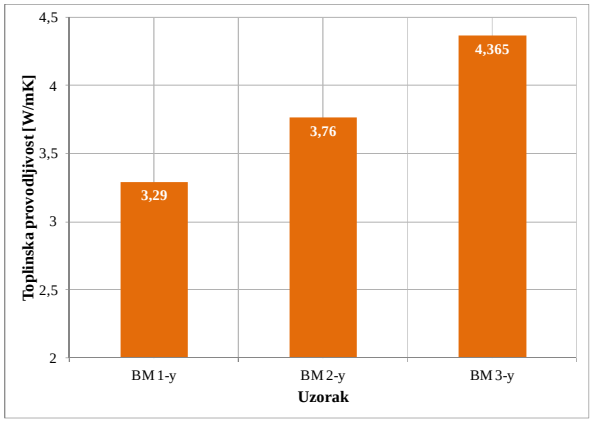
a) b)

Slika 5.43 Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti uzoraka: a) BM 3-y-1; b) BM 3-y-2

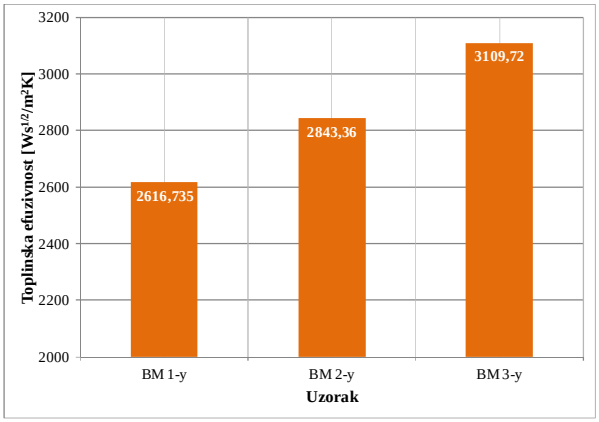
Tablica 5.14 Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti i efuzivnosti betona

Uzorak	**Toplinska provodljivost**		**Toplinska efuzivnost**	
	Srednja vrijednost [W/mK]	Standardna devijacija [W/mK]	Srednja vrijednost [$Ws^{1/2}/m^2K$]	Standardna devijacija [$Ws^{1/2}/m^2K$]
BM 1-y-1	3,26	0,70	2600,04	324,91
BM 1-y-2	3,32	0,46	2633,43	215,62
BM 2-y-2	3,80	0,36	2861,24	161,36
BM 2-y-3	3,72	0,41	2825,48	191,55
BM 3-y-1	4,56	0,46	3201,18	198,63
BM 3-y-2	4,17	0,84	3018,26	375,78

Slika 5.44 i Slika 5.45 prikazuju odnos toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti za tri vrste betona koje su promatrane u ovom radu.



Slika 5.44 Odnos toplinske provodljivosti betona



Slika 5.45 Odnos toplinske efuzivnosti betona

Do sad pokazane rezultate mjerenja toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti betona potrebno je korigirati, zbog toga što prilikom mjerenja nije korištena odgovarajuća kalibracijska krivulja.

Sam postupak korekcije rezultata mjerenja detaljno je opisan u [Jaković & Slaviček, 2010], gdje je pokazano da neovisno koja se kalibracijska krivulja definirana od strane proizvođača uređaja Mathis TCi koristi, parametar $1/m$ je uvijek konstantan.

Tablica 5.15 Vrijednosti parametra 1/m za betone korištene u ovom radu

Uzorak	1/m
BM 1-y	200,32
BM 2-y	214,75
BM 3-y	231,88

Korekcija kalibracije provedena je na osnovi betona poznate toplinske provodljivosti te proračunate toplinske efuzivnosti (uz pretpostavku $c_p = 900\,J/kgK$), a korišteni su uzorci betona izrađeni od recikliranog betona i reciklirane opeke na kojima je u sklopu projekta ECO-SANDWICH ispitana toplinska provodljivost u suhom stanju, Tablica 5.16 i Slika 5.46.

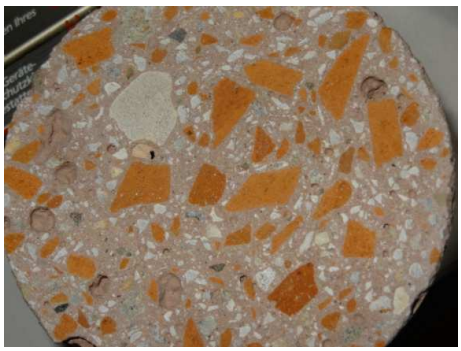
Tablica 5.16 Toplinska provodljivost uzoraka od recikliranog betona i reciklirane opeke u suhom stanju pri 10 °C

Uzorak	Volumenska masa suhog uzorka [kg/m^3]	$\lambda_{10,dry}$ [W/mK]	Toplinska efuzivnost [Ws$^{1/2}$/m^{2}K]
reciklirani beton	2105	0,858	1274,94
reciklirana opeka	1971	0,746	1150,36

Tablica 5.17 prikazuje rezultate korekcije toplinske provodljivosti betona zbog vlažnosti uzoraka i promjene temperature pri kojoj je ispitivanje provedeno. Korekcija je rađena prema [HRN EN ISO 10456, 2008] (kako je opisano u poglavlju 3.11.3) za zasićene uzorke (držani su 7 dana potopljeni u vodi) te za temperaturu od 20 °C. Toplinska efuzivnost je proračunata uz pretpostavku $c_p = 900\,J/kgK$. Koeficijent korekcije f_u uzet je da bude $f_u = 4$, a koeficijent korekcije $f_T = 0{,}001$.

Tablica 5.17 Korigirane vrijednosti toplinske provodljivosti i efuzivnosti uzoraka od recikliranog betona i reciklirane opeke u zasićenom stanju pri 20 °C

Uzorak	Volumenska masa zasićenog uzorka [kg/m^3]	$\lambda_{20,sat}$ [W/mK]	Toplinska efuzivnost [Ws$^{1/2}$/m^{2}K]
reciklirani beton	2298,91	1,150	1542,52
reciklirana opeka	2135,47	1,072	1435,37

a)  b) 

Slika 5.46 Uzorak izrađen od recikliranog betona a) i reciklirane opeke b) u sklopu projekta ECO-SANDWICH

Zbog svega navedenog, korigirane su postojeće kalibracijske krivulje za keramiku uz korištenje vode kao kontaktnog sredstva, koje bi za mjerenu vrijednost parametra 1/m dale vrijednost toplinske provodljivosti i efuzivnosti dobivene ispitivanjem apsolutnom metodom vruće ploče, odnosno proračunom te korekcijom za vlažnost i temperaturu, Tablica 5.17.

5.6.1 Korekcija kalibracijske krivulje betona za toplinsku efuzivnost

Kalibracijska krivulja za efuzivnost, prema proizvođaču 'Mathis TCi' [C-Therm, 2009] ima oblik:

$$\frac{1}{m} = M_2 \cdot e_{eff,2}^2 + M_1 \cdot e_{eff,2} + C$$

pri čemu su:

- M_1 i M_2 - konstante senzora,
- C_{TCi} - konstanta ovisna o senzoru i temperaturi okolnog prostora.

Parametar C_{TCi} se računa prema izrazu:

$$C_{TCi} = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 \,,$$

pri čemu su:

- C_0, C_1, C_2 - konstante senzora,
- T - temperatura okoliša.

Sve navedene konstante dobivene su od strane proizvođača i prikazane su u daljnjem tekstu, Tablica 5.18.

Tablica 5.18 Konstante kalibracije senzora #T039 proizvođača Mathis TCi

Kalibracijska krivulja	**A**	**R_0**	**C_0**	**C_1**	**C_2**
Keramika (toplinska provodljivost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171
Keramika (toplinska efuzivnost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171
Kalibracijska krivulja	**M_1**	**M_2**	**nagib**	**m***	**odsječak**
Keramika (toplinska provodljivost)	-	-	43,52218	0,000821	96,15176
Keramika (toplinska efuzivnost)	0,05309609	$1{,}90\times10^{-6}$	-	-	-

Tijekom ispitivanja temperatura okoliša je bila $T = 20\,°C$, pa vrijednost parametra C_{TCi}, uvažavajući konstante kalibracije (Tablica 5.18) iznosi $C_{TCi} = 46{,}82038$. Prema tome, kalibracijska krivulja koja je definirana od proizvođača za keramičke materijale ima oblik kako slijedi:

$$\frac{1}{m} = 0{,}0000019 \cdot e_{eff,2}^2 + 0{,}05309609 \cdot e_{eff,2} + 46{,}82038$$

Kako su vrijednosti parametara M_1 i M_2 konstantne za senzor kojim su provedena mjerenja, a i bilo je potrebno zadržati isti oblik krivulje (krivulja za tehničku keramiku), izračunata je vrijednost parametra C_{TCi} tako da se dobije ovisnost toplinske efuzivnosti i parametra $1/m$, uz uvjet da se za izmjerene vrijednosti $1/m$ (Tablica 5.15) dobiju vrijednosti toplinske efuzivnosti (Tablica 5.17).

Vrijednosti parametra C_{TCi} su dane za oba betona poznate toplinske efuzivnosti, Tablica 5.19, nakon čega su dobivene jednadžbe korigiranih kalibracijskih krivulja za reciklirani beton i recikliranu opeku.

Tablica 5.19 Vrijednosti parametra 1/m za betone korištene u ovom radu

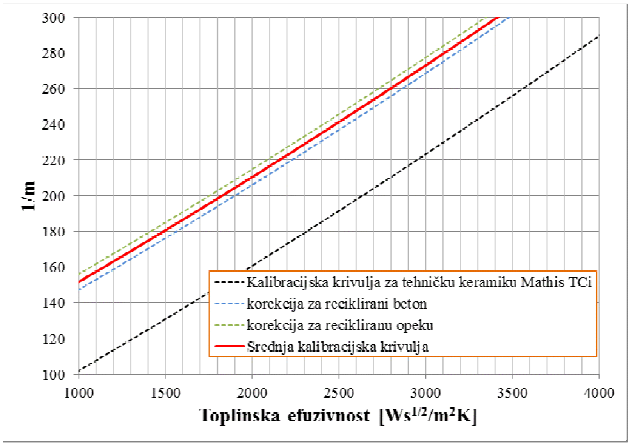
Uzorak	1/m	Toplinska efuzivnost [$Ws^{1/2}/m^2K$]	C_{TCi}
reciklirani beton	179,91	1542,52	92,15343
reciklirana opeka	182,32	1435,37	100,95160

Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku efuzivnost dobivena za reciklirani beton:

$$\frac{1}{m} = 0{,}0000019 \cdot e_{eff,2}^2 + 0{,}05309609 \cdot e_{eff,2} + 92{,}15343$$

Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku efuzivnost dobivena za recikliranu opeku:

$$\frac{1}{m} = 0{,}0000019 \cdot e_{eff,2}^2 + 0{,}05309609 \cdot e_{eff,2} + 100{,}95160$$



Slika 5.47 Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku efuzivnost uređaja Mathis Tci za primjenu na betonu

Slika 5.47 prikazuje kalibracijsku krivulju za tehničku keramiku (prema proizvođaču uređaja Mathis TCi) te korekciju kalibracijske krivulje za dva betona za koja su bila poznate toplinska provodljivost i efuzivnost. Vidljivo je da su korigirane kalibracijske krivulje za reciklirani beton i recikliranu opeku unutar standardne devijacije ispitivanja pomoću Mathis TCi uređaja. Zbog toga je napravljena srednja kalibracijska krivulja za beton koja će se koristiti u daljnjem tekstu za određivanje toplinske efuzivnosti uzoraka betona.

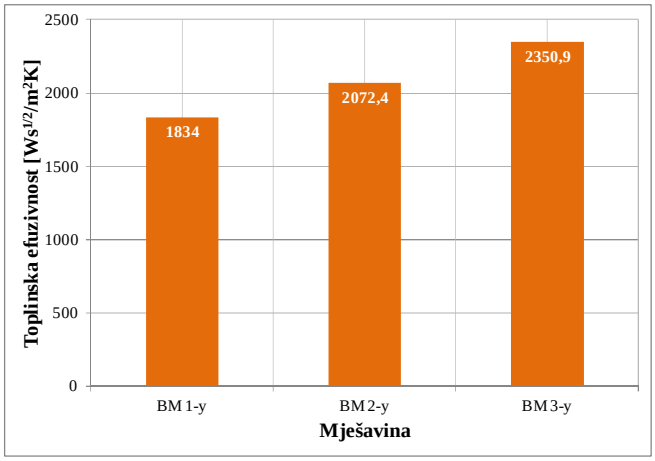
Jednadžba korigirane kalibracijske krivulje za beton korišten u ovom radu glasi:

$$\frac{1}{m} = 0{,}0000019 \cdot e_{eff,2}^2 + 0{,}05309609 \cdot e_{eff,2} + 96{,}55252$$

Tablica 5.20 prikazuje rezultate ispitivanja toplinske efuzivnosti betona BM 1-y, BM 2-y i BM 3-y koji se koriste u ovom radu metodom vrućeg diska uređajem (Mathis TCi), nakon korekcije zbog kalibracije (krivulja Slika 5.47). Rezultati su dani za zasićene uzorke, ispitivane pri temperaturi 20°C.

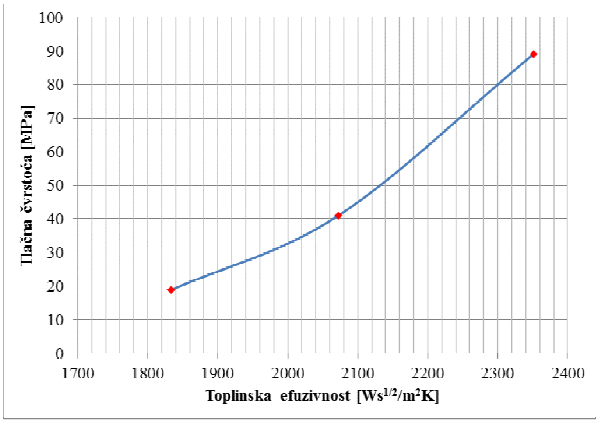
Tablica 5.20 Korigirane vrijednosti parametra toplinske efuzivnosti za betone korištene u ovom radu

Uzorak	**1/m**	**Toplinska efuzivnost [$Ws^{1/2}/m^2K$]**
BM 1-y	200,32	1834,0
BM 2-y	214,75	2072,4
BM 3-y	231,88	2350,9

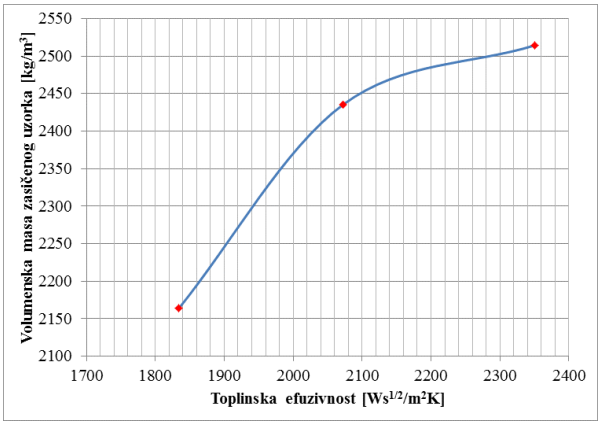


Slika 5.48 Rezultati ispitivanja toplinske efuzivnosti betona metodom vrućeg diska

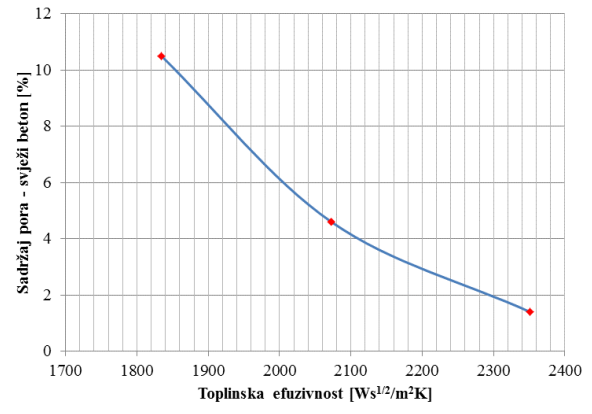
Iz prikazanih rezultata ispitivanja toplinske efuzivnosti betona (Slika 5.49 - Slika 5.52), vidljiv je porast toplinske efuzivnosti s porastom tlačne čvrstoće betona, volumenske mase u zasićenom i suhom stanju, te sadržaja pora u svježem betonu.



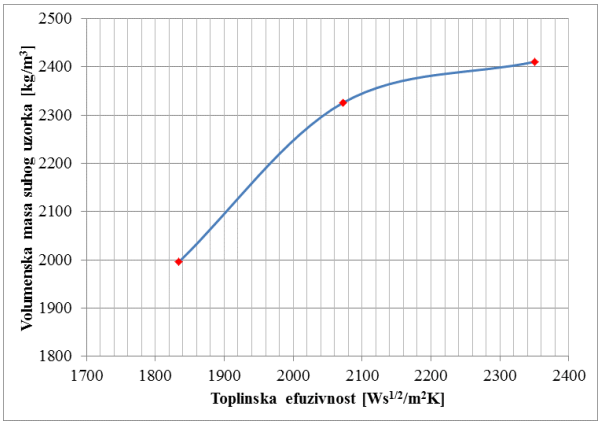
Slika 5.49 Usporedba toplinske efuzivnosti i tlačne čvrstoće betona



Slika 5.50 Usporedba toplinske efuzivnosti i volumenske mase zasićenog uzorka



Slika 5.51 Usporedba toplinske efuzivnosti i sadržaja pora u svježem betonu



Slika 5.52 Usporedba toplinske efuzivnosti i volumenske mase suhog uzorka

5.6.2 Korekcija kalibracijske krivulje betona za toplinsku provodljivosti

Kalibracijska krivulja za toplinsku provodljivost, prema proizvođaču Mathis TCi [C-Therm, 2009] ima oblik:

$$\frac{1}{m - m^*} = k \cdot \lambda_c + y$$

što se također može pisati u obliku:

$$\lambda_c = \frac{\frac{1}{m - m^*} - y}{k}$$

gdje su:

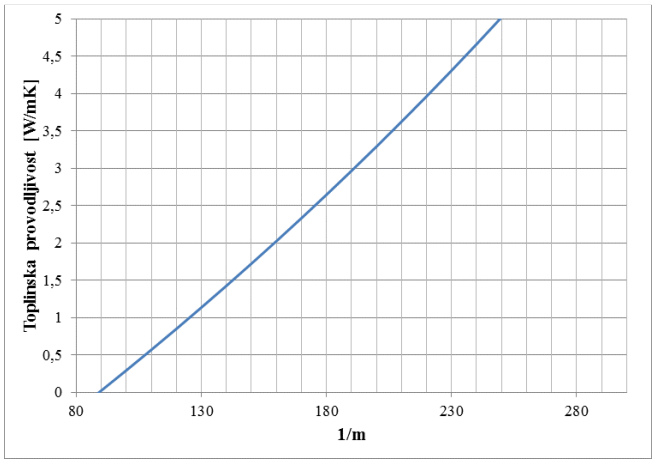
- m^* - parametar iteracijskog algoritma za kalibraciju i računanje λ_c,
- y - odsječak kalibracijske krivulje (pravca) na osi $\frac{1}{m-m^*}$
- k - nagib kalibracijske krivulje.

Dakle, λ_c se određuje na osnovi mjerenja efuzivnosti i parametra m^*, čija se vrijednost određuje kalibriranjem za pojedini senzor i materijal.

Vrijednosti parametara $k, y\ i\ m^*$ za senzor kojim je provedeno ispitivanje i za keramičke materijale prikazane su gore, Tablica 5.18.

Prema tome, kalibracijska krivulja koja je definirana od proizvođača za tehničku keramiku ima oblik kako slijedi, Slika 5.53:

$$\lambda_c = \frac{\frac{1}{m - 0{,}000821} - 96{,}15176}{43{,}52218}$$



Slika 5.53 Kalibracijska krivulja za određivanje toplinske provodljivosti tehničke keramike prema proizvođaču uređaja Mathis TCi

Kako bi se napravila korekcija ove kalibracijske krivulje, odlučeno je da se nagib k i vrijednost parametra m^* zadrže jednake kao i kod krivulje za tehničku keramiku. Vrijednost odsječka y je izračunata tako da se za izmjerene vrijednosti $1/m$ (Tablica 5.19) dobije toplinska provodljivost $\lambda_{20,sat}$, za reciklirani beton i recikliranu opeku, Tablica 5.17.

Vrijednosti parametra y su dane za oba betona poznate toplinske provodljivosti, Tablica 5.21, nakon čega su dobivene jednadžbe korigiranih kalibracijskih krivulja za reciklirani beton i recikliranu opeku, Slika 5.54.

Tablica 5.21 Vrijednosti parametra 1/m za betone korištene u ovom radu

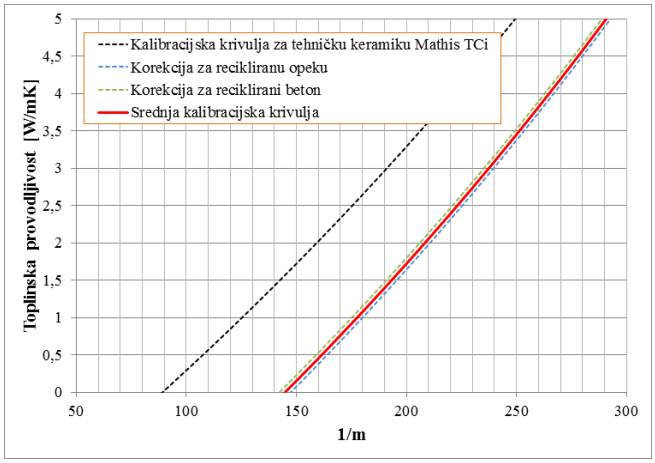
Uzorak	1/m	Toplinska provodljivost [W/mK]	y
reciklirani beton	179,91	1,150	161,0386
reciklirana opeka	182,32	1,072	167,7588

Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku provodljivost dobivena za reciklirani beton:

$$\lambda_c = \frac{\frac{1}{m - 0{,}000821} - 161{,}0386}{43{,}52218}$$

Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku provodljivost dobivena za recikliranu opeku:

$$\lambda_c = \frac{\frac{1}{m - 0{,}000821} - 167{,}7588}{43{,}52218}$$



Slika 5.54 Korekcija kalibracijske krivulje za toplinsku provodljivost uređaja Mathis Tci za primjenu na betonu

Kao i u slučaju korigiranja kalibracijske krivulje za toplinsku efuzivnost, i ovdje je određena srednja kalibracijska krivulja za toplinsku provodljivost betona ispitivanih u ovom radu, Slika 5.54.

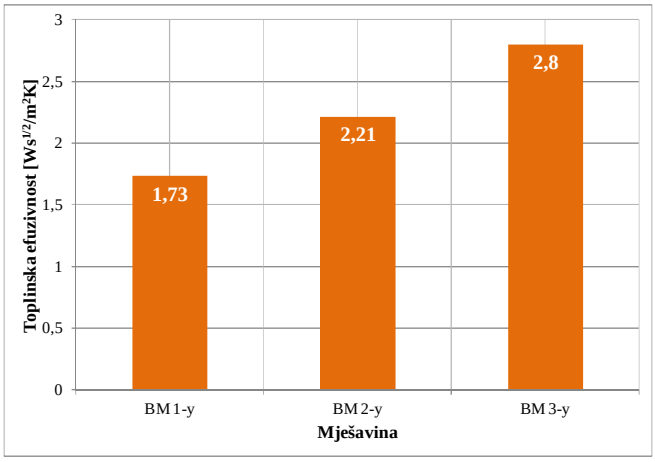
Jednadžba korigirane kalibracijske krivulje za beton korišten u ovom radu glasi:

$$\lambda_c = \frac{\frac{1}{m - 0{,}000821} - 164{,}3987}{43{,}52218}$$

Tablica 5.22 prikazuje rezultate ispitivanja toplinske provodljivosti betona BM 1-y, BM 2-y i BM 3-y koji se koriste u ovom radu metodom vrućeg diska uređajem (Mathis TCi), nakon korekcije zbog kalibracije (krivulja Slika 5.55). Rezultati su dani za zasićene uzorke, ispitivane pri temperaturi 20 °C.

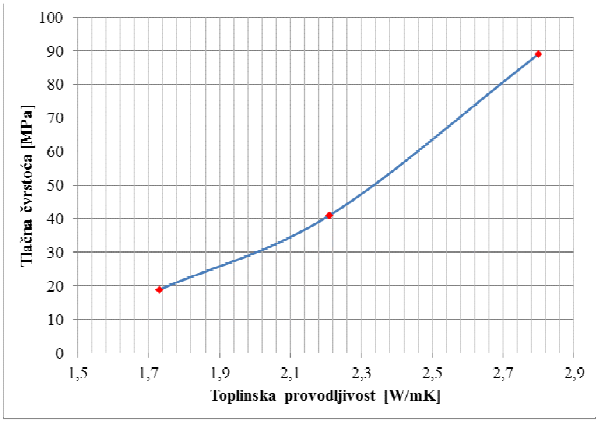
Tablica 5.22 Korigirane vrijednosti parametra toplinske provodljivosti za betone korištene u ovom radu

Uzorak	1/m	Toplinska provodljivost [W/mK]
BM 1-y	200,32	1,73
BM 2-y	214,75	2,21
BM 3-y	231,88	2,80

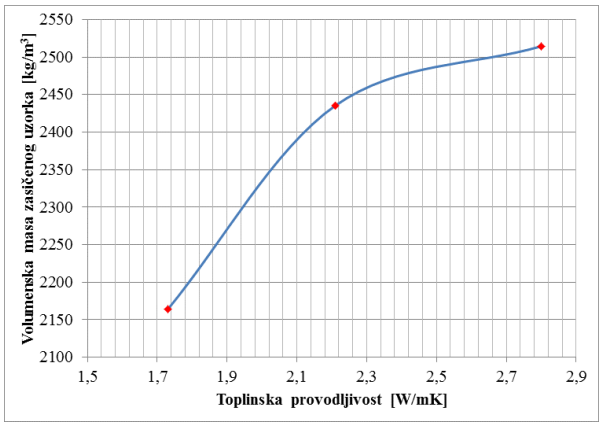


Slika 5.55 Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti betona metodom vrućeg diska

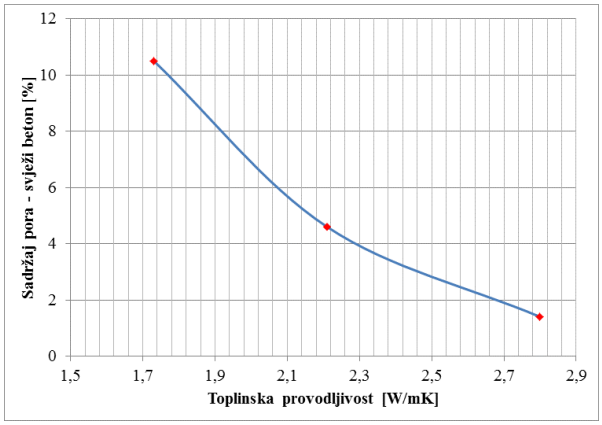
Iz prikazanih rezultata ispitivanja toplinske provodljivosti betona (Slika 5.56 - Slika 5.59), vidljiv je porast toplinske provodljivosti s porastom tlačne čvrstoće betona, volumenske mase u zasićenom i suhom stanju, te sadržaja pora u svježem betonu.



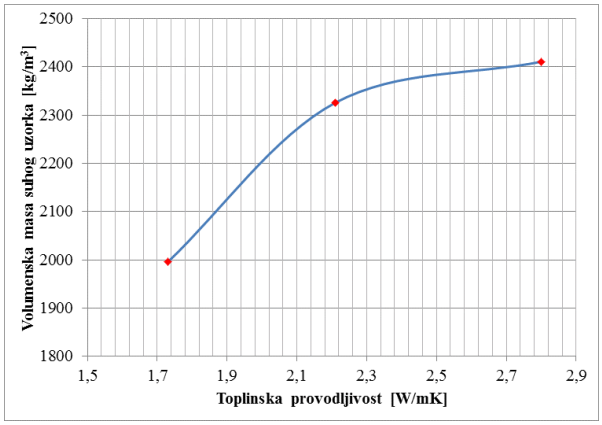
Slika 5.56 Usporedba toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće betona



Slika 5.57 Usporedba toplinske provodljivosti i volumenske mase zasićenog uzorka



Slika 5.58 Usporedba toplinske provodljivosti i sadržaja pora u svježem betonu



Slika 5.59 Usporedba toplinske provodljivosti i volumenske mase suhog uzorka

5.7 Rezultati ispitivanja toplinske efuzivnosti komparativnom metodom

Ispitivanje toplinske efuzivnosti betona provedeno je komparativnom tehnikom, odnosno tehnikom istovremenog zagrijavanja uzorka nepoznate toplinske efuzivnosti i uzorka poznate toplinske efuzivnosti s jedne strane i praćenjem razvoja temperature s iste strane. Uzorci su zagrijavani Par 64 reflektorom, u kojem se nalazi halogena lampa snage 1000W. Ispitivanje toplinske efuzivnosti je provedeno na uzorcima betona u obliku valjka promjera 10 cm, Slika 5.60. Ispitivani uzorci čuvani su u laboratorijskim uvjetima, na relativnoj vlažnosti 25 – 35% tijekom 14 dana.



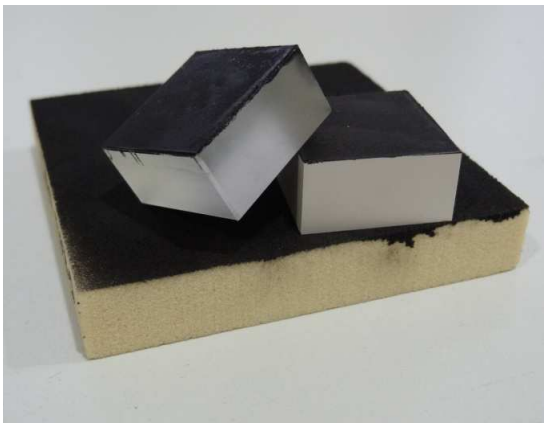
Slika 5.60 Sustav za ispitivanje toplinske efuzivnosti

I referentni uzorak (uzorak poznate toplinske efuzivnosti) i uzorak betona nepoznate toplinske efuzivnosti su obojani tako da imaju što sličniji koeficijent emisije ($\varepsilon = 0{,}95$) i kako bi apsorbirali zračenje s lampe na što sličniji način, Slika 5.61. Kao referentni uzorci korištena

su tri materijala; polimer (Pyrex), keramika (Pyroceram) te pjena (LAF6720), Slika 5.62. Karakteristike referentnih uzoraka dane su u daljnjem tekstu, Tablica 5.9.



Slika 5.61 Uzorak betona za ispitivanje toplinske efuzivnosti



Slika 5.62 Uzorci poznate toplinske efuzivnosti

Tablica 5.23 Svojstva referentnih materijala za ispitivanje toplinske efuzivnosti

Uzorak	**Volumenska masa [kg/m^3]**	**Deklarirana toplinska provodljivost [W/mK]**	**Deklarirana toplinska efuzivnost [Ws½/m²K]**	**Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]**	**Deklarirana toplinska difuzivnost [m^2/s]**
Polimer (Pyrex)	2233	1,156	1454,8	819,9	$6{,}31\times10^{-7}$
Keramika (Pyroceram)	2626	3,966	2966,4	844,9	$1{,}787\times10^{-6}$
Pjena (LAF6720)	323	0,088	172,9	1051,7	$2{,}59\times10^{-7}$

Specifični toplinski kapacitet referentnih uzoraka (Tablica 5.23) je proračunat iz dostupnih podataka o toplinskoj efuzivnosti, toplinskoj provodljivosti i volumenskoj masi uzoraka, prema izrazu:

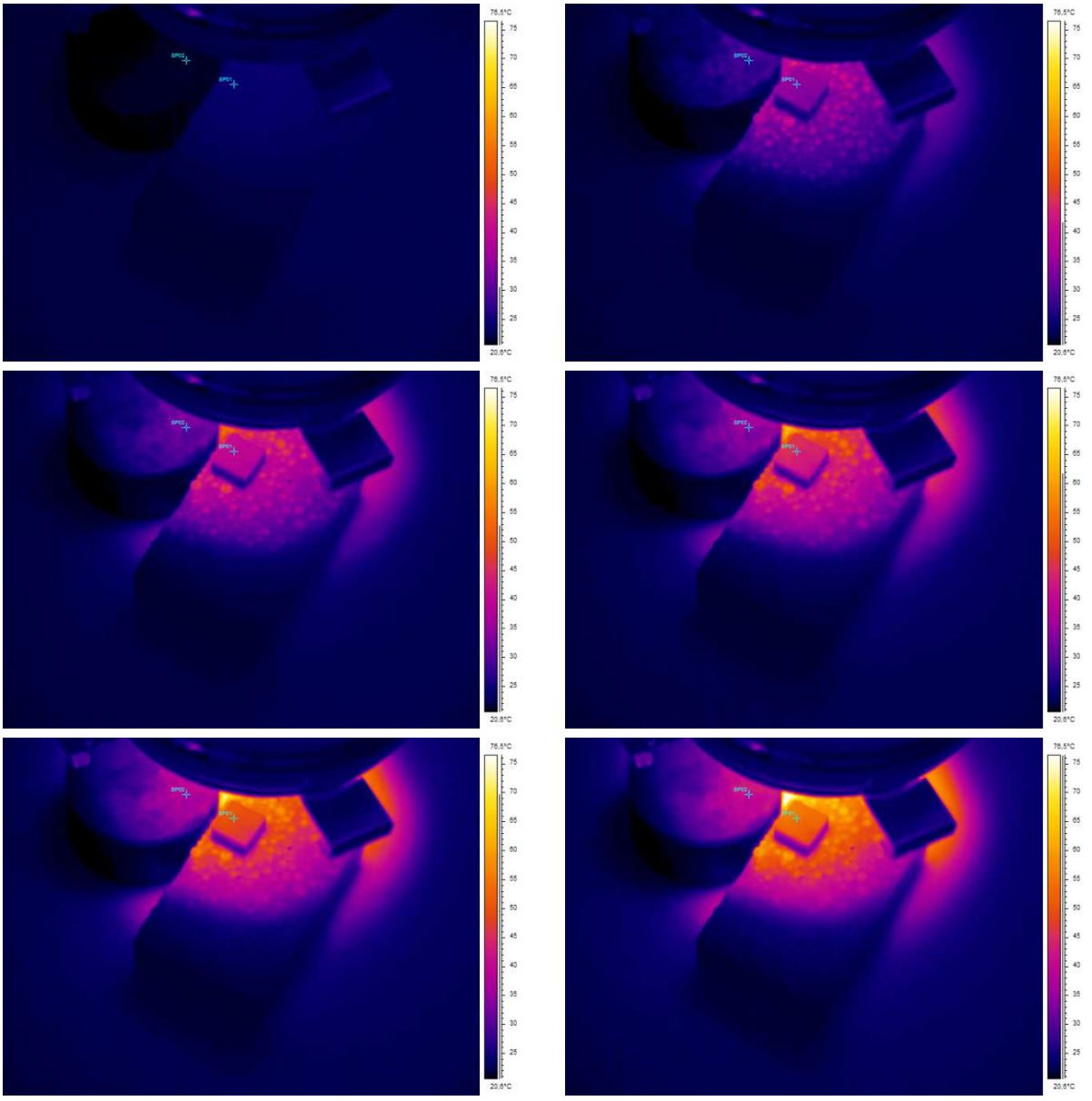
$$c_p = \frac{{e_{eff}}^2}{\lambda_c \rho_m}$$

Toplinska difuzivnost referentnih uzoraka, Tablica 5.23 je proračunata iz dostupnih podataka o toplinskoj efuzivnosti i toplinskoj provodljivosti, prema izrazu:

$$\alpha_{diff} = \frac{{\lambda_c}^2}{{e_{eff}}^2}$$

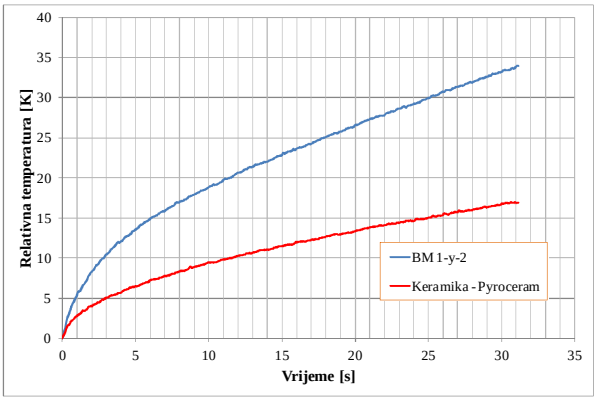
Slika 5.63 prikazuje sekvencu termograma neposredno prije i tijekom zagrijavanja uzoraka za ispitivanje toplinske efuzivnosti komparativnom metodom.

Tijekom samog ispitivanja, referentni uzorak i uzorak betona postavljeni su jedan uz drugoga u središte lampe, udaljeni 60 cm od same lampe, kako bi se osiguralo da oba uzorka budu zagrijavani jednakom snagom.

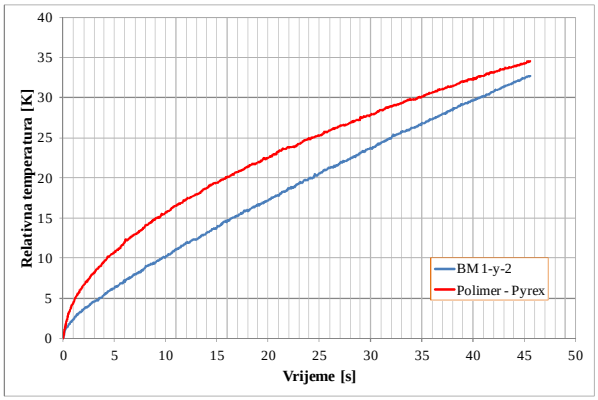


Slika 5.63 Sekvenca termograma neposredno prije i tijekom zagrijavanja uzorka betona i referentnog uzorka u ukupnom trajanju od 30 s

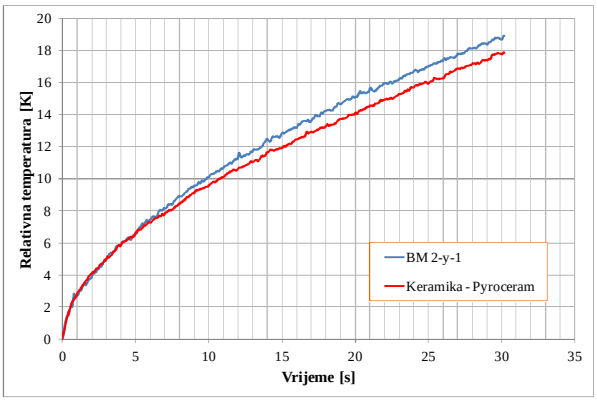
Zagrijavanje uzoraka trajalo je 30 s, pri čemu je praćen razvoj temperature površine referentnog uzorka i uzorka betona, s frekvencijom bilježenja porasta temperature (snimanja termograma) od 3,5 Hz, Slika 5.64 do Slika 5.69.



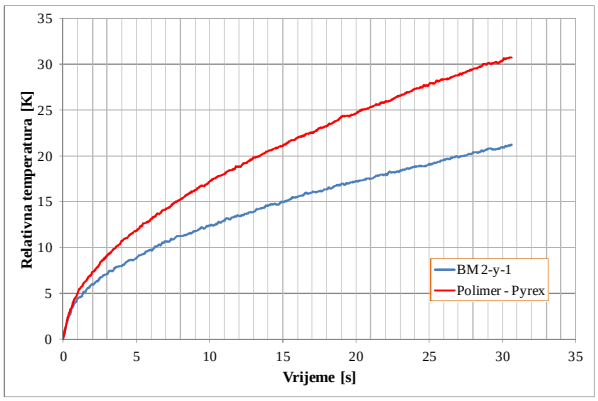
Slika 5.64 Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyroceram)



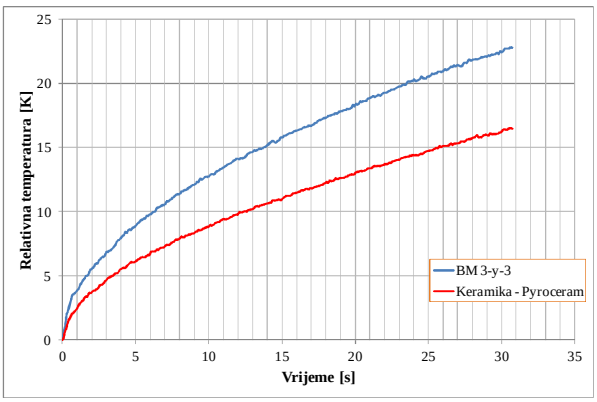
Slika 5.65 Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyrex)



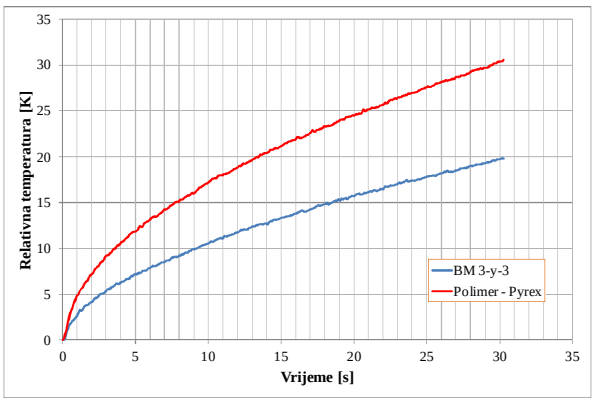
Slika 5.66 Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyroceram)



Slika 5.67 Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyrex)



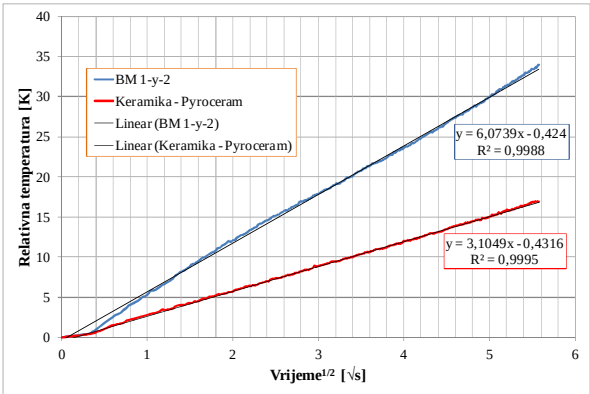
Slika 5.68 Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyroceram)



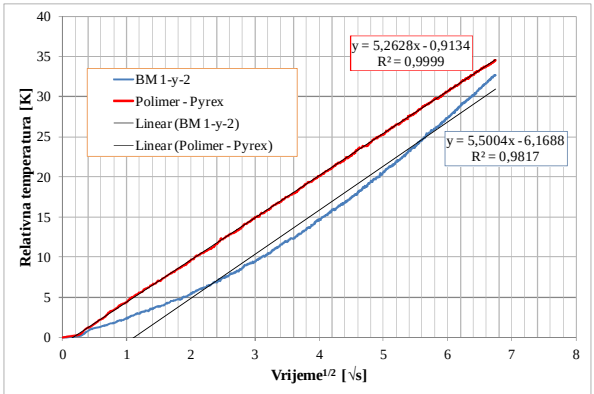
Slika 5.69 Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyrex)

Krivulja rasta relativne temperature površine referentnog uzorka i uzorka betona (temperature iznad temperature uzorka prije zagrijavanja) je zatim nacrtana u odnosu na drugi

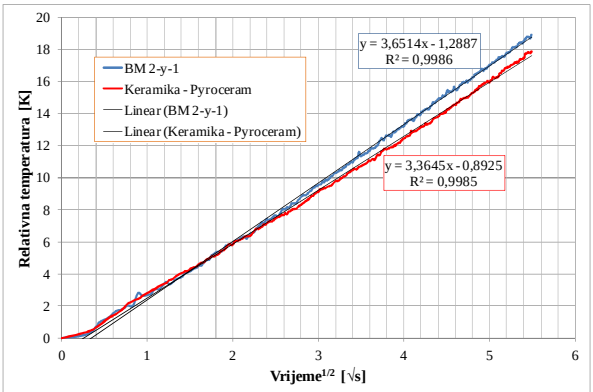
korijen iz vremena. Na taj način dobiven je linearni odnos promjene relativne temperature i vremena, te je napravljena linearna regresijska analiza nad skupom podataka za beton te referentni uzorak, Slika 5.70 do Slika 5.75.



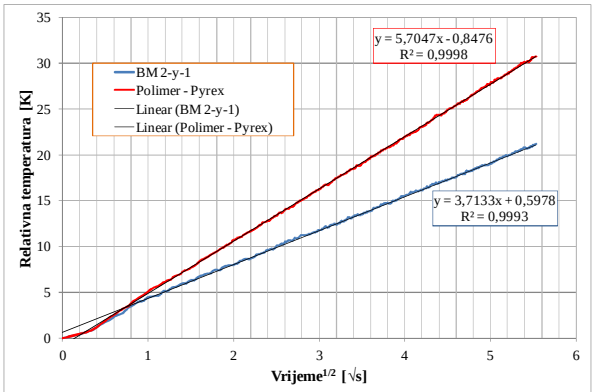
Slika 5.70 Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyroceram)



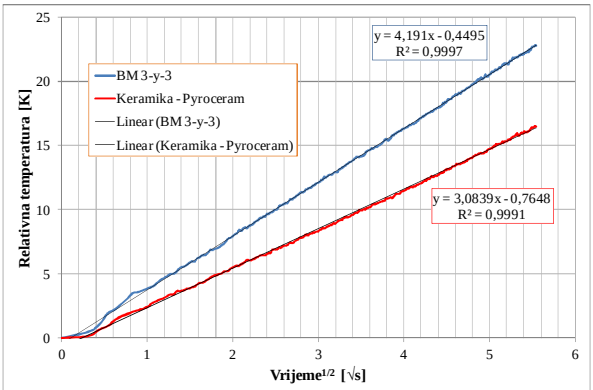
Slika 5.71 Razvoj temperature uzorka BM 1-y-2 i referentnog materijala (pyrex)



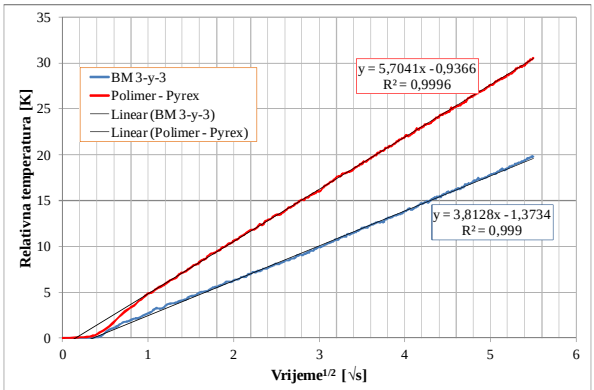
Slika 5.72 Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyroceram)



Slika 5.73 Razvoj temperature uzorka BM 2-y-1 i referentnog materijala (pyrex)



Slika 5.74 Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyroceram)



Slika 5.75 Razvoj temperature uzorka BM 3-y-3 i referentnog materijala (pyrex)

Ukoliko se promatra odnos nagiba pravca regresije referentnog uzorka i uzorka betona, moguće je odrediti odnos između toplinskih efuzivnosti dvaju promatranih materijala, kako je definirano u poglavlju 3.11.6.

$$\frac{e_{eff,BM\ x-y}}{e_{eff,ref}} = \frac{k_{eff,ref}}{k_{eff,BM\ x-y}},$$

gdje su:

$e_{eff,BM\ x-y}$ - toplinska efuzivnost uzorka betona mješavine BM x-y

$e_{eff,ref}$ - toplinska efuzivnost referentnog uzorka

$k_{eff,BM\ x-y}$ - koeficijent nagiba pravca regresije pri ispitivanju toplinske difuzivnosti uzorka betona mješavine BM x-y

$k_{eff,ref}$ - koeficijent nagiba pravca regresije pri ispitivanju toplinske difuzivnosti referentnog uzorka

Tablica 5.24 prikazuje rezultate ispitivanja toplinske efuzivnosti betona komparativnom metodom.

Tablica 5.24 Rezultati ispitivanja toplinske efuzivnosti betona komparativnom metodom

Uzorak	**Toplinska efuzivnost [Ws½/m²K]**	
	Referentni materijal	
	Polimer (Pyrex)	Keramika (Polyceram)
BM 1-y-2	1391,96	1516,39
BM 2-y-1	2234,99	2733,32
BM 3-y-3	2176,44	2182,79

Rezultati dobiveni komparativnom metodom se razlikuju od rezultata dobivenih nestacionarnom metodom vrućeg diska uređajem Mathis TCi. Dobivena je razlika u rezultatima ispitivanja od približno 30 %, pri čemu svakako do utjecaja dolazi činjenica da je u slučaju ispitivanja Mathis TCi uređajem ispitivan zasićeni uzorak, dok je kod komparativne tehnike ispitivan uzorak držan nekoliko dana na zraku, što mu je smanjilo vlažnost.

Kako se dobiveni rezultati nisu mogli usporediti s literaturnim podacima za betone (zbog nedostatka istih) prihvaćene su vrijednosti dobivene korištenjem uređaja Mathis TCi, i njih se koristi u daljnjem tekstu. Pri tome se želi naglasiti da je za korištenje komparativne tehnike potrebno provesti daljnja istraživanja kako bi se ovdje prikazani rezultati potvrdili.

5.8 Koeficijent refleksije toplinskog vala

Koeficijent refleksije toplinskog vala izračunat je korištenjem rezultata mjerenja toplinske efuzivnosti materijala, poglavlje 5.6.1, prema izrazu danom u poglavlju 3.6.2.

U slučaju prijelaza između betona i zraka (zrak je simuliran ugrađenim defektima izrađenima od XPS-a), vrijednosti koeficijenta refleksije dane su u daljnjem tekstu (Tablica 5.25).

Tablica 5.25 Koeficijent refleksije toplinskog vala

Granica	BM 1-y / XPS	BM 2-y / XPS	BM 3-y / XPS
Koeficijent refleksije	-0,942	-0,948	-0,954

Kako je vidljivo iz rezultata (Tablica 5.25) vrijednosti koeficijenta refleksije toplinskog vala u slučaju da se u betonu nalazi zrak (simuliran XPS-om) vrlo su blizu vrijednosti “-1”. To znači da se očekuje da će snaga povratnog signala, toplinskog vala reflektiranog na sučeljku, biti vrlo dobra.

Potrebno se ovdje i ograditi, jer ukoliko se radi o oštećenju koje je duboko ili maleno, povratni valovi neće biti otkriveni korištenjem IC kamere zbog njihovog brzog prigušenja u betonu (u slučaju dubokih oštećenja), odnosno ograničene povratne energije, (mala oštećenja).

6 REZULTATI I ANALIZA ISPITIVANJA IC TERMOGRAFIJOM

6.1 Prethodna obrada sekvenci termograma

Kako bi se u naknadnoj obradi moglo manipulirati podacima dobivenima tijekom ispitivanja, bilo je potrebno provesti nekoliko radnji koje će ovdje biti opisane.

Naknadna obrada rezultata ispitivanja provedena je u programskom paketu MatLab, odnosno grafičkom sučelju Ir_view.

Najprije je bilo potrebno seriju 2D termograma spremiti kao sekvencu, stvarajući time 3D skup podataka. Koristeći programski paket FLIR ThermaCAM^{TM} Researcher Pro 2.9, termogrami su pretvoreni u MatLab binarni oblik (.mat). Svaki pojedinačni termogram definiran je kao matrica kod koje su retci i stupci pojedini pikseli termograma, a vrijednosti su izmjerene temperature površine uzorka. Matrice su nakon toga transformirane u array, odnosno 3D matricu čime je dobivena mogućnost matematičke obrade u programskom paketu MatLab.

Zbog potrebe ograničenja prevelike količine podataka i smanjenja moći računala korištenog za analizu sekvence termograma bilo je potrebno smanjiti broj piksela u termogramu, a time i broj piksela u sekvenci termograma.

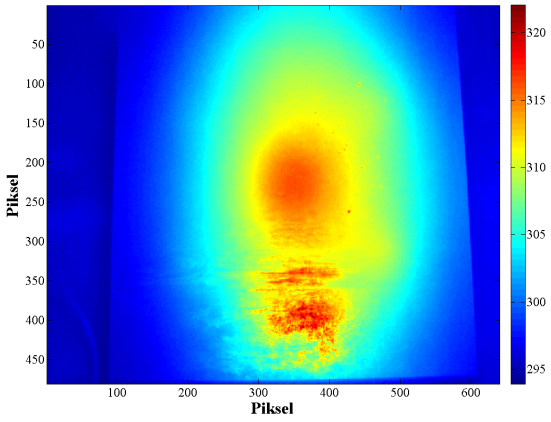
Računalo koje je korišteno:

- RAM: 4GB
- Procesor: Intel Core i5 CPU 650@3,20 GHz

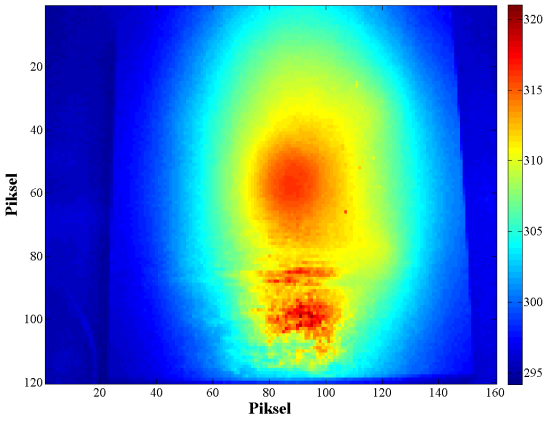
Termogram rezolucije 640×480 ima sveukupno 307200 piksela, a ukoliko se pretpostavi minimalna sekvenca od 721 termograma (hladni termogram + 360 termograma zagrijavanja + 360 termograma procesa hlađenja), tada promatrana sekvenca termograma ima minimalno $221{,}184\times10^6$ piksela. Ukoliko se rezolucija smanji na 120×160, tada sveukupno ima 19200 piksela u jednom termogramu, a sekvenca od 721 termograma ima ukupno $13{,}8432\times10^6$ piksela, što je 16 puta manje od originalne sekvence termograma. Smanjenje je provedeno usrednjavanjem 4 susjedna piksela u x smjeru i y smjeru.

Ovim postupkom je povećana brzina obrade podataka s nekoliko minuta na svega nekoliko sekundi, te su riješeni problemi nedostatka radne memorije i blokiranja računala tijekom proračuna. Zbog konstrukcije detektora IC kamere 640×480 piksela, nije bilo moguće postaviti uzorak na način da se pri tome ne zahvati i okolina uzorka, pa je bilo potrebno iz cjelokupnog termograma izdvojiti područje interesa (ROI – *Region of Interest*), odnosno samo uzorak. Ovaj postupak je ponovljen za svaki termogram cjelokupne sekvence.

Slika 6.1 i Slika 6.2 prikazuju razliku između istog termograma geometrijske rezolucije 640×480 piksela i termograma rezolucije 160×120 piksela

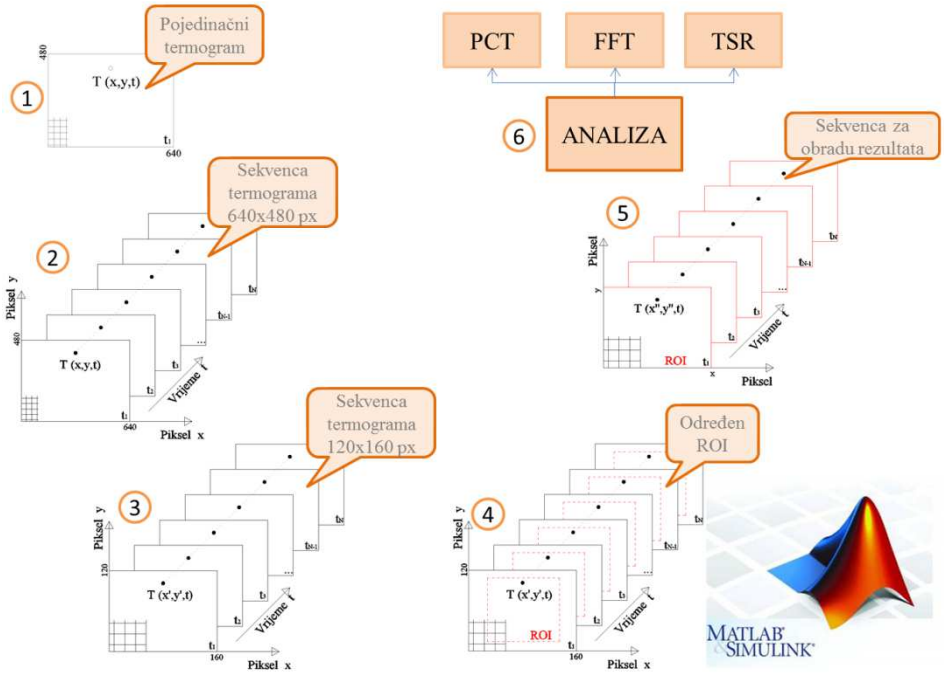


Slika 6.1 BM 3-1 s donje strane, optimalni termogram rezolucije 640×480 piksela



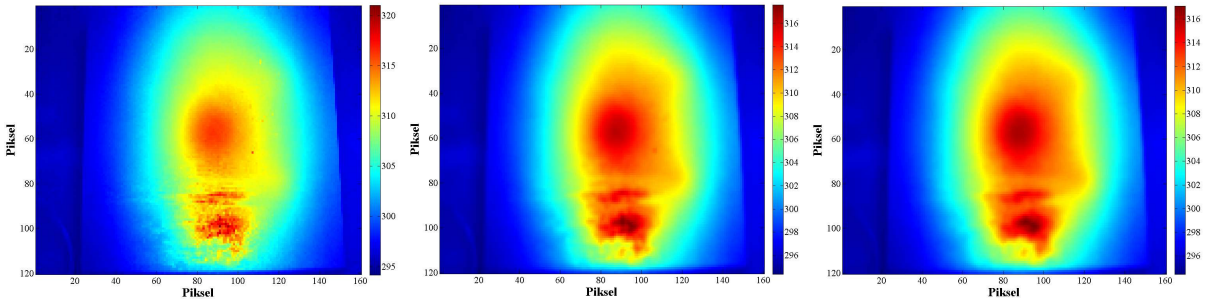
Slika 6.2 BM 3-1 s donje strane, optimalni termogram rezolucije 160×120 piksela

Slika 6.3 daje shematski prikaz postupka transformacije matrica kroz 6 koraka.



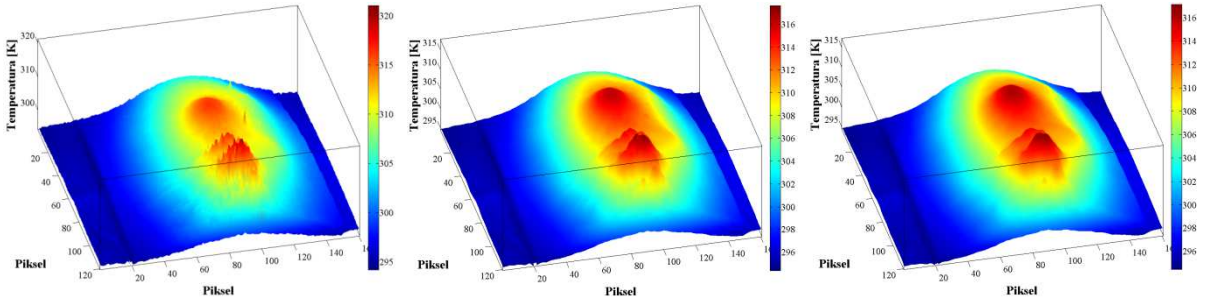
Slika 6.3 Shematski prikaz postupka transformacije matrica

Između koraka 5 i 6, neposredno prije same analize sekvenci s određenim područjem interesa, proveden je postupak filtriranja šuma, korištenjem Gaussovog filtra i medijan filtra.



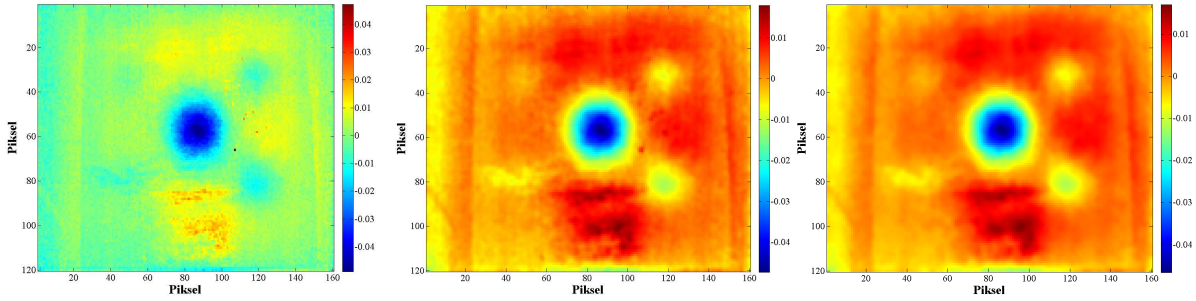
a) b) c)

Slika 6.4 Optimalni termogrami uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom



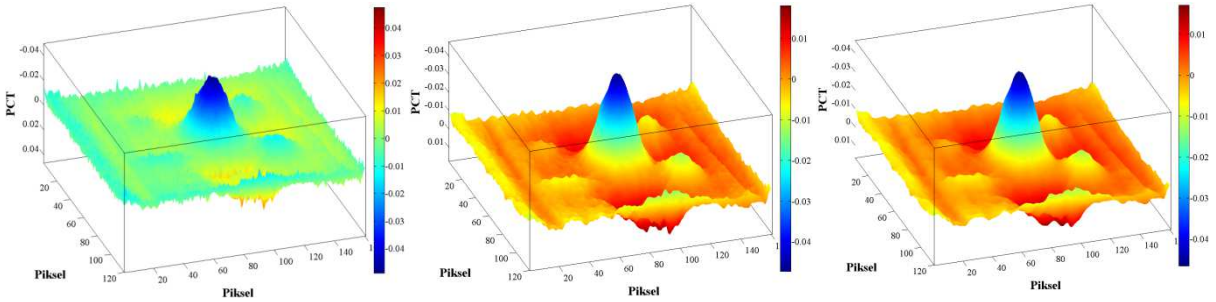
a) b) c)

Slika 6.5 Optimalni termogrami (3D prikaz) uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom



a) b) c)

Slika 6.6 PCT (mod 4) uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom



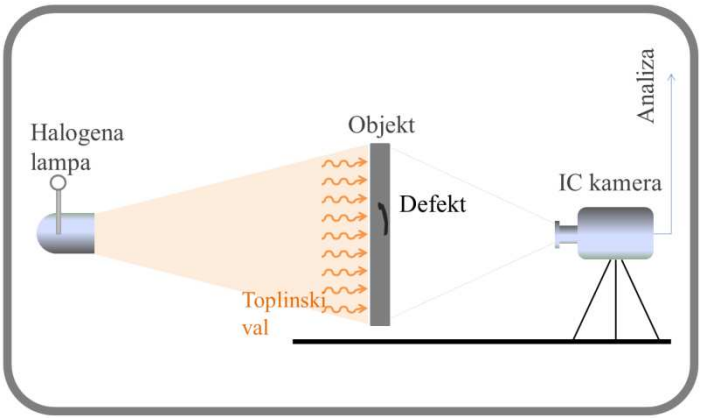
a) b) c)

Slika 6.7 PCT (mod 4) (3D prikaz) uzorka BM 3-1: a) bez uklanjanja šuma; b) uklanjanje šuma Gaussovim filtrom; c) uklanjanje šuma Gaussovim i medijan filtrom

Slika 6.4 do Slika 6.7 prikazuju razliku između termograma bez uklanjanja šuma, uklanjanje šuma korištenjem samo Gaussovog filtra, te korištenjem i Gaussovog i medijan filtra. U svim slučajevima koji su ovdje pokazani varijanca filtra je bila $\sigma^2 = 0{,}85$. Promatraju se klasični termogram, te kao primjer za rezultate dobivene analizom glavnih komponenti (PCT) (uzorak BM 3-1 s donje strane u trenutku kada je udaljenost toplinske pobude bila 1,5 m). Vidljivo je da uklanjanje dijela šuma znatno poboljšava mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorku, jer se već uz korištenje Gaussovog filtra može utvrditi da postoji barem 5 oštećenja u uzorku, dok je bez korištenja filtra moguće sa sigurnošću potvrditi postojanje samo jednog oštećenja u uzorku. Problem postojanja refleksije na površini uzorka korištenjem navedenih filtra nije riješen, te sama refleksija može nepovoljno utjecati na interpretaciju rezultata ispitivanja, ukoliko se ona pravovremeno ne ukloni.

6.2 Otkrivanje oštećenja transmitivnom metodom uz naknadnu obradu rezultata mjerenja – rezultati ispitivanja

U ovom poglavlju prikazani su optimalni termogrami ispitivanja postojanja oštećenja transmitivnom metodom, odnosno metodom kod koje se toplinska pobuda nalazi s jedne strane, a IC kamera s druge strane uzorka koji se ispituje, Slika 6.10-Slika 6.30. Razlog provođenja ispitivanja transmitivnom metodom utvrđivanje mogućnosti korištenja opisane postavke sustava za ispitivanje u slučaju kad reflektivnu metodu iz određenih razloga nije moguće koristiti. Ispitivanja su provedena kod toplinske pobude u trajanju od 120 minuta, s praćenjem i perioda hlađenja uzoraka u trajanju od 60 minuta. Toplinska pobuda halogenom lampom snage 1000 W provedena je s udaljenosti 2,0 m od površine betonskih uzoraka, a udaljenost kamere od uzorka iznosila je 1,45 m, Slika 6.8 i Slika 6.9.



Slika 6.8 Shematski prikaz transmitivne metode mjerenja



Slika 6.9 Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 2,0 m od površine uzorka, transmitivna metoda ispitivanja

Udaljenost toplinske pobude odabrana je kao optimalna udaljenost s obzirom na jednoliko zagrijavanje uzorka, a da se pri tome zadrži relativno velika mogućnost zagrijavanja uzorka od strane toplinske pobude. Uzorci su postavljani tako da je uvijek strana uzorka označena kao gornja strana okrenuta prema toplinskoj pobudi, a donja strana okrenuta prema IC kameri.

Uzorci su ispitivani tijekom tri radna dana prilikom čega se u laboratoriju vlažnost zraka kretala između 25 i 45 %, a temperatura zraka je iznosila između 18 i 20°C. Prije toga su uzorci držani u vanjskom prostoru pri temperaturi vanjskog zraka, koja se kretala između 5 i 15°C.

Slika 6.10 do Slika 6.13 prikazuju raspodjelu temperature, rezultate analize metodom termografije glavnih komponenti (PCT) i metodom brze Fourierove transformacije (FFT) i to fazni prikaz, za uzorak BM 1-1 u 3D prikazu i 2 D prikazu (gornja površina uzorka).

Slika 6.10 prikazuje raspodjelu temperature po površini uzorka BM 1-1 u trenutku neposredno nakon isključivanja toplinske pobude, odnosno trenutku najvećeg kontrasta. Iz prikazanog je očigledan značajan utjecaj nejednolikog zagrijavanja stražnje površine uzorka, što onemogućuje otkrivanje oštećenja. Najveći rast temperature stražnje površine uzorka koji je zabilježen iznosio je 9 °C.

Analizom sekvence termograma tijekom cijele sekvence (120 min zagrijavanja i 60 min hlađenja) korištenjem metode PCT otkriveno je postojanje 5 oštećenja, pri čemu se sa sigurnošću može ustvrditi postojanje oštećenja označenih sa 1, 2 i 5, dok se postojanje oštećenja 3 i 4 može naslutiti iz prikazanih modova (EOF-ova) (Slika 6.11 i Slika 6.12), ali se zbog prevelikog šuma ne može sa sigurnošću ustvrditi njihovo postojanje. Oštećenja označena sa 6 i 7 nisu otkrivena.

Nakon provedene FFT analize svakog piksela cijele sekvence termograma, utvrđeno je da prikaz amplitude ne daje rezultate iz kojih bi se moglo utvrditi postojanje oštećenja u uzorku, dok fazni prikaz za diskretnu frekvenciju ($f = 1{,}808x10^{-4}Hz$) daje sliku iz koje se sa sigurnošću može ustvrditi postojanje oštećenja 1,2 i 5, dok oštećenja 3 i 4 jedva da izlaze iz šuma i ne može se potvrditi njihovo postojanje.

Promatrajući uzorak BM 1-3 vidljivo je da se već iz termograma u trenutku neposredno nakon isključivanja toplinske pobude, može potvrditi postojanje oštećenja označenih sa 1 i 2, Slika 6.14. Postojanje oštećenja 3, potvrđeno je tek naknadnom obradom sekvence termograma korištenjem PCT metode, Slika 6.15 i Slika 6.16. FFT analizom. U prikazu faze i amplitude moguće je sa sigurnošću odrediti postojanje oštećenja 1, dok se oštećenja 2 i 3 uklapaju u smetnje izazvane nejednolikim zagrijavanjem uzorka. U ovom slučaju vidljivo je da fazni prikaz ne uklanja problem nejednolikog zagrijavanja uzoraka, Slika 6.17, Slika 6.18.

EOF_3 iz PCT analize (Slika 6.20) daje najbolje rezultate ispitivanja uzorka BM 2-3, zbog činjenice da je uklonjen utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzorka, čime je povećan kontrast između oštećenja i „zdravog“ područja, za razliku od faznog prikaza i prikaza amplitude iz FFT analize koje nisu do kraja uspjele ukloniti utjecaj nejednolikog zagrijavanja uz donji rub uzorka, Slika 6.21 i Slika 6.22.

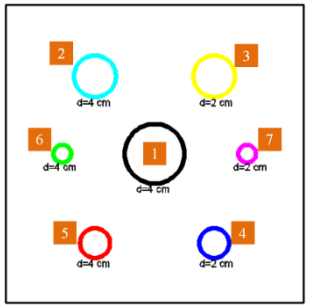
U slučaju uzorka BM 3-1, Slika 6.24 daje jedini mod PCT analize iz kojeg se može odrediti postojanje oštećenja. Korištenjem FFT analize i prikazom faze i amplitude, potvrđeno je postojanje oštećenja broj 1,2 i 5 u uzorku, ali se kod faznog prikaza, korisnim pokazalo

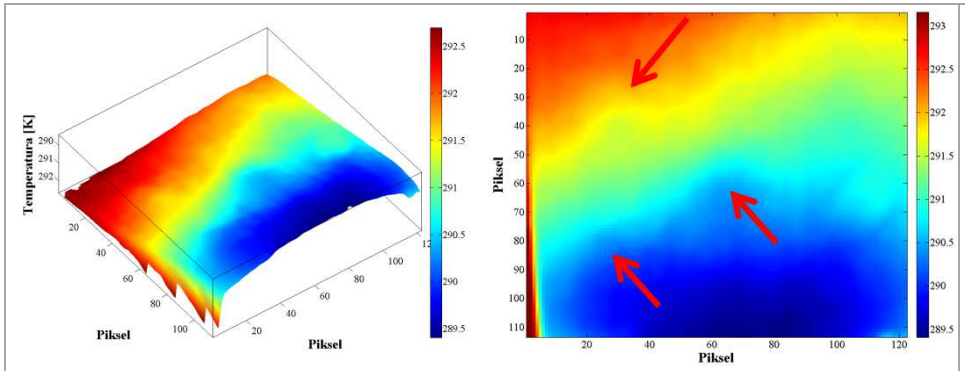
njegovo svojstvo da uklanja utjecaj nejednolikog zagrijavanja, Slika 6.25. U slučaju uzorka BM 3-1 i korelirani kontrast daje rezultate iz kojih se može iščitati postojanje oštećenja 1, 2 i 5, što kod drugih uzoraka nije bio slučaj, Slika 6.27.

Kod uzorka BM 3-3, promatranjem termograma se pokazalo da se oštećenja ne mogu otkriti zbog pretjerano naglašenog utjecaja nejednolikog zagrijavanja, Slika 6.28. Korištenjem analize PCT metodom i FFT faznim prikazom, smanjen je utjecaj nejednolikog zagrijavanja pa je bilo moguće i otkrivanje postojanja oštećenja, Slika 6.29 i Slika 6.30.

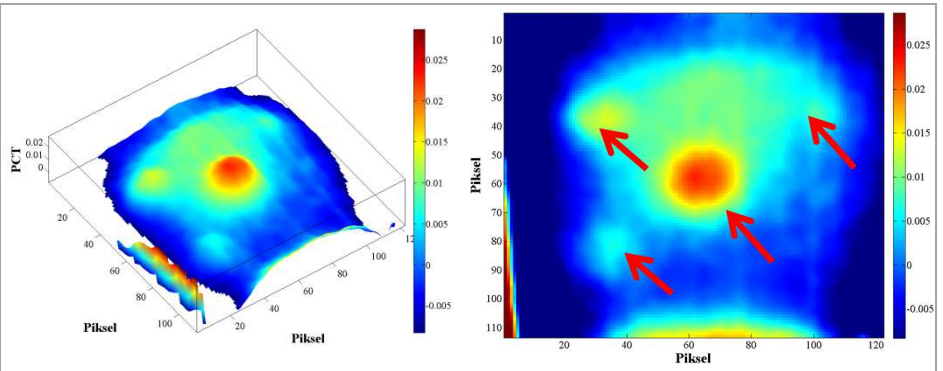
BM 1-1



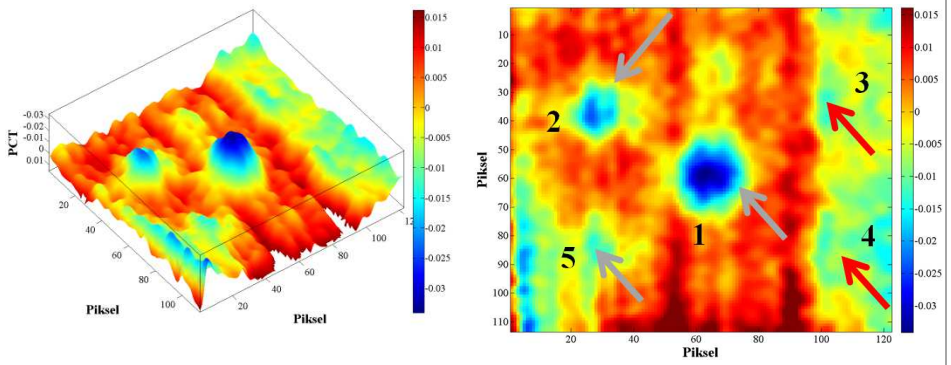




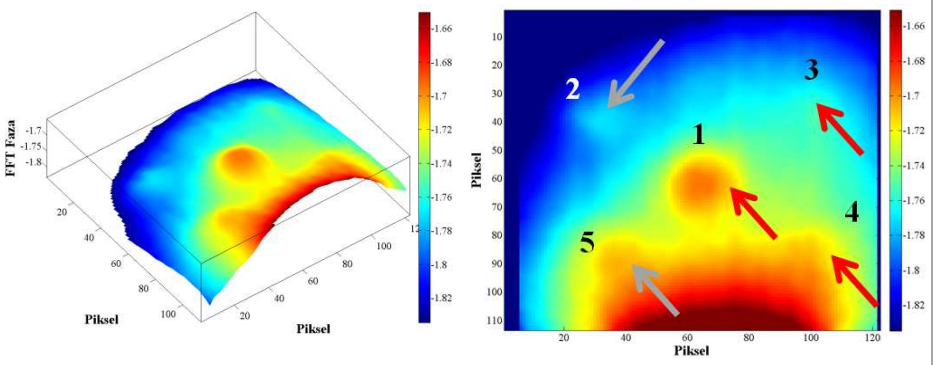
Slika 6.10 BM 1-1; Temperatura [K], (frame 721/1106); 3D i 2D prikaz



Slika 6.11 BM 1-1; PCT (EOF_3), 3D i 2D prikaz



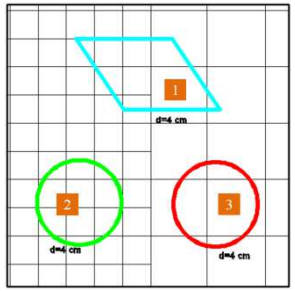
Slika 6.12 BM 1-1; PCT (EOF_7), 3D i 2D prikaz

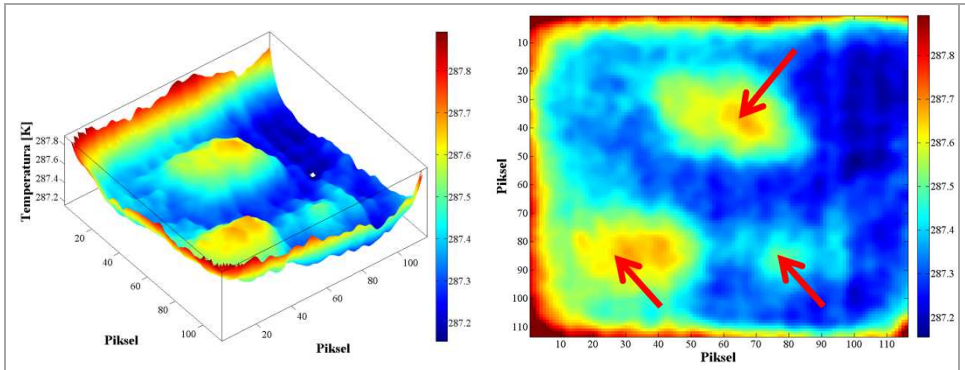


Slika 6.13 BM 1-1; FFT faza ($f = 1{,}808x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz

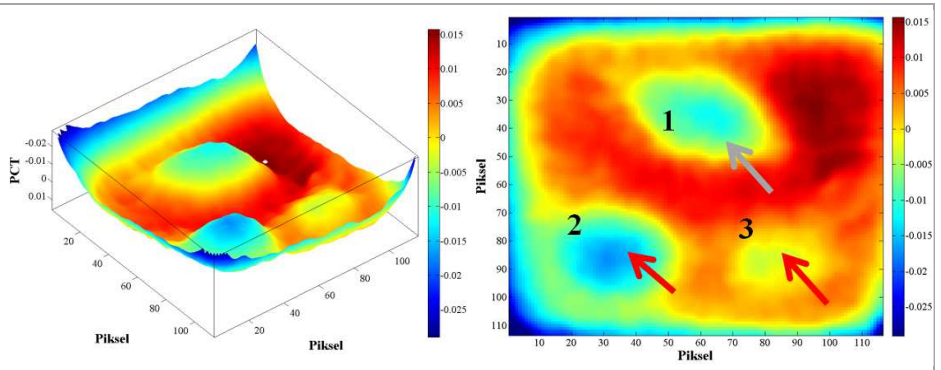
BM 1-3



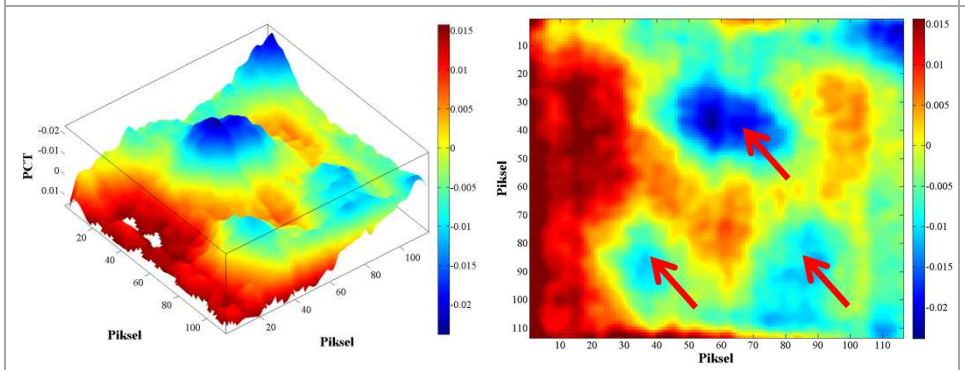




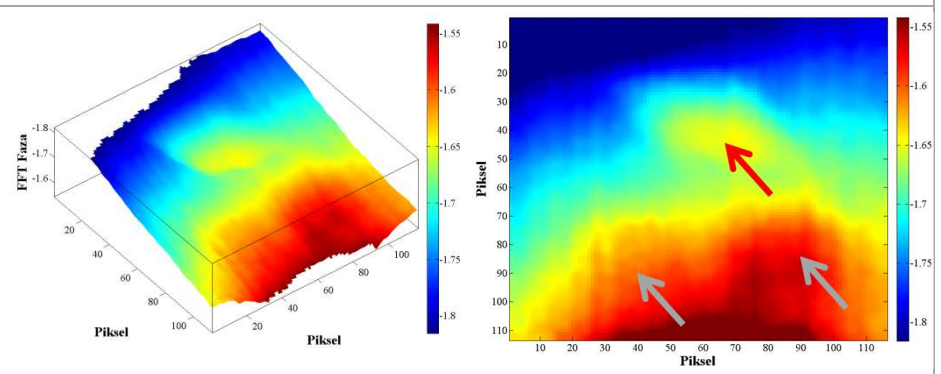
Slika 6.14 BM 1-3; Temperatura [K], (frame 721/1106); 3D i 2D prikaz



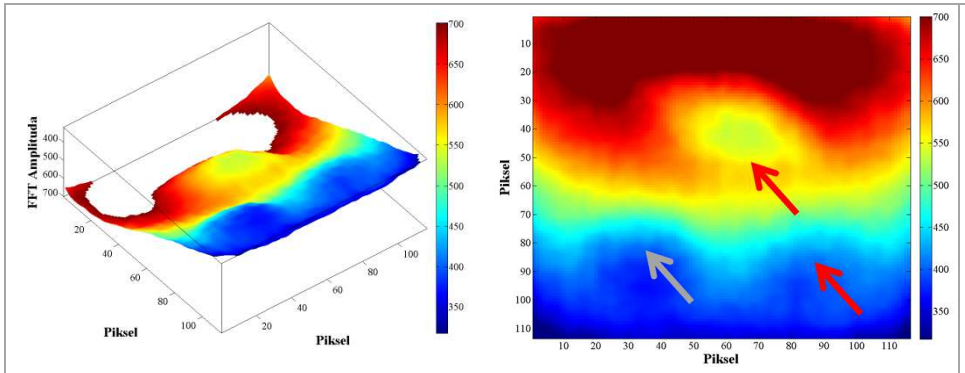
Slika 6.15 BM 1-3; PCT (EOF_2), 3D i 2D prikaz



Slika 6.16 BM 1-3; PCT (EOF_4), 3D i 2D prikaz



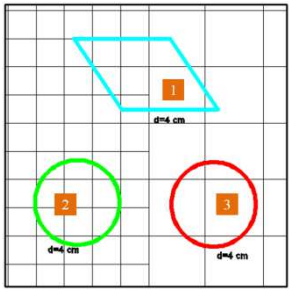
Slika 6.17 BM 1-3; FFT faza ($f = 1{,}754x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz

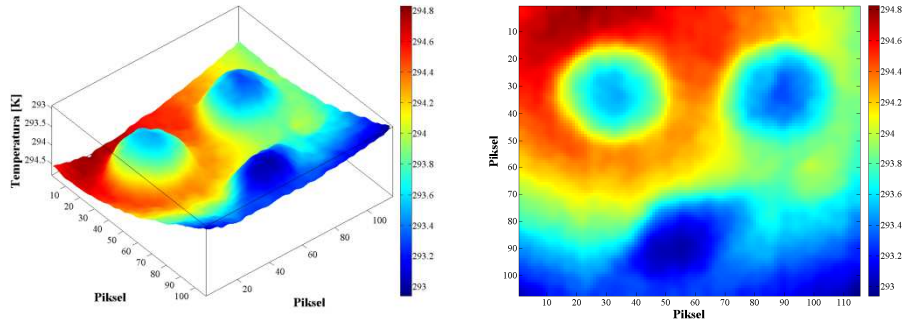


Slika 6.18 BM 1-3; FFT amplituda ($f = 2{,}632x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz

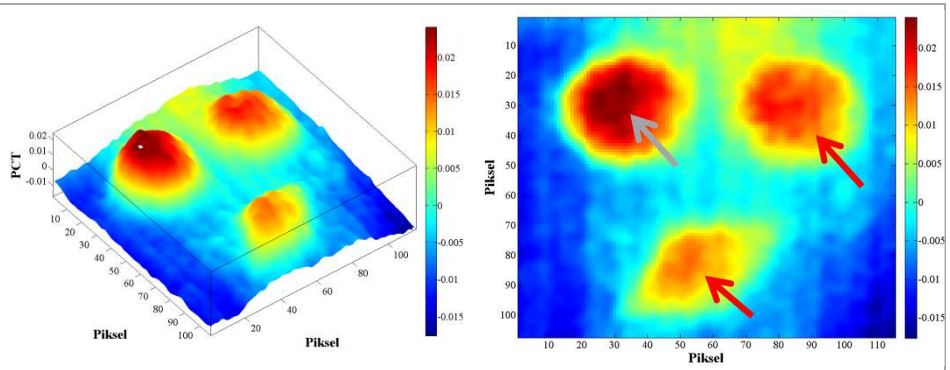
BM 2-3



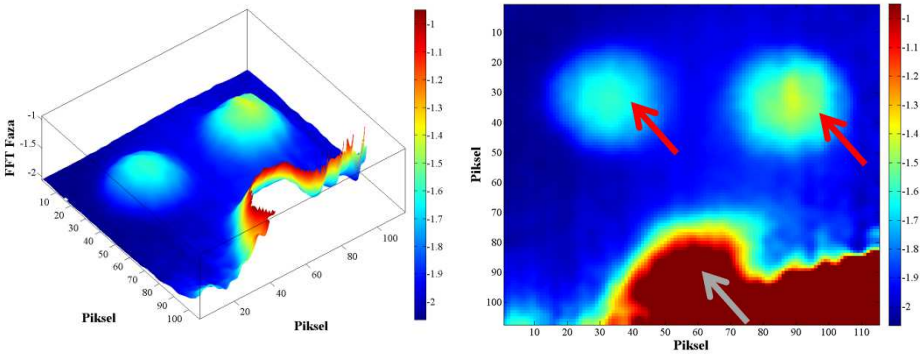




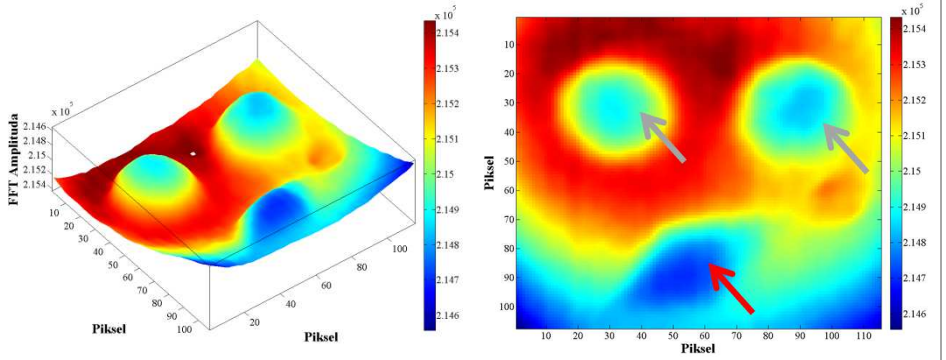
Slika 6.19 BM 2-3; Temperatura [K], (frame 360/732); 3D i 2D prikaz



Slika 6.20 BM 2-3; PCT (EOF_3), 3D i 2D prikaz



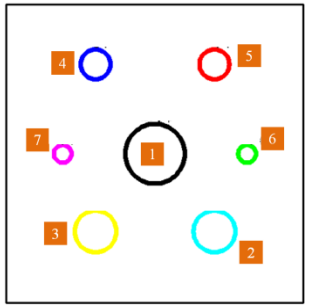
Slika 6.21 BM 2-3; FFT faza ($f = 2{,}732x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz

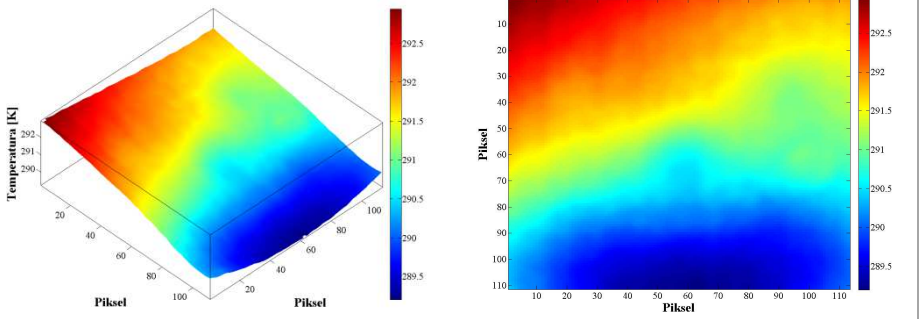


Slika 6.22 BM 2-3; FFT amplituda ($f = 1{,}366x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz

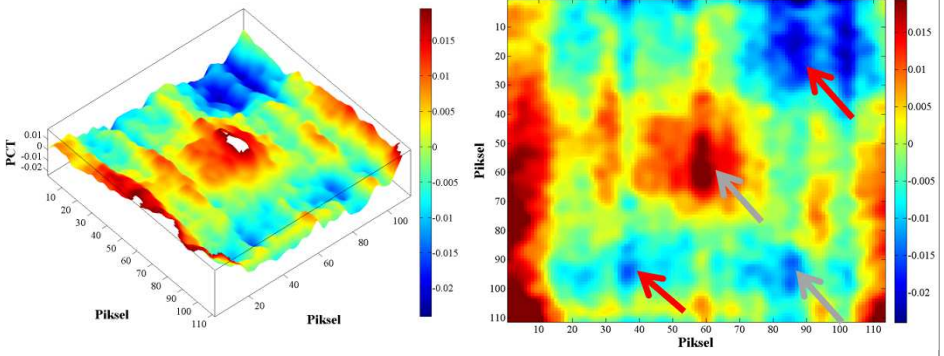
BM 3-1



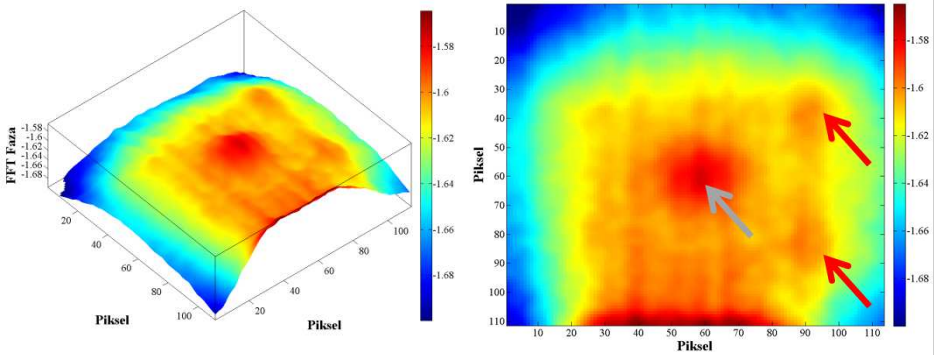




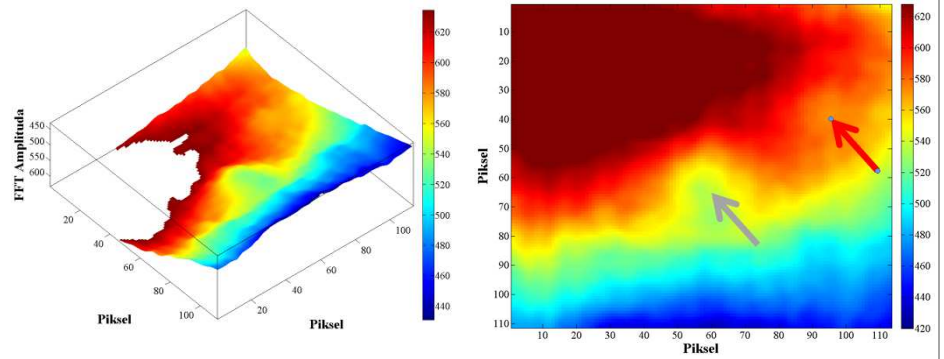
Slika 6.23 BM 3-1; Temperatura [K], (frame 683/780); 3D i 2D prikaz



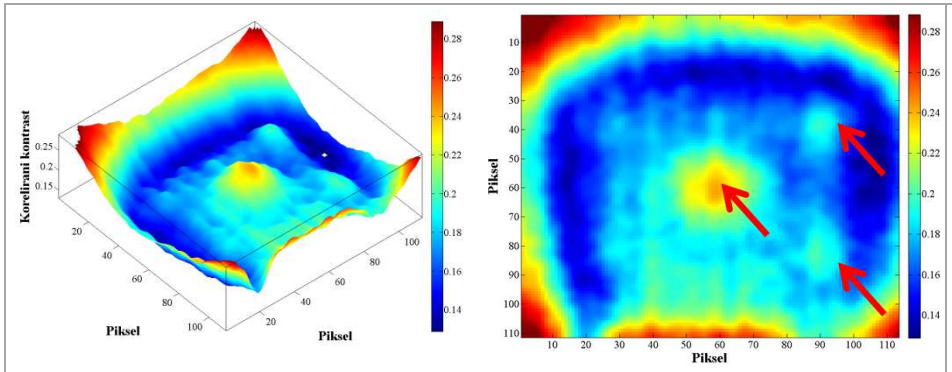
Slika 6.24 BM 3-1; PCT (EOF_6), 3D i 2D prikaz



Slika 6.25 BM 3-1; FFT faza ($f = 2{,}564x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz



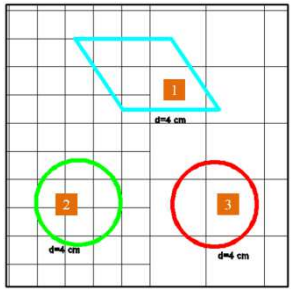
Slika 6.26 BM 3-1; FFT amplituda ($f = 3{,}846x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz

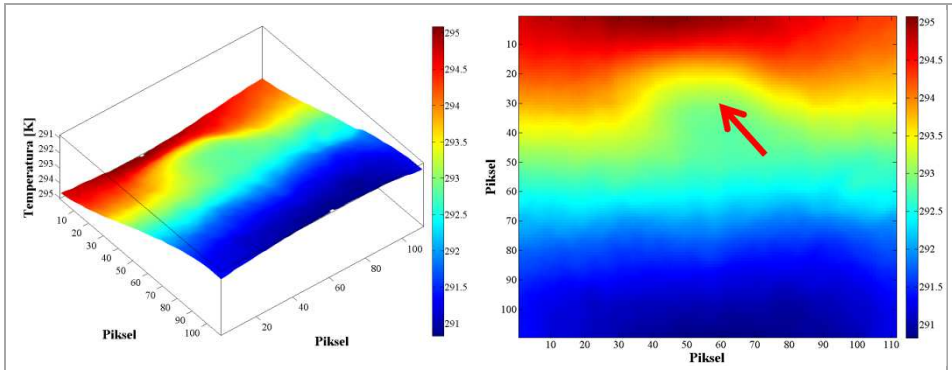


Slika 6.27 BM 3-1; Korelirani kontrast, 3D i 2D prikaz

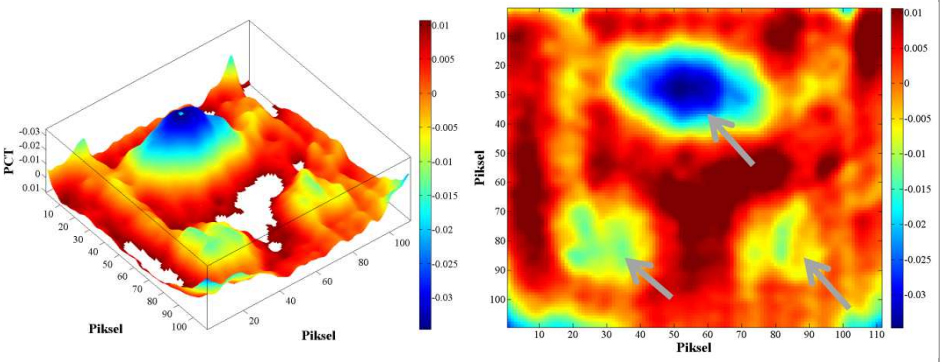
BM 3-3



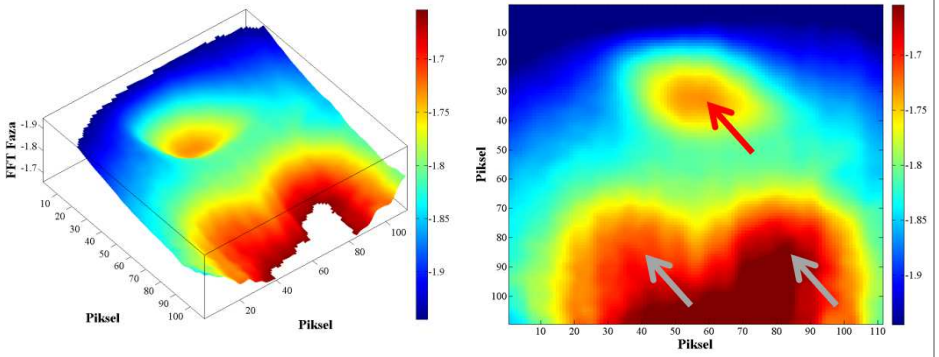




Slika 6.28 BM 3-3; Temperatura [K], (frame 720/1140); 3D i 2D prikaz



Slika 6.29 BM 3-3; PCT (EOF_3), 3D i 2D prikaz



Slika 6.30 BM 3-3; FFT faza ($f = 1{,}754x10^{-4}Hz$), 3D i 2D prikaz

U slučaju uzoraka, BM 1-2, BM 2-1, BM 2-2, i BM 3-2 rezultati ispitivanja ovdje nisu prikazani zbog nemogućnosti otkrivanja postojanja oštećenja niti jednom od tehnika naknadne obrade rezultata ispitivanja. U slučaju uzorka BM 1-2, pokazano je da kod kratkog trajanja hlađenja nije moguće odrediti postojanje oštećenja u betonu (trajanje hlađenja 7 minuta, Tablica 6.1). Navedeno je moguće potvrditi ispitivanjem na uzorku BM 3-1 (trajanje hlađenja 10 minuta, Tablica 6.1) kod kojeg je prikazano da je vrlo teško razabrati postojanje oštećenja i većeg promjera (Slika 6.23 - Slika 6.27), za razliku od primjera za uzorak BM 1-1 (Slika 6.10 - Slika 6.13), kod kojeg je period hlađenja trajao 65 minuta. Kod uzoraka BM 2-1, BM 2-2, i BM 3-2 do nemogućnosti otkrivanja postojanja oštećenja dolazi zbog povećane vlažnosti uzoraka tijekom ispitivanja, Tablica 6.1, što povećava lateralnu difuziju topline na površini betona čime se maskiraju mala oštećenja koja postoje u navedenim uzorcima.

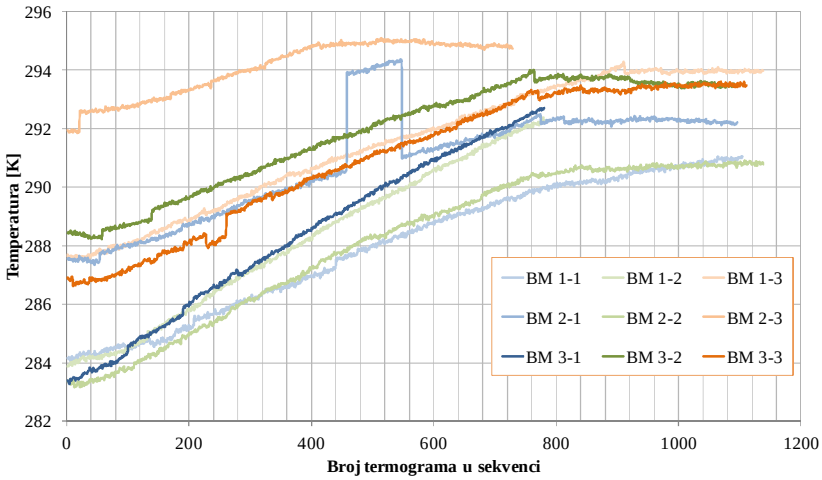
Tablica 6.1 Uvjeti ispitivanja uzoraka transmitivnom metodom

Uzorak	Vlažnost uzorka [%]	RH zraka [%]	Temperatura zraka [°C]	Trajanje zagrijavanja [min]	Trajanje hlađenja [min]
BM 1-1	4,1	26,6	19,4	120	65
BM 2-1	5	43,6	18,3	123	60
BM 3-1	5	30,5	19,7	120	10
BM 1-2	3,5	30,5	19,7	123	7
BM 2-2	4,8	32	19,1	120	70
BM 3-2	5	43,6	18,3	120	60
BM 1-3	4%	43,6	18,3	140	57
BM 2-3	4,8	30,5	19,7	60	63
BM 3-3	5,5	32	19,1	125	65

Iz prikazanih termograma i navedenih uvjeta ispitivanja, moguće je općenito zaključiti da se mogućnost otkrivanja oštećenja transmitivnom metodom smanjuje s povećanjem kvalitete betona. Kao što je vidljivo, ukoliko se usporede dobiveni rezultati za uzorak BM 1-3 (Slika 6.14 - Slika 6.18) s rezultatima za BM 2-3 (Slika 6.19 - Slika 6.22), odnosno za BM 3-3 (Slika 6.28 - Slika 6.30). Ista je tendencija dobivena uspoređujući uzorak BM 1-1 (Slika 6.10-Slika 6.13), s rezultatima za uzorak BM 3-1 (Slika 6.23 - Slika 6.27). Jednako tako, ukoliko se promatra mogućnost otkrivanja oštećenja ovisno o vlažnosti uzorka, vidljivo je da je u slučaju uzoraka koji imaju veću vlažnost, promatrajući maseni udio vlage u uzorku, mogućnost otkrivanja oštećenja manja.

Iako je u slučaju uzorka BM 2-3 zagrijavanje trajalo 60 min, nakon obrade podataka ispitivanja dobiveni su najbolji rezultati, u usporedbi sa uzorcima BM 1-3 i BM 3-3, što pokazuje da se kraćim trajanjem zagrijavanja uzoraka (optimalno 60 min) mogu dobiti bolji rezultati ispitivanja. Iako je promjena temperature kod navedenih uzorka manja, dobiven je veći temperaturni kontrast između oštećenog i neoštećenog dijela uzorka, zbog toga što toplina ne stigne proći kroz oštećeni dio uzorka te ne dolazi do izraženog lateralnog provođenja, koje onda maskira postojanje oštećenja.

U slučaju uzorka BM 2-1, zagrijavanje u trajanju od 123 min nije pridonijelo uspješnom otkrivanju postojanja oštećenja u uzorku. Pretpostavlja se da je uzrok navedenom stanju vlažnost uzorka koja je veća nego u slučaju uzorka BM 1-1 kod kojeg je moguće otkriti postojanje određenog broja oštećenja.



Slika 6.31 Promjena temperature na neoštećenom dijelu uzorka, pri transmitivnoj metodi

Slika 6.31 prikazuje promjenu temperature stražnjeg dijela uzorka (suprotna strana od strane koja se zagrijava) pri čemu je vidljiva početna temperatura uzorka i najveća temperatura promatranog piksela. Iz prikazanog dijagrama nije moguće utvrditi utjecaj početne temperature na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorku, jer su svi uzorci promatrani u vrlo malom rasponu temperature od 9°C, a promjena temperature tijekom zagrijavanja dosegla je najviše 8°C.

Iz prikazanih termograma (Slika 6.10-Slika 6.30) zaključuje se da je korištenje transmitivne tehnike za otkrivanje oštećenja u betonu ograničeno veličinom oštećenja i debljinom oštećenja. Utvrđeno je da se u slučaju betonske ploče debljine 10 cm (koje su korištene u ovom radu) sa sigurnošću mogu otkriti oštećenja promjera 10 cm i veća, dok za

oštećenja manjeg promjera to ovisi o dubini na kojoj se nalaze i njihovoj debljini. Tako je oštećenje 2 kod uzorka BM 1-1 bilo moguće otkriti, dok oštećenje 3, jednakog promjera, ali manje debljine, nije bilo moguće sa sigurnošću otkriti, Slika 6.11, Slika 6.12.

Potrebno je naglasiti da je za otkrivanje oštećenja potrebno koristiti nekoliko metoda naknadne obrade rezultata ispitivanja (PCT, FFT faza, FFT amplituda), jer se pokazalo kako korištenje samo jedne metode nije u svim slučajevima pouzdano.

6.3 Rezultati ispitivanja reflektnom metodom

U ovom poglavlju prikazani su optimalni termogrami ispitivanja postojanja oštećenja reflektnom metodom, uz primjere rezultata ispitivanja bez naknadne obrade te primjere rezultata ispitivanja obrađenih korištenjem korelacijskih operatora, PCT analize te brzom Fourierovom transformacijom uz korištenje faznog i amplitudnog prikaza. Potpuni reprezentativni rezultati ispitivanja za svaku kombinaciju ispitivanja te za sve uzorke izrađene u ovom radu dani su na CD-u u prilogu rada.

Pojam optimalni termogram koji se ovdje koristi, ima značenje termograma koji je snimljen u trenutku kada je temperaturni kontrast na površini uzorka davao najbolje rezultate za otkrivanje oštećenja bez korištenja neke od tehnika naknadne obrade rezultata mjerenja.

Ispitivanja su provedena kod toplinske pobude u trajanju od 60 minuta, s praćenjem i perioda hlađenja uzoraka u trajanju od 60 minuta. Toplinska pobuda halogenom lampom snage 1000 W provedena je s udaljenosti 1,5; 2,0 i 3,0 m od površine betonskih uzoraka, Slika 6.32, Slika 6.33.



Slika 6.32 Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 1,5 m od površine uzorka



Slika 6.33 Eksperimentalna postavka toplinske pobude na udaljenosti 3,0 m od površine uzorka

Uvjeti pod kojima su uzorci ispitivani korištenjem reflektne metode prikazani su u daljnjem tekstu, Tablica 6.2, a prikazani su vlažnost samog uzorka u postocima u odnosu na masu uzorka, relativna vlažnost i temperatura zraka prilikom ispitivanja, vrijeme zagrijavanja

uzorka i trajanje hlađenja koje je uzeto u obzir prilikom naknadne obrade rezultata ispitivanja promatranjem sekvence hlađenja.

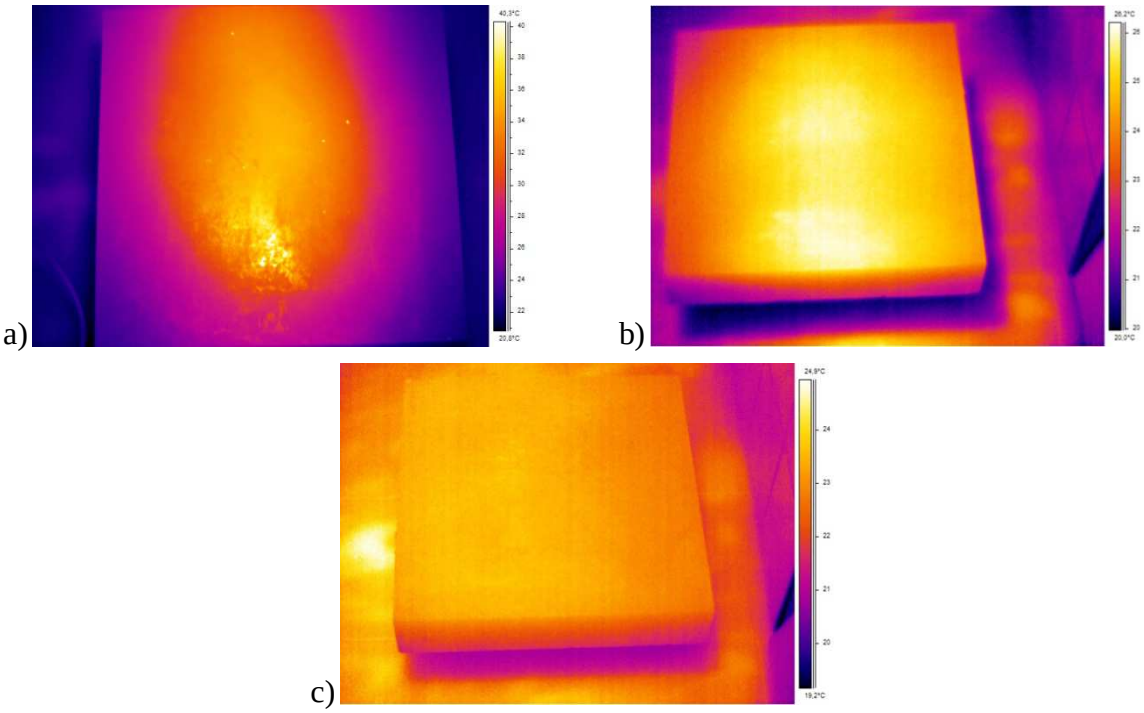
Tablica 6.2 Uvjeti ispitivanja uzoraka reflektnom metodom

	Uzorak	Vlažnost uzorka [%]	RH zraka [%]	Temperatura zraka [°C]	Trajanje zagrijavanja [min]	Trajanje hlađenja [min]
Udaljenost toplinske pobude 1,5 m od uzorka	BM 1-1 d	5,5	35,0	20,0	62	59
	BM 1-1 g	5,5	35,0	20,0	60	68
	BM 2-1 d	6,0	43,3	21,0	60	133
	BM 2-1 g	6,0	43,3	21,0	60	96
	BM 3-1 d	5,5	45,5	21,0	60	60
	BM 3-1 g	5,5	45,5	21,0	88	60
	BM 1-2 d	5	45,5	21,0	64	91
	BM 1-2 g	5	45,5	21,0	66	68
	BM 2-2 d	5,5	25,0	19,6	61	76
	BM 2-2 g	5,5	25,0	19,6	61	73
	BM 3-2 d	5,5	24,3	19,7	60	134
	BM 3-2 g	5,5	26,6	18,3	60	82
	BM 1-3 d	5	25,3	18,6	60	60
	BM 1-3 g	5	25,3	18,6	61	60
	BM 2-3 d	5,2	43,3	21,0	83	63
	BM 2-3 g	5,2	43,3	21,0	62	70
	BM 3-3 d	5,5	25,0	19,6	60	76
	BM 3-3 g	5,5	25,0	19,6	60	69
Udaljenost toplinske pobude 2,0 m od uzorka	BM 1-1 d	4,5	39,5	19,5	61	60
	BM 1-1 g	4,5	39,5	19,5	60	61
	BM 2-1 d	5,5	35,0	19,0	60	70
	BM 2-1 g	5,5	36,4	19,2	60	60
	BM 3-1 d	5,2	26,8	18,9	78	52
	BM 3-1 g	5,2	26,8	18,9	60	70
	BM 1-2 d	4,5	39,5	19,5	60	60
	BM 1-2 g	4,5	39,5	19,5	71	70
	BM 2-2 d	5,5	39,5	19,5	60	60
	BM 2-2 g	5,5	39,5	19,5	60	60
	BM 3-2 d	5,0	35,0	19,0	59	61
	BM 3-2 g	5,0	35,0	19,0	63	57
	BM 1-3 d	4,0	35,0	19,0	60	60

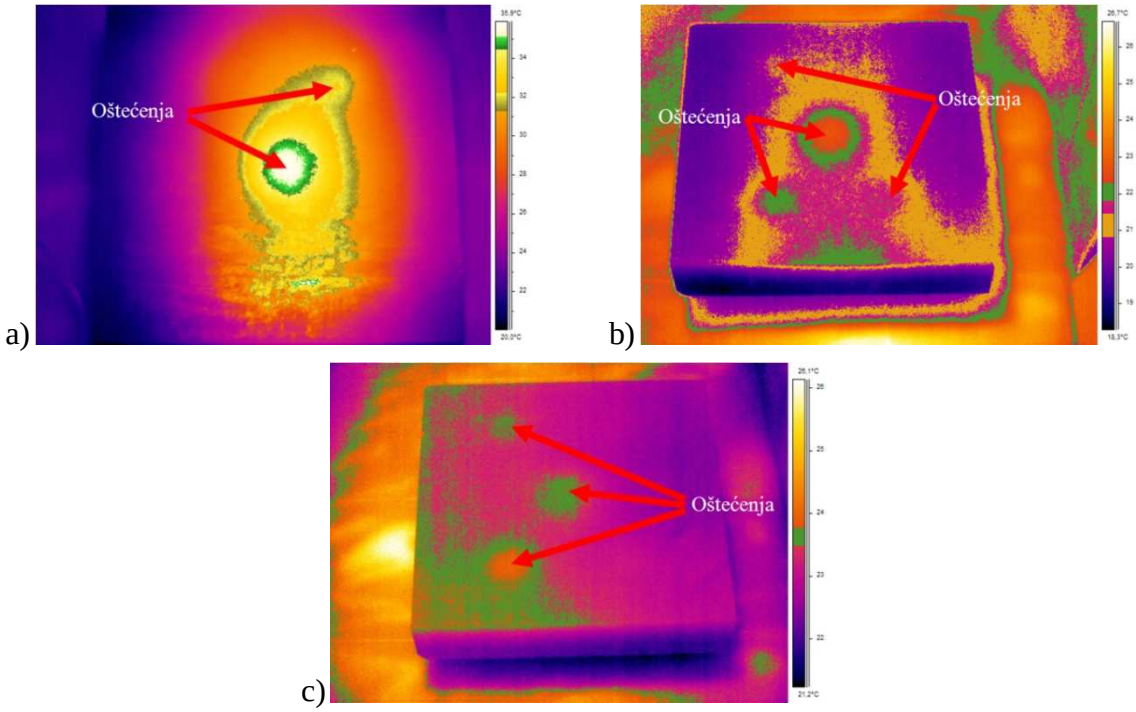
	Uzorak	Vlažnost uzorka [%]	RH zraka [%]	Temperatura zraka [°C]	Trajanje zagrijavanja [min]	Trajanje hlađenja [min]
	BM 1-3 g	4,0	35,0	19,0	61	59
	BM 2-3 d	4,5	26,8	18,9	60	60
	BM 2-3 g	5,2	26,8	18,9	60	66
	BM 3-3 d	5,2	36,4	19,2	69	63
	BM 3-3 g	5,2	36,4	19,2	60	60
Udaljenost toplinske pobude 3,0 m od uzorka	BM 1-1 d	4,6	41,7	20,4	63	59
	BM 1-1 g	4,6	41,7	20,4	59	60
	BM 2-1 d	5,5	44,8	20,1	63	73
	BM 2-1 g	5,5	44,8	20,1	60	67
	BM 3-1 d	5,5	44,8	20,1	62	60
	BM 3-1 g	5,5	47,5	19,9	60	60
	BM 1-2 d	4,1	44,8	20,1	65	70
	BM 1-2 g	4,1	44,8	20,1	60	62
	BM 2-2 d	5,2	33,1	20,6	60	61
	BM 2-2 g	5,2	41,7	20,4	60	68
	BM 3-2 d	5,2	29,8	20,8	60	60
	BM 3-2 g	5,2	29,8	20,8	60	60
	BM 1-3 d	4,2	29,8	20,8	60	70
	BM 1-3 g	4,5	33,1	20,6	60	68
	BM 2-3 d	5,2	44,8	20,1	61	64
	BM 2-3 g	5,5	47,5	19,9	60	70
	BM 3-3 d	5,2	33,1	20,6	60	60
	BM 3-3 g	5,2	33,1	20,6	60	70

6.3.1 Rezultati ispitivanja bez naknadne obrade rezultata mjerenja

Udaljenost toplinske pobude utječe na mogućnost otkrivanja oštećenja na način da veća udaljenost daje termograme s jednolikom raspodjelom temperature na površini uzorka, ali istovremeno smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja, Slika 6.34.



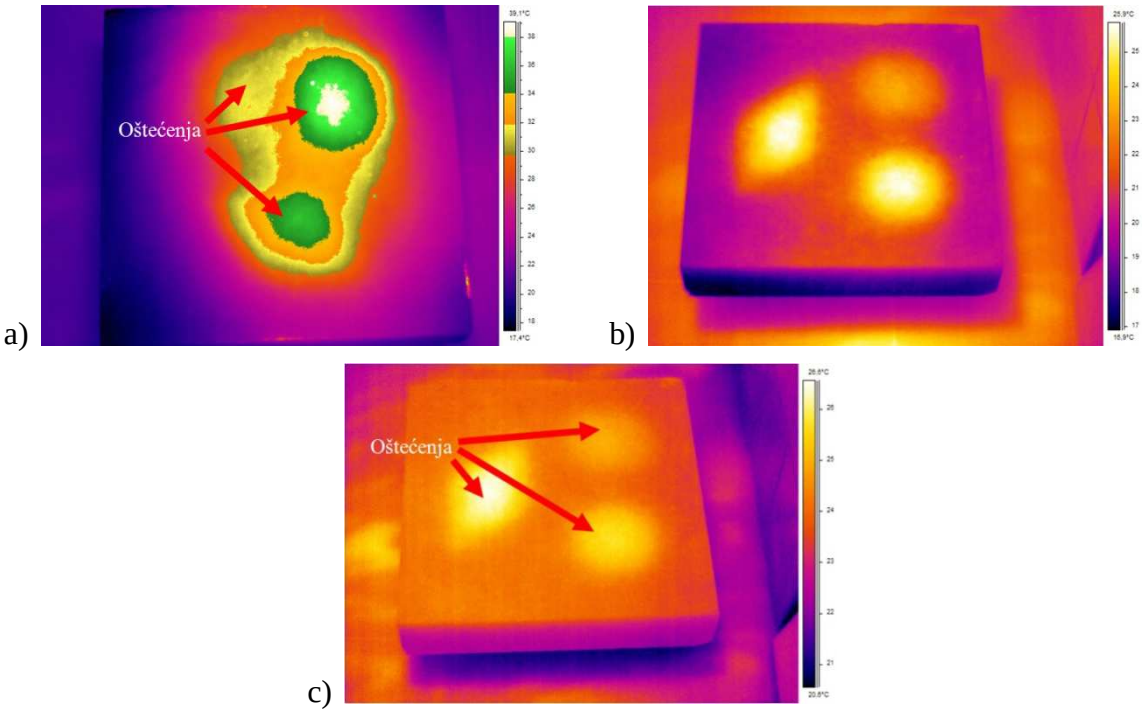
Slika 6.34 Prikaz utjecaja udaljenosti toplinske pobude na mogućnost jednolikog zagrijavanja uzorka BM 2-2 promatrano s donje strane udaljenost: a) 1,5 m; b) 2,0 m; c) 3,0 m



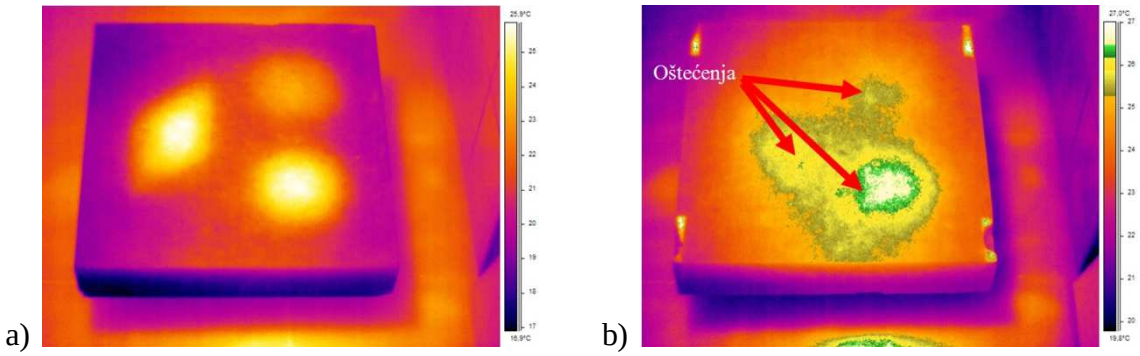
Slika 6.35 Prikaz utjecaja udaljenosti toplinske pobude na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorku BM 2-1 promatrano s donje strane udaljenost: a) 1,5 m; b) 2,0 m; c) 3,0 m

Slika 6.35 prikazuju smanjenu mogućnost otkrivanja pojedinih oštećenja zbog znatnog utjecaja nejednolikog zagrijavanja na rezultate ispitivanja kod toplinske pobude udaljene 1,5 m od uzorka koji se ispituje.

S druge strane, Slika 6.36, kod udaljenosti toplinske pobude 3 m, prikazuje smanjenu mogućnost otkrivanja pojedinih oštećenja zbog smanjenog intenziteta toplinske pobude, odnosno premalog povećanja površinske temperature uzorka. U usporedbi s utjecajem nejednolikog zagrijavanja uzoraka, utjecaj nedovoljnog zagrijavanja uzoraka zbog udaljenosti toplinske pobude od 3 m je zamjetan, ali nije značajno izražen.



Slika 6.36 Prikaz utjecaja udaljenosti toplinske pobude na mogućnost jednolikog zagrijavanja uzorka BM 1-3 promatrano s donje strane udaljenost: a) 1,5 m; b) 2,0 m; c) 3,0 m

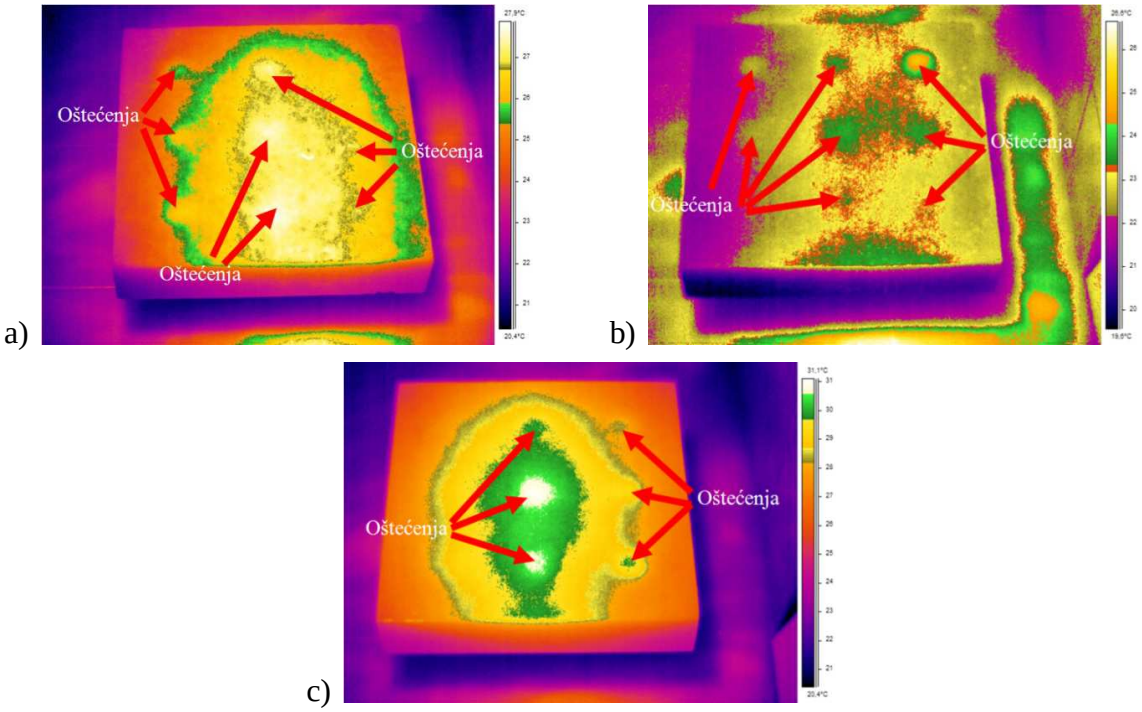


Slika 6.37 Prikaz utjecaja armature na mogućnost otkrivanja oštećenja uzorka BM 1-3 promatrano s donje strane udaljenost 2,0 m: a) bez armature; b) s armaturom

Među tri slučaja koja su u ovom radu promatrana, najboljom se pokazala toplinska pobuda uzoraka s udaljenosti od 2 m od površine uzoraka. U tom slučaju se dobiva najbolja mogućnost otkrivanja oštećenja, kao i u slučaju postojanja armature između oštećenja i površine uzorka te u slučaju kad armature nema između oštećenja i površine uzorka, Slika 6.37. Pri tome Slika 6.37 a) prikazuje slučaj kad između oštećenja i površine uzorka ne postoji armatura, dok Slika 6.37 b) prikazuje slučaj kad između oštećenja i površine uzorka postoji armaturna mreža.

Iako su sva tri oštećenja smještena na jednakoj udaljenosti (30 mm) od površine uzorka, vidljivo je da je mogućnost njihovog otkrivanja izravno iz termograma uvelike smanjena ukoliko se između oštećenja i površine uzorka nalazi armatura (mjerenje s gornje strane uzorka). Razlog smanjenoj mogućnosti otkrivanja oštećenja je veća lateralna difuzija topline po betonskom uzorku, u odnosu na slučaj kada ne postoji armatura između površine betona i oštećenja.

Značaj razmatranja utjecaja udaljenosti i intenziteta toplinske pobude na ispitivanje može utjecati na odabir IC kamere, odnosno temperaturnu razlučljivost kamere (NETD) koja se koristi prilikom ispitivanja, a time izravno i na cijenu ispitivanja. Pri tome je potrebno istaknuti da temperaturna razlučljivost, (manje vrijednosti NETD), ovisi o vrsti detektora i valnoj dužini kamere, kako je opisano u poglavlju 3.2.1.2.



Slika 6.38 Prikaz utjecaja kvalitete betona na mogućnost jednolikog zagrijavanja uzorka BM x-2 promatrano s gornje strane udaljenost 2,0 m; a) BM 1-2; b) BM 2-2; c) BM 3-2

Kvaliteta betona također utječe na mogućnost otkrivanja oštećenja, s time da je očigledna razlika u mogućnosti otkrivanja oštećenja kod uzoraka označenih sa BM 1-y (tlačna čvrstoća 18,93 MPa), u odnosu na uzorke BM 2-y i BM 3-y (tlačne čvrstoće 40,99 MPa i 89,05MPa), kod kojih je općenito moguće na ovaj način otkriti veći broj oštećenja, i ta oštećenja su izraženija (imaju bolji kontrast) u odnosu na neoštećeni dio uzorka. Kod betona bolje kvalitete, moguće je otkriti i oštećenja na većoj dubini, te oštećenja manje debljine u usporedbi s betonom lošije kvalitete, Slika 6.38. Razlog bolje mogućnosti otkrivanja oštećenja kod uzoraka BM 2-y i BM 3-y je u boljoj toplinskoj provodljivosti betona od kojih su izrađeni spomenuti uzorci, što omogućuje brži prolaz toplinskog vala do oštećenja, u odnosu na lateralno širenje topline koje u određenom stupnju maskira postojanje oštećenja.

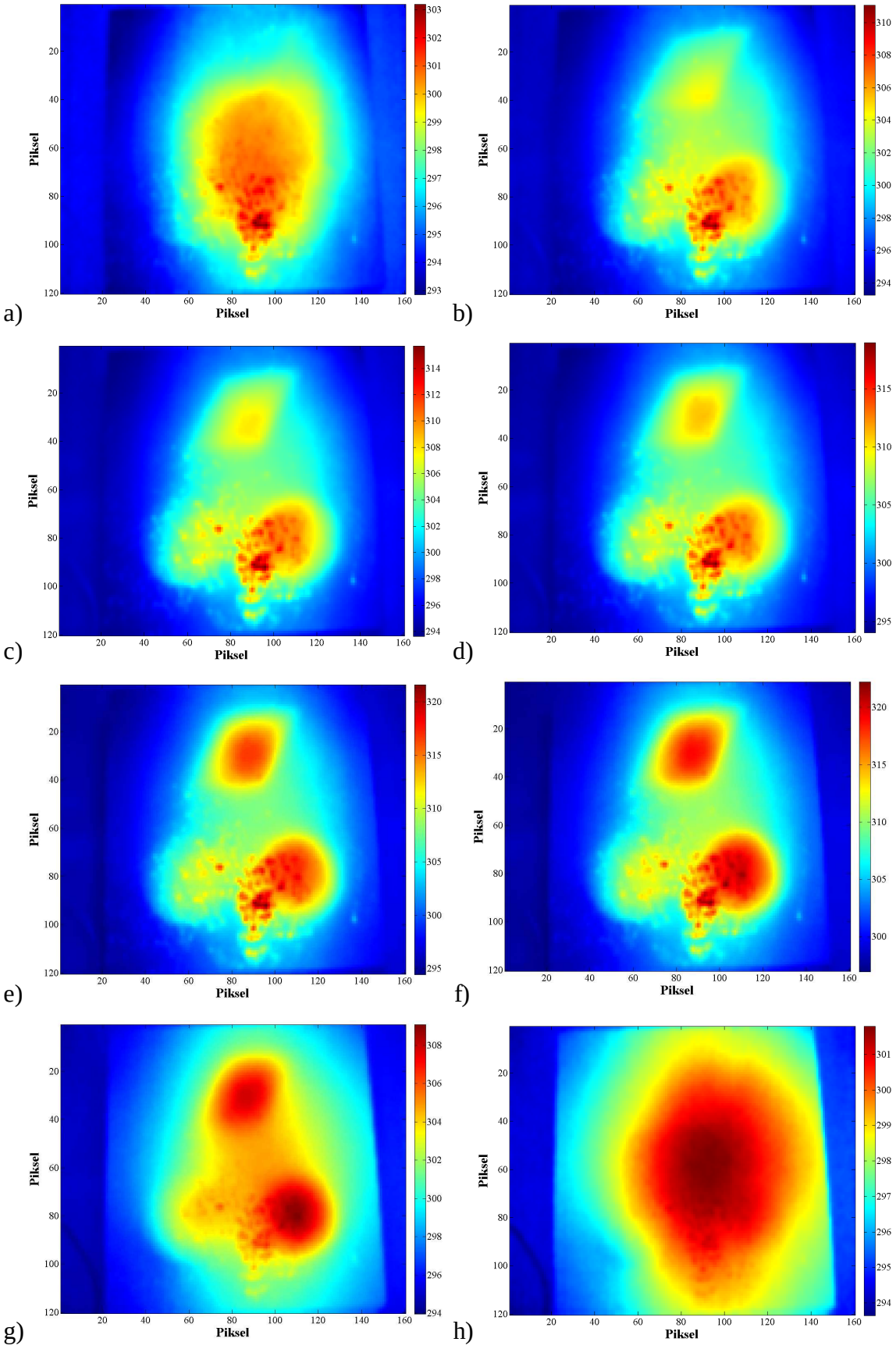
6.3.2 Utjecaj refleksije na otkrivanje oštećenja

Slika 6.39 prikazuje usporedbu termograma u različitom trenutku u odnosu na početak djelovanja toplinske pobude uzorak BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude iznosi 1,5 m; a) termogram 11, b) termogram 41, c) termogram 78, d) termogram 133, e) termogram 240, f) termogram 431, g) termogram 594, h) termogram 731, pri čemu cjelokupna sekvenca (grijanje + hlađenje) ima sveukupno 874 termograma.

Pri tome je vidljiv utjecaj refleksije lampe koja služi za toplinsku pobudu uzoraka, a koja se pri svom radu zagrijava na približno 200°C. Tijekom vremena se uzorak koji se vidi na danim termogramima (Slika 6.39) ne mijenja, iako se mijenja temperaturno polje na ostatku uzorka. Može se dakle zaključiti da iako beton kao takav ima vrlo veliki koeficijent emisije, ipak dolazi do refleksije izvora topline koji su na vrlo visokoj temperaturi.

U trenutku snimanja termograma 431, Slika 6.39 f), toplinska pobuda (lampa) je bila ugašena, no zbog činjenice da nije spriječeno djelovanje njezinog rezidualnog zračenja (lampa još uvijek ima visoku temperaturu), još uvijek postoji utjecaj refleksije na mogućnost otkrivanja oštećenja tijekom promatranja procesa hlađenja uzoraka.

Utjecaj refleksije pokušao se smanjiti postavljanjem IC kamere pod kutom od približno 75° u odnosu na površinu uzorka, ali se refleksija nije uspjela do kraja eliminirati.

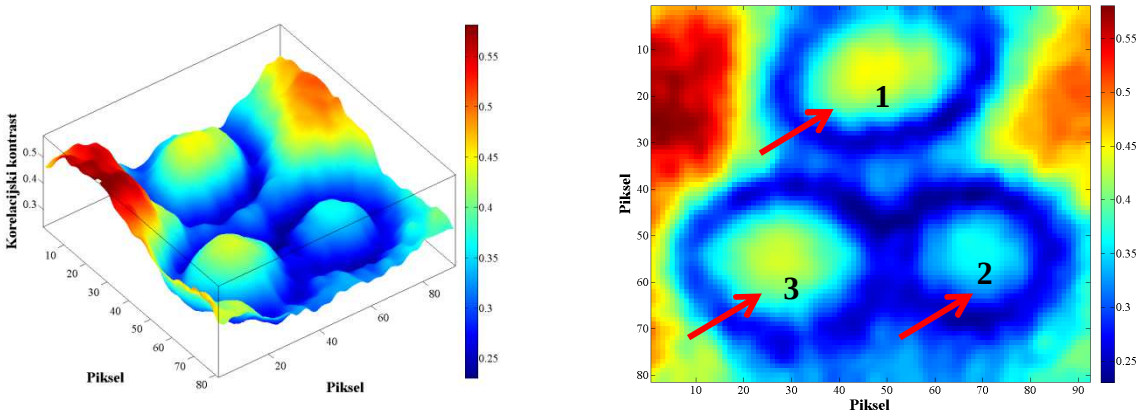


Slika 6.39 Utjecaj refleksije na otkrivanje oštećenja, uzorak BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m; a) termogram 11, b) termogram 41, c) termogram 78, d) termogram 133, e) termogram 240, f) termogram 431, g) termogram 594, h) termogram 731

6.3.3 Rezultati ispitivanja korištenjem korelacijskih operatora

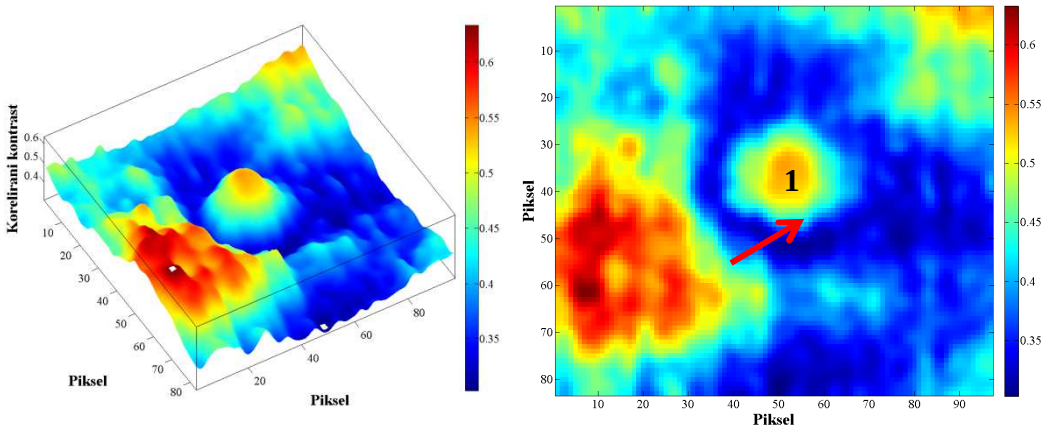
U ovom poglavlju dan je pregled rezultata ispitivanja, mogućnosti i ograničenja korištenja metode detaljnije opisane u poglavlju 3.6.9. Prikazani rezultati dani su za sekvencu hlađenja uzoraka nakon djelovanja toplinske pobude.

Oštećenja se u prikazu koreliranog kontrasta manifestiraju na način da je njihov rub definiran značajnim padom vrijednosti korelacijskog operatora, Slika 6.40. Općenito su oštećenja okružena područjem vrlo niske vrijednosti korelacijskog operatora, dok je njihovo središte visokog intenziteta, ali svakako nižeg od intenziteta na rubovima uzorka.



Slika 6.40 Korelirani kontrast, uzorak BM 3-3 s gornje strane udaljenost 2m

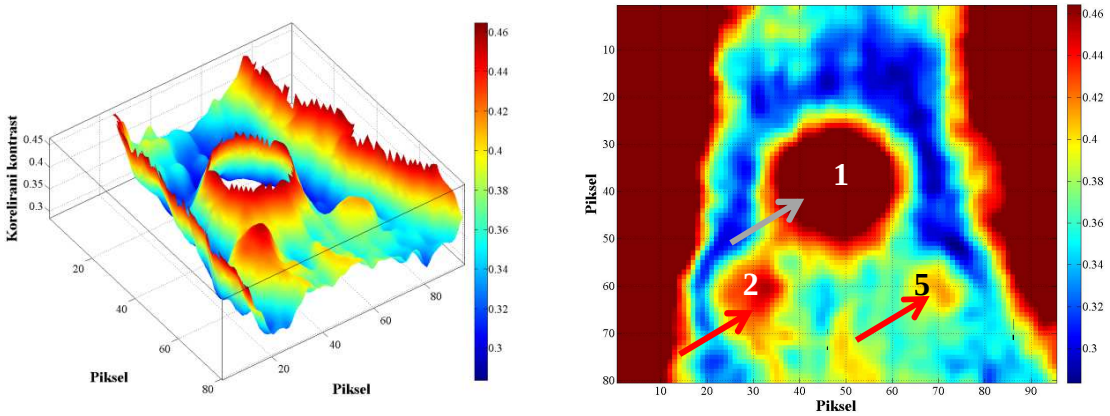
Promatrajući uzorke BM x-1 vidljivo je da se pomoću koreliranog kontrasta pouzdano može utvrditi postojanje samo oštećenja označenog s brojem „1“, Slika 6.41. Iako se oštećenje nalazi na dubini od 40 mm od površine uzorka, te toplinska pobuda stvara relativno malo povećanje temperature uzorka jer djeluje s udaljenosti od 3 m, moguće je otkriti postojanje oštećenja u uzorku BM 3-1.



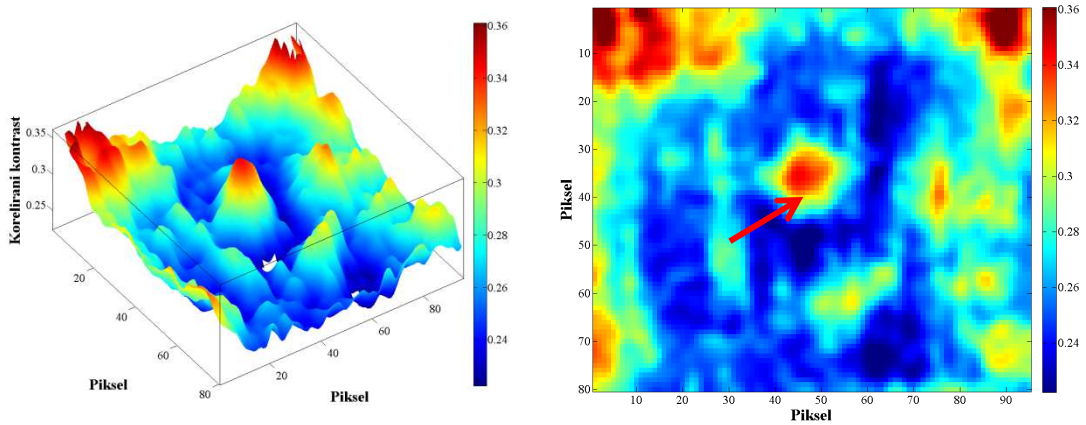
Slika 6.41 Korelirani kontrast, uzorak BM 3-1 s gornje strane udaljenost 3m, 3D i 2D prikaz

Uz sigurnu mogućnost utvrđivanja postojanja oštećenja broj „1“, problem predstavljaju područja koja se kod prikaza koreliranog kontrasta manifestiraju jednako kao i oštećenja (crveno područje između 40. i 75. piksela po y osi, Slika 6.41) što bi moglo dovesti do krive interpretacije ukoliko se zasebno promatra samo ovaj prikaz.

Slika 6.42 i Slika 6.43 daju usporedbu koreliranog kontrasta za uzorak BM 2-1 s donje, odnosno gornje strane, pri čemu je toplinska pobuda djelovala s udaljenosti 2 m.

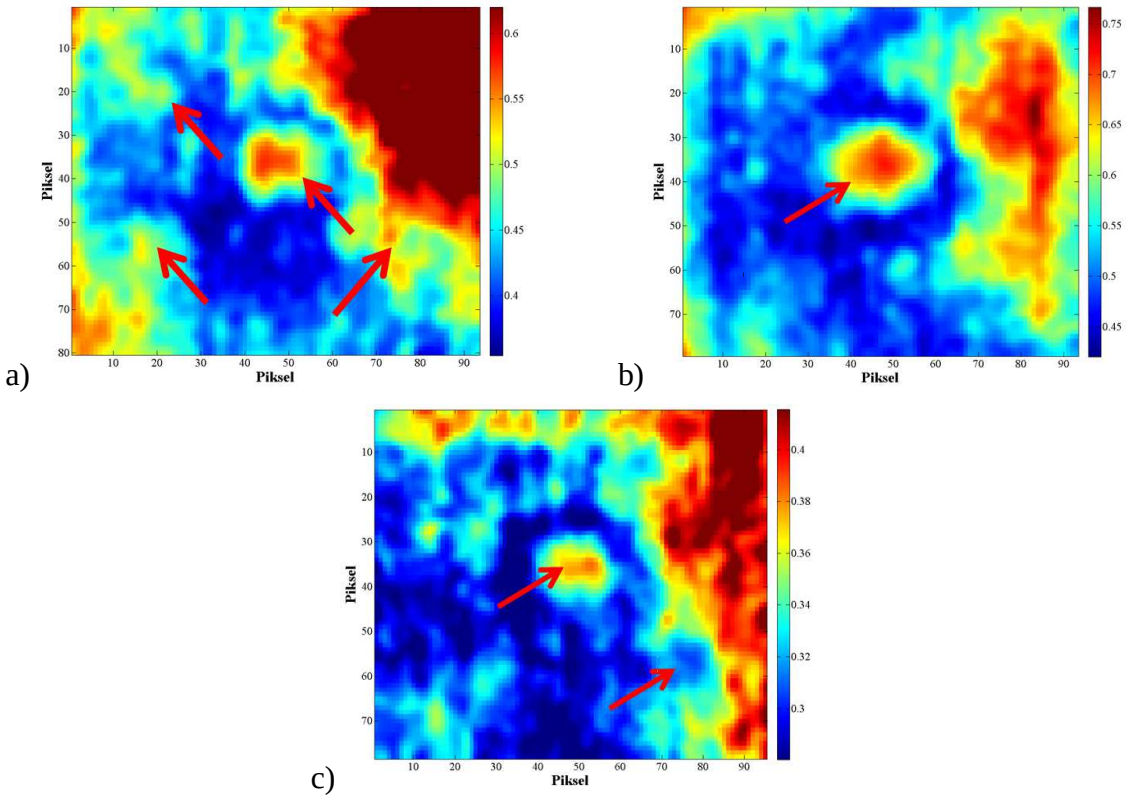


Slika 6.42 Korelirani kontrast, uzorak BM 2-1 s donje strane udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz

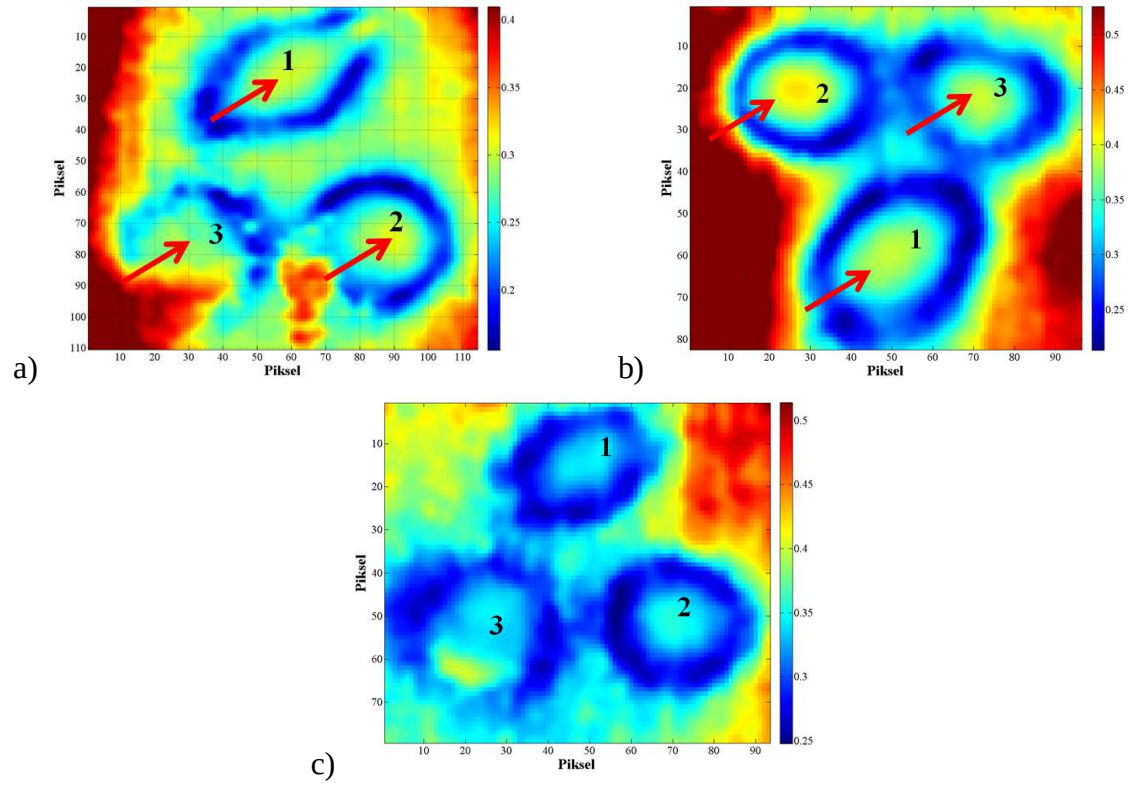


Slika 6.43 Korelirani kontrast, uzorak BM 2-1 s gornje strane udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz

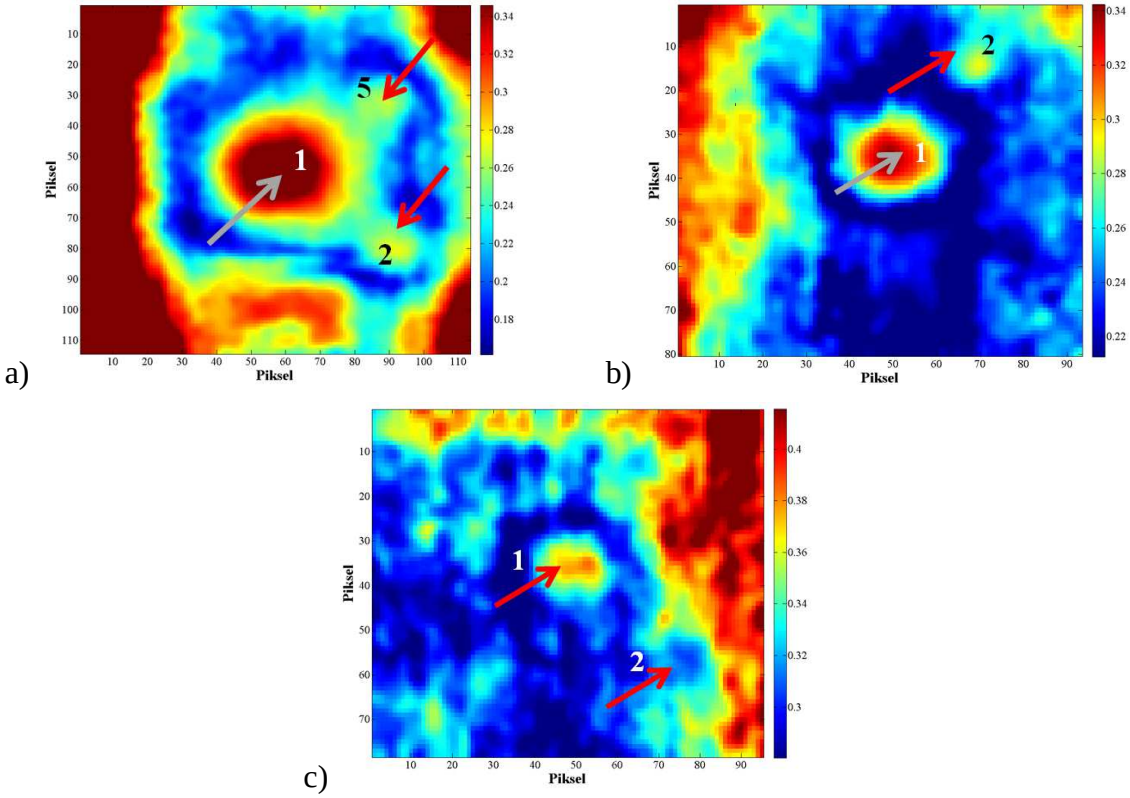
Može se općenito zaključiti da je korištenjem korelacijskih operatora, kao metode naknadne obrade rezultata ispitivanja, moguće odrediti postojanje oštećenja promjera 10 cm na dubini od 40 mm, pri čemu se bolje rezultate dobije za beton bolje kvalitete uz optimalnu udaljenost toplinske pobude od 2m, Slika 6.44 b), Slika 6.45.



Slika 6.44 Usporedba koreliranog kontrasta za betone različite kvalitete, svi uzorci su s donje strane na udaljenosti 3m: a) BM 1-1; b) BM 2-1; c) BM 3-1



Slika 6.45 Usporedba koreliranog kontrasta za betone različite kvalitete, uzorak BM 2-3 s donje strane: a) udaljenost 1,5m; b) udaljenost 2m; c) udaljenost 3m

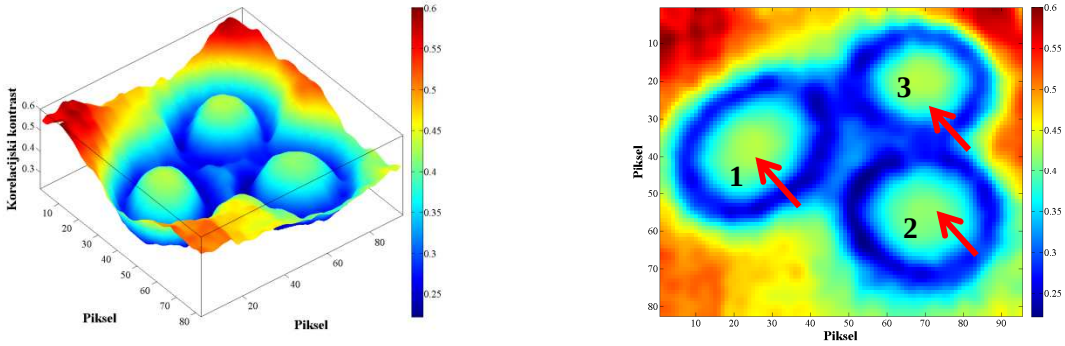


Slika 6.46 Usporedba koreliranog kontrasta za betone različite kvalitete, uzorak BM 3-1 s donje strane: a) udaljenost 1,5m; b) udaljenost 2m; c) udaljenost 3m

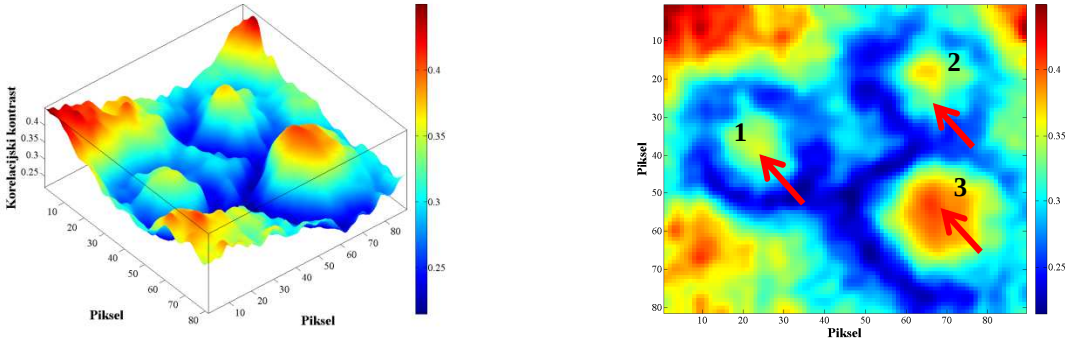
Ukoliko se promatra utjecaj udaljenosti toplinske pobude na mogućnost otkrivanja oštećenja, moguće je ustvrditi da za istu vrstu betona toplinska pobuda postavljena bliže uzorku betona daje najbolju mogućnost otkrivanja oštećenja, iako postoji i opasnost od lažno pozitivne interpretacije rezultata ispitivanja u slučaju djelovanja refleksije, Slika 6.46 a).

Slika 6.47 i Slika 6.48 prikazuju usporedbu rezultata dobivenih za uzorak BM 1-3 u slučaju kad između oštećenja i površine uzorka ne postoji armatura (Slika 6.47), te u slučaju kad armatura postoji (Slika 6.48). Iz prikazanog se može zaključiti kako armatura smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja pri čemu se uzrok pripisuje povećanoj lateralnoj difuziji topline zbog sloja armature koja „maskira“ postojanje oštećenja unutar betona.

Oštećenja broj „2“ se nalazi ispod armature postavljene na manjem razmaku u uzorku, te je u usporedbi s oštećenjem broj „3“ koje se nalazi ispod armature postavljene na većem razmaku, mogućnost otkrivanja oštećenja znatno smanjena.



Slika 6.47 Usporedba koreliranog kontrasta za uzorak BM 1-3 s donje strane na udaljenosti 2m , 3D i 2D prikaz



Slika 6.48 Usporedba koreliranog kontrasta za uzorak BM 1-3 s gornje strane na udaljenosti 2m , 3D i 2D prikaz

Naknadna obrada rezultata ispitivanja još uvijek je relativno neistražena metoda koja može poslužiti isticanju postojanja oštećenja u uzorcima. Prema podacima dostupnima autoru, u ovom radu je prikaz koreliranog kontrasta prvi put upotrjebljen kao metoda za otkrivanje postojanja oštećenja u uzorcima betona. Pokazalo se da je metoda vrlo dobra za otkrivanje velikih oštećenja u betonu. Metoda daje veliki kontrast i vrlo dobru mogućnost otkrivanja oštećenja, pri čemu se sa sigurnošću može otkriti oštećenje promjera 10 cm na dubini od 40 mm, uz uvjet da je uzorak zagrijavan toplinskom pobudom snage 1000 W na maksimalnoj udaljenosti od 3 m.

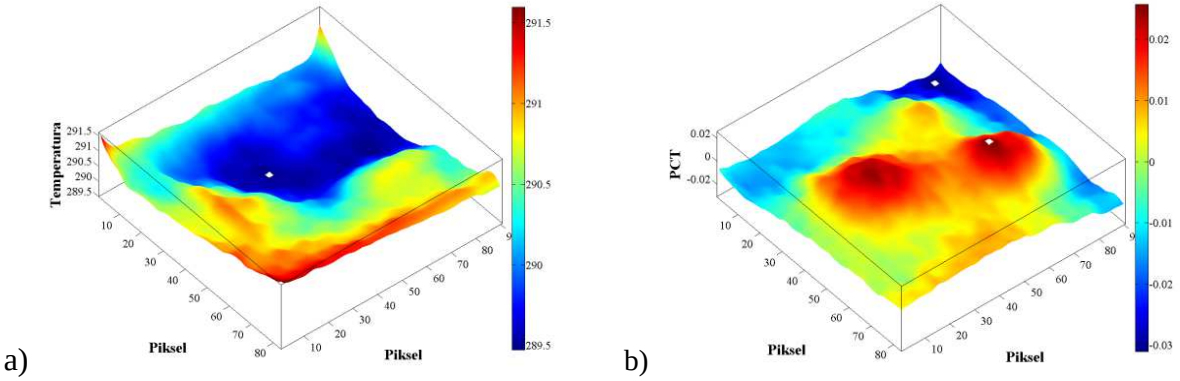
Posebno je interesantna tehnika otkrivanja oštećenja korištenjem koreliranog kontrasta zbog jednostavnosti primjene, s obzirom da nije potrebno definirati nikakve specifične parametre za proračun korelacijskih koeficijenata.

6.3.4 Rezultati ispitivanja korištenjem termografije glavnih komponenti

U ovom poglavlju dan je pregled rezultata ispitivanja, mogućnosti i ograničenja korištenja metode naknadne obrade rezultata ispitivanja analizom glavnih komponenti, koja je detaljnije opisana u poglavlju 3.6.8. Prikazani rezultati dani su za sekvencu hlađenja uzoraka nakon djelovanja toplinske pobude u trajanju od 60 minuta.

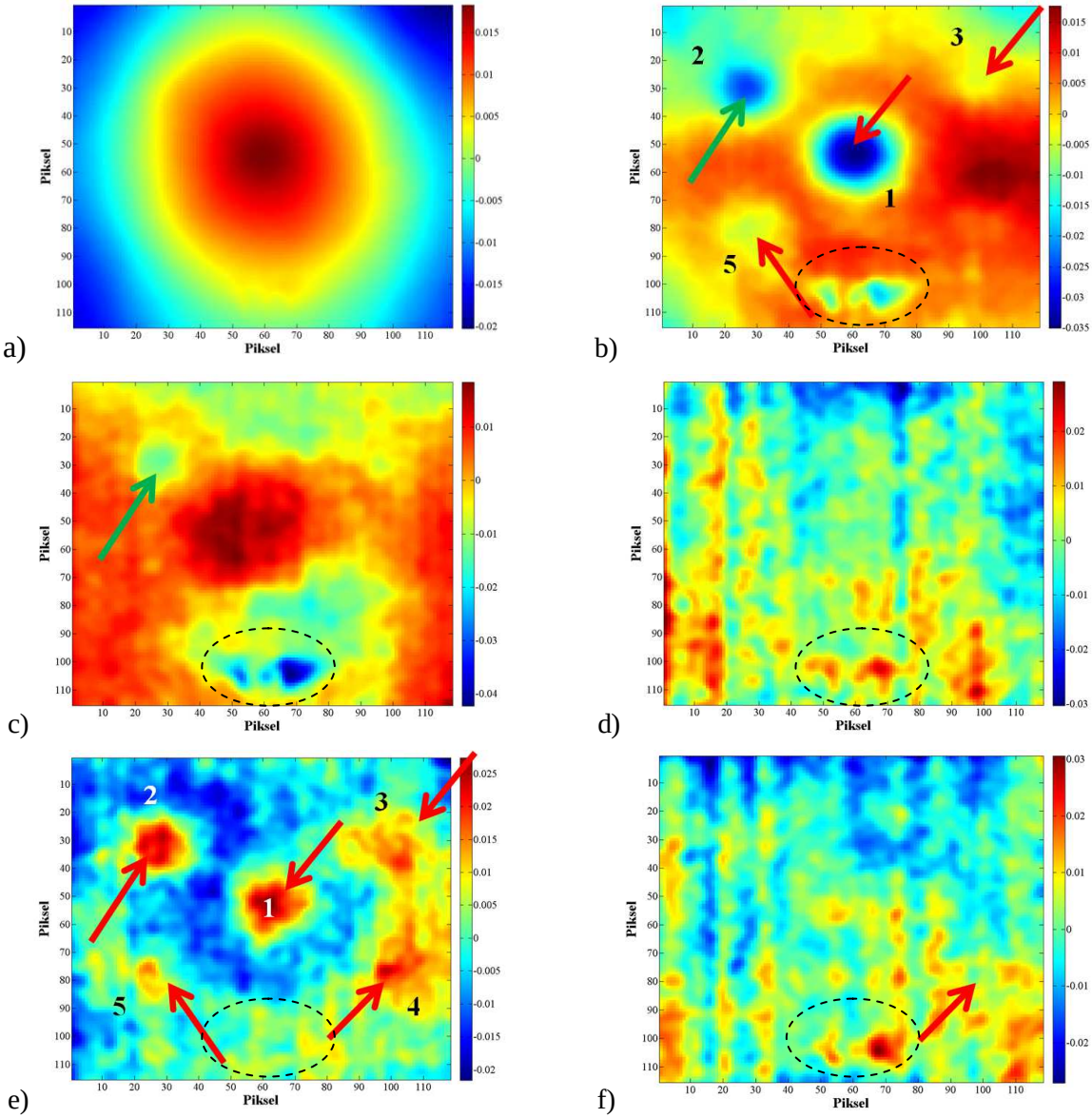
Ovdje su prikazani rezultati u obliku empirijskih ortogonalnih funkcija (EOF-a) dobivenih iz analize glavnih komponenti, koje su karakteristične za pojedine uzorke i za cjelokupni skup rezultata ispitivanja, dok je ostatak rezultata ispitivanja dan na CD-u u prilogu ovog rada.

Slika 6.49 daje primjer usporedbe rezultata ispitivanja bez naknadne obrade (optimalnog termograma) i uz naknadnu obradu korištenjem PCT analize (EOF_2) za uzorak BM 1-3 s gornje strane na udaljenosti toplinske pobude 3m, pri čemu je evidentan napredak u mogućnosti otkrivanja oštećenja u slučaju korištenja PCT metode.



Slika 6.49 PCT BM 1-3 s gornje strane udaljenost 3m: a) optimalni termogram; b) EOF_2

Slika 6.50 prikazuje prvih šest empirijskih ortogonalnih funkcija EOF-a dobivenih promatrajući sekvencu hlađenja uzorka BM 1-1 s donje strane, a koji prikazuju karakteristične rezultate za sve uzorke. Cilj je prikaza prvih šest EOF-a da se prikaže na koji je način moguće dobiti rezultate ispitivanja korištenjem PCT metode, i karakterističnog svojstva metode da se u slučaju određenih EOF-a savršeno može utvrditi postojanje oštećenja, dok se već za slijedeći EOF dobije samo šum, što može dovesti do krivog zaključka o nepostojanju oštećenja u uzorku.

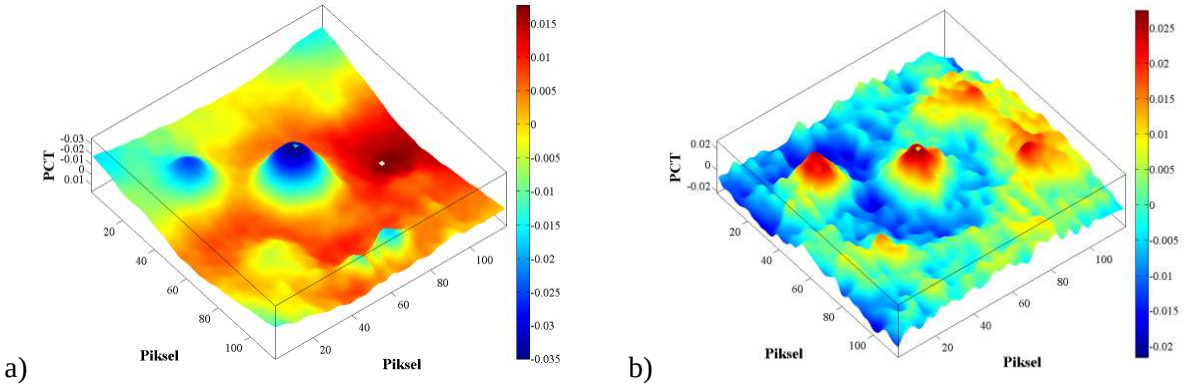


Slika 6.50 PCT BM 1-1 s donje strane udaljenost 1,5m: a) EOF_1; b) EOF_2; c) EOF_3; d) EOF_4; e) EOF_5; f) EOF_6;

Pri tome je EOF_1 vrlo sličan termogramu uzorka snimljenom u trenutku isključivanja toplinske pobude (Slika 6.50 a). EOF_2 (Slika 6.50 b) daje rezultate koji upućuju na postojanje 4 oštećenja u uzorku, pri čemu se i dodatno ističe anomalija u prikazu EOF-a, koja je, kako je utvrđeno posljedica refleksije lampe (lampa je još uvijek vrlo visoke temperature nakon isključivanja toplinske pobude).

Refleksija je u ovom slučaju posebno neugodna i „opasna“, jer ju je promatrajući izdvojeno prikaz samo jednog EOF-a, nemoguće primijetiti, zbog toga što je njezin intenzitet jednakog ekstrema kao i intenzitet EOF-a koji se javlja u području oštećenja u uzorku (Slika 6.50 b).

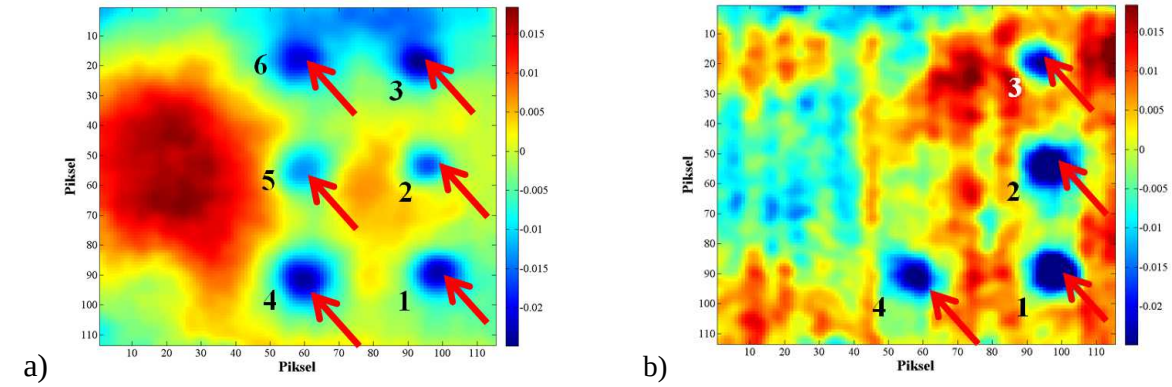
Ukoliko se promatraju EOF_3 i EOF_4, nije moguće otkriti postojanje oštećenja, dapače, dominantan je utjecaj refleksije u slučaju prikaza za EOF_3, odnosno šuma za EOF_4. Slijedeći, EOF_5 otkriva postojanje najvećeg broja oštećenja sveukupno 5 oštećenja u uzorku BM 1-1 promatrano s donje strane (Slika 6.50 e). Pri tome je šum nešto veći nego u slučaju EOF_2, ali je intenzitet iznad oštećenja toliko veliki da se bez dvojbe može ustvrditi postojanje oštećenja u uzorku, Slika 6.51.

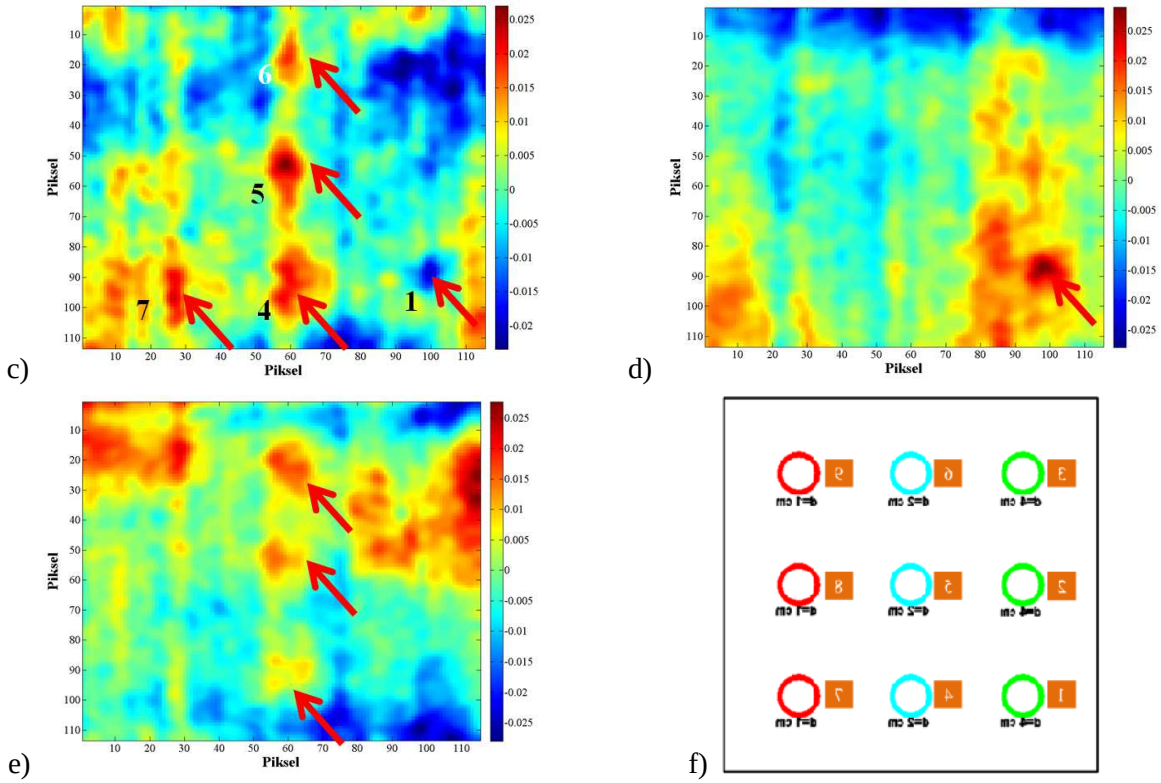


Slika 6.51 PCT BM 1-1 s donje strane udaljenost 1,5m, 3D prikaz: a) EOF_2; b) EOF_5

Potrebno je primijetiti da u slučaju prikaza EOF_5, ne postoji refleksija od lampe, te da je kod njega nestao utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzorka, što svakako doprinosi lakšem utvrđivanju postojanja oštećenja na većoj dubini ili manjih oštećenja.

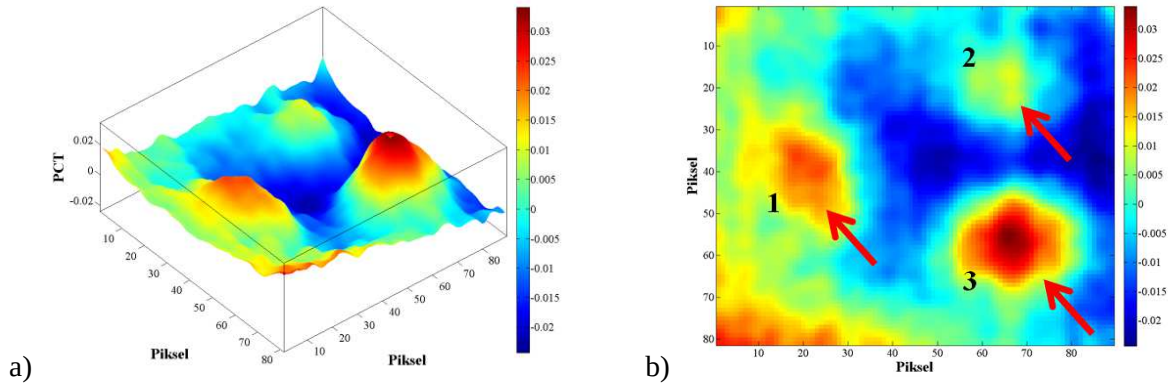
Od mogućih sveukupno 352 EOF-a za uzorak BM 1-1 s donje strane na udaljenosti toplinske pobude 1,5m, samo je prvih nekoliko EOF-a moguće iskoristiti za otkrivanje oštećenja u uzorcima betona, dok ostali EOF-ovi daju prikaze iz kojih je nemoguće utvrditi postojanje oštećenja. Slika 6.50f daje primjer ovih neupotrebljivih EOF-ova.





Slika 6.52 PCT BM 1-2 s gornje strane, udaljenost 1,5m: a) EOF_2; b) EOF_3; c) EOF_4; d) EOF_6; e) EOF_7; f) skica oštećenja;

Slika 6.52 daje prikaz rezultata analize metodom PCT za prvih nekoliko EOF-ova za uzorak BM 1-2 s gornje strane s udaljenosti 1,5 m.

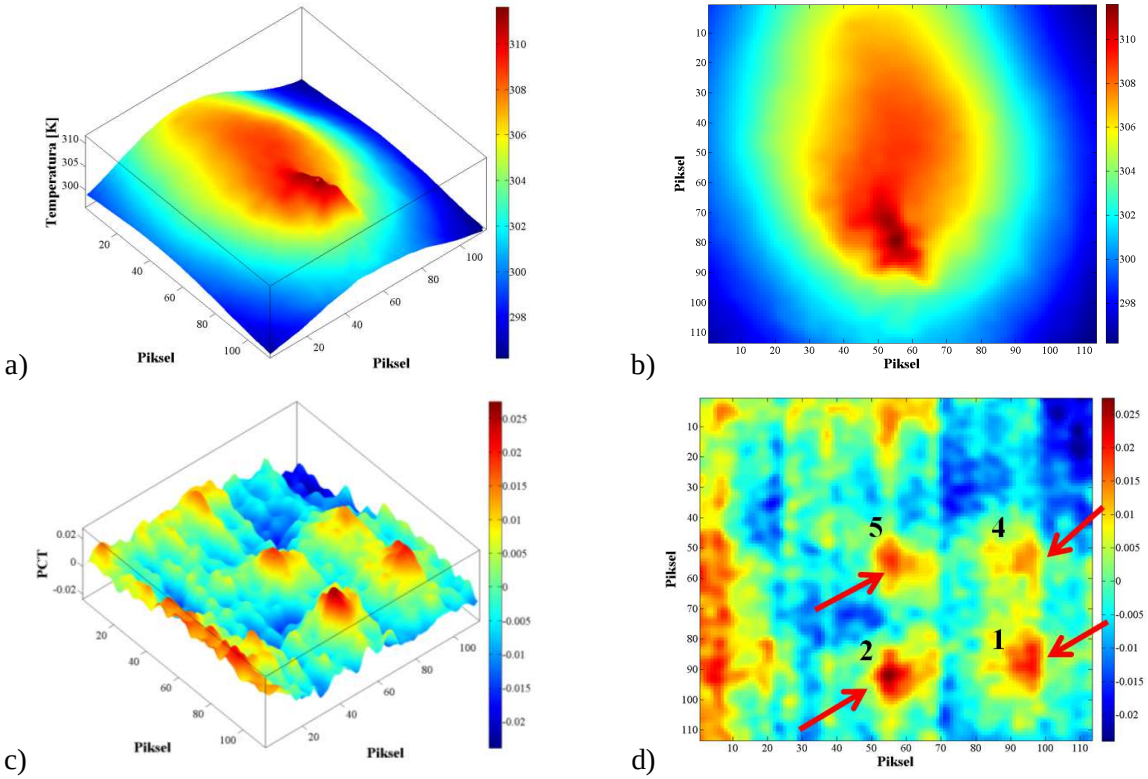


Slika 6.53 PCT (EOF_2) BM 1-3 s gornje strane, udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz

Primijećeno je da se kod uzoraka s velikim ugrađenim oštećenjima, uzoraka s oznakom BM x-3 kao upotrebljivi EOF, uz početni EOF_1, može koristiti samo EOF_2, a svi ostali EOF-ovi daju šum, Slika 6.53. Za razliku od toga, u slučaju uzoraka s oznakom BM x-1 i BM x-2 moguće je otkriti postojanje oštećenja kod većeg broja EOF-ova, što se može smatrati kao prednost, jer kako je pokazano u tom slučaju, moguće je eliminirati utjecaj refleksije i nejednolikog zagrijavanja uzoraka. Promatranjem većeg broja EOF-ova moguće je sa

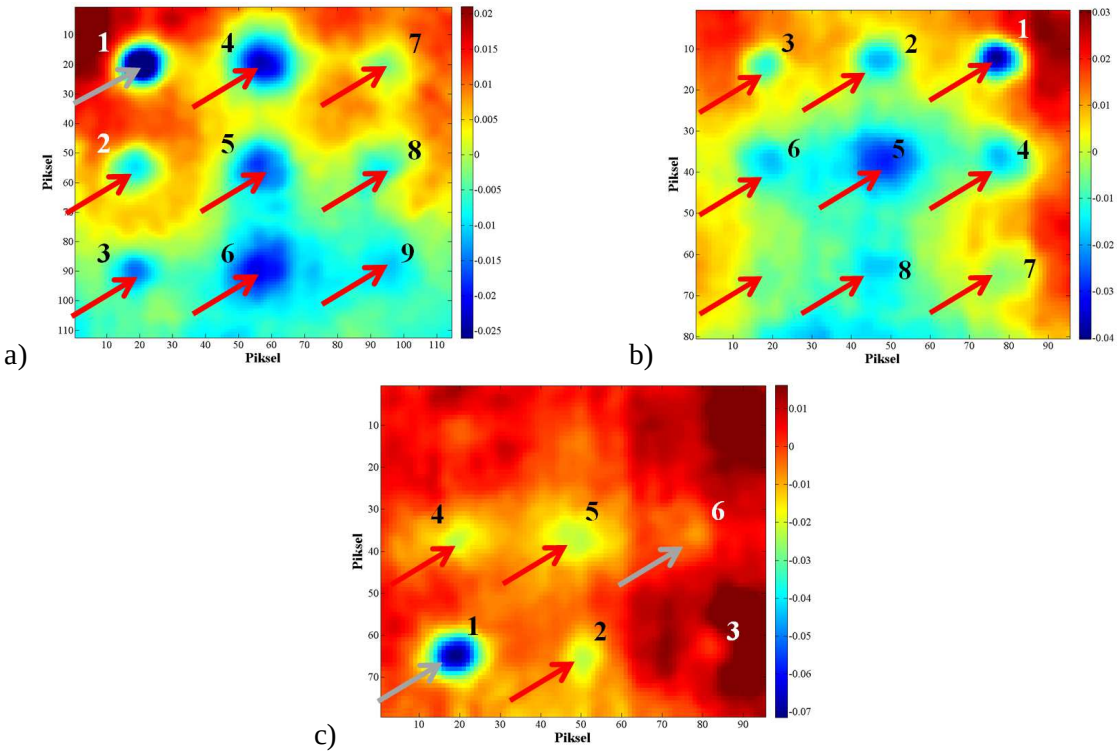
sigurnošću utvrditi postojanje oštećenja na većoj dubini, a kako je pokazano (Slika 6.52), moguće je i locirati oštećenja na određenoj dubini i ona određene debljine.

Korištenjem naknadne obrade rezultata ispitivanja uspješno je registrirano postojanje oštećenja u uzorcima BM 2-2 i BM 3-2 promatrano s donje strane i to uz uvjet da je udaljenost toplinske pobude 1,5 m, što je značajno zbog toga što su ovo jedine dvije konfiguracije ispitivanja uzoraka BM x-2 za koje je utvrđeno postojanje oštećenja u uzorku, Slika 6.54. Potrebno je spomenuti da je PCT jedina od metoda naknadne obrade rezultata ispitivanja kojom je moguće utvrditi postojanje oštećenja u spomenutim uzorcima.



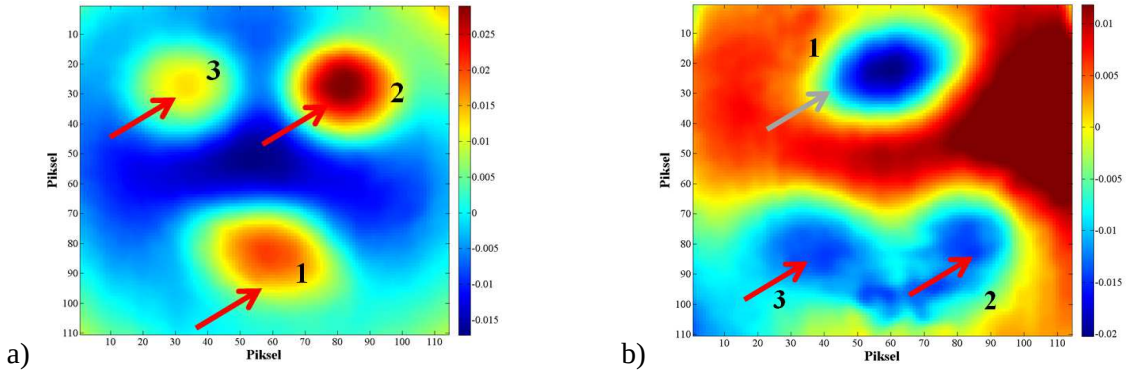
Slika 6.54 Termogram (3D i 2D prikaz) a) i b); PCT (EOF_8) c) i d) za uzorak BM 2-2 s donje strane, udaljenost 1,5m

Ukoliko se usporede rezultati ispitivanja uzorka BM 2-2 s gornje strane, vidljivo je da se uz povećanje udaljenosti toplinske pobude od površine uzorka smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja u betonu, Slika 6.55. Pri tome su dani prikazi EOF_2 zbog čega postoji utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzoraka.



Slika 6.55 PCT BM 2-2 s gornje strane: a) EOF_2 udaljenost 1,5m; b) EOF_2 udaljenost 2m; c) EOF_2 udaljenost 3m

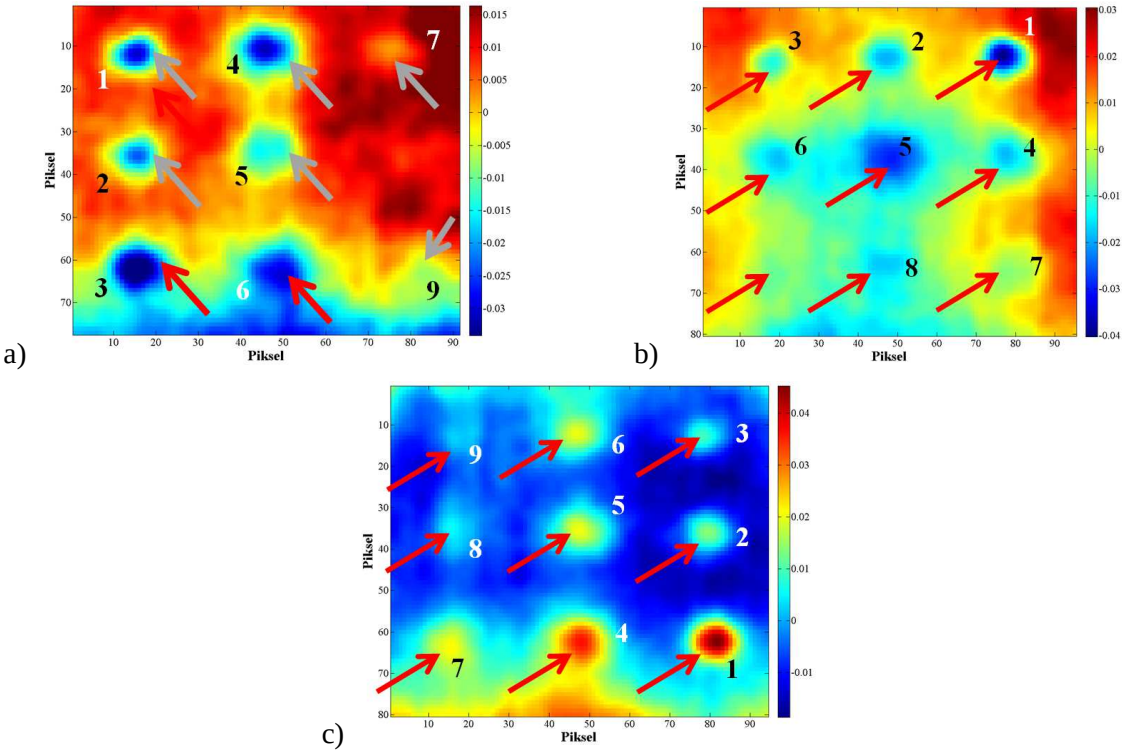
Slika 6.56 prikazuje usporedbu prikaza EOF-a za uzorak BM 3-3 s donje strane (bez armature) i gornje strane uzorka gdje postoji armatura između oštećenja i površine uzorka. Iz prikazanog te ostalih rezultata ispitivanja danih na CD-u u prilogu ovog rada, vidljivo je da postojanje armature utječe na mogućnost otkrivanja oštećenja i njegovu karakterizaciju (veličinu i oblik).



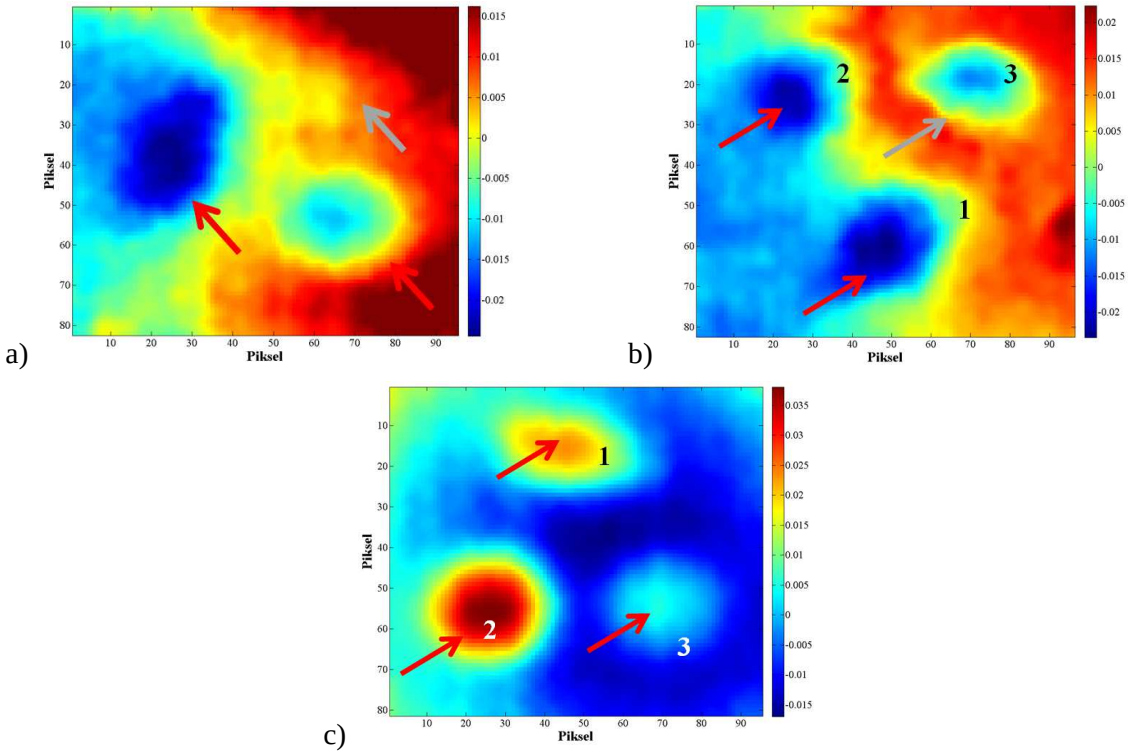
Slika 6.56 Uzorak BM 3-3 s donje strane, udaljenost 1,5m, PCT (EOF_3) a); uzorak BM 3-3 s gornje strane, udaljenost 1,5m, PCT (EOF_2)

Promatrajući utjecaj kvalitete betona na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorcima, Slika 6.57 i Slika 6.58, vidljivo je da je optimalna mogućnost otkrivanja oštećenja u slučaju betona BM 2-y iz razloga što se uz najveći kontrast boja (na skali) može utvrditi postojanje svih 9 oštećenja u uzorku. Navedeno se objašnjava činjenicom da se kod betona lošije kvalitete zbog

malene toplinske provodljivosti betona toplinski val ne može prenijeti do oštećenja i reflektirati natrag na površinu u jednakom vremenu trajanja toplinske pobude uzoraka. Suprotno tome, u slučaju betona velike kvalitete i guste strukture dominantna je lateralna difuzija topline koja maskira postojanje oštećenja u uzorku.



Slika 6.57 PCT udaljenost 2m s gornje strane: a) BM 1-2; b) BM 2-2; c) BM 3-2

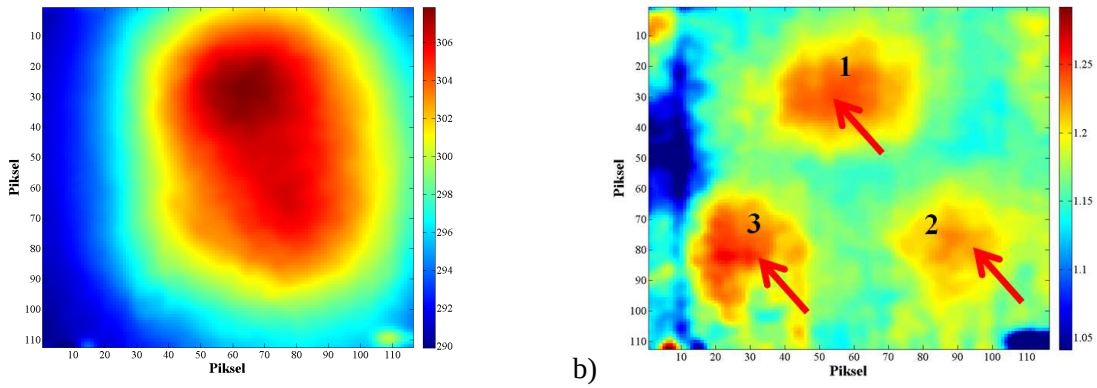


Slika 6.58 PCT (EOF_2) udaljenost 2m s donje strane: a) BM 1-3; b) BM 2-3; c) BM 3-3

6.3.5 Termografija faznog impulsa – fazni prikaz

U ovom poglavlju dan je pregled rezultata ispitivanja, mogućnosti i ograničenja korištenja termografije faznog impulsa (PPT), odnosno metode naknadne obrade rezultata ispitivanja analizom pomoću brze Fourierove transformacije kroz fazni prikaz rezultata, koja je detaljnije opisana u poglavlju 3.6.7. Prikazani rezultati dani su za sekvencu hlađenja uzoraka nakon djelovanja toplinske pobude u trajanju od 60 minuta.

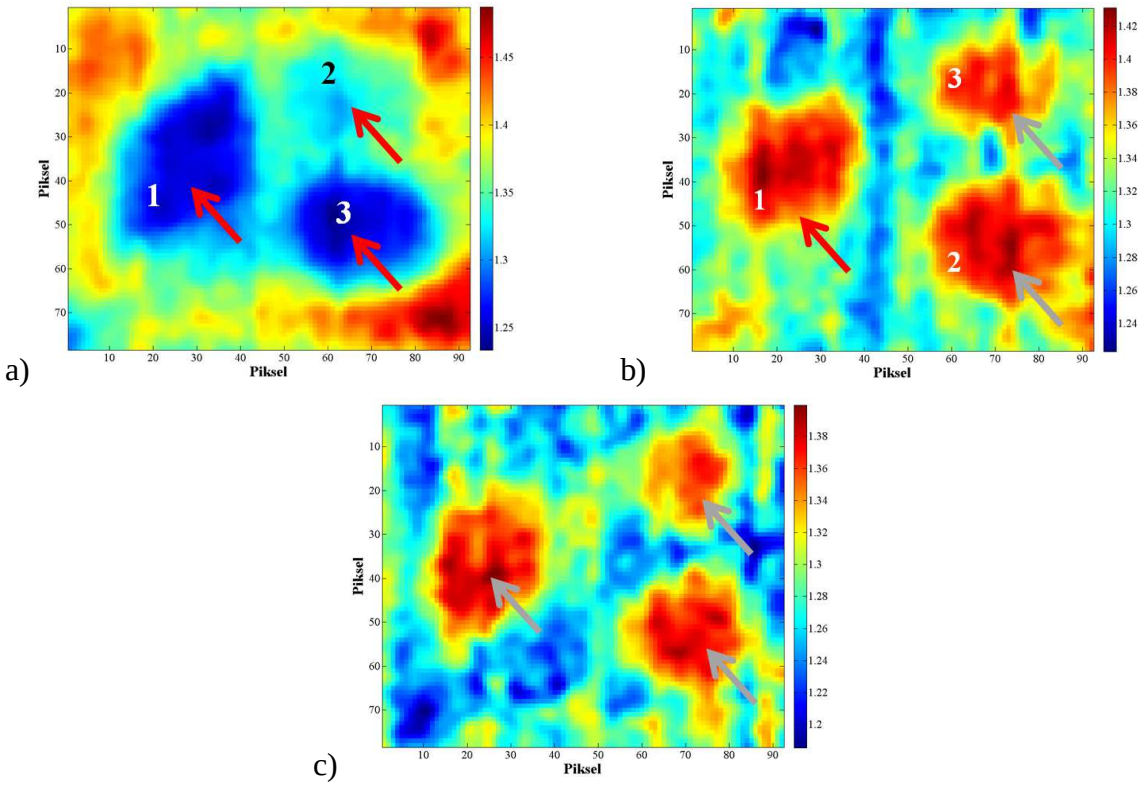
Ovdje su prikazani rezultati u obliku faznih prikaza za pojedine diskretne frekvencije f_n dobivene iz analize glavnih komponenti, koje su karakteristične za pojedine uzorke i za cjelokupni skup rezultata ispitivanja, dok je ostatak rezultata ispitivanja dan na CD-u u prilogu ovog rada. Slika 6.59 daje primjer usporedbe rezultata ispitivanja bez naknadne obrade (optimalnog termograma) i uz naknadnu obradu korištenjem PPT, odnosno FFT analize ($f = 5{,}540x10^{-4}\ Hz$) za uzorak BM 1-3 s gornje strane pri udaljenosti toplinske pobude 1,5m, pri čemu je evidentan napredak u mogućnosti otkrivanja oštećenja u slučaju korištenja faznog prikaza.



a) b)

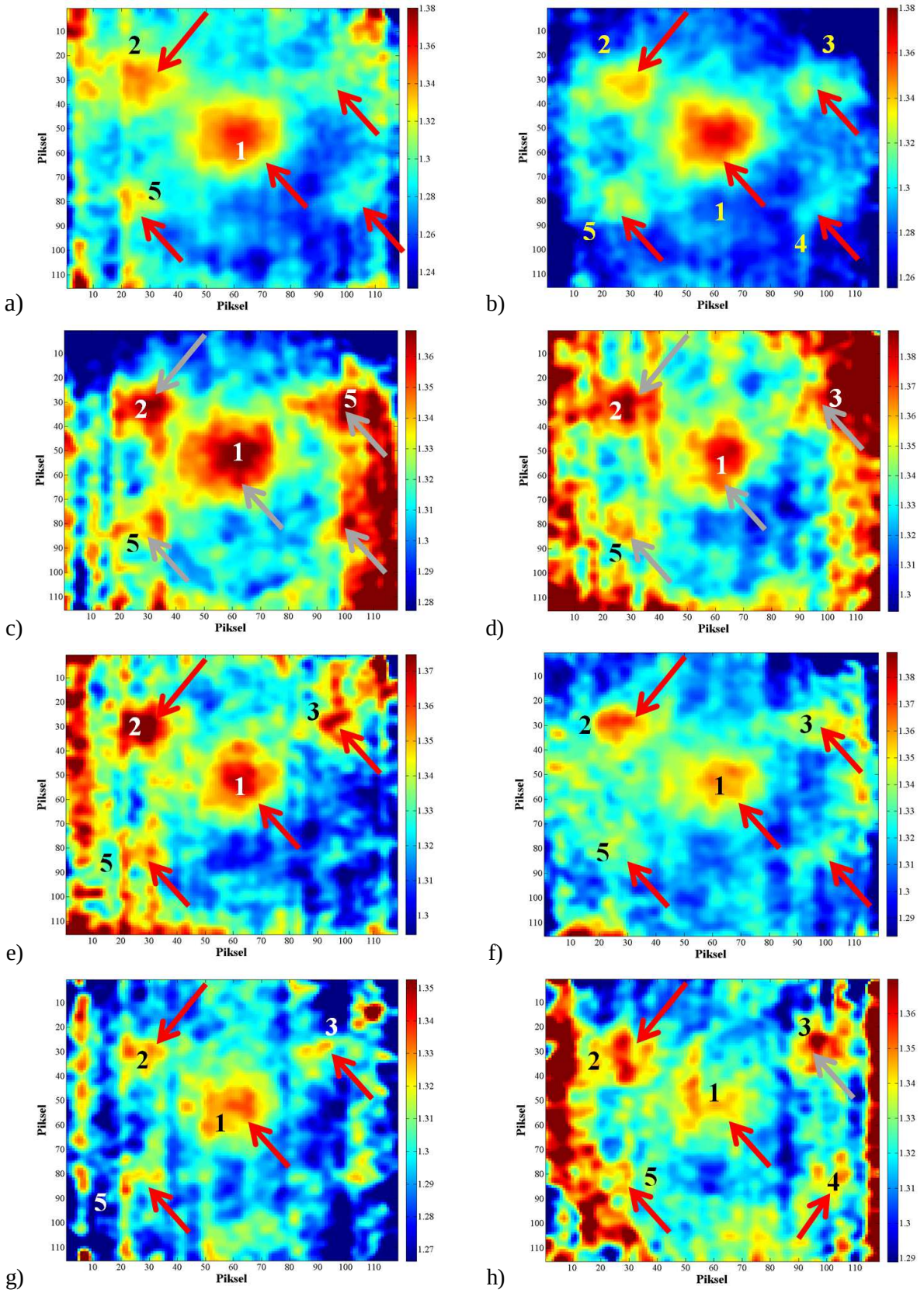
Slika 6.59 BM 1-3 s gornje strane udaljenost 1,5m: a) termogram; b) FFT fazni prikaz $f = 5{,}540x10^{-4}\ Hz$

Slika 6.60 prikazuje ovisnost mogućnosti otkrivanja oštećenja u uzorku BM 1-3 s donje strane pri udaljenosti toplinske pobude 3 m o frekvenciji promatranja faznog prikaza, pri čemu je vidljivo da se s promjenom frekvencije mijenja ekstrem koji otkriva postojanje oštećenja. Također postoji optimalna frekvencija promatranja pri kojoj je kontrast faznog prikaza najbolji, a šum najmanji, nakon čega se s daljnjim povećanjem frekvencije povećava šum sve do frekvencije kod koje više nije moguće otkriti postojanje oštećenja.



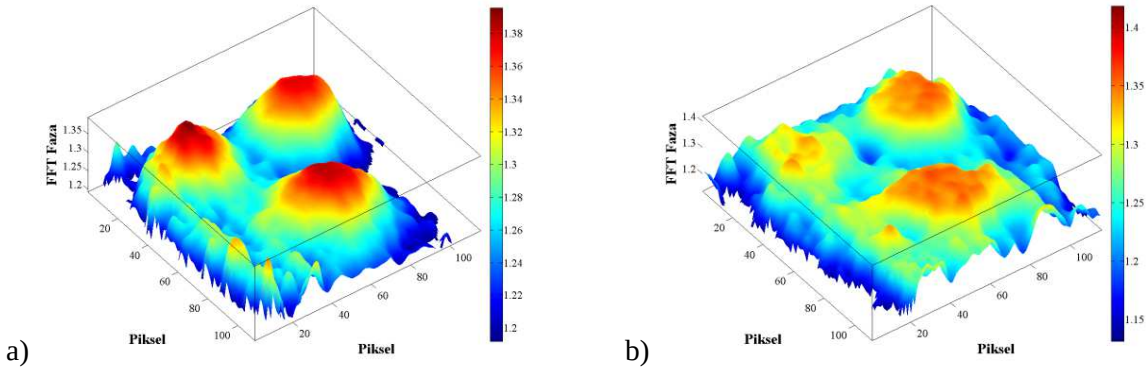
Slika 6.60 BM 1-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3m, FFT fazni prikaz: a) $f = 4{,}751x10^{-4}Hz$; b) $f = 1{,}188x10^{-3}\ Hz$; c) $f = 2{,}850x10^{-3}Hz$

Slika 6.61 prikazuje prvih osam diskretnih frekvencija za koje je moguće dati fazni prikaz oštećenja uzorka BM 1-1 s donje strane, koji je toplinski pobuđen halogenom lampom snage 1000W s udaljenosti 1,5 m. Navedeni fazni prikazi su dobiveni promatrajući sekvencu hlađenja uzorka, odnosno period nakon isključivanja toplinske pobude. Cilj je prikaza (Slika 6.61) prvih osam diskretnih frekvencija da se prikaže na koji je način moguće dobiti rezultate ispitivanja korištenjem brze Fourierove transformacije i njezinog faznog prikaza te karakterističnog svojstva metode da mogućnost otkrivanja oštećenja ovisi o promatranoj diskretnoj frekvenciji. Vidljivo je također, da se povećanjem frekvencije dobivaju lošiji rezultati zbog povećanja šuma, što može dovesti do krivog zaključka o postojanju oštećenja u uzorku.



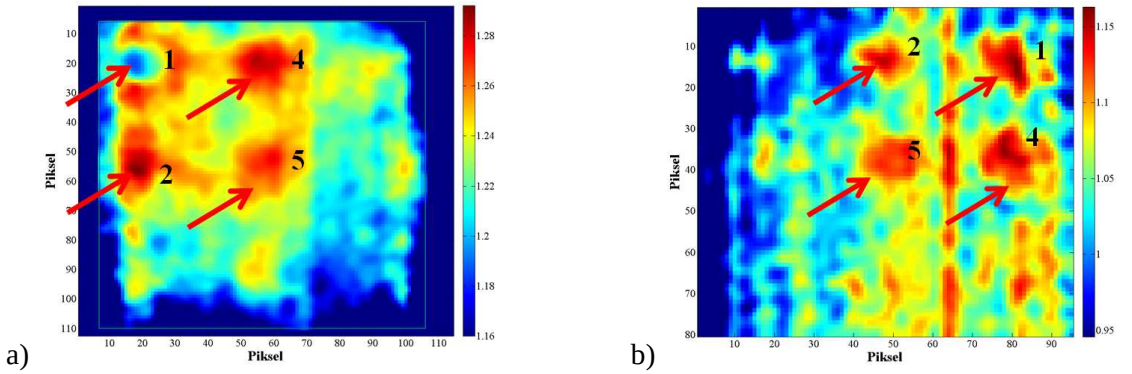
Slika 6.61 FFT fazni prikaz BM 1-1 s donje strane udaljenost 1,5m: a) $f = 1{,}136x10^{-3}\ Hz$; b) $f = 1{,}420x10^{-3}\ Hz$; c) $f = 1{,}705x10^{-3}\ Hz$; d) $f = 1{,}990x10^{-3}\ Hz$; e) $f = 2{,}273x10^{-3}\ Hz$; f) $f = 2{,}557x10^{-3}\ Hz$; g) $f = 3{,}409x10^{-3}\ Hz$; h) $f = 3{,}693x10^{-3}\ Hz$

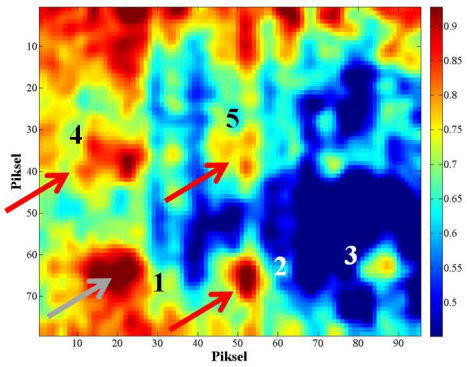
Povećanjem promatrane diskretne frekvencije, smanjuje se kontrast između oštećenog i neoštećenog područja na uzorku, Slika 6.62, čak toliko da je, ukoliko se promatra fazni prikaz za određenu diskretnu frekvenciju, moguće je propustiti postojanje određenih oštećenja.



Slika 6.62 FFT fazni prikaz BM 1-3 s donje strane udaljenost 1,5m: a) $f = 1{,}096x10^{-3}\ Hz$; b) $f = 3{,}562x10^{-3}\ Hz$

Ukoliko se usporede rezultati ispitivanja uzorka BM 2-2 s gornje strane, vidljivo je da se povećanjem udaljenosti toplinske pobude od površine uzorka smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja u betonu, Slika 6.63. Iako su na slikama označeni broj 1,2, 4 i 5 i njih je u slučaju toplinske pobude na udaljenosti 1,5 i 2 m moguće s većom sigurnosti otkriti, uz poznavanje položaja oštećenja, moguće je utvrditi da se naziru i druga oštećenja u uzorku. Ovo nije slučaj kod ispitivanja gdje je toplinska pobuda bila na udaljenosti od 3 m, kod kojeg se već i oštećenje broj 5 slabije vidi. Zaključuje se dakle da je oštećenja promjera 50 mm sa sigurnošću moguće otkriti s toplinskom pobudom na udaljenosti od 2 m ukoliko su oštećenja na dubini manjoj od 3 cm i ukoliko su veće debljine od 1 cm.



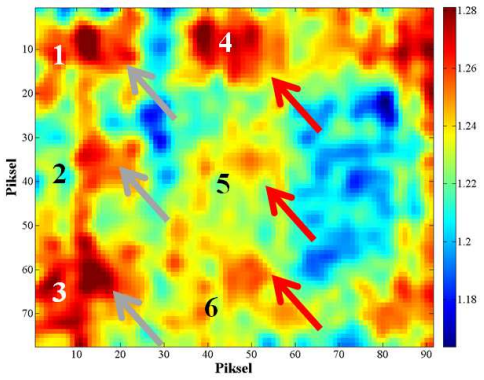


c)

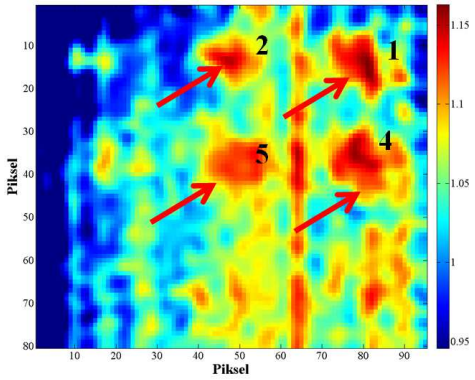
Slika 6.63 FFT fazni prikaz BM 2-2 s gornje strane: a) udaljenost 1,5m ($f = 1{,}364x10^{-3}Hz$); b) udaljenost 2m ($f = 1{,}928x10^{-3}Hz$); c) udaljenost 3m ($f = 1{,}202x10^{-3}Hz$)

Promatrajući utjecaj kvalitete betona na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorcima, Slika 6.64, vidljivo je smanjenje mogućnosti otkrivanja oštećenja u uzorcima s povećanjem kvalitete betona.

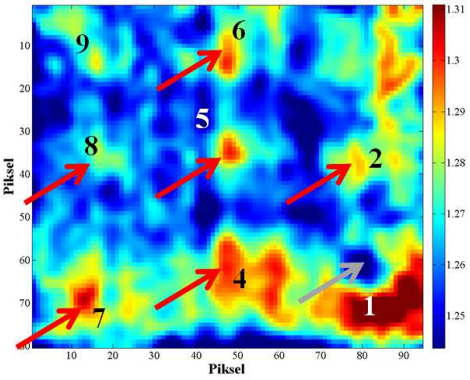
Ovaj zaključak potrebno je uzeti s rezervom, jer je provođenje ispitivanja i naknadnom obradom rezultata zaključeno da je vrlo teško uspostaviti direktnu ovisnost kvalitete betona i mogućnosti otkrivanja oštećenja u njemu, iz razloga što u obzir svakako treba uzeti i diskretnu frekvenciju pri kojoj se uzorci betona promatraju. Mogućnost promatranja za istu frekvenciju u slučaju sustava ispitivanja prikazanog u ovom radu teško je postići zbog toga što, kako je opisano u poglavlju 3.6.7, frekvencija ovisi o duljini ispitivanja i promatranoj slici dobivenoj iz FFT analize. Kako pojedine slike nakon analize ne daju rezultate kojima bi se moglo otkriti oštećenja u uzorku, za usporedbu kvalitete betona i mogućnosti otkrivanja oštećenja, odabrano je da su frekvencije približno jednake, a svakako da su istog reda veličine.



a)



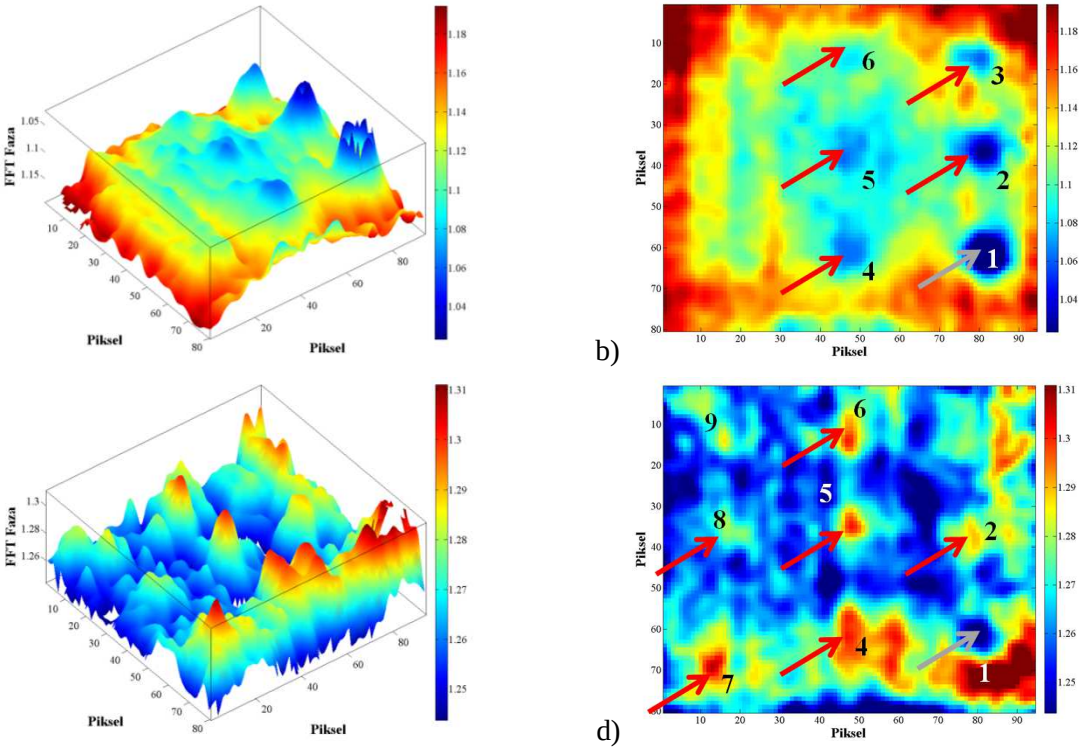
b)



c)

Slika 6.64 FFT faza udaljenost 2m s gornje strane: a) BM 1-2, $f = 1{,}676x10^{-3}Hz$; b) BM 2-2, $f = 1{,}928x10^{-3}Hz$; c) BM 3-2 $f = 1{,}441x10^{-3}Hz$

Zbog navedenog, nije nužno da su dani fazni prikazi (Slika 6.64) optimalni fazni prikazi. Slika 6.65a) i b) daju optimalni fazni prikaz za uzorak BM 3-2 u danoj konfiguraciji ispitivanja. Za taj fazni prikaz može se sa značajnom sigurnošću utvrditi postojanje označenih 6 oštećenja, dok tanka oštećenja broj 7-9 nisu otkrivena. S druge strane, Slika 6.65c) i d) daju prikaz kojim je moguće otkriti postojanje svih 9 oštećenja, ali je šum veliki, odnosno kontrast između oštećenja i neoštećenog područja toliko malen da su u navedenom slučaju oštećenja otkrivena isključivo zahvaljujući tome što je unaprijed bio poznat njihov položaj u uzorku.



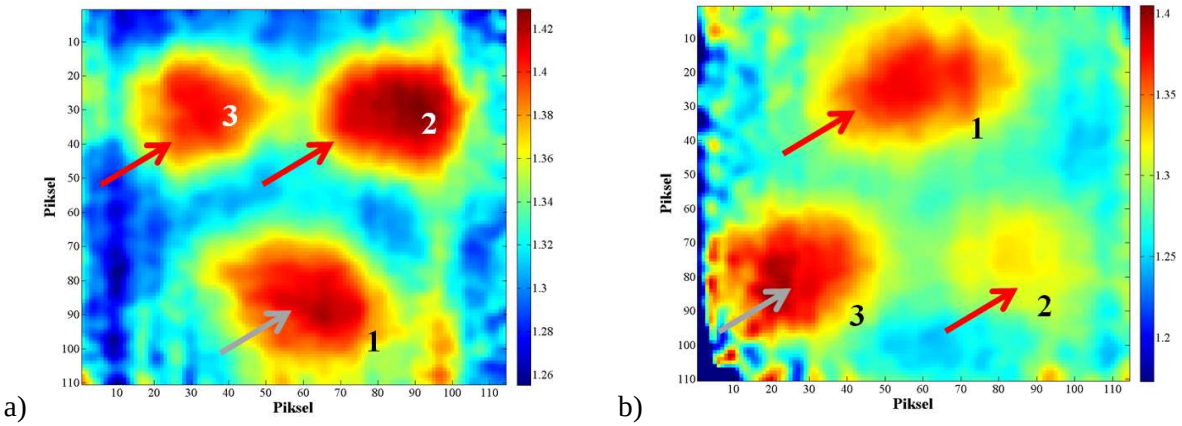
a) b)

c) d)

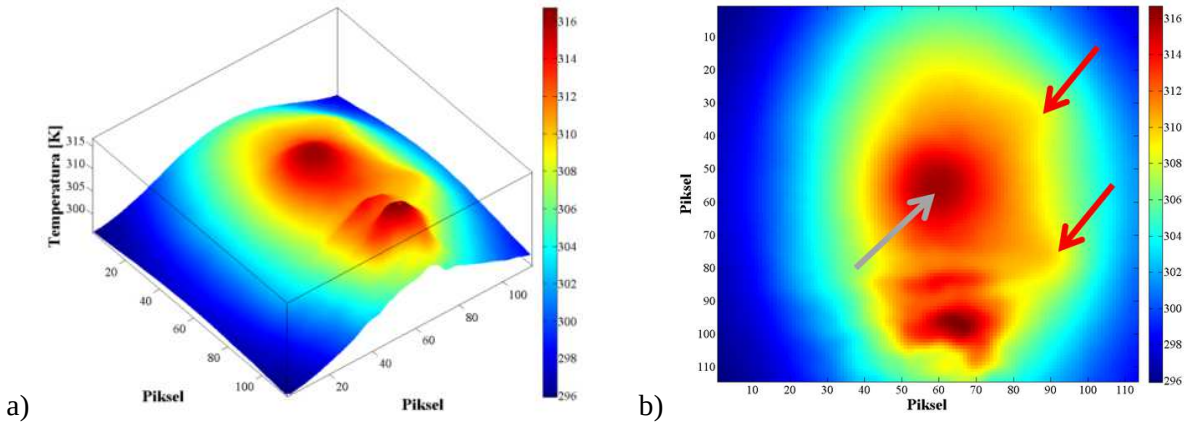
Slika 6.65 FFT Faza BM 3-2 udaljenost 2m s gornje strane: a) 3D prikaz, $f = 5{,}764x10^{-4}Hz$; b) 2D prikaz, $f = 5{,}764x10^{-4}Hz$; c) 3D prikaz, $f = 1{,}441x10^{-3}Hz$; d) 2D prikaz, $f = 1{,}441x10^{-3}Hz$

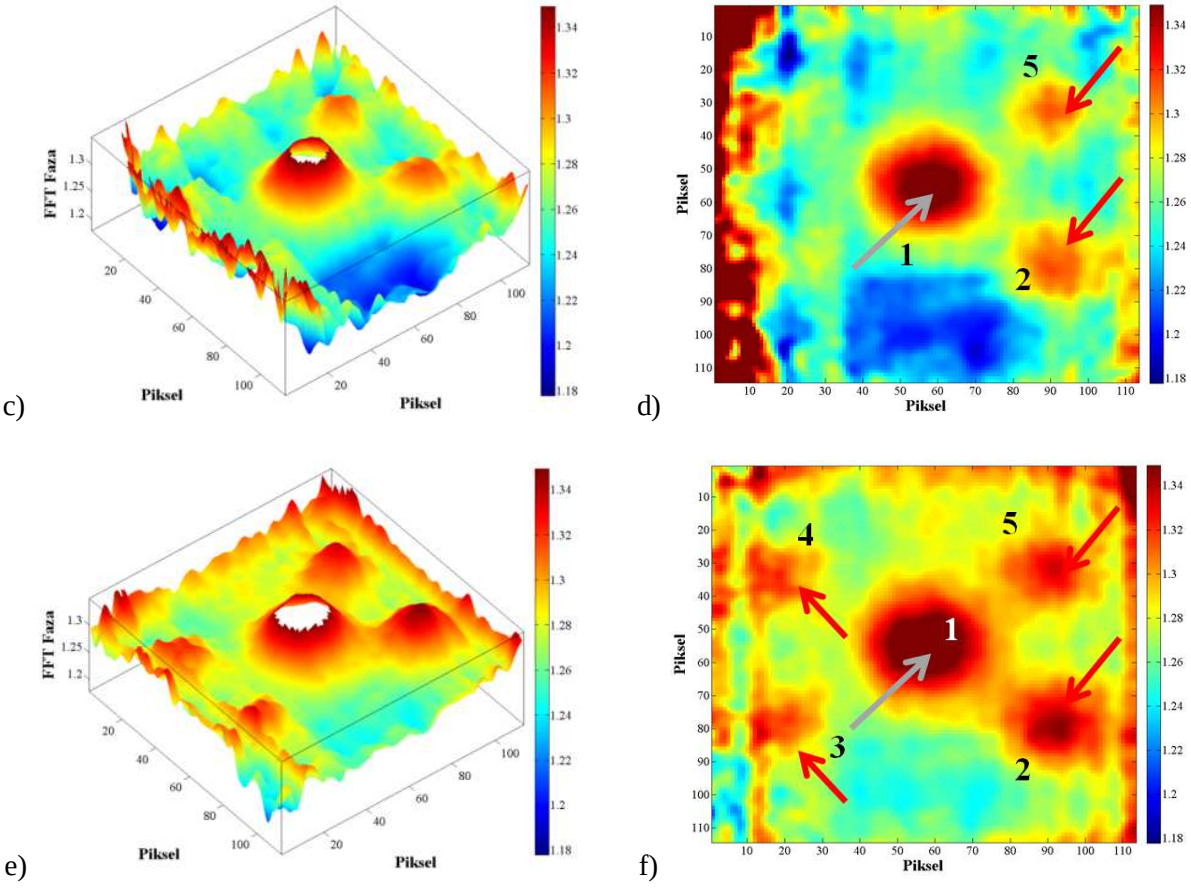
Općenito se može zaključiti da manji broj termograma u sekvenci daje nešto bolje rezultate pri nominalno nižoj diskretnoj frekvenciji, dok je za veći broj termograma u sekvenci moguće dobiti detaljniju raspodjelu prikaza u frekvencijskoj domeni (gušće frekvencije), ali će rezultati tada biti pod nominalno većom diskretnom frekvencijom. Navedeno vrijedi pod uvjetom da je razmak između snimanja dva termograma jednak u svim slučajevima, tako da se vrijeme promatranja iskazuje brojem termograma u sekvenci hlađenja.

Slika 6.66 daje usporedbu faznog prikaza za uzorak BM 3-3 s donje strane (bez armature) i gornje strane uzorka gdje postoji armatura između oštećenja i površine uzorka. Iz prikazanog te ostalih rezultata ispitivanja danih na CD-u u prilogu ovog rada, vidljivo je da postojanje armature utječe na mogućnost otkrivanja oštećenja i njegovu karakterizaciju (veličinu i oblik), pri čemu je za oštećenje broj 2 promatrano s gornje strane (oštećenje ispod gušće armature), kontrast između oštećenja i neoštećenog područja vrlo malen.



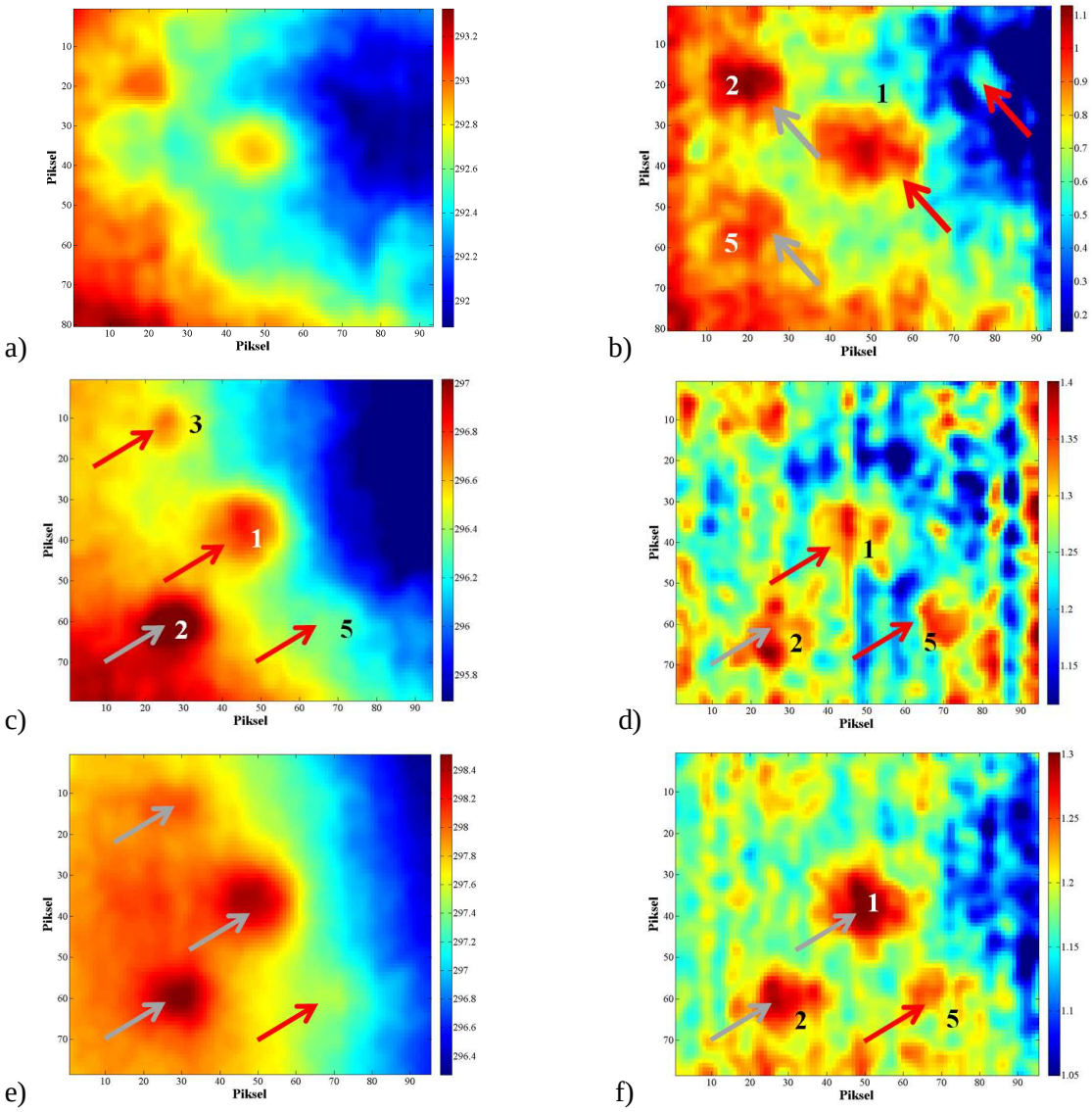
Slika 6.66 a) Uzorak BM 3-3 s donje strane, udaljenost 1,5m, $f = 1{,}301x10^{-3}Hz$; b) uzorak BM 3-3 s gornje strane, udaljenost 1,5m, $f = 1{,}370x10^{-3}Hz$





Slika 6.67 BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) optimalni termogram, 3D prikaz; b) optimalni termogram, 2D prikaz; c) FFT faza, 3D prikaz, $f = 1{,}102x10^{-3}Hz$; d) FFT faza, 2D prikaz, $f = 1{,}102x10^{-3}Hz$; e) FFT faza, 3D prikaz, $f = 1{,}377x10^{-3}Hz$; f) FFT faza, 2D prikaz, $f = 1{,}377x10^{-3}Hz$

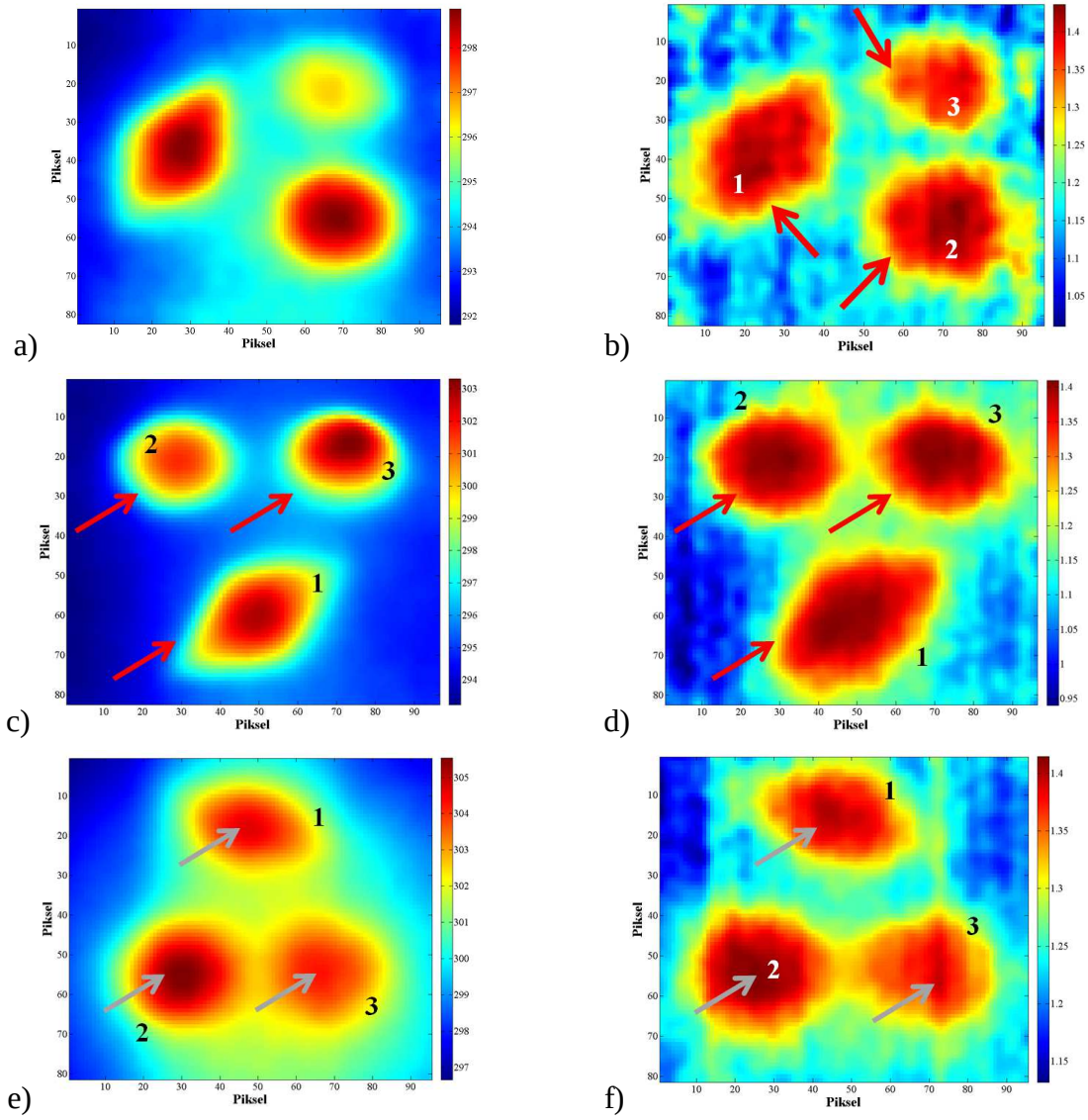
Slika 6.67a) i b) prikazuje termogram (raspodjelu temperature po površini uzorka) u trenutku neposredno nakon isključivanja toplinske pobude, pri čemu je očigledan problem nejednolikog zagrijavanja uzorka koji sprječava otkrivanje oštećenja. Također, s donje strane uzorka postoji refleksija halogene lampe koja može uzrokovati lažno pozitivni rezultat, kojime bi se utvrdilo postojanje oštećenja koje zapravo ne postoji. Problem se javlja zbog toga što se reflektira vrela lampa na glatkom dijelu uzorka.



Slika 6.68 BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m, a) Optimalni termogram, b) FFT Faza, $f = 1{,}681x10^{-3}Hz$;// BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m; c) Optimalni termogram, d) FFT Faza, $f = 1{,}231x10^{-3}Hz$;// BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m, e) Optimalni termogram, f) FFT Faza, $f = 1{,}653x10^{-3}Hz$

Vidljivo je također, da fazni prikaz rješava problem nejednolikog zagrijavanja uzorka, a može se utvrditi da uopće nema problema s refleksijom koja se pojavljuje na termogramima, Slika 6.67c) - f). Može se dakle ustvrditi da se promatranjem faznog prikaza može lakše odrediti postojanje oštećenja u uzorku, s time da je oštećenje suprotnog ekstrema od refleksije, odnosno pri višoj frekvenciji, refleksija nestaje i moguće je odrediti postojanje čak pet oštećenja (Slika 6.67d) i f)). Iako postoji značajni šum, i teško je utvrditi postojanje malenih oštećenja promjera samo 50 mm, moguće je utvrditi tendenciju da niža frekvencija daje dobre rezultate za oštećenja pri većoj dubini i za oštećenja manje debljine, dok se kod viših frekvencija ne mogu otkriti oštećenja pri većoj dubini ukoliko ona nisu dovoljne

debljine, Slika 6.67c) - f). Ukoliko se usporede rezultati ispitivanja dobiveni za uzorak BM 1-1 na udaljenosti od 3m (Slika 6.68a)) s onima za uzorke BM 2-1 i BM 3-1 na udaljenosti od 3m (Slika 6.68f)), vidljivo je da termogrami pokazuju nejednoliko zagrijavanje uzoraka, pri čemu je s povećanjem udaljenosti moguće već iz termograma odrediti postojanje oštećenja. Slika 6.68d) i f) daju loš fazni prikaz, što se pripisuje betonu bolje kvalitete i činjenici da je prilikom ispitivanja vlažnost uzorka BM 1-1 bila 4,1%, a uzorka BM 2-1 5%, što uzrokuje veće lateralno provođenje topline kod betona bolje kvalitete i vlažnijeg betona, pri čemu je trajanje zagrijavanja i hlađenja uzorka jednako.



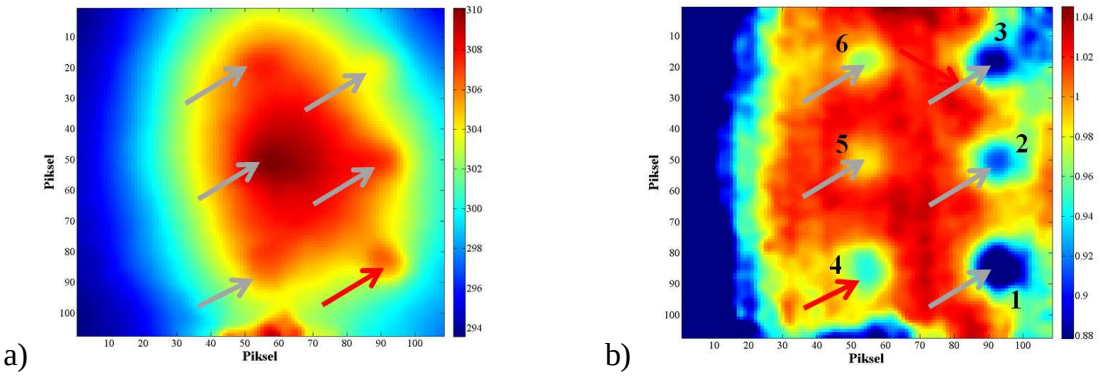
Slika 6.69 BM 1-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m, a) Optimalni termogram, b) FFT faza, $f = 1{,}950x10^{-3}Hz$;// BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m; c) Optimalni termogram, d) FFT faza, $f = 2{,}479x10^{-3}Hz$;// BM 3-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m, e) Optimalni termogram, f) FFT faza, $f = 1{,}441x10^{-3}Hz$

Slika 6.69 prikazuje usporedbu optimalnih termograma i optimalnih faznih prikaza za uzorke betona BM 1-3, BM 2-3 i BM 3-3 svi s donje strane, pri čemu je toplinska pobuda bila na udaljenosti 2m. Prilikom ispitivanja, vlažnost uzoraka je bila za uzorak BM 1-3 najmanja, Tablica 6.3. Bitno je ovdje naglasiti da za velika oštećenja u betonu, vlažnost i kvaliteta betona imaju utjecaj na veličinu kontrasta između oštećenog i neoštećenog dijela uzorka, dok na samu mogućnost otkrivanja oštećenja nemaju značajniji utjecaj.

Tablica 6.3 Vlažnost uzoraka BM x-3 prilikom ispitivanja s udaljenosti 2m

Uzorak	Vlažnost uzorka [%]
BM 1-3	4,0
BM 2-3	4,5
BM 3-3	5,2

Iako je određeni broj oštećenja vidljiv i na optimalnim termogramima, korištenjem faznog prikaza moguće je uz poboljšanje kontrasta, i postaviti apriori karakteristike oštećenja, odnosno dubinu oštećenja i debljinu oštećenja, Slika 6.70. Oštećenja označena brojevima 1, 2 i 3 su debljine 40 mm, s time da je dubina oštećenja broj 1, 10 mm, a dubina oštećenja broj 3 je 30 mm. Srednji stupac oštećenja je debljine 20 mm, a dubina oštećenja broj 4 je 20 mm dok je dubina oštećenja broj 6, 40 mm.

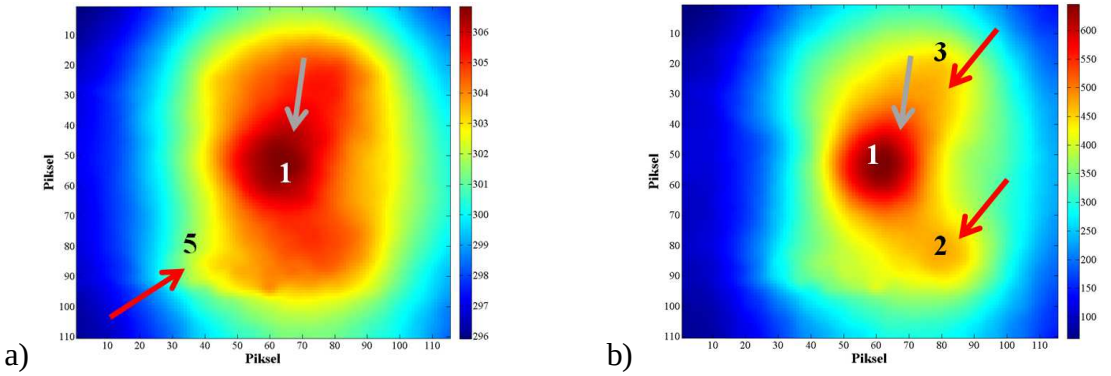


Slika 6.70 BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m, a) Optimalni termogram; b) FFT faza ($f = 4{,}525x10^{-4}Hz$)

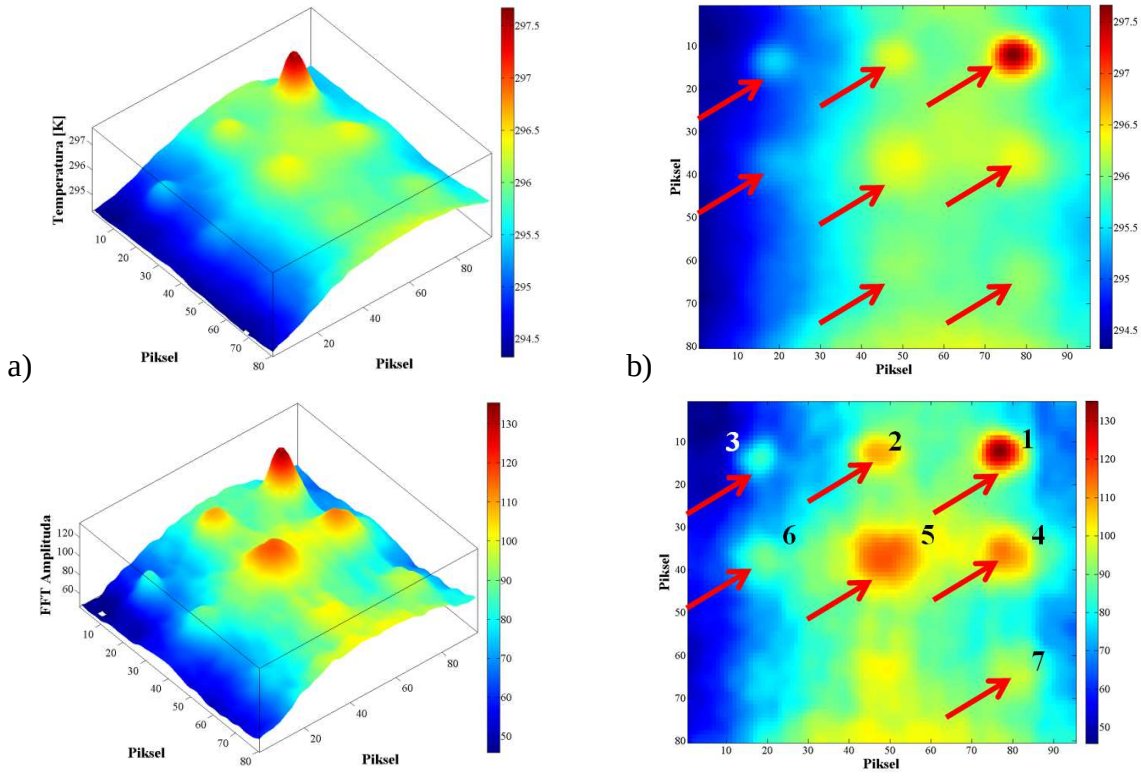
6.3.6 Termografija faznog impulsa – amplitudni prikaz

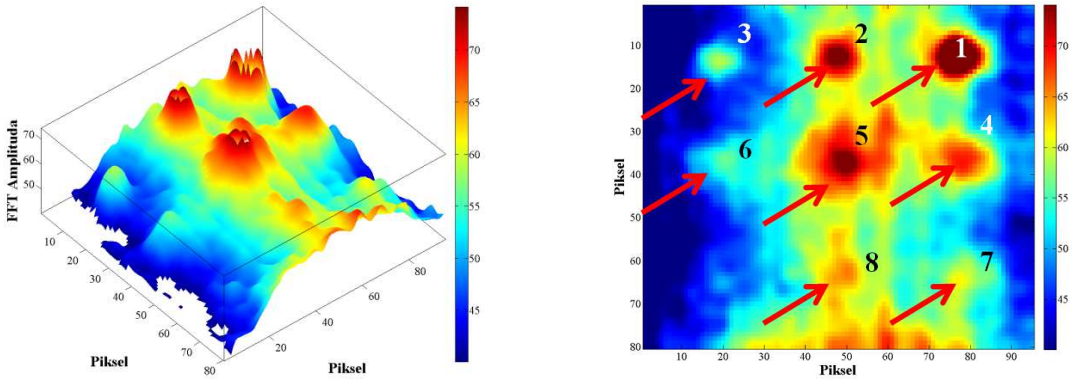
U ovom poglavlju dan je pregled rezultata ispitivanja, mogućnosti i ograničenja korištenja termografije faznog impulsa (PPT), odnosno metode naknadne obrade rezultata ispitivanja analizom pomoću brze Fourierove transformacije kroz amplitudni prikaz rezultata, koja je detaljnije opisana u poglavlju 3.6.7. Prikazani rezultati dani su za sekvencu hlađenja uzoraka

nakon djelovanja toplinske pobude u trajanju od 60 minuta. Prikazani su rezultati u obliku amplitudnih prikaza za pojedine diskretne frekvencije f_n dobivene iz analize glavnih komponenti, koje su karakteristične za pojedine uzorke i za cjelokupni skup rezultata ispitivanja, dok je ostatak rezultata ispitivanja dan na CD-u u prilogu ovog rada. Slika 6.71 i Slika 6.72 daju primjer usporedbe rezultata ispitivanja bez naknadne obrade (optimalnog termograma) i uz naknadnu obradu korištenjem PPT, odnosno FFT analize. Amplitudni prikaz ($f = 3{,}472x10^{-4}\,Hz$) za uzorak BM 2-1 s gornje strane pri udaljenosti toplinske pobude 1,5 m, Slika 6.71, daje tek blagi napredak u mogućnosti otkrivanja oštećenja u slučaju korištenja amplitudnog prikaza.



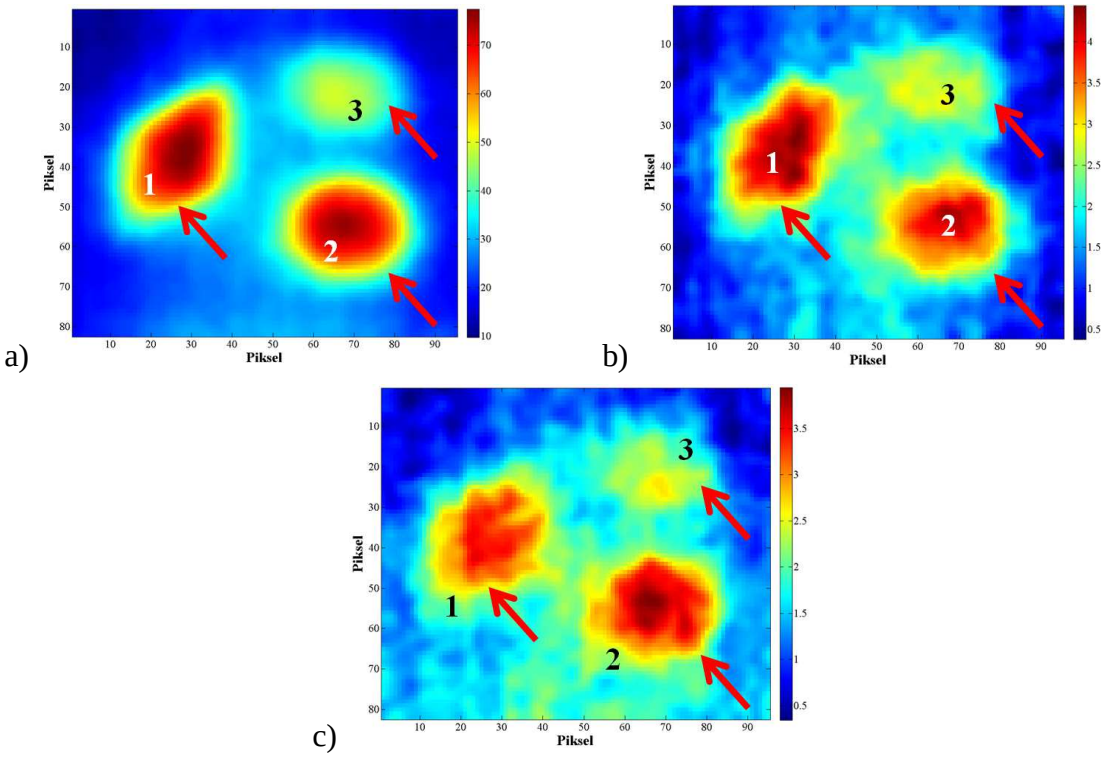
Slika 6.71 BM 2-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m; a) Optimalni termogram; b) FFT amplituda ($f = 3{,}472x10^{-4}Hz$)





Slika 6.72 BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m; a) Optimalni termogram; b) FFT amplituda ($f = 5{,}510x10^{-4}Hz$); c) FFT amplituda ($f = 8{,}264x10^{-4}Hz$)

U slučaju uzorka BM 2-2 (Slika 6.72), mogućnost otkrivanja oštećenja korištenjem amplitudnog prikaza je znatno bolja, u usporedbi s optimalnim termogramom.

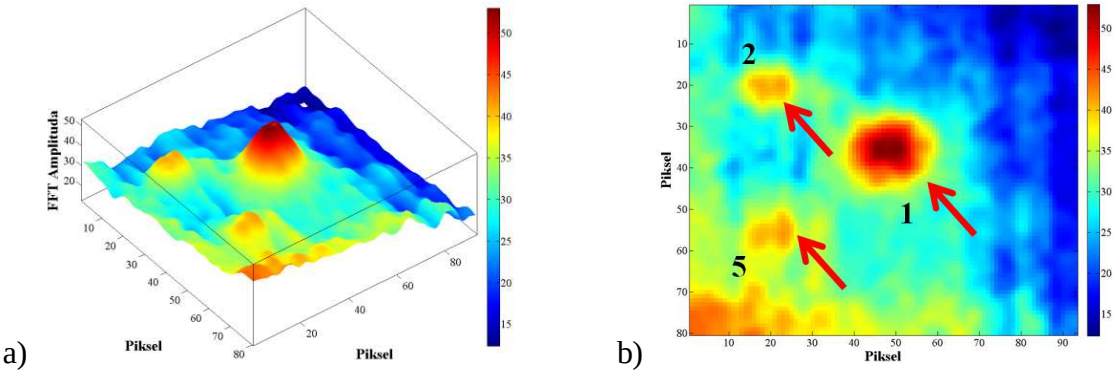


Slika 6.73 BM 1-3 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m; a) FFT amplituda ($f = 1{,}671x10^{-3}Hz$); b) FFT amplituda ($f = 27{,}855x10^{-3}Hz$); c) FFT amplituda ($f = 55{,}710x10^{-3}Hz$)

Slika 6.73 daje amplitudni prikaz ovisnosti frekvencije promatranja amplitude nakon provođenja FFT analize na sekvenci hlađenja uzorka BM 1-3 s donje strane, pri čemu je toplinska pobuda bila na udaljenosti 2 m od uzorka. Pri tome je potrebno primijetiti razliku u mogućnosti otkrivanja i karakterizacije oštećenja ovisno o diskretnoj frekvenciji pri kojoj se

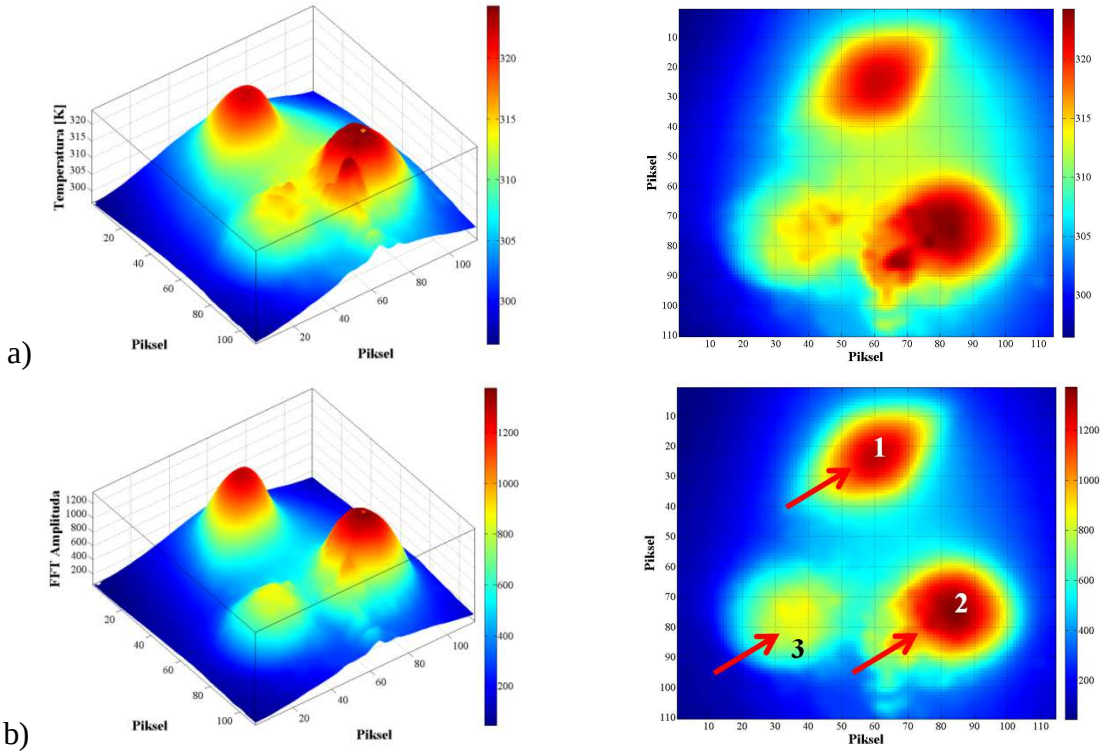
uzorak promatra. Pri nižim frekvencijama moguće je odrediti oblik oštećenja, te je smanjen šum i bolji kontrast između oštećenja i neoštećenog područja na uzorku.

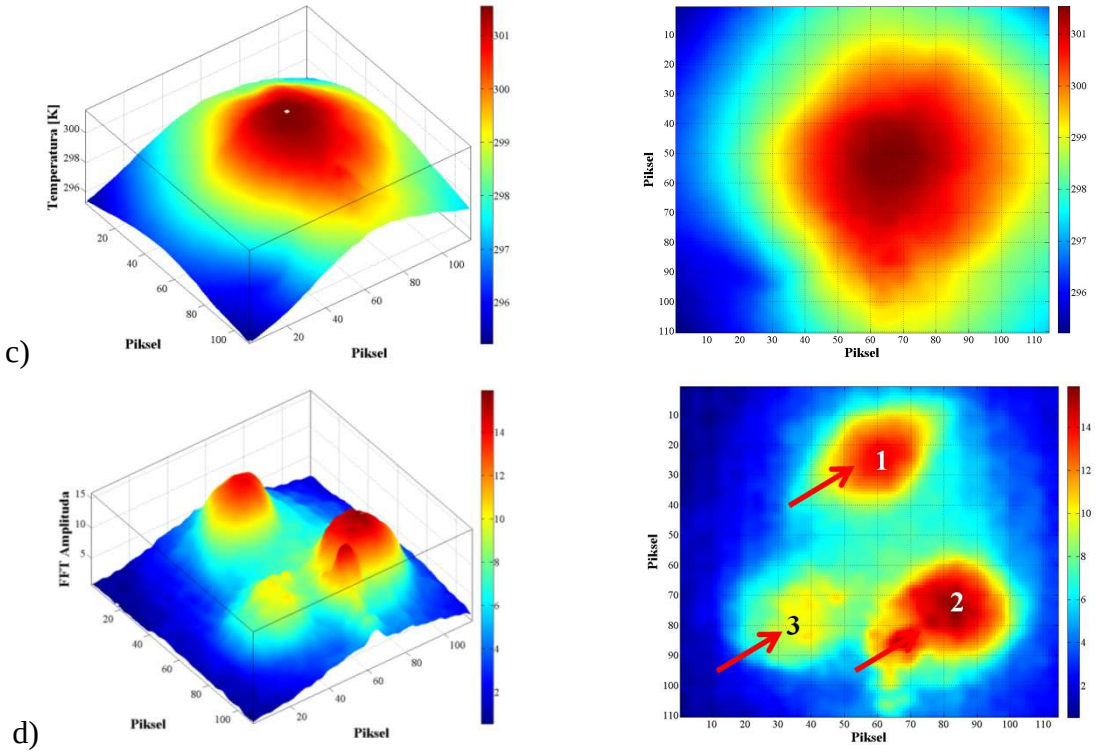
Primjena amplitude kao metode korištene za prikaz rezultata mjerenja aktivnom termografijom ne rješava problem nejednolikog zagrijavanja uzoraka, već samo smanjuje njegov utjecaj, Slika 6.74.



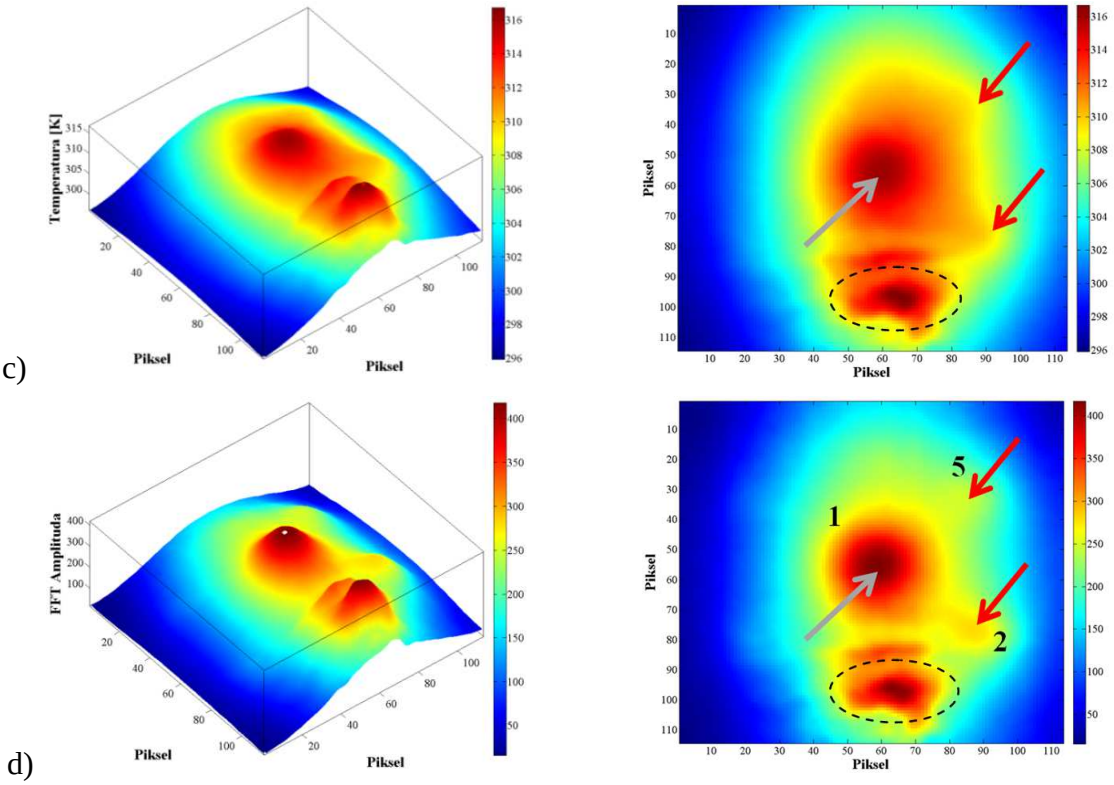
Slika 6.74 BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3 m; a) FFT amplituda, 3D prikaz ($f = 5{,}602x10^{-4}Hz$); b) FFT amplituda, 2D prikaz ($f = 5{,}602x10^{-4}Hz$);

Ukoliko se koristi kontinuirano snimanje termograma i napravi naknadna obrada rezultata ispitivanja pomoću FFT analize, te daju amplitudni prikazi, moguće je otkriti postojanje oštećenja u trenutku u vremenu nakon što na klasičnom termogramu oštećenja postanu apsolutno nevidljiva, Slika 6.75.



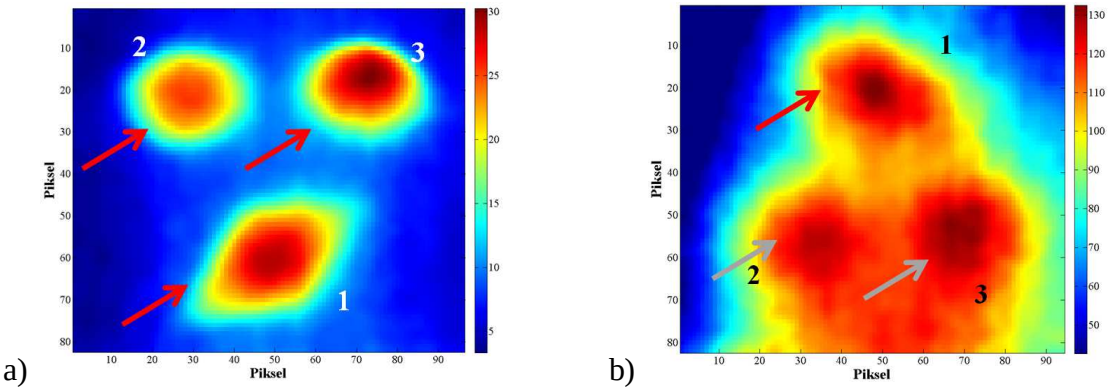


Slika 6.75 BM 2-3 s donje strane, udaljenost pobude 3 m; a) Optimalni termogram; b) FFT amplituda, 3D i 2D prikaz ($f = 5{,}263x10^{-4}Hz$); c) Termogram snimljen 42,67 min nakon isključenja toplinske pobude; d) FFT amplituda, 3D i 2D prikaz ($f = 67{,}368x10^{-3}Hz$);



Slika 6.76 BM 3-1 s donje strane, udaljenost pobude 1,5 m; a) Optimalni termogram; b) FFT amplituda, 3D i 2D prikaz ($f = 8{,}264x10^{-4}Hz$);

Posebno je potrebno naglasiti mogućnost pogrešne interpretacije rezultata mjerenja ukoliko se koristi amplitudni prikaz zbog njegove nemogućnosti eliminacije refleksije, tako da je moguće da dođe do lažno pozitivnih rezultata mjerenja, Slika 6.76. Na slici su strelicama označena oštećenja i refleksija (crtkana linija) koja se javila i koju amplitudnim prikazom nije moguće izbjeći.

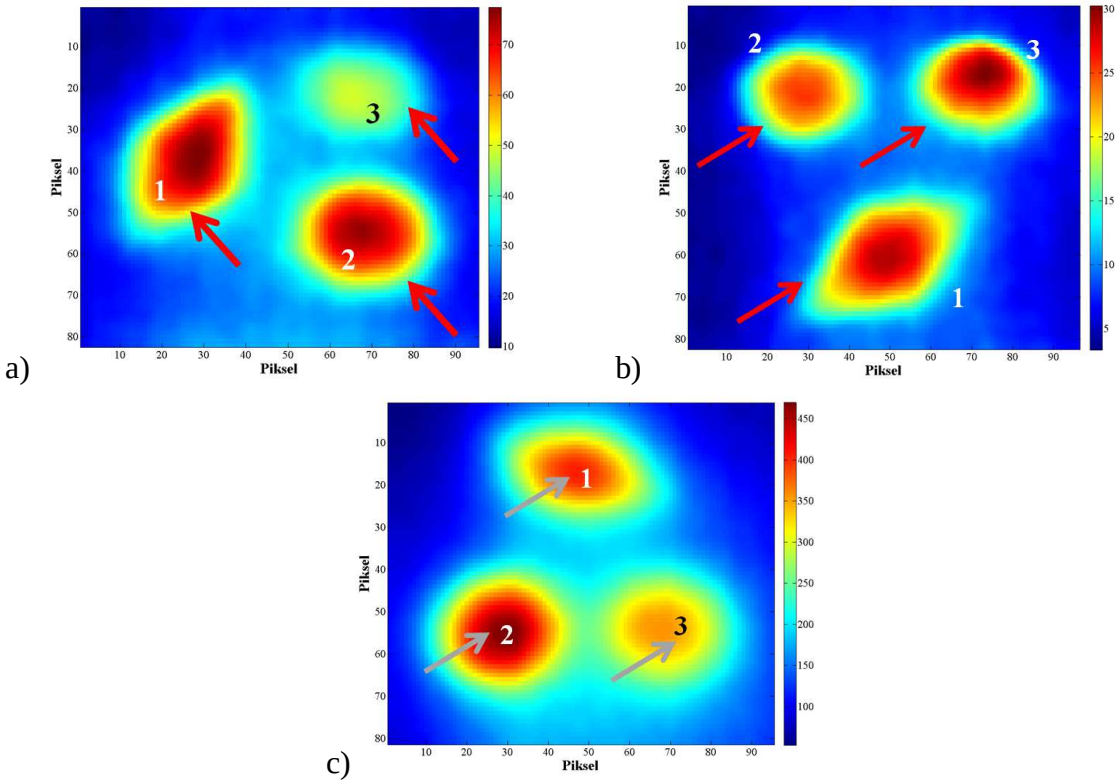


Slika 6.77 a) BM 2-3 s donje strane, udaljenost pobude 2 m, FFT amplituda, ($f = 5{,}785x10^{-3}Hz$);// b) BM 2-3 s gornje strane, udaljenost pobude 2 m, FFT amplituda, ($f = 5{,}050x10^{-4}Hz$);

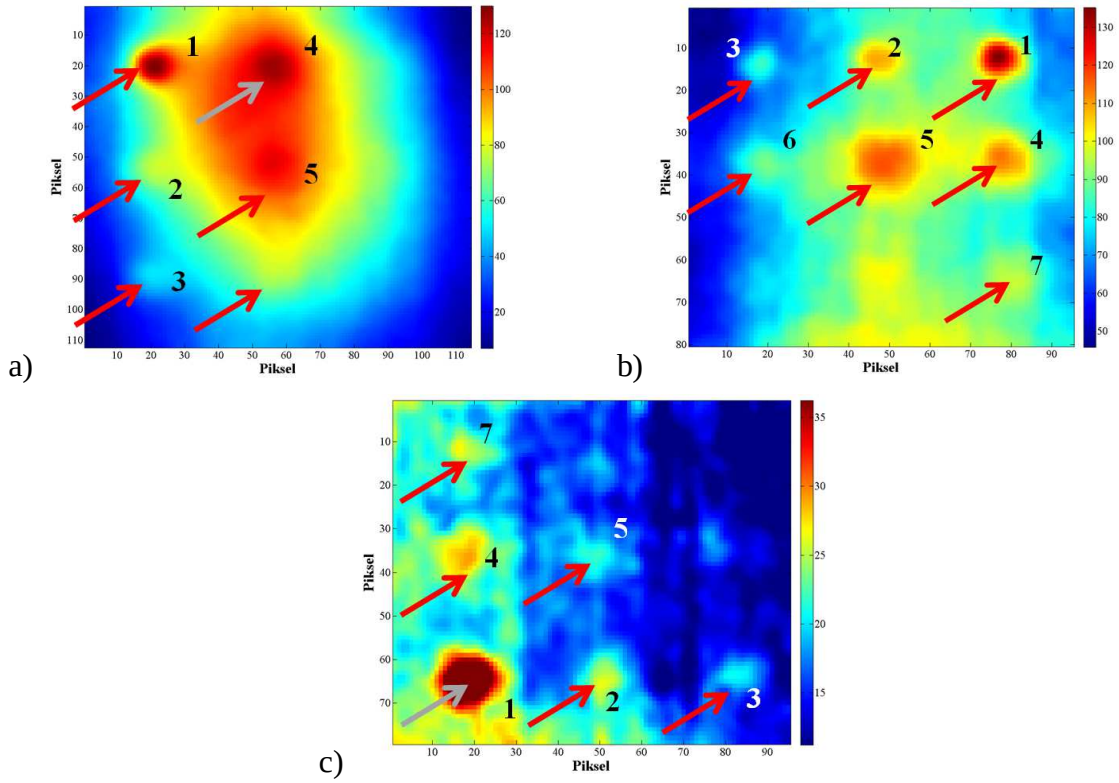
Slika 6.77 daje usporedbu faznog prikaza za uzorak BM 2-3 s donje strane (bez armature) i gornje strane uzorka gdje postoji armatura između oštećenja i površine uzorka. Iz prikazanog, te ostalih rezultata ispitivanja danih u prilogu ovog rada, vidljivo je da postojanje armature utječe na mogućnost otkrivanja oštećenja i njegovu karakterizaciju (veličinu i oblik), pri čemu je za oštećenje broj 2 promatrano s gornje strane (oštećenje ispod gušće armature), kontrast između oštećenja i neoštećenog područja vrlo malen. Na ovom je primjeru zorno prikazan utjecaj lateralne difuzije topline koja maskira postojanje oštećenja. Potrebno je napomenuti da su oštećenja jednako udaljena od površine s jedne i druge strane uzorka, a dubina do oštećenja je 30 mm.

Ovisnost o kvaliteti betona amplitudnog prikaza i mogućnosti otkrivanja oštećenja je vrlo teško definirati zbog toga što postoji mogućnost promjene diskretne frekvencije promatranja koja je optimalna za promatranu vrstu betona, Slika 6.78.

Slika 6.79 prikazuje ovisnost amplitudnog prikaza o udaljenosti toplinske pobude uzorka. Zaključuje se da je moguće postići ravnotežu između snage toplinske pobude potrebne za otkrivanje oštećenja, a da istovremeno ne postoji problem nejednolikog zagrijavanja uzoraka. Optimalni slučaj je udaljenost toplinske pobude 2 m od površine uzorka.



Slika 6.78 FFT amplituda s donje strane udaljenost toplinske pobude 2,0 m: a) BM 1-3 ($f = 1{,}671x10^{-3}Hz$); b) BM 2-3 ($f = 5{,}785x10^{-3}Hz$); c) BM 3-3 ($f = 5{,}764x10^{-4}Hz$)

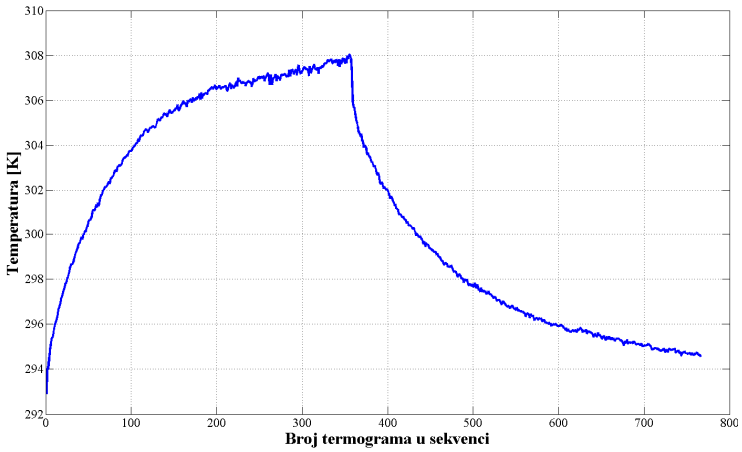


Slika 6.79 BM 2-2 s gornje strane, FFT amplituda: a) udaljenost toplinske pobude 1,5 m ($f = 1{,}364x10^{-3}Hz$); b) udaljenost toplinske pobude 2,0 m ($f = 5{,}509x10^{-4}Hz$); c) udaljenost toplinske pobude 3,0 m ($f = 7{,}212x10^{-4}Hz$)

6.3.7 Rezultati ispitivanja kod obrade cijele sekvence grijanja i hlađenja

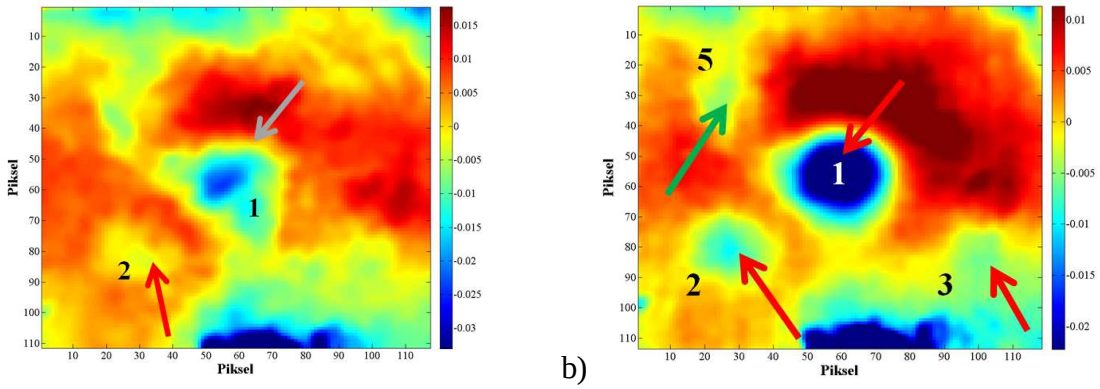
Ukoliko se umjesto promatranja isključivo sekvence hlađenja, koja počinje u trenutku prestanka toplinske pobude, promatra istovremeno i period grijanja i period hlađenja uzorka u jednoj sekvenci te ukoliko se provede naknadna obrada rezultata ispitivanja koje su prethodno opisane, moguće je dobiti slijedeće rezultate.

Ispitivanja su provedena reflektnom metodom na način kako je opisano u poglavlju 5.2, a termogrami su kontinuirano spremani u sekvencu s međusobnim vremenskim razmakom od 10 sekundi. Slika 6.80 prikazuje krivulju razvoja temperature površine uzorka kroz cjelokupni period grijanja i hlađenja uzorka BM 1-1 promatrano s gornje strane, pri čemu je udaljenost toplinske pobude bila 1,5 m od samog uzorka.



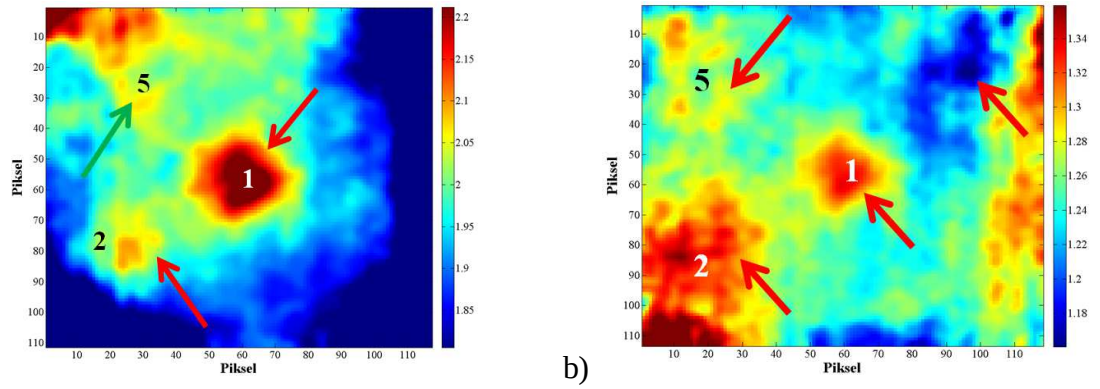
Slika 6.80 Razvoj temperature na površini uzorka BM 1-1 kroz cijeli period grijanja i hlađenja

Slika 6.81 do Slika 6.83 prikazuju usporedbu rezultata ispitivanja dobivenih korištenjem metode PCT analize, FFT fazni prikaz i FFT amplitudni prikaz. Pri tome su kao podaci za naknadnu obradu uzeti rezultati cjelokupne sekvence ispitivanja, koja uključuje i grijanje i hlađenje uzorka (Slika 6.81 a) do Slika 6.83 a)) te dodatno rezultati samo sekvence hlađenja uzoraka (Slika 6.81 b) do Slika 6.83 b)).



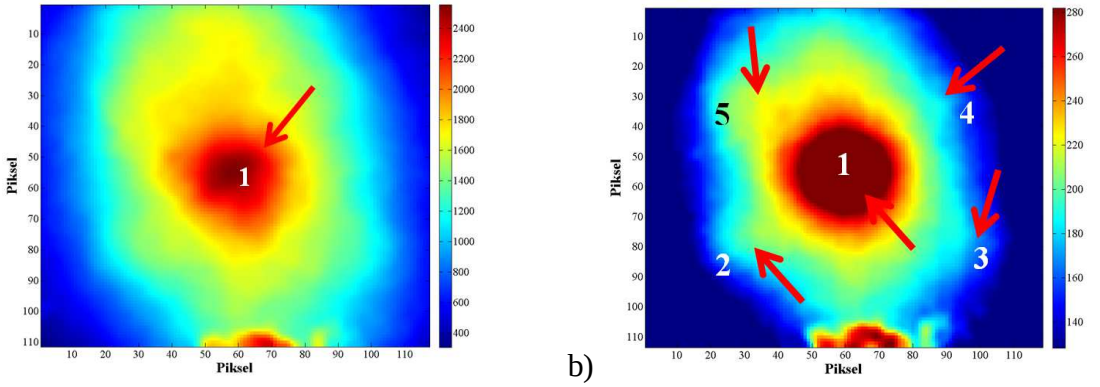
a) b)

Slika 6.81 BM 1-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)



a) b)

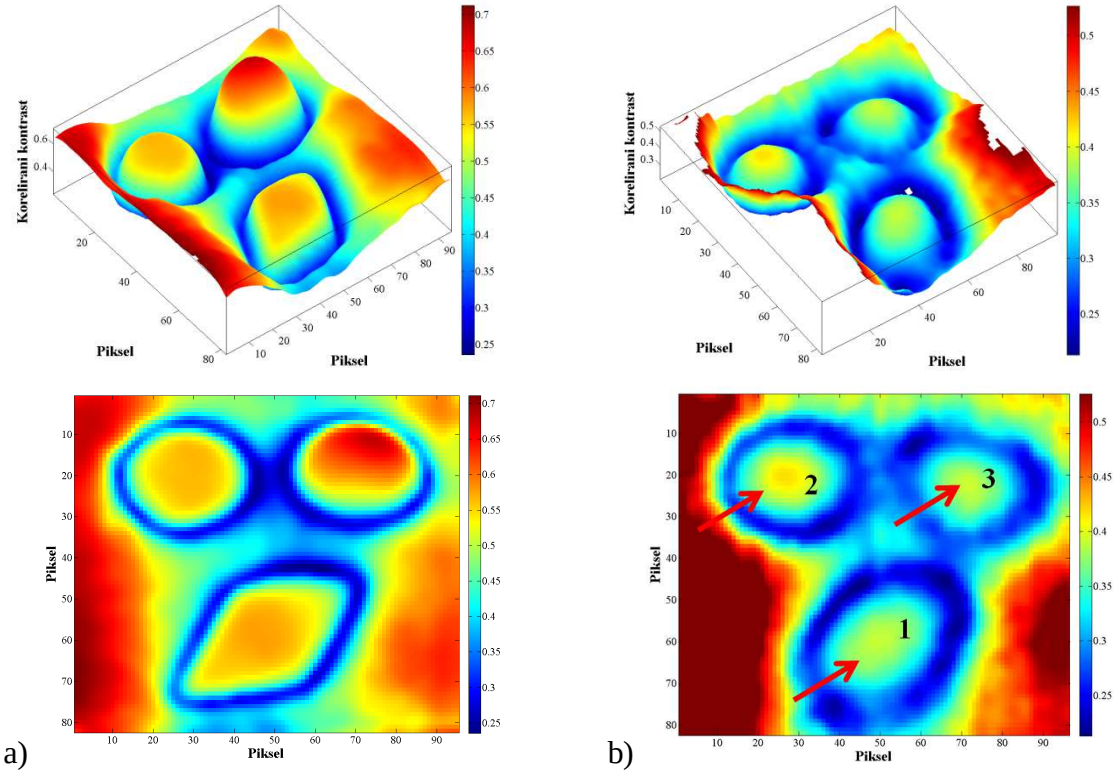
Slika 6.82 BM 1-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) FFT faza, cjelokupna sekvenca, ($f = 5{,}208x10^{-4}Hz$); b) FFT faza, sekvenca hlađenja, ($f = 9{,}732x10^{-4}Hz$)



a) b)

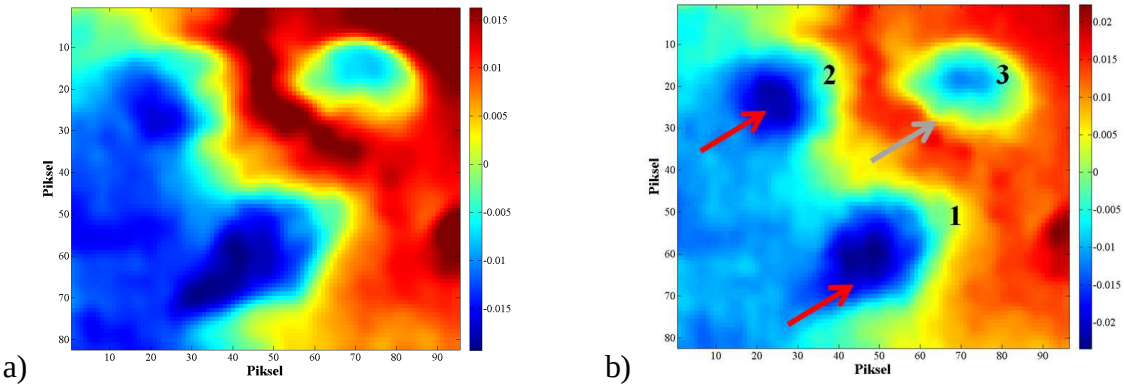
Slika 6.83 BM 1-1 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 1,5 m: a) FFT amplituda, cjelokupna sekvenca, ($f = 2{,}604x10^{-4}Hz$); b) FFT amplituda, sekvenca hlađenja, ($f = 7{,}299x10^{-4}Hz$)

Vidljivo je iz prikazanog (Slika 6.81 do Slika 6.83) da se korištenjem rezultata iz cjelokupne sekvence dobivaju nešto lošiji rezultati obzirom na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorcima betona za metode PCT i FFT amplitudni prikaz, dok je za FFT fazni prikaz dobiven bolji rezultat u slučaju kad je promatrana cjelokupna sekvenca (grijanje i hlađenje).



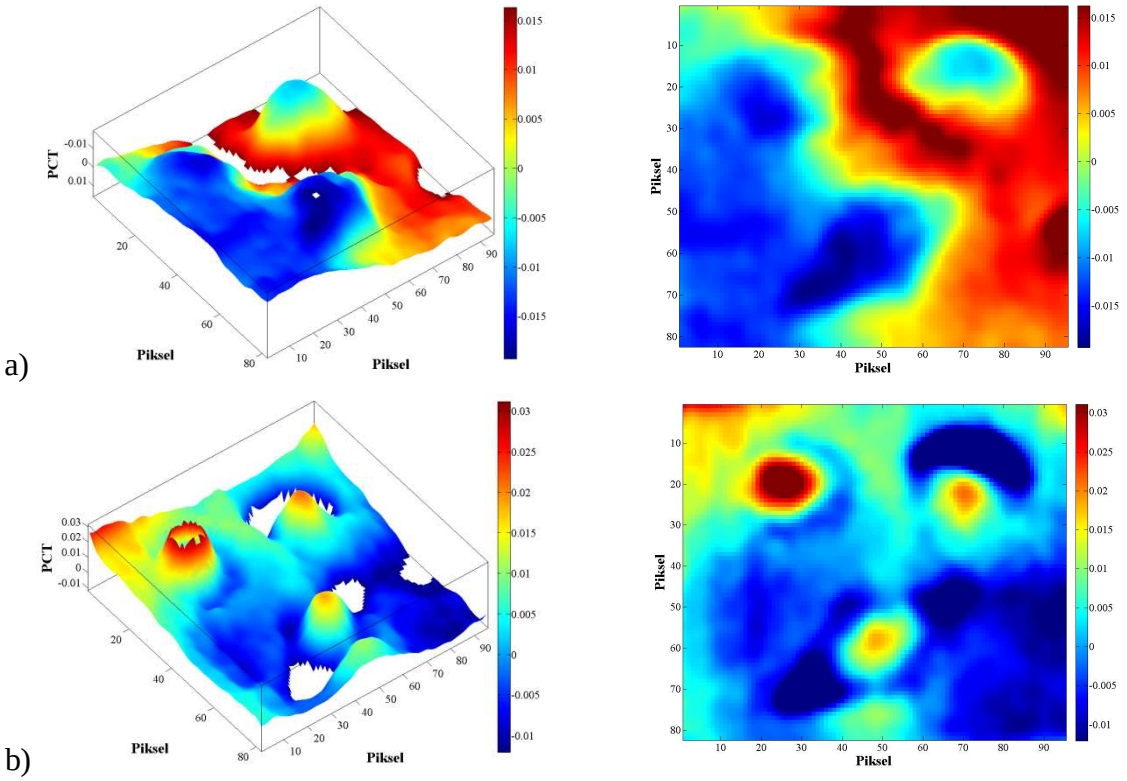
Slika 6.84 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) korelirani kontrast, cjelokupna sekvenca, 3D i 2D prikaz; b) korelirani kontrast, sekvenca hlađenja, 3D i 2D prikaz

Korelirani kontrast kod velikih oštećenja, u slučaju korištenja cjelokupne sekvence, daje znatno bolje rezultate u smislu granica oštećenja, i oblika oštećenja, nego u slučaju korištenja samo sekvence hlađenja, Slika 6.84.

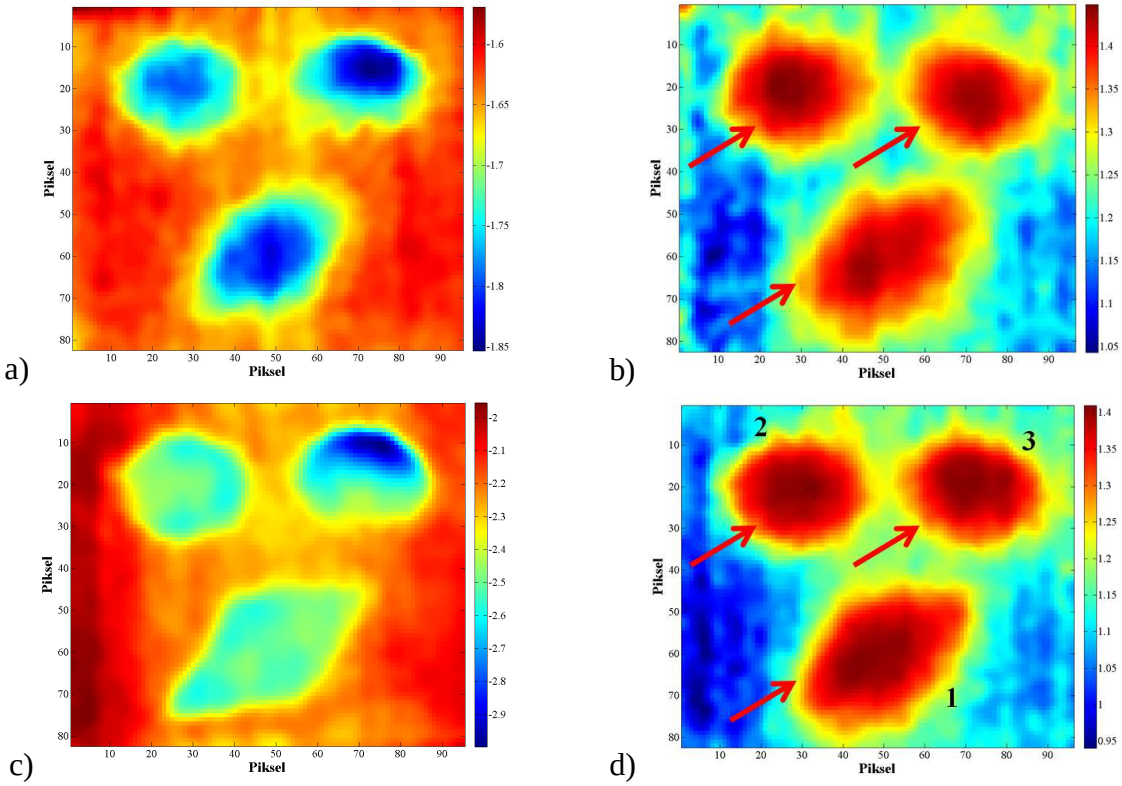


Slika 6.85 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)

U slučaju promatranja rezultata dobivenih PCT analizom, Slika 6.85, moguće je ustvrditi da se u slučaju korištenja cjelokupne sekvence (grijanje i hlađenje) može dobiti više korisnih EOF-a nego u slučaju korištenja samo sekvence hlađenja (gdje je dobiven samo jedan korisni EOF, osim početnog), Slika 6.86. Posebno je to uočeno kod velikih oštećenja u uzorcima BM x-3.

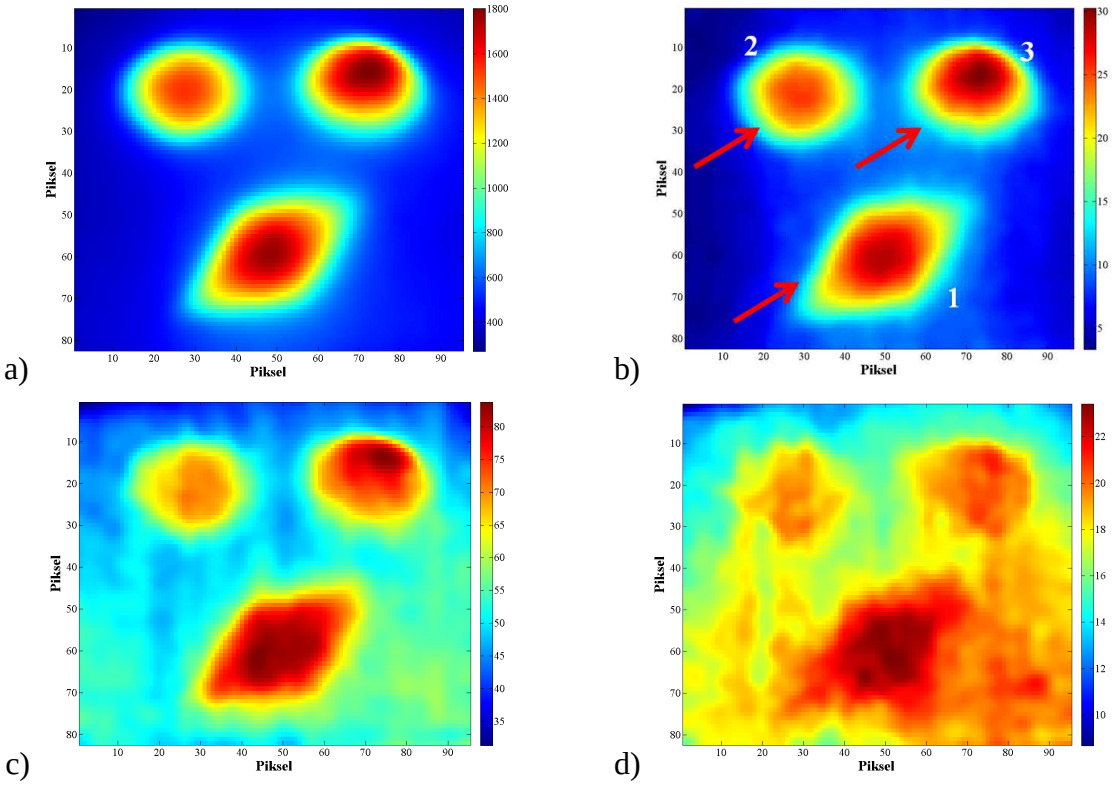


Slika 6.86 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_4)



Slika 6.87 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT faza, cjelokupna sekvenca, ($f = 4{,}167x10^{-4}Hz$); b) FFT faza, sekvenca hlađenja, ($f = 1{,}653x10^{-3}Hz$): c) FFT faza, cjelokupna sekvenca, ($f = 8{,}333x10^{-4}Hz$); d) FFT faza, sekvenca hlađenja, ($f = 2{,}479x10^{-3}Hz$)

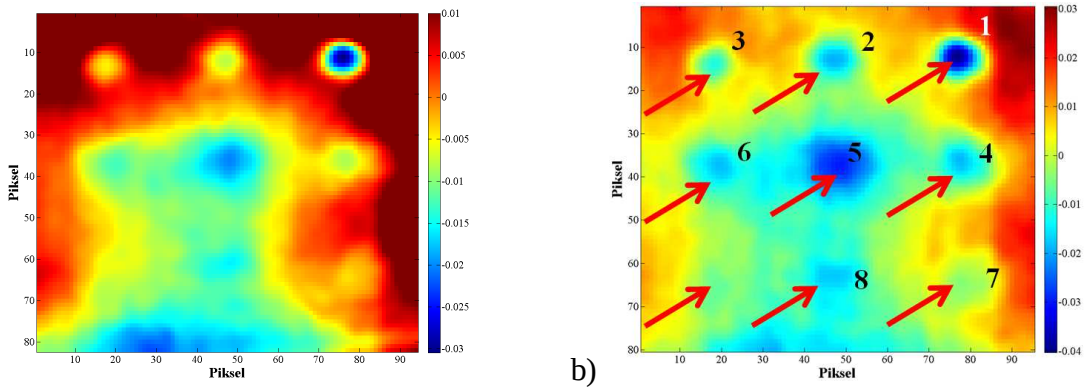
Za razliku od rezultata dobivenih isključivo iz sekvence hlađenja, fazni prikaz dobiven iz FFT analize za cjelokupnu sekvencu daje samo nekoliko korisnih diskretnih frekvencija (tri do pet frekvencija), s time da su oštećenja suprotnog ekstrema (hladnija od okoline) nego kod sekvence hlađenja, Slika 6.87.



Slika 6.88 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT amplituda, cjelokupna sekvenca, ($f = 2{,}778x10^{-4}Hz$); b) FFT amplituda, sekvenca hlađenja, ($f = 5{,}785x10^{-3}Hz$); c) FFT amplituda, cjelokupna sekvenca, ($f = 1{,}111x10^{-3}Hz$); d) FFT amplituda, cjelokupna sekvenca, ($f = 2{,}778x10^{-3}Hz$)

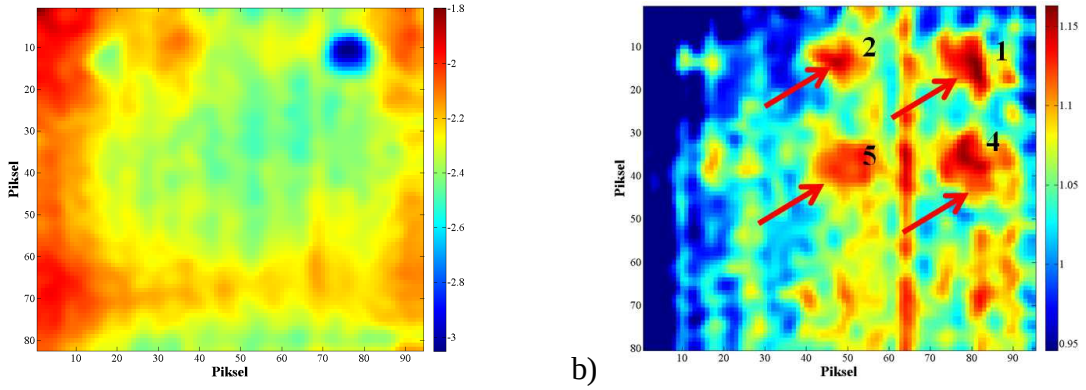
Pri promatranju amplitudnog prikaza za uzorak BM 2-3 dobivenog FFT analizom cjelokupne sekvence termograma (grijanje i hlađenje), primijećeno je da je svaki drugi amplitudni prikaz koristan za određivanje postojanja oštećenja u uzorcima. Slično kao fazni prikaz, i amplitudni prikaz dobiven iz FFT analize za cjelokupnu sekvencu daje tek nekoliko korisnih diskretnih frekvencija, Slika 6.88.

U slučaju promatranja sitnih oštećenja u betonskim uzorcima, točnije u kontrastu oštećenja u odnosu na neoštećeni dio uzorka, bolje uvjete otkrivanja oštećenja moguće je dobiti u slučaju promatranja samo sekvence hlađenja. Vidljiva je razlika u rezultatima dobivenima PCT analizom, za FFT fazni i amplitudni prikaz, Slika 6.89 do Slika 6.91.



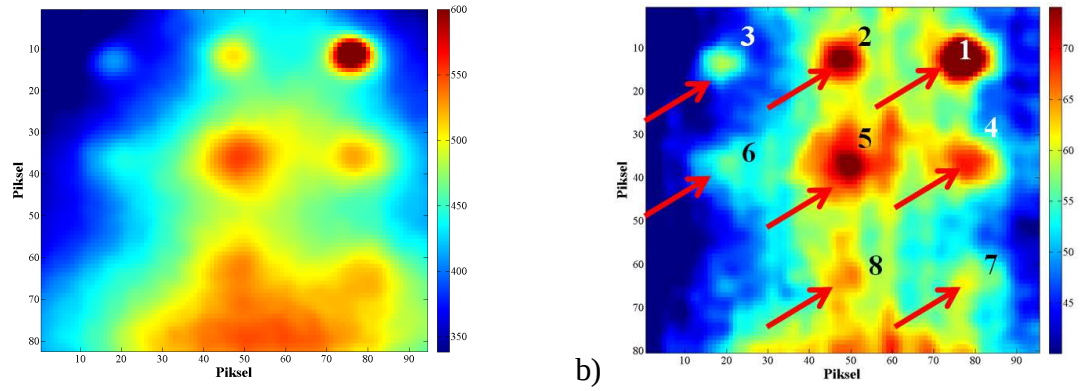
a) b)

Slika 6.89 BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, cjelokupna sekvenca, (EOF_2); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)



a) b)

Slika 6.90 BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT faza, cjelokupna sekvenca, ($f = 8{,}333x10^{-4}Hz$); b) FFT faza, sekvenca hlađenja, ($f = 1{,}928x10^{-3}Hz$):



a) b)

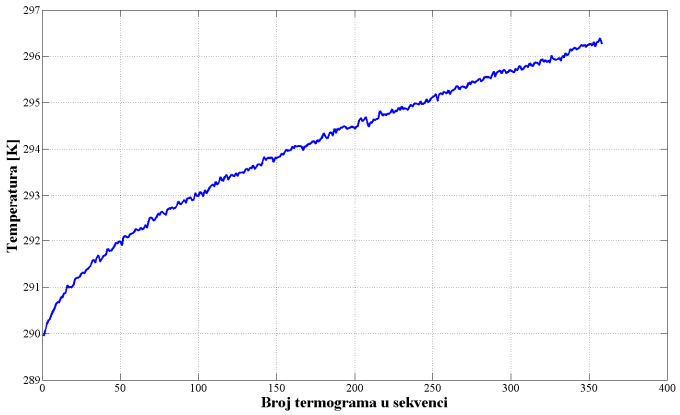
Slika 6.91 BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT amplituda, cjelokupna sekvenca, ($f = 2{,}778x10^{-4}Hz$); b) FFT amplituda, sekvenca hlađenja, ($f = 8{,}264x10^{-4}Hz$)

Općenito je moguće zaključiti da se u slučaju promatranja oštećenja malog promjera boljom metodologijom pokazalo promatranje sekvence hlađenja i naknadna obrada rezultata ispitivanja samo dijela sekvence hlađenja. U slučaju velikih oštećenja na relativno malenoj dubini, moguće je zaključiti da ne postoji razlika između mogućnosti otkrivanja oštećenja promatranjem rezultata ispitivanja dobivenih naknadnom obradom cjelokupne sekvence ili sekvence hlađenja.

6.3.8 Rezultati ispitivanja kod obrade sekvence grijanja

Ukoliko se umjesto promatranja isključivo sekvence zagrijavanja, koja počinje u trenutku početka zagrijavanja do prestanka toplinske pobude, promatra istovremeno i period grijanja i period hlađenja uzorka u jednoj sekvenci te ukoliko se provede naknadna obrada rezultata ispitivanja koje su prethodno opisane, moguće je dobiti slijedeće rezultate.

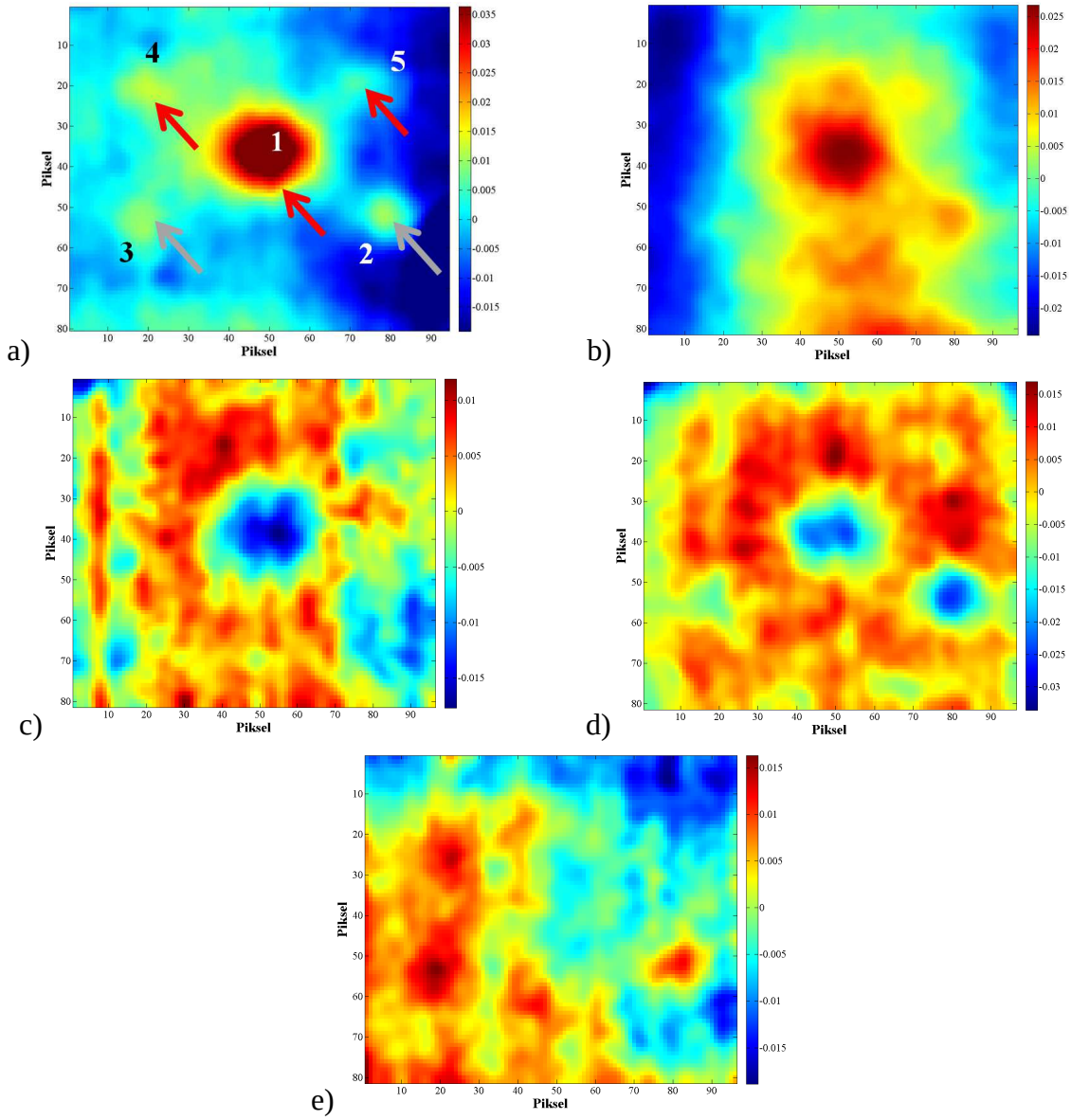
Ispitivanja su provedena reflektnom metodom na način kako je opisano u poglavlju 4.2 a termogrami su kontinuirano spremani u sekvencu u međusobnom vremenskom razmaku od 10 sekundi. Slika 6.92 prikazuje krivulju razvoja temperature površine uzorka kroz period grijanja uzorka BM 2-2 promatrano s gornje strane, pri čemu je udaljenost toplinske pobude bila 2 m od samog uzorka.



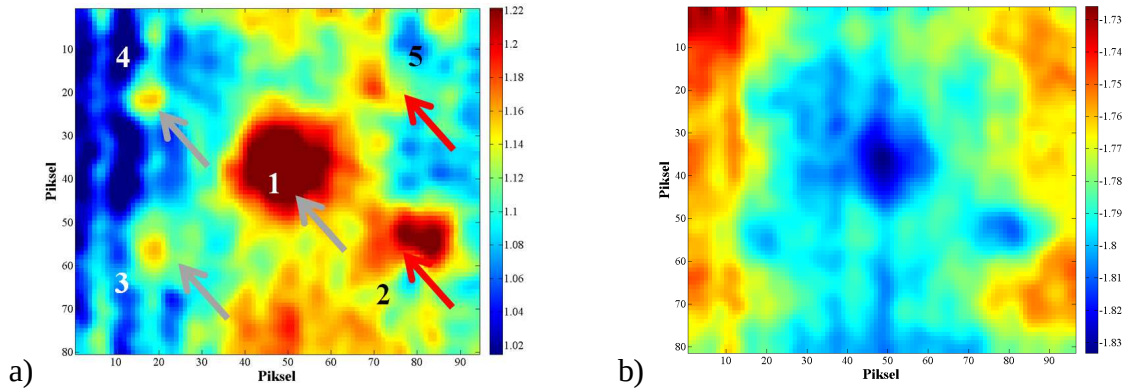
Slika 6.92 Razvoj temperature na površini uzorka BM 2-2 kroz cijeli period grijanja

Promatrajući rezultate dobivene korištenjem PCT tehnike na sekvenci termograma tijekom zagrijavanja uzoraka, vidljivo je da se dobivaju nešto lošiji rezultati u odnosu na rezultate dobivene analizom sekvence hlađenja zbog većeg šuma pri višim EOF-ima i utjecaja nejednolikog zagrijavanja, Slika 6.93. S druge strane, promatrajući EOF_7, Slika 6.93e), moguće je otkriti postojanje oštećenja označenih brojem 3 i 4, koja nisu otkrivena u prethodnim EOF-ima promatrajući sekvencu zagrijavanja uzoraka.

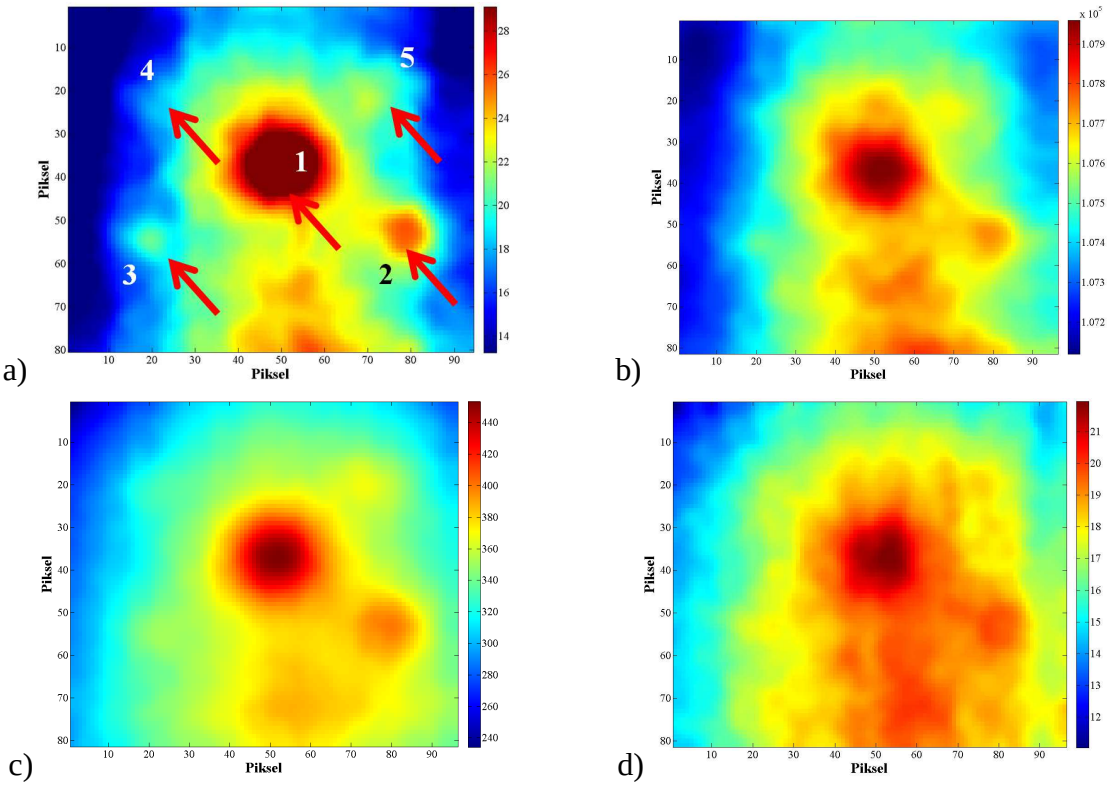
Iako se ni promatranjem sekvence hlađenja ne može sa sigurnošću utvrditi postojanje svih oštećenja u uzorku korištenjem FFT faznog prikaza, ipak kod promatranja sekvence hlađenja postoji bolji kontrast između oštećenog i neoštećenog područja na uzorku nego što je to slučaj ukoliko se promatra isključivo sekvenca zagrijavanja pri FFT analizi, Slika 6.94.



Slika 6.93 BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2); b) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_1); c) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_3); d) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_6); e) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_7)

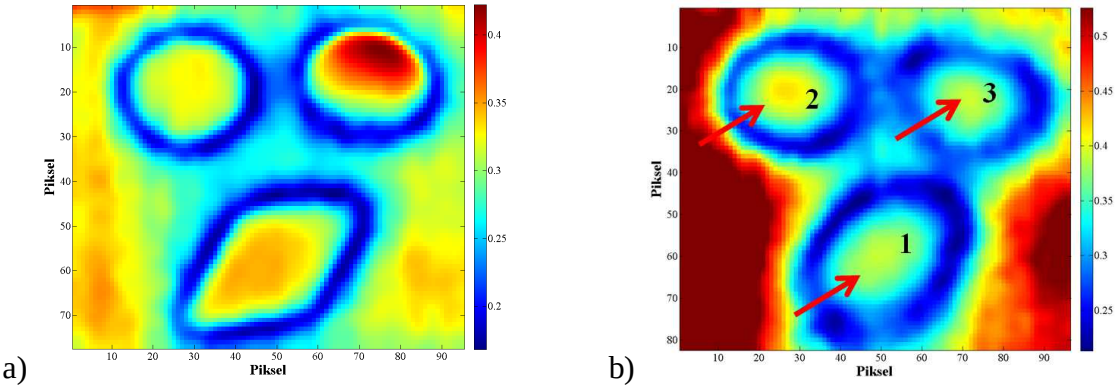


Slika 6.94 BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT faza, sekvenca hlađenja, ($f = 1{,}653x10^{-3}Hz$); b) FFT faza, sekvenca zagrijavanja, ($f = 5{,}450x10^{-4}Hz$)



Slika 6.95 BM 1-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT amplituda, sekvenca hlađenja, ($f = 1{,}928x10^{-3}Hz$); b) FFT amplituda, sekvenca zagrijavanja, ($f = 2{,}725x10^{-4}Hz$); c) FFT amplituda, sekvenca zagrijavanja, ($f = 5{,}450x10^{-4}Hz$); d) FFT amplituda, sekvenca zagrijavanja, ($f = 6{,}812x10^{-3}Hz$)

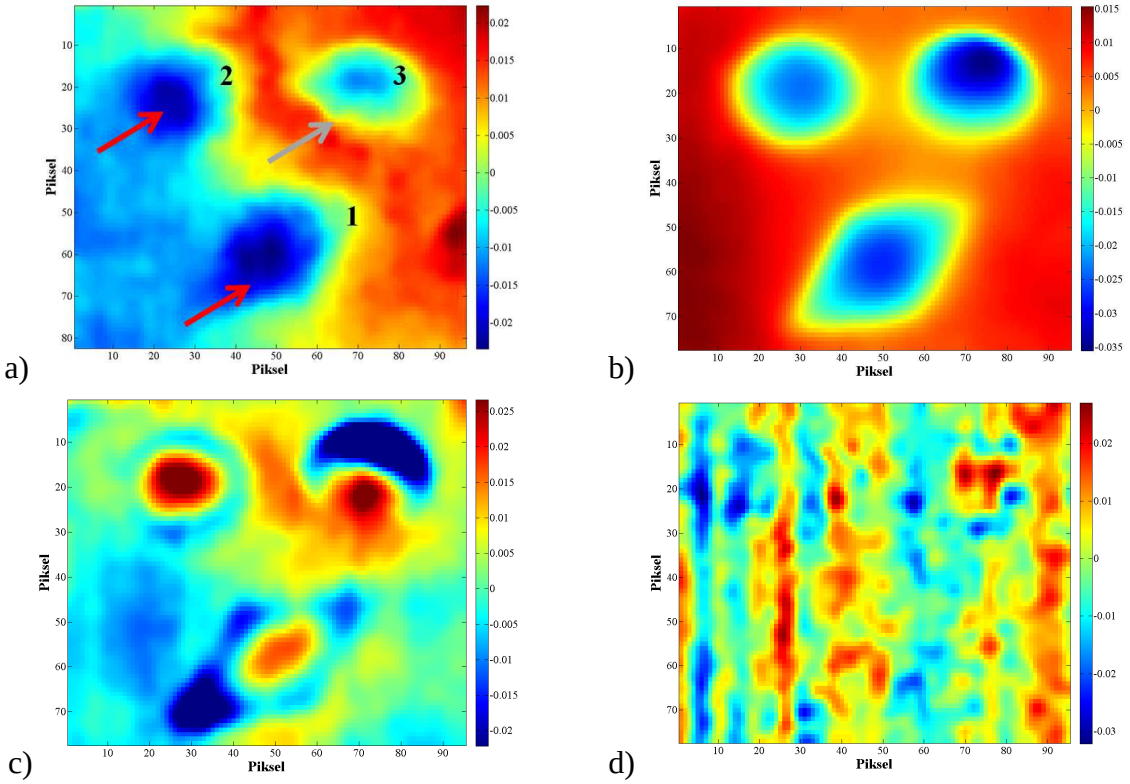
Vidljivo je iz prikazanog (Slika 6.95) da se korištenjem rezultata iz sekvence zagrijavanja, FFT amplitudni prikaz, dobivaju nešto lošiji rezultati mogućnosti otkrivanja oštećenja u uzorcima betona u usporedbi s promatranjem sekvence hlađenja, a posebno je značajan utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzoraka.



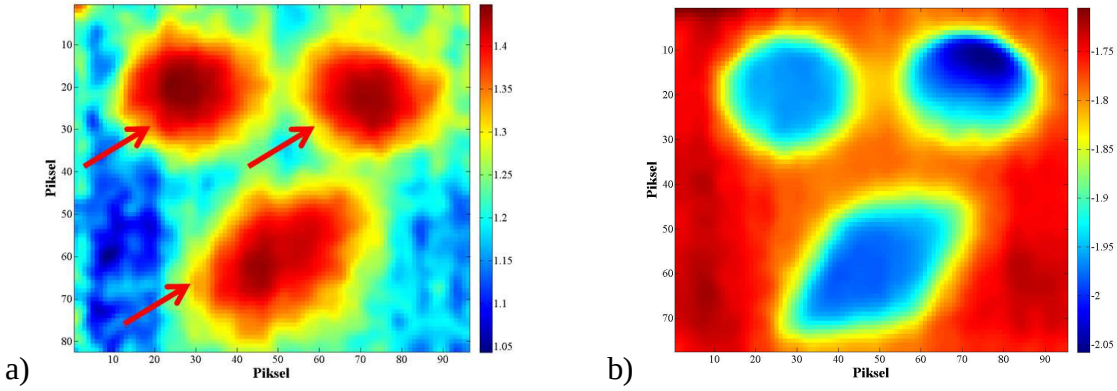
Slika 6.96 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) korelirani kontrast, sekvenca zagrijavanja, 3D i 2D prikaz; b) korelirani kontrast, sekvenca hlađenja, 3D i 2D prikaz

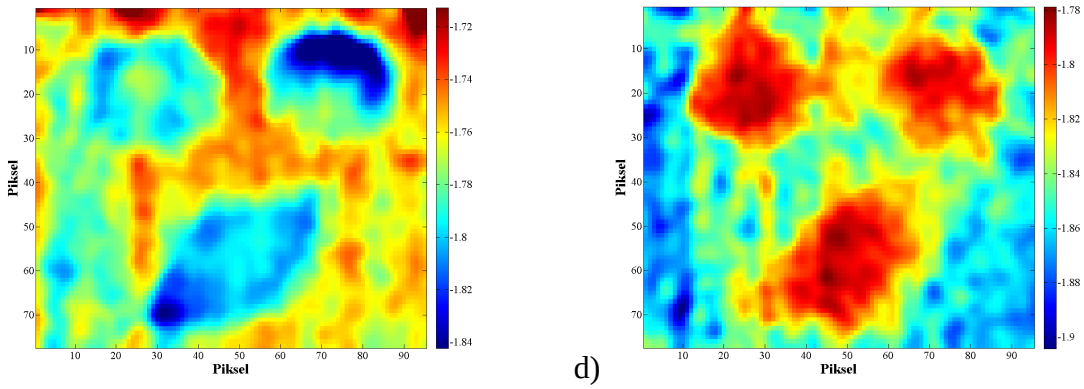
Korelirani kontrast kod velikih oštećenja, u slučaju promatranja sekvence zagrijavanja, slično kao kod cjelokupne sekvence, daje znatno bolje rezultate u smislu granica oštećenja, i oblika oštećenja, nego u slučaju korištenja samo sekvence hlađenja, Slika 6.96.

Iako je EOF_1 dobiven iz PCT analize kod promatranja sekvence zagrijavanja sličan optimalnom termogramu (slično se događa i kod promatranja sekvence hlađenja), ostali rezultati PCT analize (EOF) daju prikaze iz kojih je teška interpretacija oštećenja, što se može pripisati utjecaju zagrijavanja, a nakon EOF_3 je interpretacija oštećenja potpuno nemoguća, Slika 6.97.



Slika 6.97 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2); b) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_1); c) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_3); d) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_6)

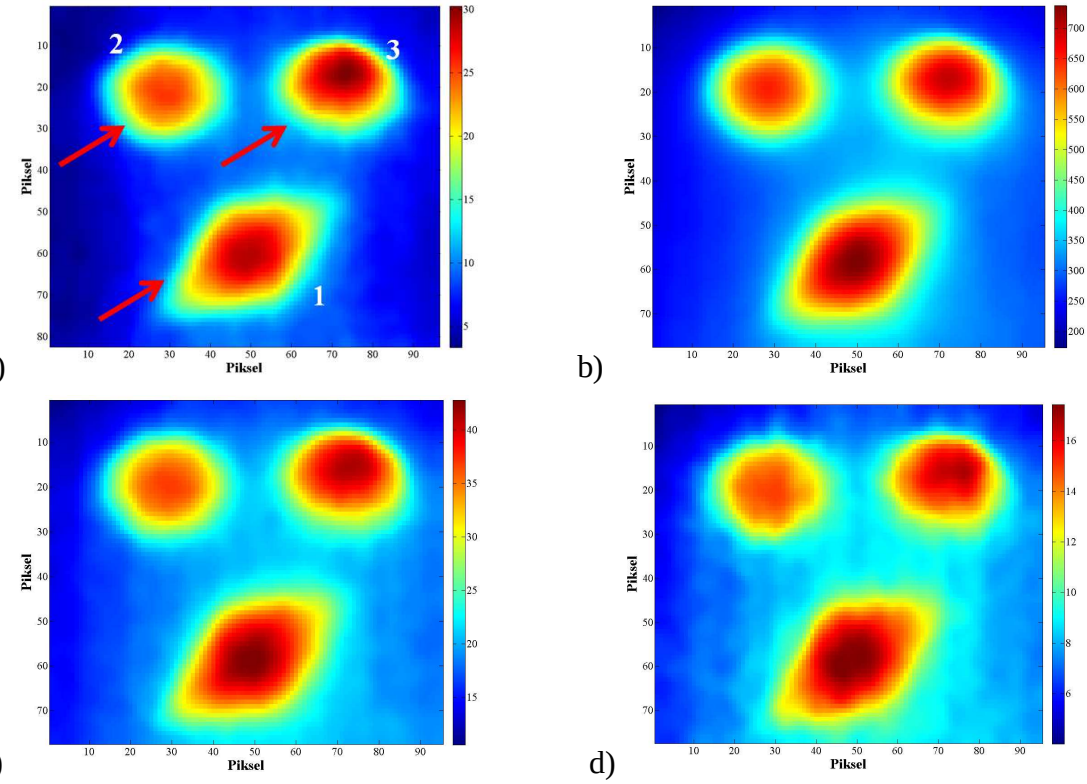




c) d)

Slika 6.98 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT faza, sekvenca hlađenja, ($f = 1{,}653x10^{-3}Hz$); b) FFT faza, sekvenca zagrijavanja, ($f = 5{,}571x10^{-4}Hz$); c) FFT faza, sekvenca zagrijavanja, ($f = 8{,}357x10^{-4}Hz$); b) FFT faza, sekvenca zagrijavanja, ($f = 5{,}571x10^{-3}Hz$)

Fazni prikaz dobiven iz FFT analize za sekvencu zagrijavanja daje više korisnih diskretnih frekvencija (u rasponu od niskih pri kojima je mali utjecaj šuma do visokih frekvencija s visokim šumom) pri kojima je moguće otkriti postojanje oštećenja u betonu. Za razliku od rezultata dobivenih iz sekvence hlađenja, promatranjem sekvence zagrijavanja dobiveni su općenito bolji rezultati, i to posebno za niske frekvencije, Slika 6.98.



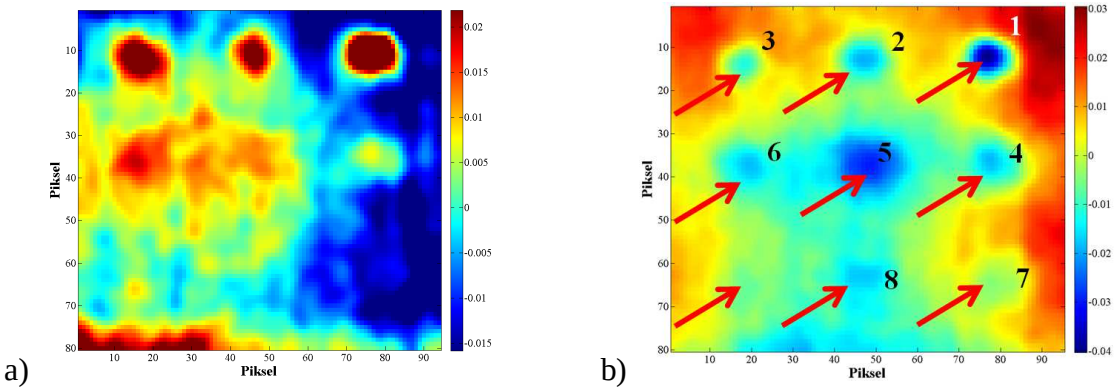
a) b)

c) d)

Slika 6.99 BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT amplituda, sekvenca hlađenja, ($f = 5{,}785x10^{-3}Hz$); b) FFT amplituda, sekvenca zagrijavanja, ($f = 5{,}571x10^{-4}Hz$); c) FFT amplituda, sekvenca zagrijavanja, ($f = 5{,}571x10^{-3}Hz$); d) FFT amplituda, sekvenca zagrijavanja, ($f = 13{,}928x10^{-3}Hz$)

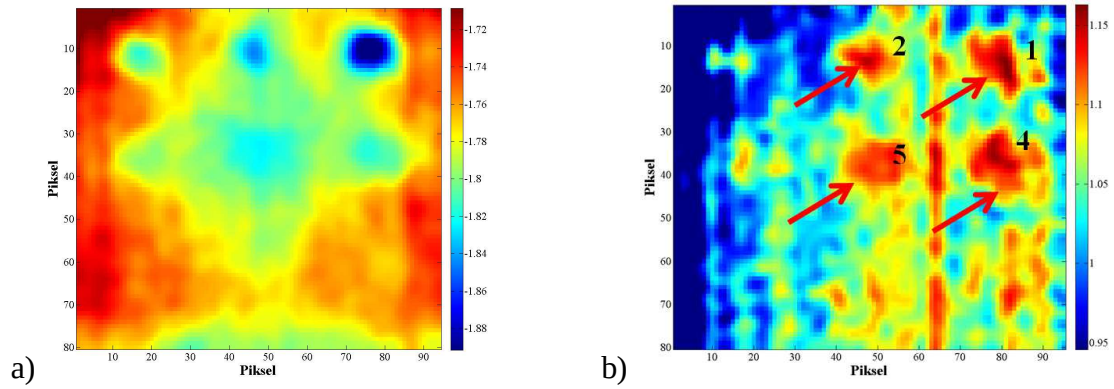
Pri promatranju amplitudnog prikaza za uzorak BM 2-3 dobivenog FFT analizom sekvence zagrijavanja, primijećeno je da se postojanje oštećenja može odrediti na velikom broju amplitudnih prikaza. Kod promatranja amplitude za ovaj uzorak dobiven je bolji kontrast između oštećenog i neoštećenog područja na uzorku nego u slučaju promatranja faznog prikaza, a sve slično kao kod promatranja amplitudnog prikaza dobivenog iz FFT analize sekvence hlađenja, Slika 6.99.

U slučaju promatranja sitnih oštećenja u betonskim uzorcima, točnije u kontrastu oštećenja u odnosu na neoštećeni dio uzorka, bolje uvjete otkrivanja oštećenja moguće je dobiti u slučaju promatranja samo sekvence hlađenja. Vidljiva je razlika u rezultatima dobivenima PCT analizom, za FFT fazni i amplitudni prikaz, Slika 6.100 do Slika 6.102. Osim što je moguće otkriti manji broj oštećenja, postoji ozbiljan problem djelovanja refleksije i nejednolikog zagrijavanja uzoraka, što naročito utječe na rezultate amplitudnog prikaza i PCT analize.



a) b)

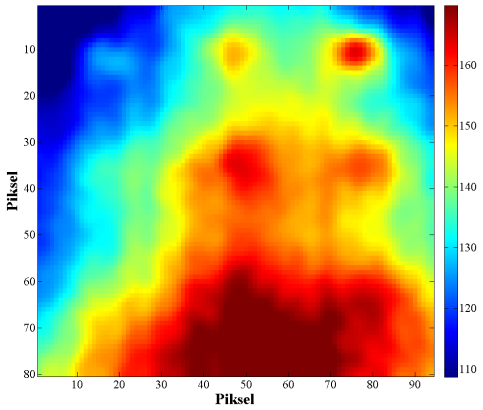
Slika 6.100 BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) PCT, sekvenca zagrijavanja, (EOF_3); b) PCT, sekvenca hlađenja, (EOF_2)



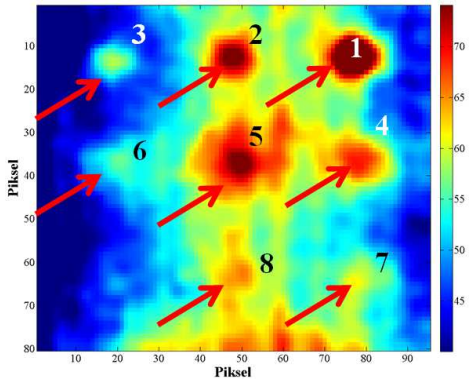
a) b)

Slika 6.101 BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT faza, sekvenca zagrijavanja, ($f = 5{,}587x10^{-4}Hz$); b) FFT faza, sekvenca hlađenja, ($f = 1{,}928x10^{-3}Hz$):

a)



b)

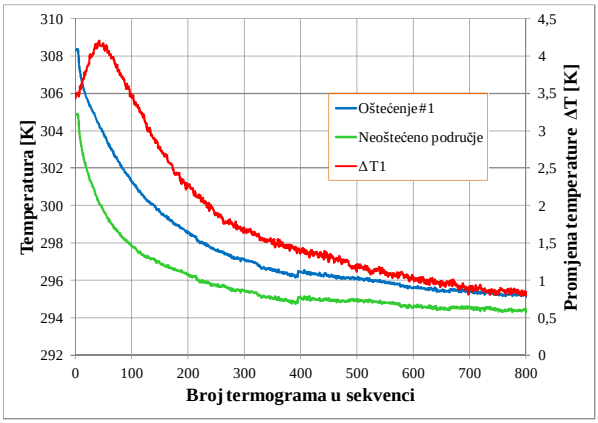


Slika 6.102 BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m: a) FFT amplituda, sekvenca zagrijavanja, ($f = 8{,}380x10^{-4}Hz$); b) FFT amplituda, sekvenca hlađenja, ($f = 8{,}264x10^{-4}Hz$)

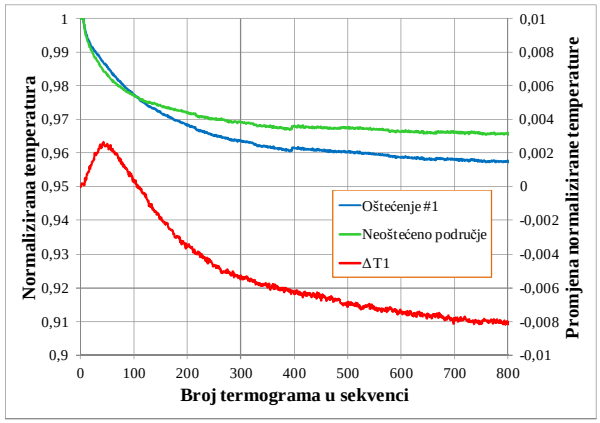
7 KARAKTERIZACIJA OŠTEĆENJA

7.1 Karakterizacija oštećenja promatranjem oblika krivulje hlađenja

Slika 7.1 prikazuje razvoj temperature površine betona uzorka BM 2-1 promatrano s donje strane u trenutku kad je toplinska pobuda 1,5 m iznad uzorka. Dane su krivulje razvoja temperature u procesu hlađenja uzorka (početak je u trenutku gašenja toplinske pobude) na mjestu iznad oštećenja označenog brojem 1, za promatrani uzorak, i iznad neoštećenog područja betona. Slika 7.2 daje prikaz krivulje razvoja normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-1 promatrano s donje strane u trenutku kad je toplinska pobuda 1,5 m iznad uzorka. Normalizacija je provedena na način da je krivulja razvoja temperature podijeljena sa svojom početnom vrijednosti. Normalizacija krivulja je provedena kako bi se pokazalo postojanje razlike između krivulje razvoja temperature iznad oštećenja i neoštećenog dijela uzorka jer je razliku teško vidjeti na stvarnim krivuljama razvoja temperature zbog toga što postoji početna razlika u temperaturi.

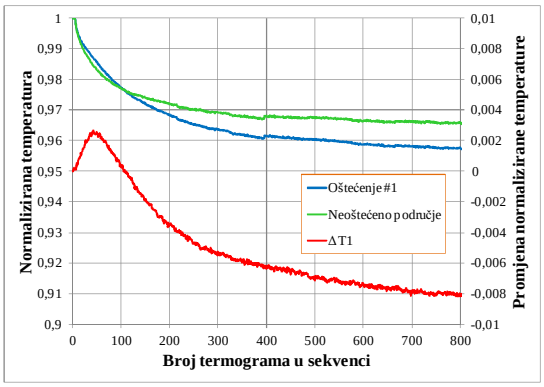


Slika 7.1 Razvoj temperature površine betona uzorka BM 2-1d iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog betona i razlika krivulja

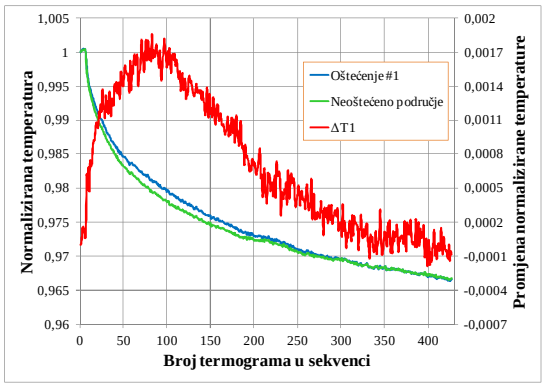


Slika 7.2 Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-1d iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog betona i razlika krivulja

Očigledno je da postoji trenutak t_{max} pri kojem je razlika krivulja temperatura maksimalna ΔT_{max}, Slika 7.1 i Slika 7.2. Također je vidljivo da nije potrebno dugo promatrati vrijeme hlađenja, jer se kontrast znatno smanjuje nakon 200 termograma promatranja hlađenja, te se mijenja predznak vrijednosti razlike u temperaturi zbog razlika u specifičnom toplinskom kapacitetu između zraka u oštećenjima i neoštećenog betona.



Slika 7.3 Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-1d iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog betona i razlika krivulja

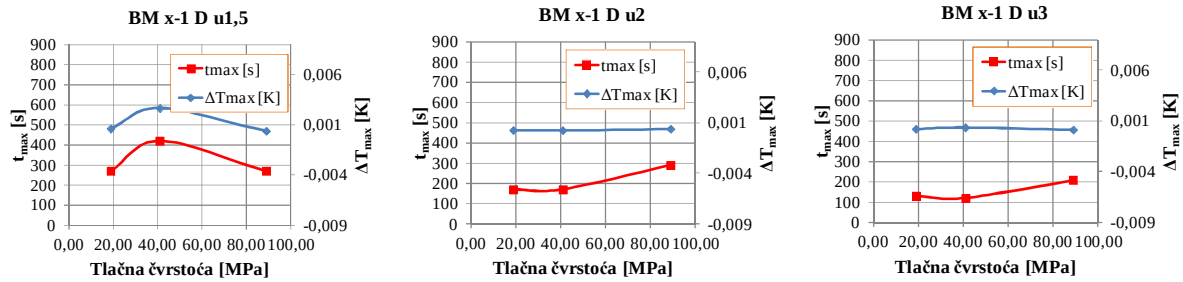


Slika 7.4 Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-3g iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog betona i razlika krivulja

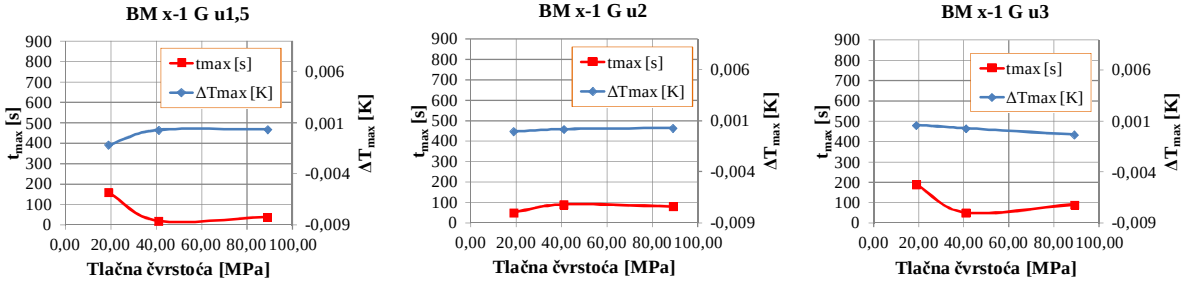
Iako se temperatura uzoraka nije vratila na temperaturu okoliša tijekom promatranja ciklusa hlađenja, potrebno je istaknuti da se u ovom radu promatralo hlađenje u trajanju od minimalno 60 min, što je dovoljno da dođe do uočavanja ΔT_{max} i vremena pojavljivanja t_{max}.

Promjena vremena pojavljivanja t_{max} i sama promjena vrijednosti parametra ΔT_{max}, ovisno o čvrstoći betona, promatrana je za slučaj oštećenja broj 1 promatrano kod uzoraka označenih sa BM x-1, s donje i gornje strane, BM x-2 s gornje strane (s donje strane se oštećenja ne vide na svim udaljenostima i za sve betone) te uzorka BM x-3, također donje i gornje strane. Oštećenja označena brojem 1 su odabrana, jer se sa sigurnošću vide u svim konfiguracijama ispitivanja, dok je za razvoj temperature neoštećenog područja odabran piksel u neposrednoj blizini oštećenja, a da se nalazi na samom neoštećenom dijelu uzorka.

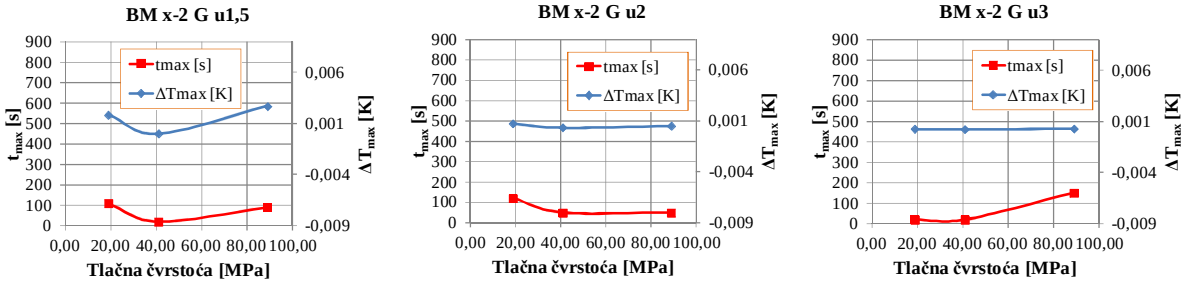
Slika 7.5 do Slika 7.9 prikazuju ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona, pri čemu se mijenja udaljenost toplinske pobude od samog uzorka. Vidljivo je sa slika da u slučaju udaljenosti toplinske pobude od 2 i 3 m dolazi do male promjene u iznosu maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} s povećanjem tlačne čvrstoće betona, dok je u slučaju udaljenosti toplinske pobude od 1,5 m vrlo teško uspostaviti smislenu korelaciju ovisno u uzorcima s različitim vrstama oštećenja. Pretpostavlja se da uzrok tome proizlazi iz nejednolikog zagrijavanja uzorka gdje lampa korištena kao toplinska pobuda proizvodi zraku koja zbog blizine uzorka, lokalno više zagrijava dio uzorka, dok se s povećanjem udaljenosti taj efekt gubi. Zbog toga veličina ΔT_{max} znatno ovisi o izboru točke kod koje je promatrana temperatura neoštećenog dijela uzorka, kao i sam položaj uzorka, koji svakako nije prilikom svakog ispitivanja postavljen u savršeno jednak položaj kao prethodni uzorak.



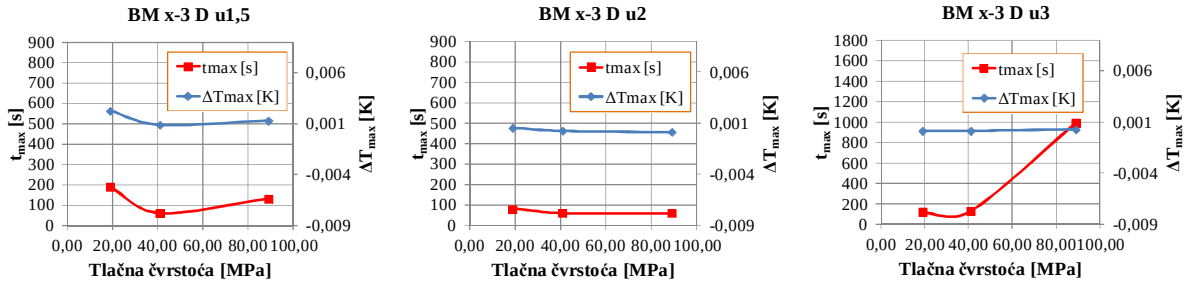
Slika 7.5 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-1 s donje strane



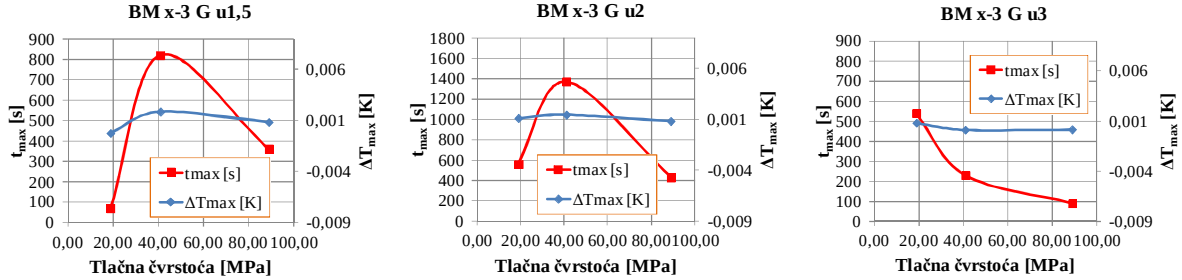
Slika 7.6 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-1 s gornje strane



Slika 7.7 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-2 s gornje strane

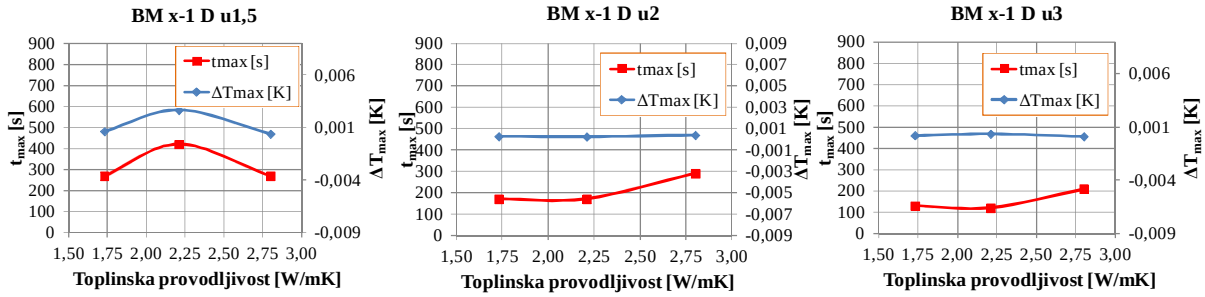


Slika 7.8 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-3 s donje strane

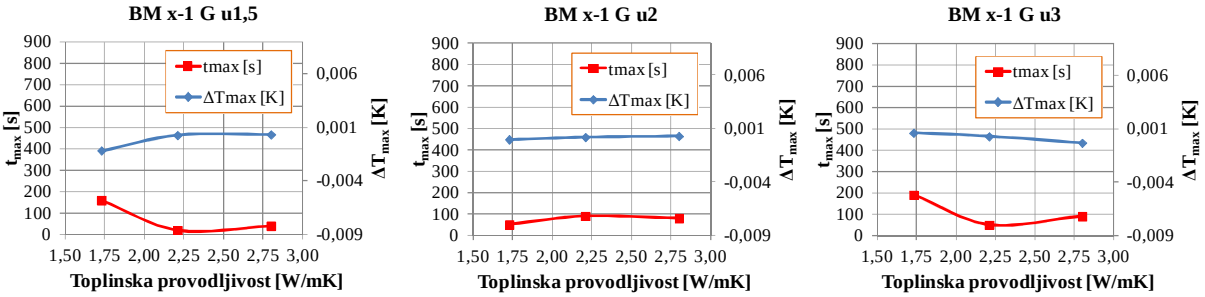


Slika 7.9 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona uzoraka BM x-3 s gornje strane

Ukoliko se promatra ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o toplinskoj provodljivosti betona, pri čemu se mijenja udaljenost toplinske pobude od samog uzorka, vidljivo je da se trendovi ne mijenjaju u usporedbi s onima kod ovisnosti o tlačnoj čvrstoći betona, Slika 7.10 i Slika 7.11. Ovakvo ponašanje je bilo za očekivati, s obzirom na ovisnost promjene toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće betona koja je gotovo linearna.

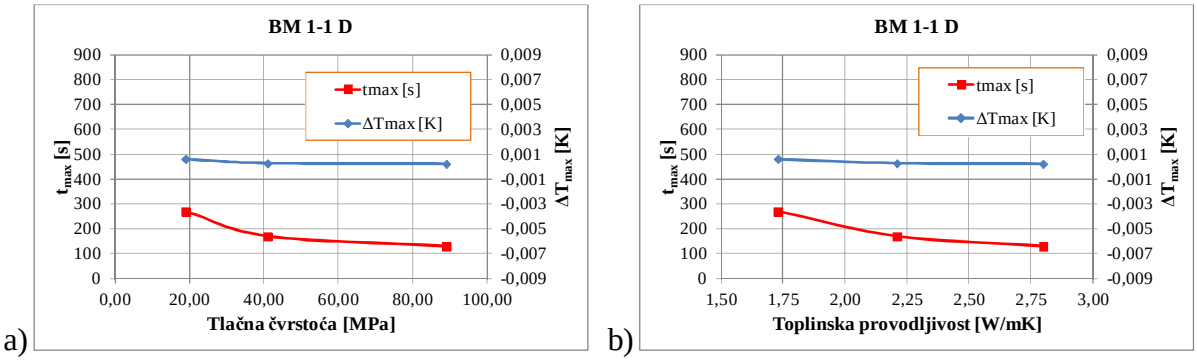


Slika 7.10 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o toplinskoj provodljivosti betona uzoraka BM x-1 s donje strane

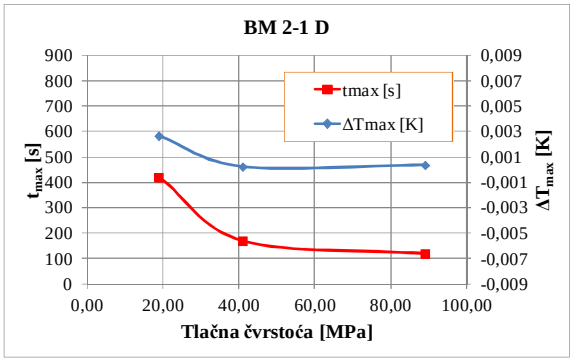


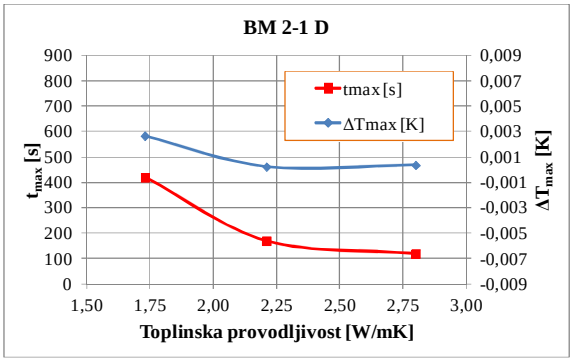
Slika 7.11 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o toplinskoj provodljivosti betona uzoraka BM x-1 s gornje strane

Slika 7.12, Slika 7.13 i Slika 7.14 prikazuju ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona te o toplinskoj provodljivosti betona uzoraka BM 1-1, BM 2-1 i BM 3-1 s donje strane, pri čemu se povećava udaljenost toplinske pobude od uzoraka te iznosi 1,5; 2 i 3 m.

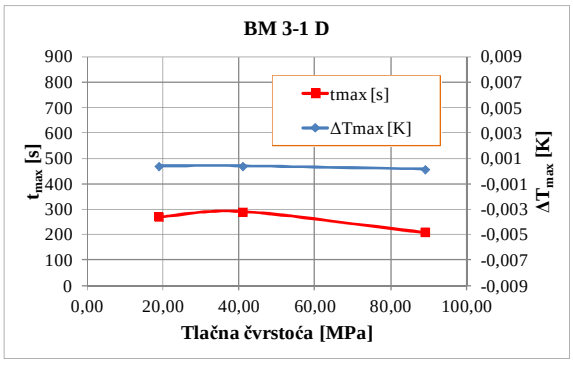


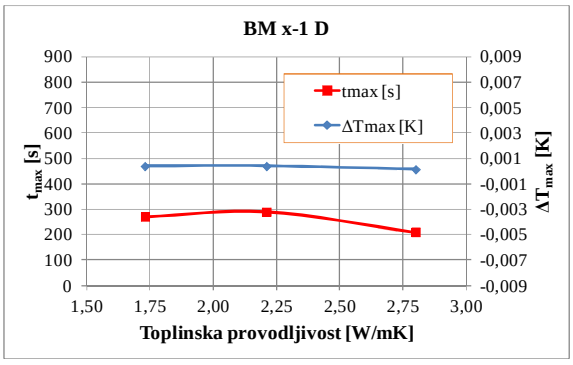
Slika 7.12 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona a) te o toplinskoj provodljivosti betona b) uzoraka BM 1-1 s donje strane

a) 

b) 

Slika 7.13 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona a) te o toplinskoj provodljivosti betona b) uzoraka BM 2-1 s donje strane

a) 

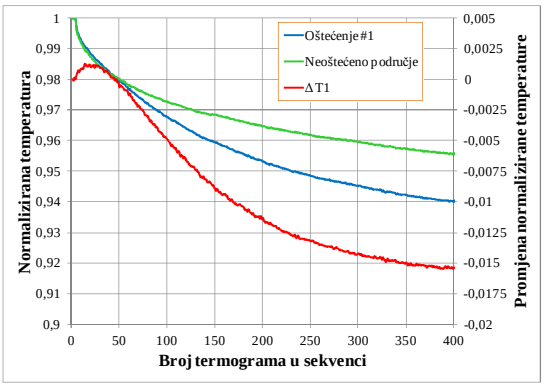
b) 

Slika 7.14 Ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona a) te o toplinskoj provodljivosti betona b) uzoraka BM 3-1 s donje strane

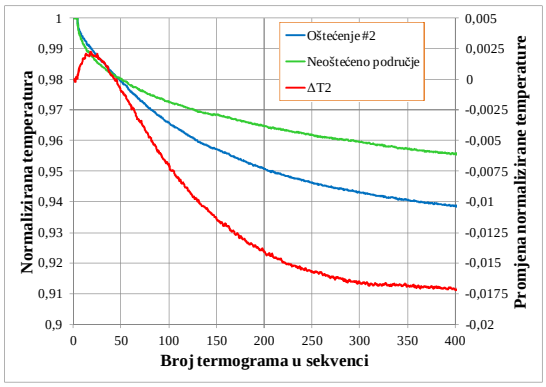
Potrebno je primijetiti smanjenje maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} s povećanjem udaljenosti toplinske pobude od ispitivanog uzorka. Slične tendencije mogu se primijetiti i za uzorke s drugim konfiguracijama oštećenja.

Utjecaj armature na mogućnost otkrivanja oštećenja, prikazan je na primjeru uzorka BM 3-3, pri čemu je udaljenost toplinske pobude iznosila 1,5 m. Slika 7.15 prikazuje krivulje razvoja normalizirane temperature na površini betona iznad tri oštećenja i neoštećenog područja betona te krivulje razlike normaliziranih krivulja za svako pojedino oštećenje.

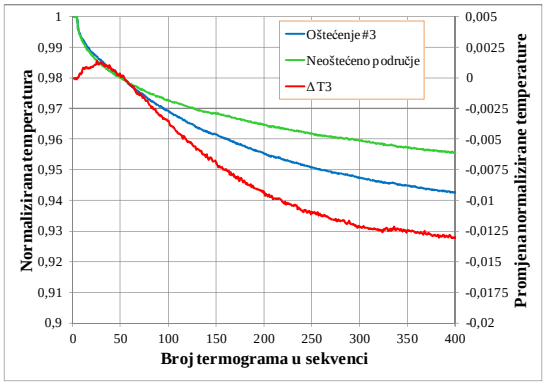
a)



b)

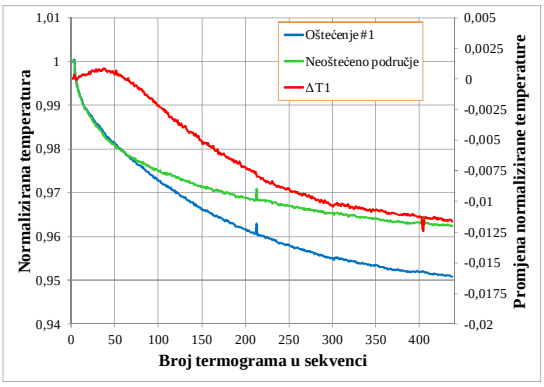


c)

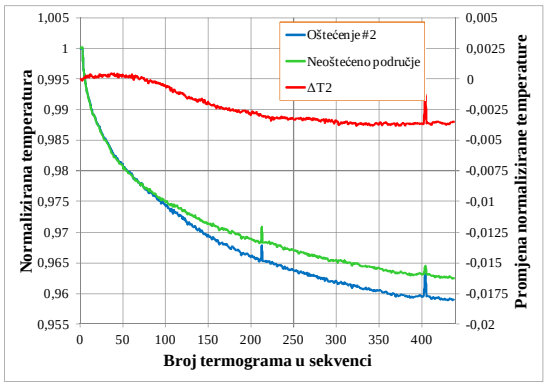


Slika 7.15 Razvoj temperature površine betona uzorka BM 3-3 s donje strane iznad oštećenja broj 1 a); broj 2 b) i broj 3 c) te neoštećenog betona i krivulja razlika normaliziranih temperatura

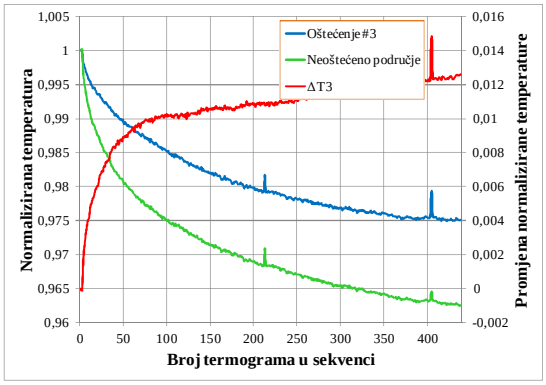
a)



b)



c)



Slika 7.16 Razvoj temperature površine betona uzorka BM 3-3 s gornje strane iznad oštećenja broj 1 a); broj 2 b) i broj 3 c) te neoštećenog betona i krivulja razlika normaliziranih temperatura

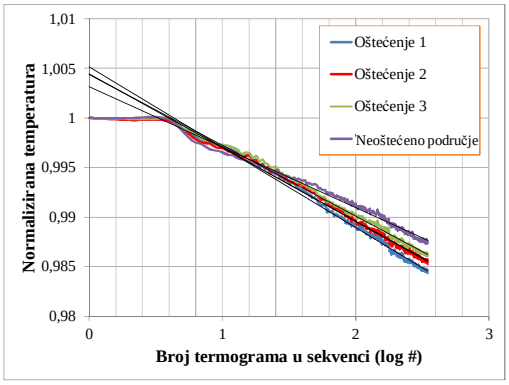
Vidljivo je kako se u slučaju promatranja uzorka BM 3-3 s gornje strane postiže manja vrijednost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} (manji temperaturni kontrast) i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} koje je povećano u odnosu na krivulje kada se promatra uzorak BM 3-3 s donje strane, Slika 7.15 i Slika 7.16. Razlog ovome je postojanje armature između oštećenja i površine uzorka u slučaju konfiguracije BM 3-3 s gornje strane, čime se dokazuje da postojanje armature smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja.

Promatrajući ovisnost oblika krivulje hlađenja o dubini na kojoj se nalazi oštećenje, primijećeno je da s povećanjem dubine postoji promjena u nagibu krivulje hlađenja za uzorak BM 3-2 s gornje strane na udaljenosti 2 m. Slika 7.17, Slika 7.18 i Slika 7.19 prikazuju razvoj krivulje hlađenja za a) oštećenja broj 1, 2 i 3, koja su debljine 40 mm te neoštećeno područje; b) oštećenja 4, 5 i 6, koja su debljine 20 mm te neoštećeno područje; c) oštećenja 7, 8 i 9 koja su debljine 10 mm te neoštećeno područje od trenutka prestanka toplinske pobude do kraja hlađenja u polu-logaritamskom mjerilu i to za uzorke, redom, BM 1-2, BM 2-2 i BM 3-2.

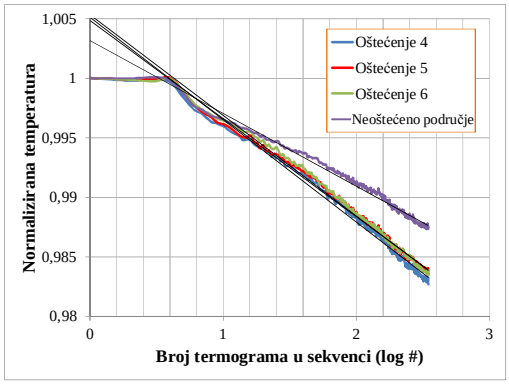
Vidljivo je da za oštećenja jednake debljine, s povećanjem dubine na kojoj se ona nalaze dolazi do smanjenja nagiba pravca (u odnosu na horizontalu) koji je dobiven linearnom regresijskom analizom krivulje hlađenja, odnosno povećanje njegova koeficijenta nagiba, pri čemu je za usporedbu potrebno je promatrati oštećenja jednakih debljina, Tablica 7.1. Ova zakonitost vrijedi za sve tri vrste betona korištene u ovom radu.

Potrebno je također naglasiti da se tanka oštećenja, koja se vrlo teško identificiraju, u prikazima svih metoda naknadne obrade rezultata korištenih u ovom radu, i u ovom prikazu, vrlo teško razlikuju od neoštećenog područja, Slika 7.18 c).

a)

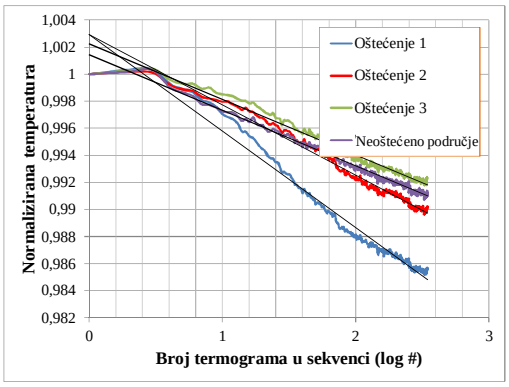


b)

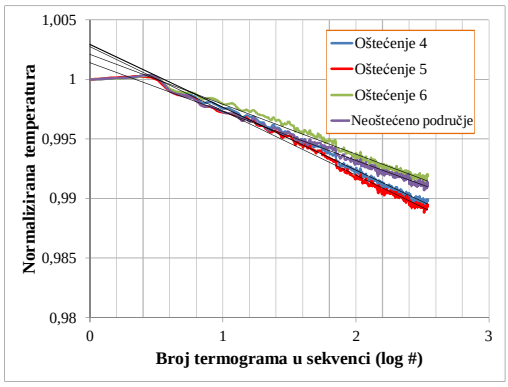


Slika 7.17 Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 1-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m

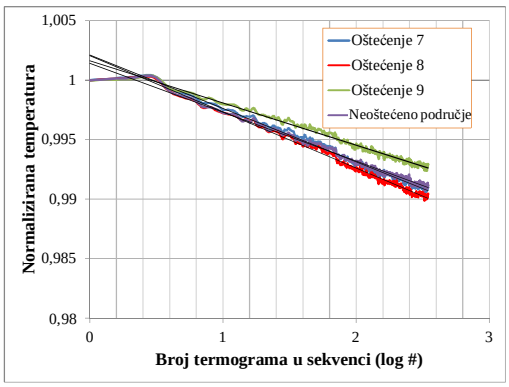
a)



b)

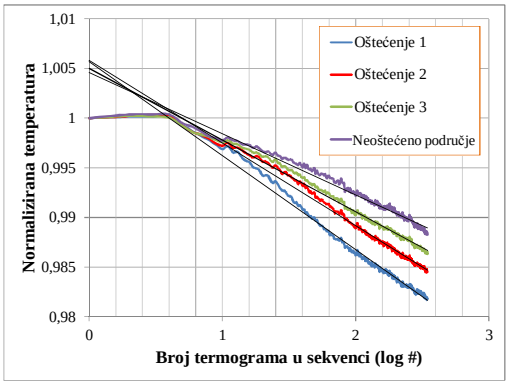


c)

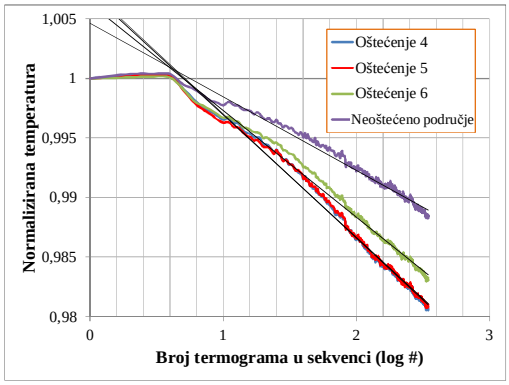


Slika 7.18 Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 2-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m

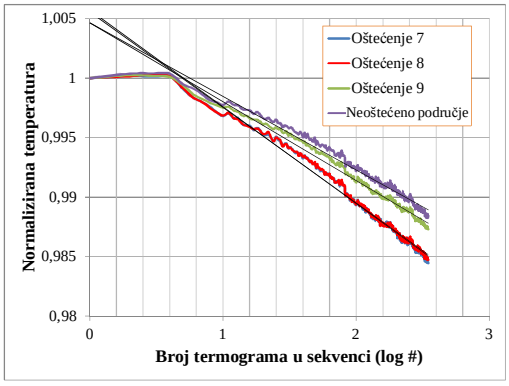
a)



b)



c)



Slika 7.19 Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m

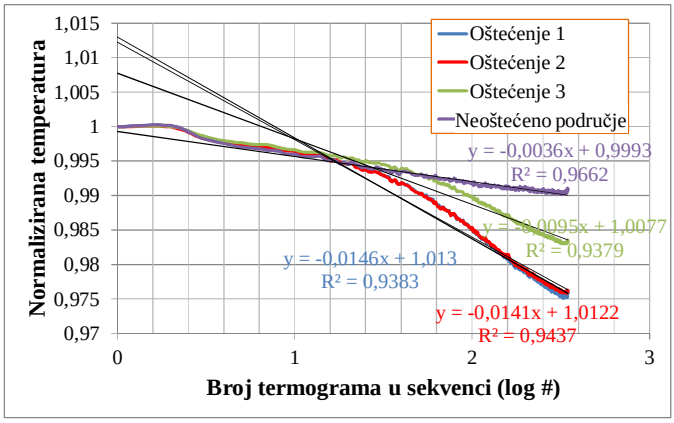
Tablica 7.1 Ovisnost nagiba pravca regresije o karakteristikama oštećenja

Uzorak	Oštećenje broj	Dubina oštećenja [mm]	Debljina oštećenja	Koeficijent nagiba pravca	Odsječak na osi „y“	R^2
BM 1-2 G udaljenost 2 m	1	10	40	-0,0081	1,0052	0,9844
	2	20	40	-0,0074	1,0045	0,9857
	3	30	40	-0,0071	1,0044	0,9856
	4	20	20	-0,0086	1,0051	0,9823
	5	30	20	-0,0082	1,0048	0,9849
	6	40	20	-0,0085	1,0053	0,9836
	7	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-
	Neoštećeni dio	-	-	-0,0061	1,0032	0,9825
BM 2-2 G udaljenost 2 m	1	10	40	-0,0071	1,0029	0,9735
	2	20	40	-0,0052	1,0029	0,9787
	3	30	40	-0,0041	1,0022	0,9756
	4	20	20	-0,0053	1,0029	0,9827
	5	30	20	-0,0054	1,0028	0,9844
	6	40	20	-0,0042	1,0021	0,9791
	7	20	10	-0,0045	1,0021	0,9839
	8	30	10	-0,0047	1,0021	0,9863
	9	40	10	-0,0036	1,0016	0,9802
	Neoštećeni dio	-	-	-0,0041	1,0014	0,9859
BM 3-2 G udaljenost 2 m	1	10	40	-0,0095	1,0057	0,9845
	2	20	40	-0,0083	1,0059	0,9814
	3	30	40	-0,0072	1,005	0,9813
	4	20	20	-0,0104	1,0074	0,9798
	5	30	20	-0,0103	1,0072	0,9791
	6	40	20	-0,009	1,0063	0,9793
	7	20	10	-0,0081	1,0057	0,9764
	8	30	10	-0,008	1,0055	0,978
	9	40	10	-0,0066	1,0046	0,9768
	Neoštećeni dio	-	-	-0,0062	1,0046	0,9706

Značaj korištenja nagiba krivulje hlađenja opisanog u ovom radu za karakterizaciju oštećenja u betonu, je ta da dopušta brzu relativnu karakterizaciju oštećenja pri čemu je nužno da je oštećenje vidljivo na klasičnom termogramu, inače će se opisane krivulje hlađenja ponašati kao neoštećeno područje termograma te neće biti moguće otkriti postojanje oštećenja. Općenito se može zaključiti da ovakav način karakterizacije oštećenja uvelike ovisi o lokalnom zagrijavanju uzorka betona te ju je kao takvu potrebno koristiti s oprezom te svakako uz podršku neke druge metode karakterizacije oštećenja.

Mala oštećenja na većim dubinama je vrlo teško razlikovati, kao što je vidljivo u slučaju oštećenja broj 5 i 6, odnosno oštećenja 8 i 9 u svim slučajevima, Slika 7.17, Slika 7.18 i Slika 7.19. Pokazalo se da je mogućnost razlikovanja i kvantificiranja oštećenja znatno smanjena kod betona lošije kvalitete.

Potrebno je također naglasiti da iako ovdje opisana zakonitost i dalje vrijedi (s povećanjem dubine oštećenja se povećava koeficijent nagiba pravca regresije postavljenog na krivulju hlađenja) da kod većih oštećenja, samo postavljanje pravca regresije dolazi u pitanje. Iako je koeficijent determinacije R^2 velik i vrijednost mu je veća od 0,9, vidljivo je da pravac ne opisuje promjenu temperature na uzorku, Slika 7.20.

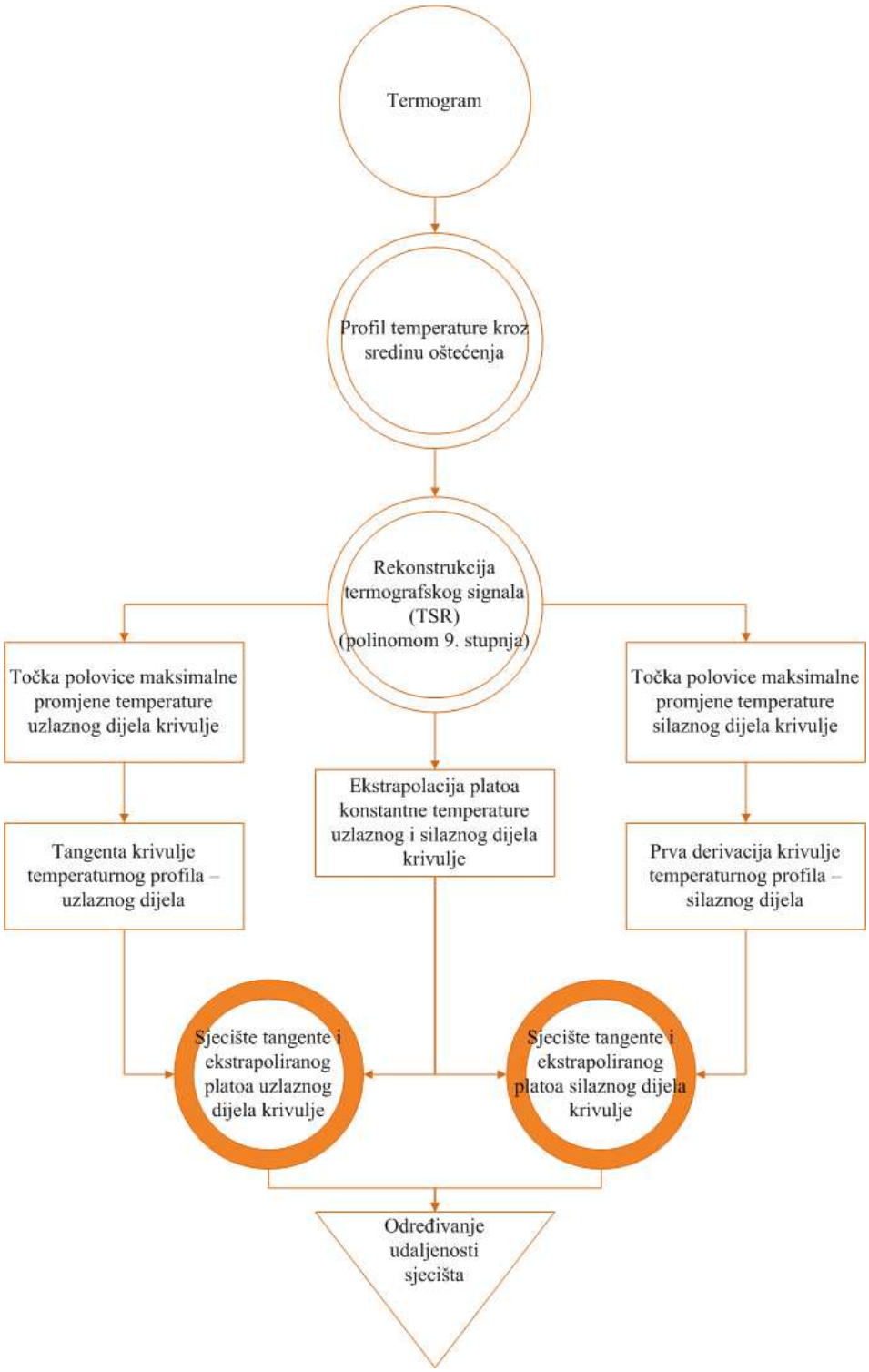


Slika 7.20 Razvoj normalizirane temperature površine betona uzorka BM 1-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m

7.2 Određivanje promjera oštećenja

Promjer oštećenja određuje se korištenjem prostorne distribucije površinske temperature uzoraka, odnosno korištenjem tangenti na krivulju razvoja temperature u točkama kod kojih se postiže polovica vrijednosti maksimalne promjene temperature zbog postojanja oštećenja,

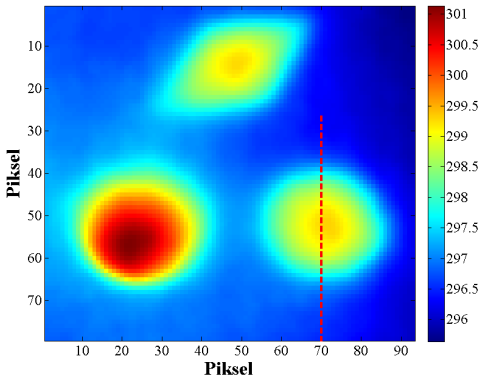
pri čemu se traži udaljenost sjecišta navedenih tangenti i temperature uzorka bez oštećenja. Ovaj postupak poznat je i pod nazivom FWHM tehnika (*Full Width, Half Maksimum technique*), a opisan je dijagramom tijeka, Slika 7.21. Primjer određivanja promjera oštećenja FWHM tehnikom prikazan je u daljnjem tekstu.



Slika 7.21 Proces određivanja promjera oštećenja u uzorcima korištenjem FWHM tehnike

Promatra se termogram dobiven u trenutku kada se oštećenje sa sigurnošću vidi u uzorku, a da ne dolazi do lateralnog širenja topline, što prividno povećava dimenziju oštećenja.

Ukoliko se uzme profil temperature kroz sredinu oštećenja (kako je prikazano, Slika 7.22), te se na polovici maksimalne promjene temperature odrede tangente na krivulju, razmak između sjecišta tangenti i ekstrapoliranih linija srednje vrijednosti derivacije temperature s lijeve i desne strane od promatranog maksimuma daje promjer oštećenja.

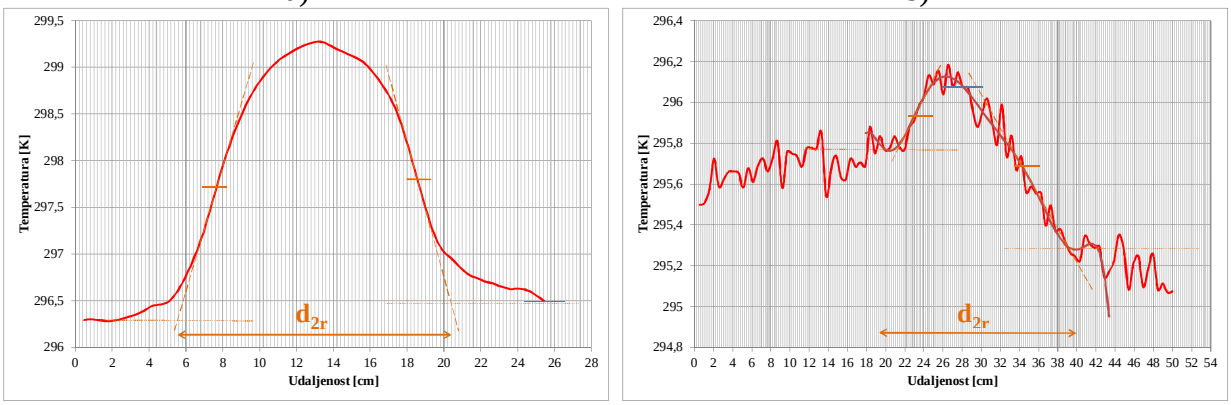


Slika 7.22 Linija za koju je dana prostorna raspodjela temperature (profil temperature) za uzorak BM 2-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 3m

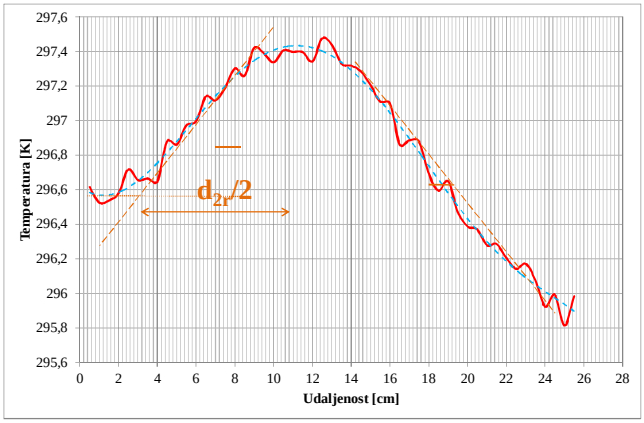
Slika 7.23 shematski prikazuje način određivanja promjera oštećenja iz profila armature, ukoliko nije potrebno i ukoliko je potrebno provoditi regresijsku analizu, odnosno fitovanje krivulje prostorne promjene temperature (u slučaju malog temperaturnog kontrasta). Ovdje je korišten polinom šestog stupnja u regresijskoj analizi u ograničenom dijelu krivulje koja predstavlja oštećenje u uzorku, Slika 7.23 b). Ukoliko pak nije moguće s obje strane krivulje pronaći plato kod kojeg dolazi do stabilizacije temperature, dovoljno je točno uzeti plato s jedne strane, te će horizontalna udaljenost do tjemena krivulje dati polumjer oštećenja u betonu, Slika 7.23 c).

Za dobivanje dimenzije na osi apscisa u [cm] umjesto broja piksela dobivenih sa slike, potrebno je poznavati vidno polje kamere (FOV) i udaljenost kamere od objekta koji se snima, kako bi se mogla odrediti veličina jednog piksela detektora na samom objektu mjerenja, kako je opisano u poglavlju 2.6.1.3. Pri tome je potrebno paziti na perspektivu koja se javlja ukoliko je objekt sniman pod kutom različitim od 90° u odnosu na plohu objekta mjerenja, te prikladno korigirati veličinu piksela.

a) b)

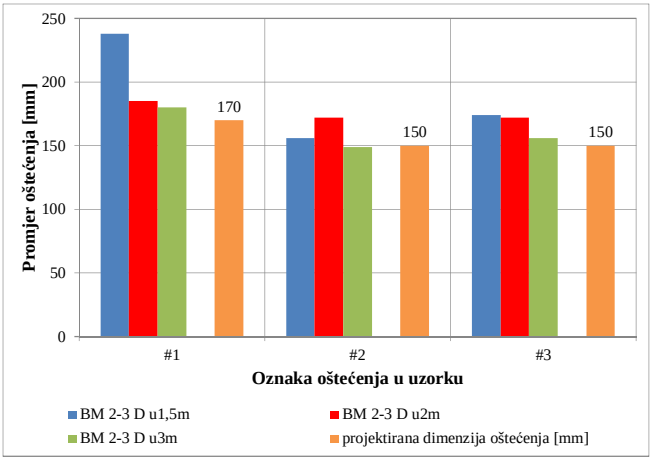


c)



Slika 7.23 Shematski prikaz određivanja promjera oštećenja iz profila temperature; a) bez potrebe za fitovanjem, b) s potrebom za fitovanjem, c) određivanje polumjera oštećenja

Slika 7.24 prikazuje ovisnost rezultata ispitivanja promjera oštećenja u uzorku BM 2-3 s donje strane ovisno o udaljenosti toplinske pobude.

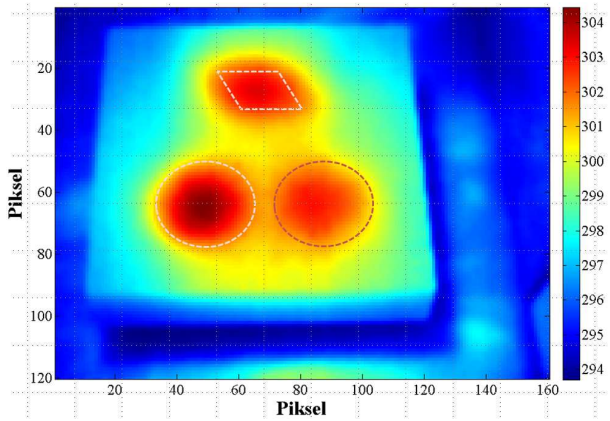


Slika 7.24 Rezultati ispitivanja promjera oštećenja u uzorku BM 2-3 s donje strane ovisno o udaljenosti toplinske pobude

Vidljivo je iz rezultata ispitivanja, Slika 7.24, da se u slučaju toplinske pobude udaljene 1,5 m dobivaju rezultati koji su značajno različiti od projektirane vrijednosti, za udaljenost

toplinske pobude od 2 m dobivaju se manje greške mjerenja, dok se za slučaj udaljenosti toplinske pobude od 3 m dobivaju rezultati u granicama prihvatljivih vrijednosti. Razlog je ovome utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzoraka koji onemogućuje određivanje promjera oštećenja zbog pretjerane lateralne difuzije topline na površini uzoraka.

Općenito je vrlo teško odabrati termogram kod kojeg je temperaturni kontrast dovoljno veliki da se s dovoljnom sigurnosti temperaturni profil može tangirati (bez utjecaja šuma), a da istovremeno utjecaj lateralnog vođenja topline nema preveliki utjecaj, odnosno da ne dođe do toga da je oštećenje prividno veće od njegove stvarne veličine, Slika 7.25.



Slika 7.25 Prikaz povećanja veličine oštećenja zbog lateralne difuzije topline, uzorak BM 3-3 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2m

Slična se tendencija s određivanjem promjera uzoraka može vidjeti i u slučaju drugih uzoraka. U slučaju manjih oštećenja (50 mm), vrlo je teško odrediti stvarni promjer oštećenja već i na dubinama od 20 mm zbog utjecaja lateralne difuzije topline na površini uzorka.

7.3 Model za određivanje dubine oštećenja

Dubina oštećenja izračunata je korištenjem jednadžbe:

$$\alpha_{diff} = \frac{C_x L^2}{\pi^2 t_x},$$

gdje je C_x koeficijent kalibracije za promatrano vrijeme t_x od početka mjerenja. Ovdje se promatra vrijeme pojavljivanja točke infleksije krivulje razvoja temperaturnog kontrasta t_{infl}. Pri tome je umjesto debljine uzorka L uvedena dubina na kojoj se nalazi oštećenja D. Toplinska difuzivnost materijala α_{diff} ovdje je uzeta proračunom prema izrazu:

$$a_{diff} = \frac{\lambda_c}{\rho_m \cdot c_p} \qquad \left[\frac{m^2}{s}\right],$$

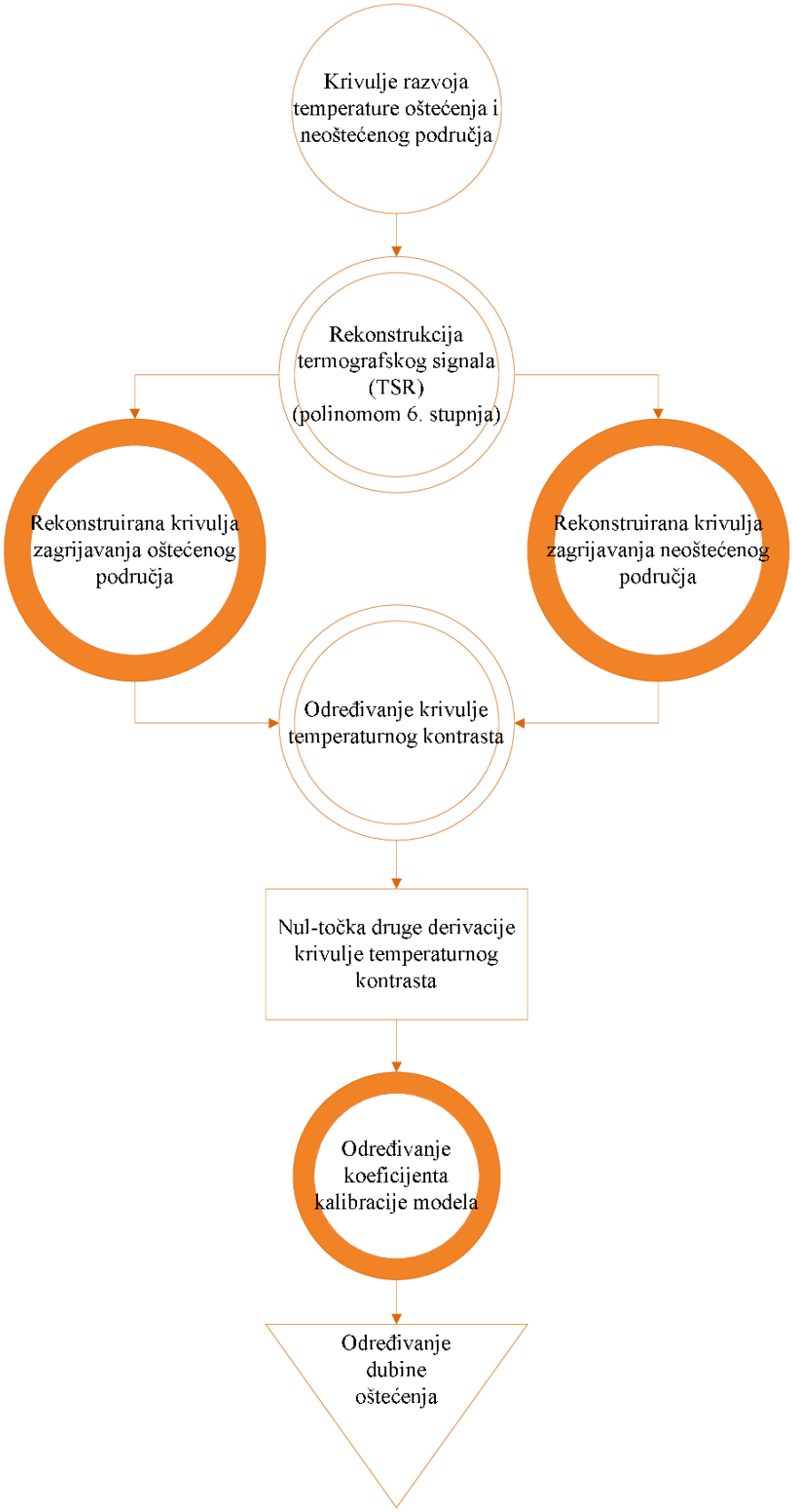
gdje su λ_c – toplinska provodljivost, [W/mK] izmjerena uređajem Mathis Tci, kako je opisano u poglavlju 3.11.4.; ρ_m [kg/m³] – volumenska masa materijala uzeta za zasićeni uzorak betona, čuvan u vlažnoj komori kod vlažnosti 95±5%, dok je c_p [J/kgK] – specifični toplinski kapacitet uzet da je jednak 1000 J/kgK, Tablica 7.2.

Tablica 7.2 Proračun toplinske difuzivnosti betona

Uzorak	**Toplinska provodljivost [W/mK]**	**Volumenska masa [kg/m^3]**	**Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]**	**Toplinska difuzivnost [m^2/s]**
BM 1-y	1,73	2163,67	1000	$7{,}996\times10^{-7}$
BM 2-y	2,21	2435,40		$9{,}074\times10^{-7}$
BM 3-y	2,80	2514,50		$1{,}114\times10^{-7}$

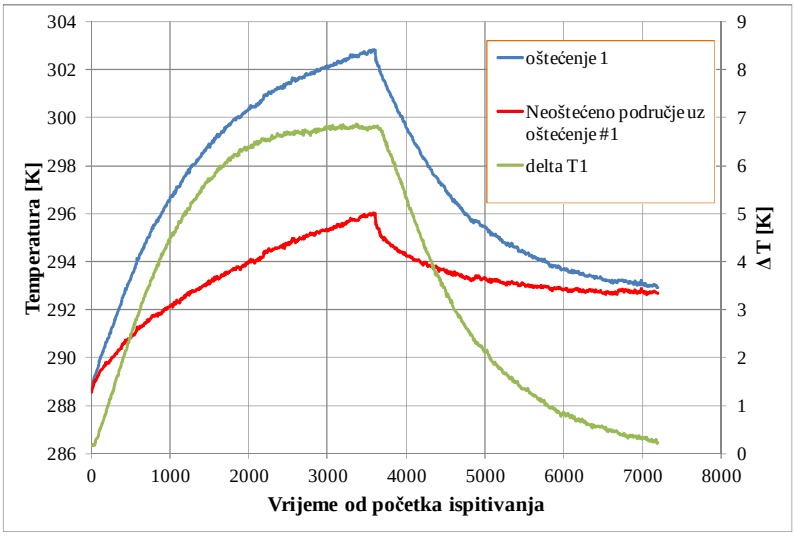
Ovime je u obzir uzeta i vlažnost betona koja je bila vrlo visoka (između 4 i 5,5 %) tijekom ispitivanja postojanja oštećenja u betonu korištenjem IC termografije, te su zbog toga vrijednosti toplinske difuzivnosti značajno veće od onih dobivenih mjerenjem za suhi uzorak betona (poglavlje 5.4.).

Proces određivanja dubine oštećenja iz sekvence termograma prema modelu korištenom u ovom radu opisan je dijagramom tijeka, Slika 7.26, a u daljnjem je tekstu opisan primjer određivanja dubine u slučaju uzorka BM 2-3.



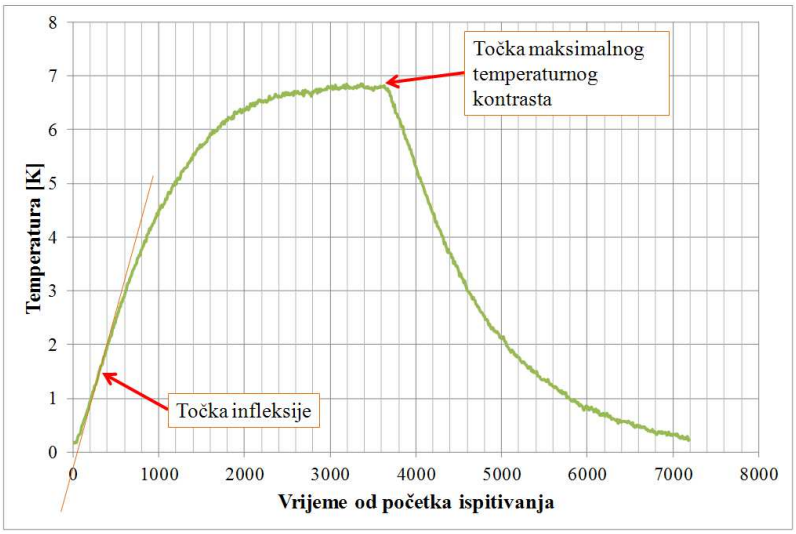
Slika 7.26 Proces određivanja dubine oštećenja iz sekvence termograma

Slika 7.27 prikazuje razvoj temperature na površini uzorka BM 2-3 promatrano s donje strane, pri čemu je udaljenost toplinske pobude 2m. Prikazana je krivulja razvoja temperature iznad oštećenja broj 1, iznad neoštećenog područja neposredno pokraj oštećenja broj 1, te razvoj temperaturnog kontrasta za oštećenje broj 1.



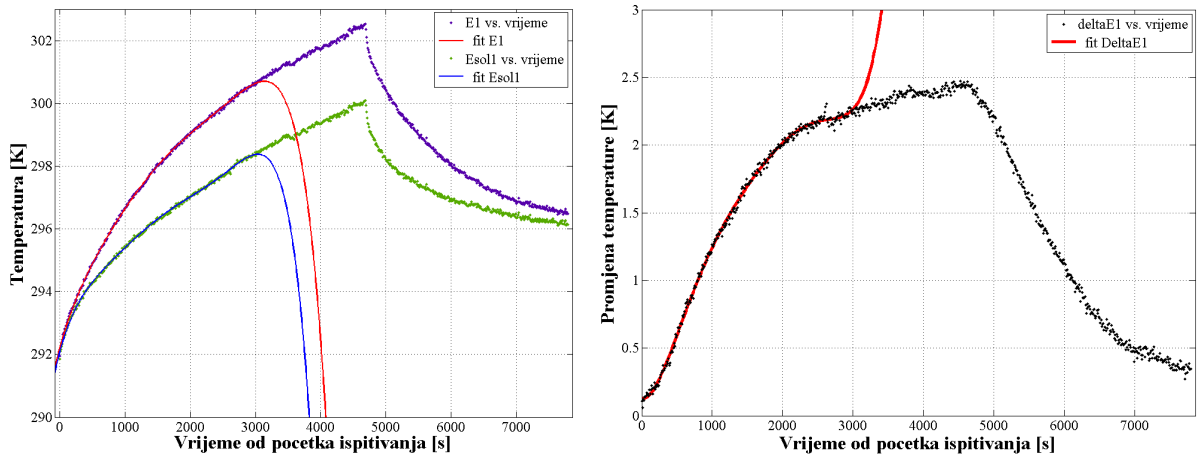
Slika 7.27 Razvoj temperature na uzorku BM 2-3 s donje strane, udaljenost 2m

Slika 7.28 prikazuje razvoj temperaturnog kontrasta oštećenja broj 1 u uzorku BM 2-3 promatrano s donje strane, udaljenost toplinske pobude je 2 m. Pri tome su označene karakteristične točke koje se koriste za određivanje dubine oštećenja.

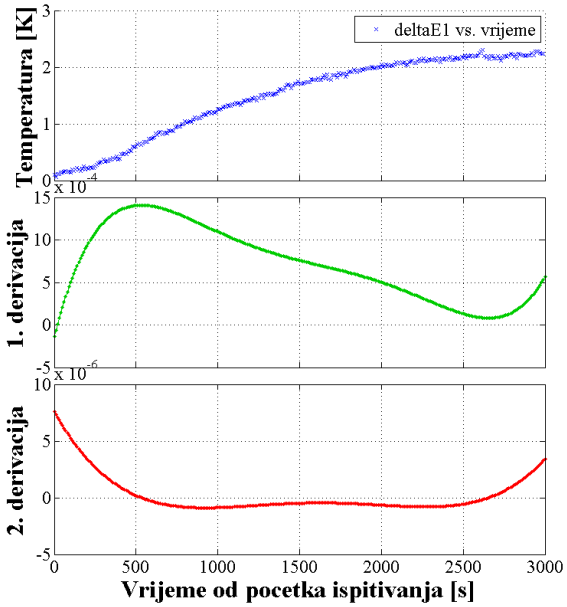


Slika 7.28 Karakteristične točke na temperaturnom kontrastu, oštećenje broj 1, uzorak BM 2-3

Točka infleksije krivulje temperaturnog kontrasta, karakterizirana je vremenom infleksije t_{infl}, koje se dobiva na način kako je opisano u daljnjem tekstu.



Slika 7.29 Fitanje krivulje porasta temperature a) i krivulje temperaturnog kontrasta b) uzorka polinomom šestog stupnja, uzorak BM 3-1 s donje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m



Slika 7.30 Prva i druga derivacija krivulje temperaturnog kontrasta oštećenja broj 1 uzorka BM 3-1 s donje strane, udaljenost 2m

Najprije je provedena rekonstrukcija termografskog signala (TSR) na dijelu krivulje razvoja temperature, odnosno korištena je regresijska analiza kako bi se dobile glatke krivulje koje opisuju ponašanje površine uzorka, a istovremeno se pri tome eliminira šum, odnosno omogućuje deriviranje krivulja razvoja temperature. Kod regresijske analize korišteni su polinomi šestog stupnja za opisivanje krivulje porasta temperature do vremena od 3000 sekundi od početka zagrijavanja, Slika 7.29. Vrijeme od 3000 sekundi je odabrano zbog toga

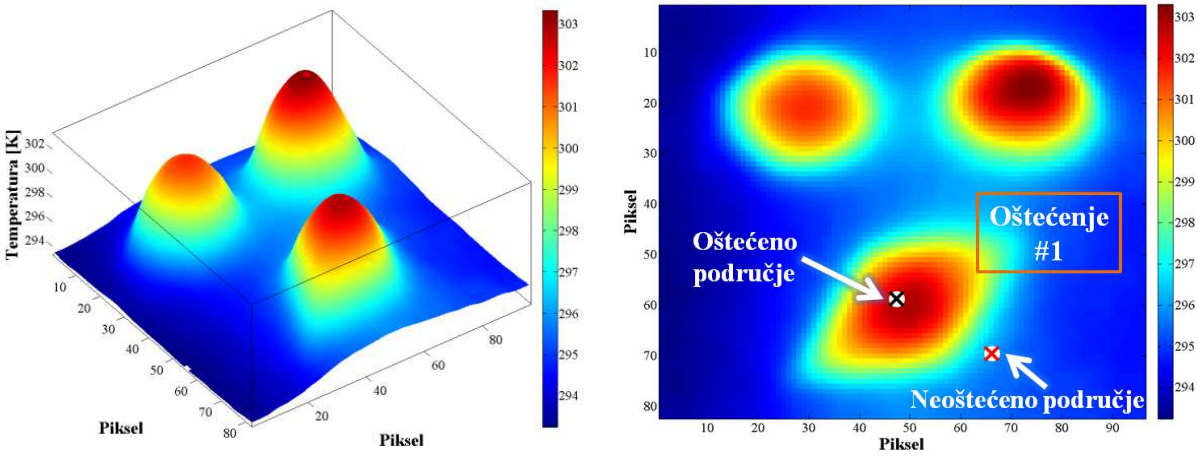
što se do tog vremena razlikuje oštećenja od neoštećenog područja, a istovremeno je dovoljno kratko tako da je moguće polinomom šestog stupnja opisati promjenu temperature, uz visoki koeficijent regresije.

Nakon toga je su regresijske krivulje derivirane po vremenu, Slika 7.30, pri čemu trenutak u vremenu kod kojeg je druga derivacija krivulje temperaturnog kontrasta jednaka nuli, daje trenutak u kojem se nalazi točka infleksije na krivulji temperaturnog kontrasta, t_{infl}.

Potom je pronađena vrijednost koeficijenta korelacije C_{infl} koja za poznatu toplinsku difuzivnost betona daje projektiranu dubinu oštećenja u promatranim uzorcima, koristeći pri tome vrijeme pri kojem se javlja točka infleksije na krivulji temperaturnog kontrasta, t_{infl}.

$$C_{infl} = \frac{\alpha_{diff} \cdot \pi^2 t_{infl}}{L^2}$$

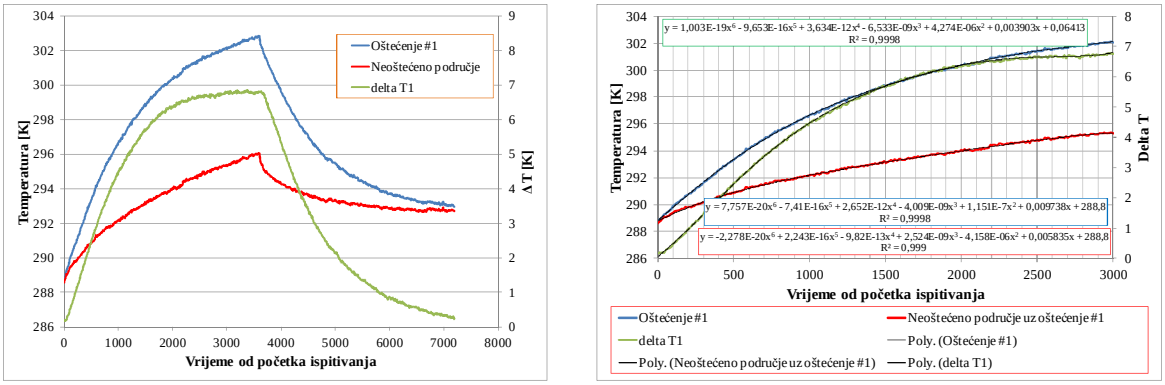
Kao uzorak za kalibraciju, odnosno određivanje vrijednosti koeficijenta kalibracije C_{infl} korišten je uzorak BM 2-3 promatrano s donje strane s udaljenosti 2 m, odnosno oštećenje broj 1 spomenutog uzorka, Slika 7.31.



Slika 7.31 Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 2m, 3D i 2D prikaz

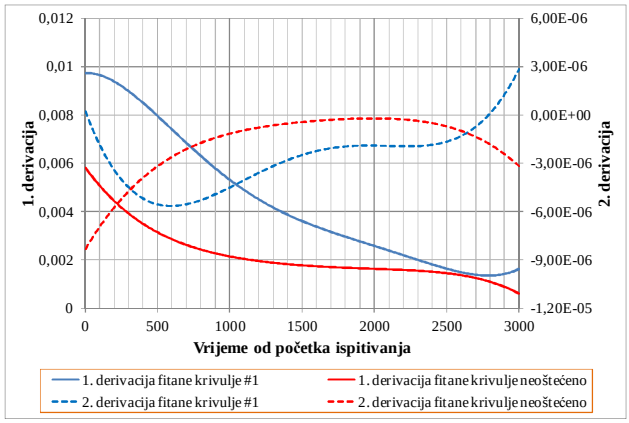
Pri tome su dobivene krivulje razvoja temperature oštećenja broj 1, temperatura neoštećenog područja te krivulja temperaturnog kontrasta na uzorku BM 2-3 promatrano s donje strane, pri čemu je udaljenost toplinske (U) pobude bila 2 m. Slika 7.32a) prikazuje krivulje razvoja temperature kroz cijelu sekvencu ispitivanja uzorka (grijanje + hlađenje), dok Slika 7.32b) prikazuje krivulje samo u intervalu perioda zagrijavanja od 0 do 3000 sekundi te njihove regresijske krivulje koje su uzete kao polinomi šestog stupnja. Slika 7.33 prikazuje

prvu i drugu derivaciju regresijskih krivulja razvoja temperature iznad oštećenja broj 1 i neoštećenog područja.

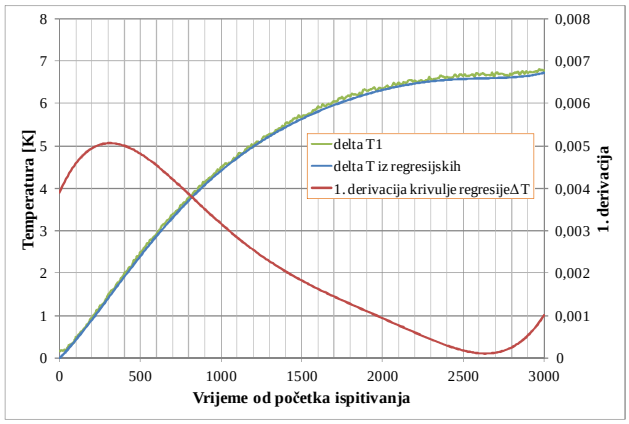


a) b)

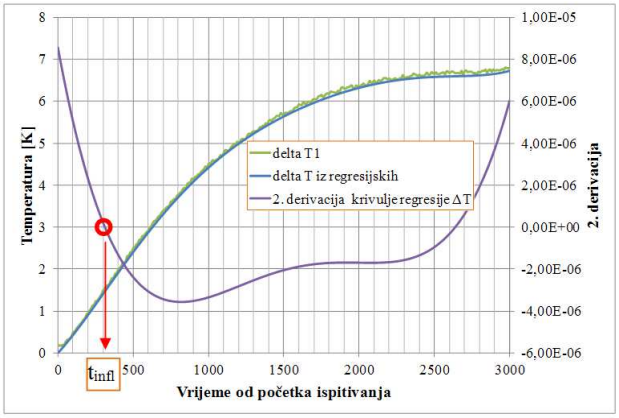
Slika 7.32 Krivulje razvoja temperature oštećenja broj 1, temperatura neoštećenog područja te krivulja temperaturnog kontrasta na uzorku BM 2-3 D U2m



Slika 7.33 Prva i druga derivacija regresijskih krivulja razvoja temperature oštećenja broj 1 i neoštećenog područja na uzorku BM 2-3 D U2m



Slika 7.34 Prva derivacija regresijske krivulje temperaturnog kontrasta oštećenja broj 1 i neoštećenog područja na uzorku BM 2-3 D U2m



Slika 7.35 Druga derivacija regresijske krivulje temperaturnog kontrasta oštećenja broj 1 i neoštećenog područja na uzorku BM 2-3 D U2m

Slika 7.34 i Slika 7.35 prikazuju prvu, odnosno drugu derivaciju regresijske krivulje, iz čega je moguće pronaći nul-točku druge derivacije, čije vrijeme pojavljivanja predstavlja vrijeme pojavljivanja točke infleksije na krivulji temperaturnog kontrasta. Potrebno je ovdje naglasiti da se promatra nul-točka prvog silaznog kraka krivulje druge derivacije regresijske krivulje, jer postoje slučajevi kad se najprije događa uzlazni krak druge derivacije.

Dobiveno je da je koeficijent kalibracije jednak $C_{infl} = 4{,}80$, ukoliko se koristi prva točka infleksije silaznog kraka krivulje druge derivacije, tako da srednje vrijednosti rezultata mjerenja budu optimalno bliske projektiranoj dubini oštećenja. Iz toga proizlazi da ukoliko se primijeni dobiveni koeficijent, dobiva se izraz za određivanje dubine na kojoj se nalazi oštećenje:

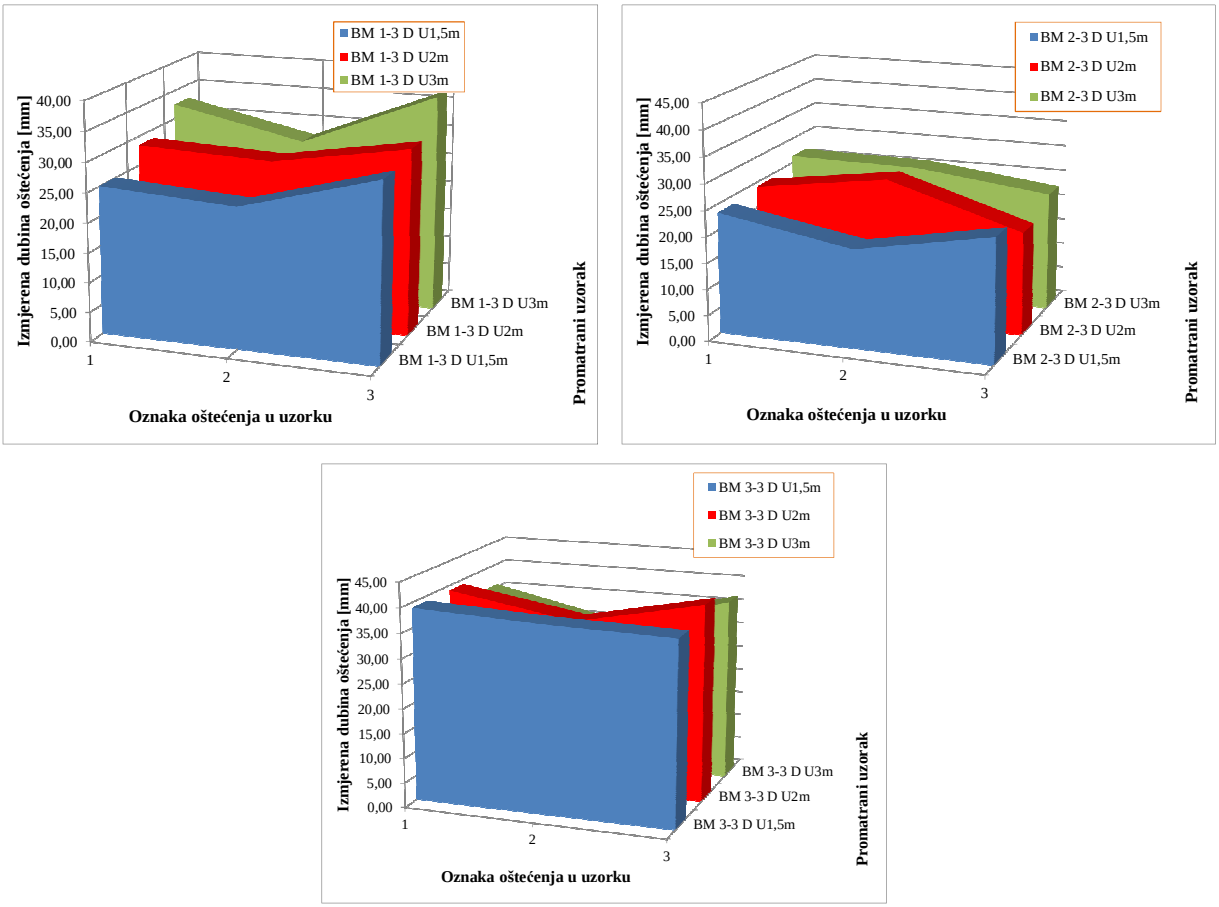
$$D = \sqrt{\frac{\alpha_{diff} \cdot \pi^2 t_{infl}}{4{,}80}}$$

Primjenom navedenog izraza za mjerenje dubine na kojoj se nalazi oštećenje primjenom metode aktivne termografije dobivaju se slijedeći rezultati mjerenja, za svako pojedino oštećenje pri svim konfiguracijama za uzorke BM x-3 s donje strane, Tablica 7.3, Slika 7.36.

Tablica 7.3 Dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s donje strane

Uzorak	**Dubina oštećenja [cm]**			**Odstupanje u % za oštećenje**		
Oštećenje	**#1**	**#2**	**#3**	**#1**	**#2**	**#3**
BM 1-3 D U1,5m	2,50	2,36	3,01	-16,7	-21,2	0,2
BM 1-3 D U2m	2,84	2,75	3,14	-5,4	-8,3	4,7
BM 1-3 D U3m	3,24	2,75	3,69	8,1	-8,3	23,1
BM 2-3 D U1,5m	2,33	1,88	2,37	-22,5	-37,2	-21,1

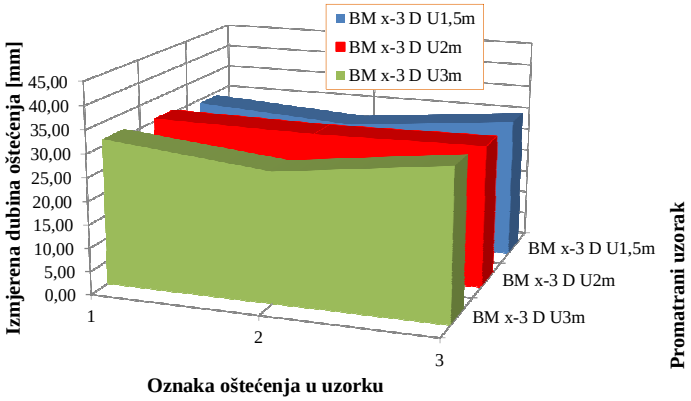
Uzorak	Dubina oštećenja [cm]			Odstupanje u % za oštećenje		
BM 2-3 D U2m	2,41	2,77	1,98	-19,8	-7,8	-34,0
BM 2-3 D U3m	2,63	2,59	2,29	-12,4	-13,6	-23,8
BM 3-3 D U1,5m	3,89	3,77	3,71	29,6	25,6	23,6
BM 3-3 D U2m	3,89	3,45	3,98	29,6	15,0	32,5
BM 3-3 D U3m	3,55	2,99	3,68	18,3	-0,4	22,5



Slika 7.36 Dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s donje strane

Pri obradi rezultata mjerenja, odnosno određivanju dubine oštećenja, primijećeno je da se obično rezultat problematičnog ispitivanja (određivanja referentnih točaka krivulja) znatno razlikuje od svih ostalih rezultata, tako da je očigledna greška određivanja dubine oštećenja. U tom se slučaju preporuča provođenje određivanje dubine na više različitih točaka koje su dovoljno blizu promatranom oštećenju, odnosno provođenje više mjerenja na istom mjernom mjestu ili ispitivanje s različitih udaljenosti. Pri tome se ispitivanje provodi s dovoljnim vremenskim razmakom, tako da se toplinski pobuđeni uzorak vrati na temperaturu okoline.

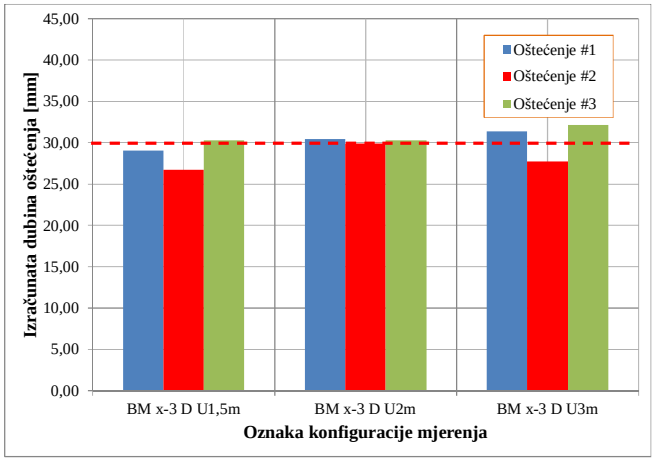
Slika 7.37 i Tablica 7.4 prikazuju srednju dubinu oštećenja broj 1, 2 i 3 u uzorcima BM x-3, pri čemu je srednja dubina proračunata iz izmjerenih dubina oštećenja (Tablica 7.3) za svaku pojedinu vrstu betona, za udaljenosti toplinske pobude od 1,5; 2 i 3 m od površine uzorka. Odstupanje od projektirane vrijednosti za uzorke BM x-3 na udaljenosti 2 m i 3 m maksimalno je jednako 10,9 %, Slika 7.38, Tablica 7.5.



Slika 7.37 Srednja dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s donje strane

Tablica 7.4 Srednje dubine oštećenja uzorka BM x-3

Uzorak	**Dubina oštećenja [mm]**		
Oštećenje	**#1**	**#2**	**#3**
BM x-3 D U1,5m	29,05	26,72	30,27
BM x-3 D U2m	30,44	29,89	30,32
BM x-3 D U3m	31,40	27,77	32,19



Slika 7.38 Usporedba projektirane (crtkano) i izmjerene srednje dubine oštećenja uzoraka BM x-3 s donje strane

Tablica 7.5 Odstupanje srednje dubine oštećenja uzorka BM x-3 od projektirane dubine

Uzorak	**Odstupanje u % za oštećenje**		
Oštećenje	**#1**	**#2**	**#3**
BM x-3 D U1,5m	-3,2	-10,9	0,9
BM x-3 D U2m	1,5	-0,4	1,1
BM x-3 D U3m	4,7	-7,4	7,3

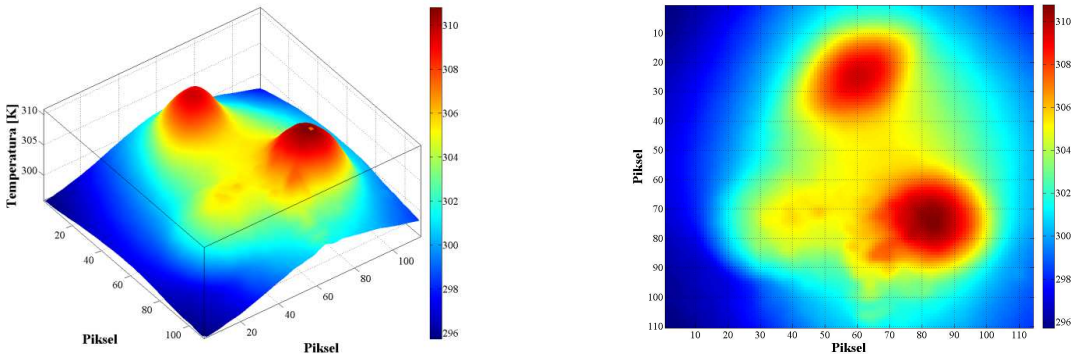
Vidljivo je da se srednje vrijednost izmjerene dubine oštećenja za sve udaljenosti toplinske pobude relativno dobro poklapaju s projektiranim vrijednostima dubina oštećenja, Tablica 7.5. Kod pojedinačnih mjerenja za svaku pojedinu konfiguraciju mjerenja uzoraka BM x-3 s donje strane dolazi i do znatne varijacije rezultata ispitivanja od uzorka do uzorka, pa se greška kreće i do 35%.

Potrebno je naglasiti da do razlika između izmjerene dubine oštećenja i projektirane dubine dolazi najvjerojatnije zbog greške u određivanju toplinske difuzivnosti materijala u kojem se nalazi oštećenje (neoštećenog betona). Ona je ovdje određena proračunom temeljem izmjerene toplinske provodljivosti korištenjem nestacionarne metode vrućeg diska koja svakako sadrži određenu grešku mjerenja. Također, specifični toplinski kapacitet betona je pretpostavljen na temelju literaturnih vrijednosti za betone sličnog mineralnog sastava agregata i slične vlažnosti. Nadalje, toplinska difuzivnost je određena za zasićeni beton (vlažnosti veće od 5% maseno, odnosno 90% relativne vlažnosti betona), dok su uzorci bili i nešto manje vlažnosti tijekom mjerenja.

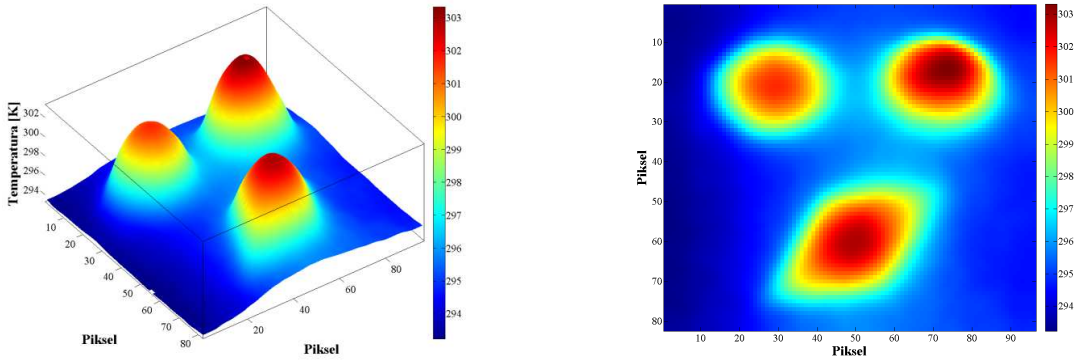
Ovdje treba istaknuti da postoji mogućnost pomaka oštećenja prilikom betoniranja uzoraka, od idealne projektirane vrijednosti do koje je moguće došlo prilikom ugradnje betona u kalupe, odnosno prilikom vibriranja betona.

Znatni utjecaj na točnost određivanja dubine oštećenja svakako ima i odabir točaka koje se uzimaju kao predstavnice oštećenog odnosno neoštećenog područja na uzorku, što kod uzoraka koji su ispitivani s toplinskom pobudom na udaljenosti od 1,5 m od uzorka predstavlja znatni problem zbog nejednolikog zagrijavanja uzoraka, a u slučaju udaljenosti toplinske pobude 3 m od uzorka zbog utjecaja lateralnog vođenja topline u uzorku. Vrlo je važno da se točka koja predstavlja oštećenje uzima u sredini oštećenja, ukoliko je to moguće, dok je za točke koje predstavljaju neoštećeni dio uzorka bitno da su blizu oštećenja, ali dovoljno daleko da se minimizira utjecaj lateralnog vođenja topline, i pri tome je svakako potrebno izbjeći utjecaj refleksije ili promjena u emisivnosti materijala. Slika 7.39 i Slika 7.40

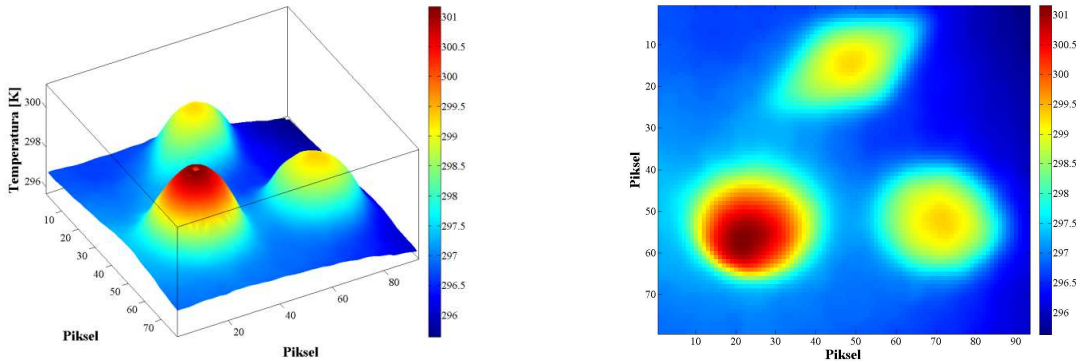
prikazuju razliku između toplinske pobude uzorka BM 2-3 gledano s donje strane, s udaljenosti 1,5 m, 2 m, odnosno 3 m, pri čemu je očigledna razlika u temperaturnom polju istog uzorka ako se promatraju optimalni termogrami sekvence sva tri navedena ispitivanja.



Slika 7.39 Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 1,5 m, 3D i 2D prikaz

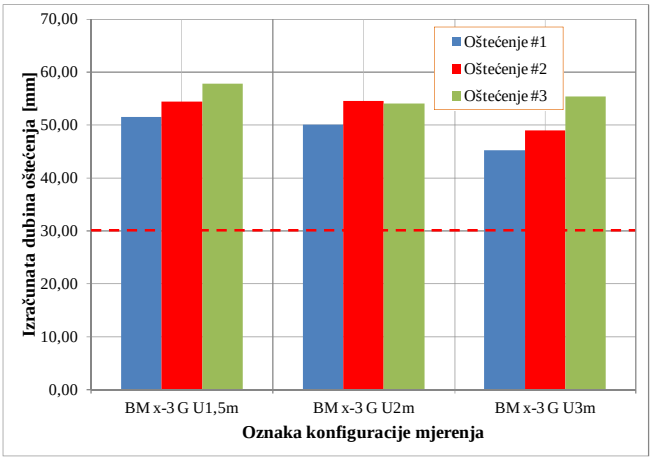


Slika 7.40 Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 2 m, 3D i 2D prikaz



Slika 7.41 Optimalni termogram uzorka BM 2-3 s donje strane, udaljenost 3 m, 3D i 2D prikaz

Ukoliko se promatra utjecaj armature na određivanje dubine oštećenja u betonu, vidljivo je da je potrebno odrediti novi koeficijent kalibracije C'_{infl} koji vrijedi u slučaju kad se između oštećenja i površine betona nalazi sloj armature. Potreba određivanja novog koeficijenta kalibracije utvrđena je nakon što su korištenjem koeficijenta $C_{infl} = 4{,}8$ dobivene slijedeće dubine oštećenja, Slika 7.42.



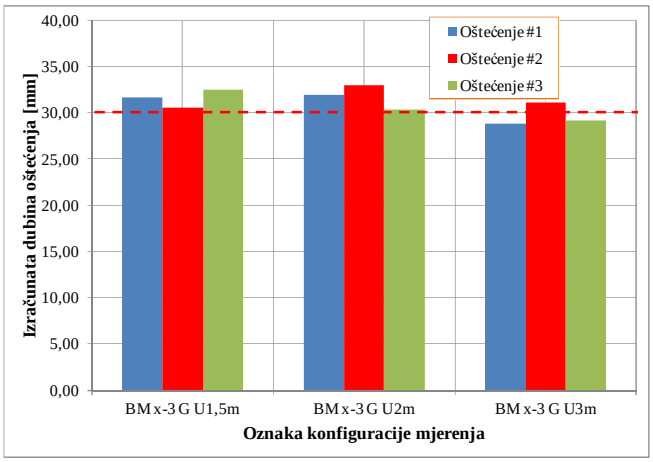
Slika 7.42 Usporedba projektirane (crtkano) i izmjerene srednje dubine oštećenja uzoraka BM x-3 s gornje strane

Vidljivo je da uz korištenje koeficijenta kalibracije $C_{infl} = 4{,}8$ kod određivanja dubine oštećenja dolazi do greške između 50 i 93 %, ovisno o oštećenju koje se promatra.

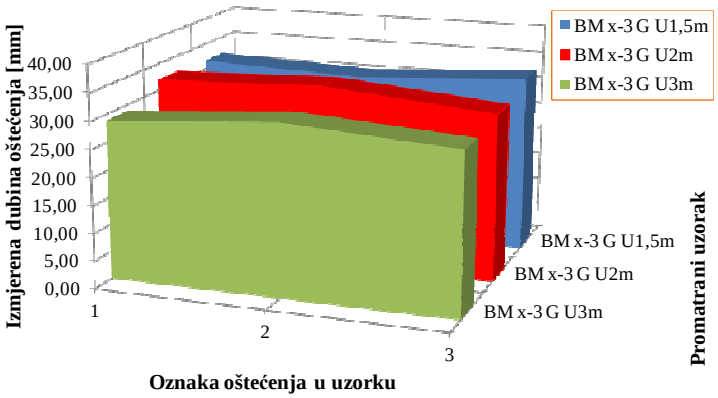
Zbog toga je određen koeficijent kalibracije C'_{infl}, a dobiven je na jednaki način kao što je opisano za slučaj koeficijenta C_{infl} ranije u ovom poglavlju. Dobivena je vrijednost koeficijenta kalibracije $C'_{infl} = 11{,}5$ koja daje dubine vrlo blizu projektiranim vrijednostima. Jednadžba koja se koristi za određivanje dubine oštećenja u slučaju postojanja armature između oštećenja i površine betona glasi:

$$D = \sqrt{\frac{\alpha_{diff} \cdot \pi^2 t_{infl}}{11{,}5}},$$

pri čemu je dobivena srednja dubina oštećenja uzoraka BM x-3, s gornje strane, Slika 7.43.

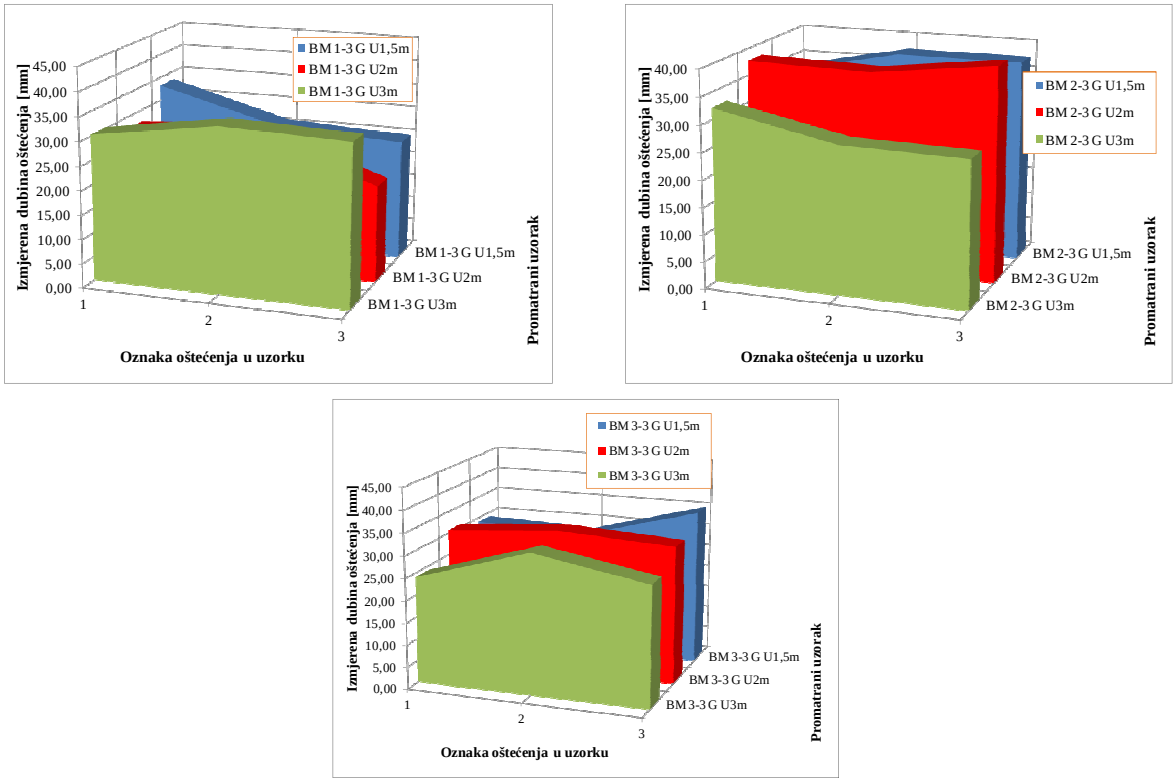


Slika 7.43 Usporedba projektirane (crtkano) i izmjerene srednje dubine oštećenja uzoraka BM x-3 s gornje strane



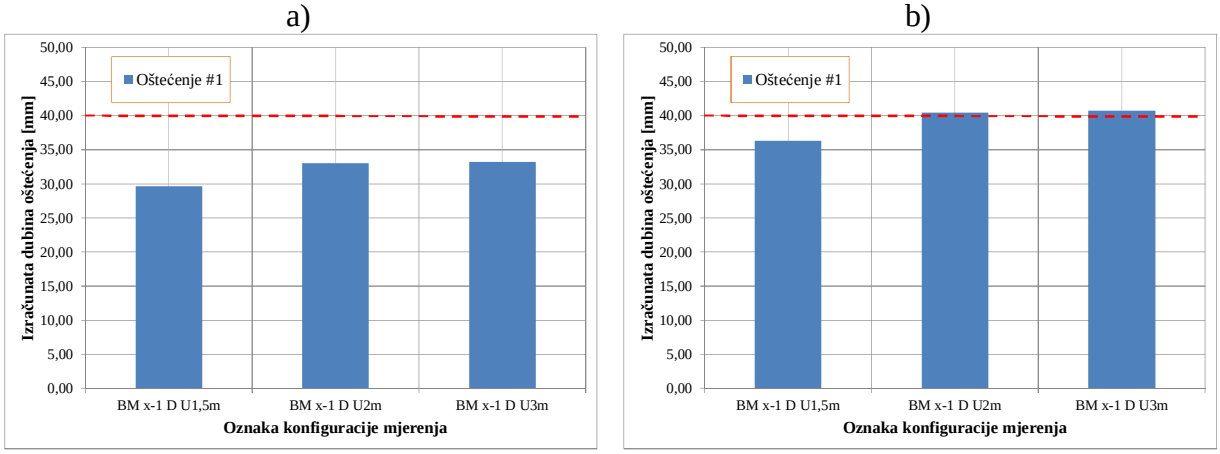
Slika 7.44 Srednja dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s gornje strane

Slika 7.44 prikazuje srednju dubinu oštećenja broj 1, 2 i 3 u uzorcima BM x-3 promatrano s gornje strane, pri čemu je srednja dubina proračunata iz izmjerenih dubina oštećenja za svaku pojedinu vrstu betona, za udaljenosti toplinske pobude od 1,5; 2 i 3 m od površine uzorka. Odstupanje od projektirane vrijednosti za uzorke BM x-3 na udaljenosti 2 m i 3 m maksimalno je jednako 9,9 %. Općenito se može zaključiti da do većih međusobnih odstupanja svakog pojedinog rezultata ispitivanja dolazi kod udaljenosti toplinske pobude od 1,5 m, dok se kod udaljenosti toplinske pobude od 2 i 3 m dobivaju rezultati ispitivanja s manjom varijabilnosti (raspršenjem) rezultata ispitivanja, Slika 7.45.



Slika 7.45 Dubina oštećenja na uzorcima BM x-3 s gornje strane

Ukoliko se provede analiza za oštećenje broj 1 na uzorcima BM x-1 s gornje strane, vidljivo je da za vrijednost koeficijenta kalibracije $C_{infl} = 4{,}8$, proračun dubine podcjenjuje stvarnu dubinu na kojoj se nalaze oštećenja, Slika 7.46 a), dobivena je greška između 17,0 i 26,0 %.



Slika 7.46 a) Podcijenjena dubina oštećenja uz korištenje $C_{infl} = 4{,}8$ pri proračunu; b) izmjerena dubina oštećenja uz korigirani koeficijent kalibracije $C_{infl}^{BM\ x-1} = 3{,}2$

Očito je da veličina samog oštećenja utječe na mogućnost otkrivanja na kojoj se dubini oštećenje nalazi, tako da je u nastavku predložen jednostavan način određivanja utjecaja promjera oštećenja na koeficijent kalibracije koji se koristi kod određivanja dubine oštećenja. Ukoliko se stavi u odnos omjer promjera oštećenja broj 2 i 3 kod uzoraka BM x-3 s donje strane (bez utjecaja armature) i promjera oštećenja broj 1 kod uzoraka BM x-1 s gornje strane te odnos koeficijenata kalibracije za navedene uzorke, moguće je dobiti koeficijent kalibracije za oštećenje manjeg promjera, pri čemu je debljina samih oštećenja jednaka 40 mm u svim navedenim slučajevima.

$$\frac{C_{infl}^{BM\ x-3}}{C_{infl}^{BM\ x-1}} = \frac{d_{2r}^{BM\ x-3}}{d_{2r}^{BM\ x-1}} \quad \rightarrow \quad \frac{4{,}8}{C_{infl}^{BM\ x-1}} = \frac{150\ mm}{100\ mm}$$

$$C_{infl}^{BM\ x-1} = \frac{4{,}8 * 100}{150} = 3{,}2$$

Ovdje dobivena vrijednost koeficijenta kalibracije $C_{infl}^{BM\ x-1} = 3{,}2$ daje korektne rezultate pri određivanju dubine oštećenja broj 1 u uzorcima BM x-1, Slika 7.46 b), pri čemu je dobivena greška mjerenja 1,1 i 9,3%.

7.4 Model za određivanje debljine oštećenja

Karakterizacija oštećenja može se provoditi promatranjem temperaturnog polja na površini uzoraka, te se uz poznavanje toplinskih i fizikalnih svojstava oštećenja, te samog materijala u kojem se oštećenje nalazi ono može okarakterizirati, odnosno odrediti dubina na kojoj se oštećenje nalazi.

Kako je opisano detaljnije u poglavlju 3.8. [Meola, 2007] uspostavlja ovisnost između promjera oštećenja d_{2r}, debljine oštećenja d i debljine promatranog objekta u kojem se oštećenje nalazi L te toplinskih karakteristika (toplinske efuzivnosti) materijala oštećenja $e_{eff,d}$ i materijala objekta koji se promatra $e_{eff,obj}$. Uvedena je bezdimenzionalna veličina D_e koja je funkcija navedenih parametara i koja za jednoslojni materijal ima slijedeći oblik [Meola, 2007]:

$$D_e = N_1 \left| \frac{e_{eff,obj} - e_{eff,d}}{e_{eff,obj}} \right| \frac{d}{L} \frac{d_{2r}}{D}$$

Ukoliko je D_T normalizirana razlika temperatura na površini iznad oštećenja T_d i neoštećenog betona T_s, a T_r je temperatura neoštećenog materijala prije početka zagrijavanja:

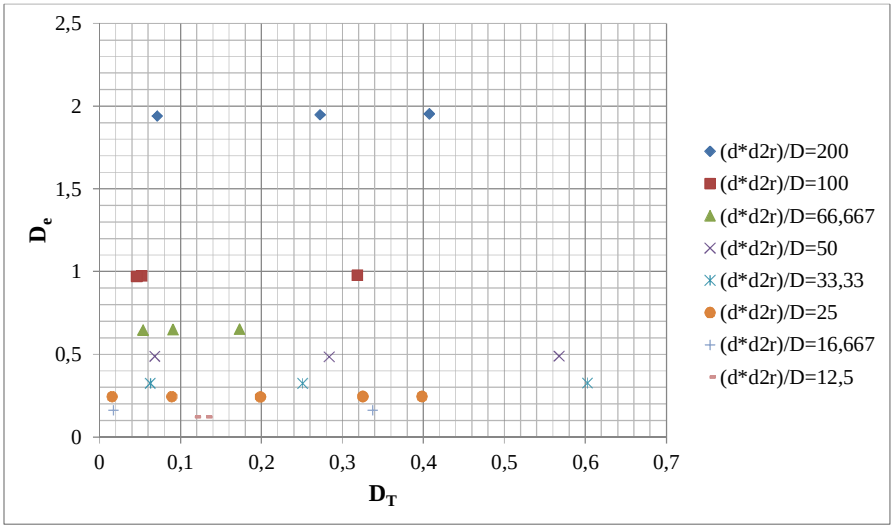
$$D_T = \frac{|T_s - T_d|}{|T_s - T_r|},$$

tada je moguće uspostaviti sljedeću vezu između parametara D_e i D_T, [Meola, 2007], pod pretpostavkom da se u oštećenju nalazi zrak, a da je osnovni materijal beton.

Ukoliko se za toplinska svojstva osnovnog materijala (betona) i materijala oštećenja prihvate vrijednosti dane u tablici 5.20 (za beton), odnosno tablici 4.4 (za XPS), te za poznatu debljinu uzorka betona $L = 100\,mm$, te geometrijske karakteristike oštećenja kako je prikazano na slici 4.8 za uzorke BM x-2, moguće je odrediti određene pravilnosti (Slika 7.47).

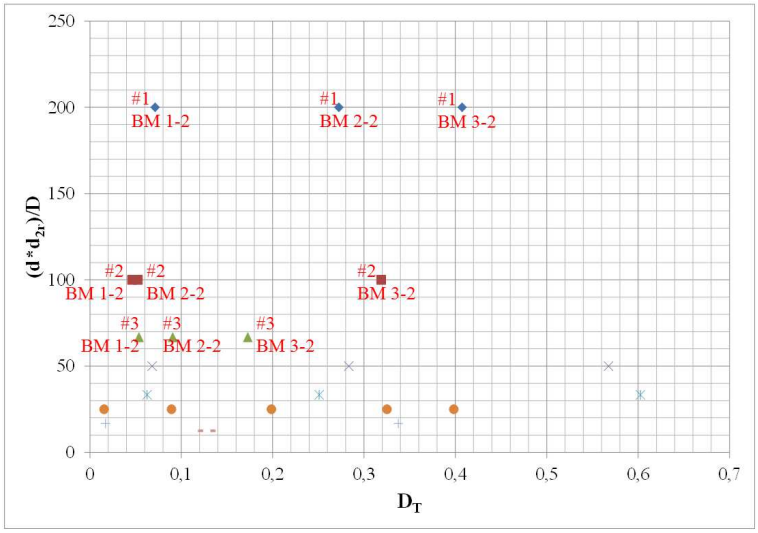
Za oštećenja koja imaju jednak omjer između promjera oštećenja d_{2r}, debljine oštećenja d i dubine oštećenja D, vidljivo je da je vrijednost parametra D_e približno jednaka, a razlika postoji zbog razlike u toplinskoj efuzivnosti betona različite kvalitete. Slika 7.47 prikazuje točke dobivene za oštećenja iz uzoraka BM 1-2, BM 2-2 i BM 3-2, pri čemu su svi promatrani s gornje strane pri udaljenosti toplinske pobude 2 m od površine uzorka. Pri tome su temperature potrebne za proračun parametra D_T izvučene iz termograma snimljenog odmah

nakon gašenja toplinske pobude, odnosno referentna temperatura T_r je dobivena očitanjem na termogramu snimljenom prije početka zagrijavanja uzorka, na proizvoljno odabranom mjestu na uzorku.



Slika 7.47 Ovisnost između D_T i D_e ovisno o geometrijskim karakteristikama oštećenja uzoraka BM 1-2, BM 2-2 i BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m

Vidljivo je da se za različite vrste betona od kojih su izrađeni uzorci korišteni u ovom radu, vrijednost parametra D_e mijenja tek neznatno. U slučaju da se toplinska efuzivnost oštećenja napunjenog zrakom i betona, te debljina uzorka izdvoje iz izraza za D_e, može se definirati omjer $\frac{d \cdot d_{2r}}{D}$ kao parametar na osi ordinata, Slika 7.48.



Slika 7.48 Ovisnost između D_T i $\frac{d \cdot d_{2r}}{D}$ ovisno o geometrijskim karakteristikama oštećenja uzoraka BM 1-2, BM 2-2 i BM 3-2 s gornje strane, udaljenost toplinske pobude 2 m

Važnost korištenja navedenog dijagrama je mogućnost određivanja omjera debljine i dubine oštećenja, bez obzira na temperaturni kontrast, odnosno vrijednost D_T koja je postignuta prilikom ispitivanja.

8 ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja provedenih u ovom radu koristeći metodu aktivne IC termografije su takvi da se može zaključiti slijedeće:

„Metodu aktivne infracrvene termografije moguće je koristiti za detekciju i karakterizaciju oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama. Na rezultate ispitivanja utječu fizikalno mehanička svojstva betona, ali je poznavanjem karakteristika mjernog sustava, konfiguracije ispitivanja, toplinskih svojstava betona te temperaturnog polja na površini betona moguće uz korištenje definiranih modela karakterizirati oštećenja."

Provedeno je istraživanje stanja područja nerazornog ispitivanja materijala i konstrukcija metodom infracrvene (IC) termografije s primjenom pasivne tehnike i aktivnih tehnika ispitivanja te pregled spoznaja o fizikalnom konceptu toplinskog zračenja u infracrvenom spektru valnih dužina, problematici detektora infracrvenog zračenja, njihovoj geometrijskoj i temperaturnoj razlučivosti. Također, analizirane su metode naknadne obrade rezultata ispitivanja koje se koriste u području zrakoplovstva i svemirske industrije za lokaciju oštećenja u materijalima te određivanje njihove veličine i dubine, s razmatranjem mogućnosti primjene pojedinih metoda u području građevinarstva.

Ispitivanja pasivnom tehnikom su provedena na kolničkoj ploči mosta Krapina na autocesti Zagreb – Macelj, pri čemu su definirane mogućnosti, ali i problematika upotrebe IC termografije za otkrivanje oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama.

Ukoliko se pasivna tehnika ispitivanja IC termografijom koristi za otkrivanje postojanja oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama, kao što su na primjer kolničke ploče mostova sa i bez asfaltnog zastora, pokazano je u ovom radu da će na rezultate mjerenja utjecati svojstva kolnika da emitira zračenje, odnosno njezin koeficijent emisivnosti koji može varirati ukoliko na površini postoje guma, ostaci ulja, tragovi oštećenja i drugi uzroci. Uvjeti okoliša koji su prisutni prilikom mjerenja također utječu na rezultate ispitivanja. Oblaci smanjuju utjecaj sunčevog zračenja tijekom dana, odnosno reflektiraju IC zračenje s površine Zemlje tijekom noći, čime se usporava prijenos topline na površini betona i smanjuje mogućnost pouzdanog otkrivanja oštećenja. Također, za oštećenja koja su otkrivena pasivnom tehnikom, moguća je samo kvalitativna analiza, odnosno nije moguće reći ništa više od toga da oštećenje postoji na određenom mjestu, koja je njegova dubina i/ili debljina, a da li se ono nalazi u sloju

asfalta, betonskoj ploči ili između asfalta i betonske ploče potpuno je nejasno. Također, pokazalo se da ukoliko ne postoji izravno sunčevo zračenje na dijelove konstrukcije koja se ispituje IC kamerom, kao što je donji ustroj mosta (upornjaci, stupovi i piloni) ili podgled rasponske konstrukcije, da će otkrivanje oštećenja u betonu zbog nepostojanja razlika u toplinskom toku biti vrlo teško, pa čak i nemoguće

Iz istraživanja prikazanih u ovom radu, te pregleda stanja područja, nerazorno ispitivanje betonskih konstrukcija korištenjem IC termografije koje se temelji na pasivnoj termografiji ima određeni broj ograničenja i nedostataka.

Zbog toga se sve više primjenjuju tehnike aktivne termografije (kod koje je potreban izvor topline za uspostavljanje toplinskog toka) kako bi se istaknula oštećenja u konstrukciji.

U radu su provedena ispitivanja toplinskih svojstava tri vrste betona (koji oponašaju betone 3 različite kvalitete), a sve u svrhu točnijeg određivanja toplinske provodljivosti, toplinske efuzivnosti i toplinske difuzivnosti koja su potrebna prilikom određivanja dubine na kojoj se nalaze oštećenja.

Tijekom istraživanja razvijena je metodologija za provođenje ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija s posebnim naglaskom na metode toplinske pobude (zagrijavanja), tehnike prikupljanja termograma (tehnike IC termografije) i tehnike naknadne obrade sekvenci termograma te analize rezultata mjerenja.

Poseban naglasak je postavljen na određivanje granica metode, točnije određivanje donje granice veličine oštećenja kojeg je moguće otkriti primjenom IC termografije u ovisnosti o kvaliteti betona, udaljenosti toplinske pobude, te termo-higrometrijskim uvjetima pri kojima se provodi ispitivanje s ciljem simuliranja stvarnih uvjeta i situacija u kojima se nalaze armiranobetonske konstrukcije. Pri ispitivanju je korištena halogena lampa snage 1000 W što je vrlo mala snaga toplinske pobude kad se u usporedi s istraživanjima drugih autora. Potrebno je naglasiti da je lampa snage 1000 W vrlo praktična za terenska ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija, zbog potrebe priključenja i drugih strojeva i uređaja na pogonske agregate prikladne za lagani transport na često nepristupačne terene (čija se snaga kreće do 5 kW).

Definiran je eksperimentalni poligon na kojem je moguće provoditi ispitivanja IC termografijom u svrhu otkrivanja oštećenja, a koji je definiran potrebom da postoji mogućnost

prenošenja uzoraka (ograničene su dimenzije i masa samih uzoraka) i kondicioniranja u predviđenim uvjetima, a da su s druge strane uzorci dovoljno veliki da se mogu simulirati stvarna oštećenja, bez utjecaja rubova ili oštećenja međusobno na temperaturno polje.

Konfiguracije uzoraka BM x-1 i BM x-2 takve su da su oštećenja ugrađena u uzorke relativno malena i kao takva nisu nužno zanimljiva za otkrivanje u betonu i armiranobetonskim konstrukcijama, no one su odabrane da bi se upravo odredila minimalna veličina oštećenja koje je moguće otkriti. Kod uzoraka BM x-3 ugrađena su oštećenja koja realno mogu stvoriti probleme u armiranobetonskim konstrukcijama s gledišta nosivosti i trajnosti.

Za prethodnu i naknadnu obradu rezultata ispitivanja su razvijeni algoritmi i vlastite funkcije te programi (poznati kao M-datoteke) u kodu MATLAB-a, koji su služili za pojedine korake analize rezultata.

Kod naknadne obrade rezultata ispitivanja, odnosno otkrivanja postojanja oštećenja korištene su: termografija koračnog grijanja (SH); termografija faznog impulsa (PPT), pri čemu je razmatran fazni i amplitudni prikaz; termografija glavnih komponenti (PCA) i tehnika naknadne obrade rezultata pomoću korelacijskih operatora, pri čemu je utvrđen evidentan napredak u mogućnosti otkrivanja oštećenja u slučaju korištenja navedenih metoda.

8.1 Zaključci mjerenja toplinskih svojstava betona

Pregledom literature se pokazalo da postoji veliko rasipanje vrijednosti toplinske provodljivosti, toplinske efuzivnosti i toplinske difuzivnosti za beton.

U ovom radu je razvijeno je nekoliko tehnika ispitivanja toplinske difuzivnosti i toplinske efuzivnosti materijala kod kojih se iz promjene površinske temperature (mjereno IC kamerom) mogu proračunati spomenuta svojstva promatranog materijala.

8.1.1 Zaključci o ispitivanju toplinske difuzivnosti betona

Ispitivanje toplinske difuzivnosti betona provedeno je tehnikom zagrijavanja uzorka s jedne strane i praćenjem razvoja temperature na njegovoj suprotnoj površini. Pri tome je za mjerenje toplinske difuzivnosti korištena modificirana Parkerova metoda. Modifikacija Parkerove metode podrazumijeva izmjenu načina toplinske pobude, Parker koristi točkastu

pobudu laserom, dok se u ovom radu koristi jednoliko zagrijavanje cijele površine uzorka halogenom lampom snage 1000 W.

Vrijednosti toplinske difuzivnosti dobivene ispitivanjem uspoređene su s literaturnim vrijednostima, pri čemu rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti betona znatno variraju od autora do autora. Vrijednosti toplinske difuzivnosti se kreću od $3{,}7\times10^{-7}$ m^2/s do $2{,}19\times10^{-6}$ m^2/s. Do ovakvih razlika dolazi zbog različitog sastava betona (različite vrste i udjeli agregata u betonu), te zbog toga što su pojedini autori ispitivali suhi beton (nakon sušenja na zraku i do konstantne mase) dok su drugi ispitivali vlažni beton (kondicioniran i ispitivan u vodenoj kupki ili do određenog postotka vlažnosti).

Rezultati ispitivanja toplinske difuzivnosti dobiveni za betone BM 1-y, BM 2-y i BM 3-y korištene u ovom radu kreću se od $3{,}4\times10^{-7}$ do $4{,}2\times10^{-7}$ m^2/s, čime se uklapaju u donje (minimalne) vrijednosti toplinske difuzivnosti, kako je dano pregledom literature. To se objašnjava činjenicom da je u uzorcima prilikom ispitivanja postojala minimalna količina vlage. Beton je izrađen od dolomita koji se ubraja među vrste agregata koji imaju srednju toplinsku provodljivost, a time i toplinsku difuzivnost.

Zaključeno je da toplinska difuzivnost betona ovisi o njegovoj volumenskoj masi, na način da toplinska difuzivnost pada s porastom volumenske mase betona u suhom stanju. Jednako tako može se vidjeti da toplinska difuzivnost očvrslog betona opada sa smanjenjem sadržaja pora svježeg betona, odnosno plinopropusnosti očvrslog betona. Povećanjem tlačne čvrstoće betona ispitane nakon 28 dana, toplinska difuzivnost betona se također smanjuje. Navedeni rezultati su u skladu s teorijskim postavkama i međuovisnosti toplinske difuzivnosti α_{diff}, toplinske provodljivosti λ_c, specifičnog toplinskog kapaciteta c_p i volumenske mase materijala ρ_m.

8.1.2 Zaključci o ispitivanju toplinske provodljivosti betona

Ukoliko se promatraju literaturne vrijednosti toplinske provodljivosti betona, zaključeno je da se one kreću od 0,69 – 3,3 W/mK. Na vrijednost toplinske provodljivosti betona ponajprije utječu vlažnost betona, gustoća i temperatura te mineraloški sastav agregata iz kojeg je beton izrađen. Iz navedenog proizlazi veliko rasipanje vrijednosti toplinske provodljivosti betona.

Ispitivanje toplinske provodljivosti betona provedeno je nestacionarnom metodom korištenjem uređaja Mathis Tci, pri čemu je provedena kalibracija mjernog uređaja prema

rezultatima dobivenima apsolutnom metodom mjerenja toplinske provodljivosti, odnosno metodom vruće ploče.

Nakon korekcije za vlažnost ispitanih uzoraka (potpuno zasićeni) dobiveni su rezultati toplinske provodljivosti za BM 1-y→1,73 W/mK; BM 2-y→2,21 W/mK; BM 3-y→2,80 W/mK, što je u skladu s literaturnim vrijednostima za slične betone s visokom vlažnosti.

Iz prikazanih rezultata ispitivanja, vidljiv je porast toplinske provodljivosti s porastom tlačne čvrstoće betona, volumenske mase u zasićenom i suhom stanju, odnosno pad vrijednosti toplinske provodljivosti s porastom sadržaja pora u svježem betonu.

8.1.3 Zaključci o ispitivanju toplinske efuzivnosti betona

Ispitivanje toplinske efuzivnosti betona provedeno je nestacionarnom metodom, korištenjem uređaja Mathis Tci i koristeći komparativnu tehniku (istovremeno zagrijavanje uzorka nepoznate toplinske efuzivnosti i uzorka poznate toplinske efuzivnosti s jedne strane i praćenjem razvoja temperature s iste strane).

Iz prikazanih rezultata ispitivanja toplinske efuzivnosti betona, vidljiv je porast toplinske efuzivnosti s porastom tlačne čvrstoće betona, volumenske mase u zasićenom i suhom stanju, odnosno pad vrijednosti toplinske efuzivnosti s porastom sadržaja pora u svježem betonu. Prilikom ispitivanja toplinske efuzivnosti korištenjem nestacionarne metode vrućeg diska pomoću Mathis TCi uređaja i komparativne tehnike, dobivena je razlika u rezultatima ispitivanja od približno 30 %. Pri čemu svakako do utjecaja dolazi činjenica da je u slučaju ispitivanja Mathis TCi uređajem ispitivan zasićeni uzorak, dok je kod komparativne tehnike ispitivan uzorak držan nekoliko dana na zraku, što mu je smanjilo vlažnost.

Kako se dobiveni rezultati nisu mogli usporediti s literaturnim podacima za betone (zbog nedostatka istih), prihvaćene su dobivene vrijednosti uz napomenu da je potrebno provesti daljnja ispitivanja kako bi se ovdje prikazani rezultati potvrdili.

8.2 Zaključci ispitivanja postojanja oštećenja u betonu transmitivnom metodom

Kod obrade rezultata ispitivanja transmitivnom metodom uspoređeni su optimalni termogrami uzoraka, rezultati dobiveni naknadnom obradom korištenjem metode termografije glavnih komponenti (PCT) i metodom brze Fourierove transformacije (FFT) i to fazni prikaz.

U slučaju promatranja termograma, primijećen je značajan utjecaj nejednolikog zagrijavanja stražnje površine uzorka, što smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja.

Nakon provedene FFT analize svakog piksela cijele sekvence termograma, utvrđeno je da prikaz amplitude ne daje rezultate iz kojih bi se moglo sa sigurnošću utvrditi postojanje oštećenja čiji je promjer manji od 150 mm u uzorku, dok fazni prikazi daju sliku iz koje se sa sigurnošću može ustvrditi postojanje oštećenja promjera > 70 mm.

EOF-i dobiveni iz PCT analize daju najbolje rezultate ispitivanja uzorka, zbog činjenice da uvelike smanjuju utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzorka, čime je povećan kontrast između oštećenja i neoštećenog područja, za razliku od faznog prikaza i prikaza amplitude iz FFT analize koje nisu uspjele ukloniti utjecaj nejednolikog zagrijavanja uz donji rub uzoraka.

Zaključeno je da fazni prikaz, u slučaju ispitivanja transmitivnom metodom, za razliku od ispitivanja reflektnom metodom, ne uklanja problem nejednolikog zagrijavanja uzoraka, što u znatnoj mjeri smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja.

Općenito je zaključeno da se mogućnost otkrivanja oštećenja transmitivnom metodom smanjuje s povećanjem kvalitete betona. Jednako tako, ukoliko se promatra mogućnost otkrivanja oštećenja ovisno o vlažnosti uzorka, vidljivo je da je u slučaju uzoraka koji imaju veću vlažnost, manja mogućnost otkrivanja oštećenja. Zagrijavanjem uzoraka u trajanju od optimalno 60 min, dobivaju se najbolji rezultati ispitivanja postojanja oštećenja transmitivnom metodom, što se pripisuje činjenici da toplina ne stigne proći kroz oštećeni dio uzorka te istovremeno ne dolazi do izraženog lateralnog provođenja, koje onda maskira postojanje oštećenja.

Korištenje transmitivne tehnike za otkrivanje oštećenja u betonu je ograničeno s veličinom i debljinom oštećenja. Utvrđeno je da se u slučaju betonske ploče debljine 10 cm (koje su korištene u ovom radu) sa sigurnošću mogu otkriti oštećenja promjera 10 cm i veća, dok za oštećenja manjeg promjera to ovisi na kojoj se dubini nalaze i koja je njihova debljina.

Potrebno je naglasiti da je za otkrivanje oštećenja potrebno koristiti nekoliko metoda naknadne obrade rezultata ispitivanja (PCT, FFT faza, FFT amplituda) jer se pokazalo kako korištenje samo jedne metode nije u svim slučajevima pouzdano.

8.3 Zaključci ispitivanja postojanja oštećenja u betonu reflektnom metodom

Prikazani su optimalni termogrami ispitivanja postojanja oštećenja reflektnom metodom, uz primjere rezultata ispitivanja bez naknadne obrade te primjere rezultata ispitivanja obrađenih korištenjem korelacijskih operatora, PCT analize te brzom Fourierovom transformacijom uz korištenje faznog i amplitudnog prikaza. Rezultati dani u ovom radu, te iz njih izvedeni zaključci dobiveni su korištenjem tehnike koračnog zagrijavanja kao toplinske pobude.

Iako je Lock-in tehnika toplinske pobude i prikupljanja rezultata provedena tijekom procesa u kojem je uspostavljana metodologija istraživanja na betonskim uzorcima, zaključeno je da se ovakvim načinom toplinske pobude u uzorak unosi premalena količina energije, odnosno da se tijekom perioda hlađenja uzorak ohladi. Također, zbog potrebe traženja optimalne frekvencije ispitivanja kod koje bi se postojanje oštećenja najbolje vizualiziralo, zaključeno je da bi ispitivanje Lock-in tehnikom trajalo nerazumno dugačak period vremena.

Općenito se može zaključiti iz istraživanja provedenih u ovom radu da je s velikom sigurnosti moguće otkriti oštećenja promjera 100 mm i veća na dubini do 40 mm, koliko je ispitivano u ovom radu, ali prema snazi signala dobivenog od tih oštećenja, može se reći da bi ovakva oštećenja bilo moguće otkriti i na dubini većoj od 70 mm, a sve ovisno kolika je debljina oštećenja. Ukoliko se radi o oštećenju koje se nalazi na prevelikoj dubini ili je premaleno, povratni valovi neće biti otkriveni korištenjem IC kamere zbog njihovog brzog prigušenja u betonu (u slučaju dubokih oštećenja), odnosno ograničene povratne energije (mala oštećenja).

U nastavku su dani primarni zaključci koji su dobiveni promatranjem sekvence hlađenja.

8.3.1 Ispitivanje bez naknadne obrade rezultata mjerenja - zaključci

Kod toplinske pobude udaljene 1,5 m od uzorka smanjena je mogućnost otkrivanja pojedinih oštećenja korištenjem optimalnih termograma zbog znatnog utjecaja nejednolikog zagrijavanja na rezultate ispitivanja. S druge strane, kod udaljenosti toplinske pobude 3 m od uzorka, također je smanjena mogućnost otkrivanja pojedinih oštećenja, što se pripisuje smanjenom intenzitetu toplinske pobude, odnosno premalog povećanja površinske

temperature uzorka. U usporedbi s utjecajem nejednolikog zagrijavanja uzoraka, utjecaj nedovoljnog zagrijavanja uzoraka zbog udaljenosti toplinske pobude od 3 m je zamjetan, ali nije značajno izražen.

Analizom rezultata provedenih ispitivanja (halogenom lampom snage 1000 W), optimalnom se pokazala toplinska pobuda uzoraka s udaljenosti od 2 m od površine uzoraka, pri čemu se dobiva najbolja mogućnost otkrivanja oštećenja, i u slučaju postojanja armature između oštećenja i površine uzorka kao i u slučaju kad armature nema između oštećenja i površine uzorka. Mogućnost otkrivanja oštećenja izravno iz termograma uvelike je smanjena ukoliko se između oštećenja i površine uzorka nalazi armatura (mjerenje s gornje strane uzorka). Razlog smanjenoj mogućnosti otkrivanja oštećenja je veća lateralna difuzija topline po betonskom uzorku, u odnosu na slučaj kada ne postoji armatura između površine betona i oštećenja.

Kod betona bolje kvalitete, moguće je otkriti i oštećenja na većoj dubini, te oštećenja manje debljine u usporedbi s betonom lošije kvalitete.

Pokazalo se da refleksija može imati znatan utjecaj na rezultate ispitivanja, iako je mjerenjem pokazano da se koeficijent emisije za betone korištene u ovom radu kreće od 0,931 – 0,950. Zbog toga je potrebno obratiti pažnju i na refleksiju kao mogući uzrok pojavljivanja određenog uzorka prividne temperature na termogramima.

8.3.2 Ispitivanja korištenjem korelacijskih operatora - zaključci

Oštećenja se u prikazu koreliranog kontrasta manifestiraju na način da je njihov rub definiran značajnim padom vrijednosti korelacijskog operatora. Općenito su oštećenja okružena područjem vrlo niske vrijednosti korelacijskog operatora, dok je njihovo središte visokog intenziteta, zbog čega je vrlo jednostavno odrediti da li se radi o oštećenom području ili se radi o nekom drugom utjecaju (šum, utjecaj nejednolikog zagrijavanja ili refleksija).

Ukoliko se promatra utjecaj udaljenosti toplinske pobude na mogućnost otkrivanja oštećenja, za istu vrstu betona toplinska pobuda postavljena bliže uzorku betona daje najbolju mogućnost otkrivanja oštećenja, iako postoji i opasnost od lažno pozitivne interpretacije rezultata ispitivanja, u slučaju djelovanja refleksije.

Iz prikazanog se može zaključiti kako armatura smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja, gdje oštećenje koje se nalazi ispod gušće postavljene armature u uzorku, ima znatno smanjenu mogućnost otkrivanja.

Pokazalo se da je metoda vrlo dobra za otkrivanje velikih oštećenja u betonu, pri kojima daje veliki kontrast i vrlo dobru mogućnost otkrivanja oštećenja. Pri tome se sa sigurnošću može otkriti oštećenje promjera 10 cm na dubini od 40 mm, uz uvjet da je uzorak zagrijavan toplinskom pobudom snage 1000 W na maksimalnoj udaljenosti od 3 m. Pri tome se bolje rezultate dobije za beton bolje kvalitete, a kao optimalna određena je udaljenost toplinske pobude od 2 m.

8.3.3 Ispitivanje korištenjem termografije glavnih komponenti - zaključci

Prilikom interpretacije rezultata ispitivanja promatranjem većeg broja empirijskih ortogonalnih funkcija (EOF-ova) (desetak), njihovom izravnom usporedbom može se sigurnošću utvrditi postojanje oštećenja na većoj dubini. Navedena tvrdnja je važna zbog toga jer promatranje jednog EOF-a, izvan konteksta drugih EOF-a, može dovesti do krivog zaključka o nepostojanju oštećenja u uzorku. Razlog je tome što prikazi EOF-a u slučaju oštećenja manjeg promjera i/ili veće dubine mogu biti teško čitljivi u smislu identifikacije oštećenja, uz utjecaj refleksije, koju nije moguće ukloniti na ovaj način, te drugih utjecaja koji mogu dati privid postojanja oštećenja. Promatranjem većeg broja EOF-a, signal koji nastaje zbog oštećenja se ne mijenja (osim u svom intenzitetu), dok se svi ostali utjecaji i signal na neoštećenom dijelu uzorka mijenja od EOF-a do EOF-a, čime je relativno jednostavno moguće izdvojiti oštećenje od neoštećenog dijela uzorka.

Od mogućeg velikog broja EOF-a (broj EOF-a jednak je broju termograma snimljenih u sekvenci), samo je prvih nekoliko EOF-a moguće iskoristiti za otkrivanje oštećenja u uzorcima betona, dok ostali EOF-ovi daju prikaze iz kojih je nemoguće utvrditi postojanje oštećenja.

Primijećeno je da se kod uzoraka s velikim ugrađenim oštećenjima, uzoraka s oznakom BM x-3 kao upotrebljivi EOF, uz početni EOF_1, može upotrijebiti samo EOF_2, a svi ostali EOF-ovi daju šum. Za razliku od toga, u slučaju uzoraka s oznakom BM x-1 i BM x-2 moguće je otkriti postojanje oštećenja kod većeg broja EOF-ova, što se može smatrati kao prednost, jer kako je prethodno napomenuto, u tom slučaju moguće je identificirati, a time i eliminirati utjecaj refleksije i nejednolikog zagrijavanja uzoraka iz daljnjih razmatranja.

Promatrajući utjecaj kvalitete betona na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorcima, vidljivo je da je optimalna mogućnost otkrivanja oštećenja u slučaju betona BM 2-y i BM 3-y, dakle betona bolje kvalitete, dok postojanje armature smanjuje mogućnost otkrivanja oštećenja i njegovu karakterizaciju (veličinu i oblik). Povećanje udaljenosti toplinske pobude od površine uzorka smanjuje mogućnosti otkrivanja oštećenja u betonu.

8.3.4 Ispitivanje korištenjem termografije faznog impulsa - zaključci

Analizom faznih prikaza za pojedine diskretne frekvencije f_n, utvrđeno je da za svaki uzorak postoji optimalna diskretna frekvencija pri kojoj je kontrast faznog prikaza najbolji, a šum najmanji, nakon čega se s daljnjim povećanjem frekvencije povećava šum sve do frekvencije kod koje više nije moguće otkriti postojanje oštećenja.

Povećanjem promatrane diskretne frekvencije smanjuje se kontrast između oštećenog i neoštećenog područja na uzorku, čak utoliko da je moguće propustiti postojanje određenih oštećenja, ako se promatra fazni prikaz za određenu diskretnu frekvenciju.

Zaključuje se da je promatranjem faznih prikaza sa sigurnošću moguće otkriti oštećenja promjera 50 mm s toplinskom pobudom na udaljenosti od 2 m ukoliko su oštećenja na dubini manjoj od 3 cm i ukoliko su veće debljine od 1 cm.

Promatrajući utjecaj kvalitete betona na mogućnost otkrivanja oštećenja u uzorcima, korištenjem faznog prikaza, vidljivo je smanjenje mogućnosti otkrivanja oštećenja u uzorcima s povećanjem kvalitete betona.

Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da postojanje armature utječe na mogućnost otkrivanja oštećenja i njegovu karakterizaciju (veličinu i oblik) ukoliko se koristi fazni prikaz za vizualizaciju oštećenja, pri čemu je za oštećenje broj 2 promatrano s gornje strane (oštećenje ispod gušće armature), kontrast između oštećenja i neoštećenog područja vrlo malen.

Fazni prikaz rješava problem nejednolikog zagrijavanja uzorka, a također, može se utvrditi da uopće nema problema s refleksijom koja se inače pojavljuje na termogramima, koja je suprotnog ekstrema od oštećenja, čime se za razliku od drugih metoda korištenih u ovom radu, refleksija relativno jednostavno identificira, odnosno u slučaju promatranja viših frekvencija refleksija nestaje.

Amplitudni prikaz daje tek blagi napredak u mogućnosti otkrivanja oštećenja u odnosu na slučaj da se promatra optimalni termogram. Također pri nižim frekvencijama moguće je odrediti oblik oštećenja, te je smanjen šum i dobiva se bolji kontrast između oštećenja i neoštećenog područja na uzorku.

Primjena amplitude kao metode korištene za prikaz rezultata mjerenja aktivnom termografijom ne rješava problem nejednolikog zagrijavanja uzoraka, već samo smanjuje njegov utjecaj. Posebno je potrebno naglasiti mogućnost pogrešne interpretacije rezultata mjerenja ukoliko se koristi amplitudni prikaz, zbog njegove nemogućnosti eliminacije refleksije, tako da je moguće da dođe do lažno pozitivnih rezultata mjerenja.

Ovisnost amplitudnog prikaza o kvaliteti betona i mogućnosti otkrivanja oštećenja je vrlo teško definirati zbog toga što postoji mogućnost promjene diskretne frekvencije pri kojoj se promatra promatranja te time pronaći optimalna diskretnu frekvenciju koja će za promatrani slučaj dati najbolje rezultate.

Zaključuje se da je moguće postići ravnotežu između snage toplinske pobude potrebne za otkrivanje oštećenja, a da istovremeno ne postoji problem nejednolikog zagrijavanja uzoraka. Optimalni slučaj je udaljenost toplinske pobude 2 m od površine uzorka.

8.3.5 Rezultati mjerenja korištenjem cjelokupne sekvence i sekvence zagrijavanja - zaključci

Korelirani kontrast kod velikih oštećenja, u slučaju korištenja cjelokupne sekvence daje znatno bolje rezultate u smislu granica oštećenja, i oblika oštećenja, nego u slučaju korištenja samo sekvence hlađenja. Također, korištenje PCT analize kod velikih oštećenja (cjelokupna sekvenca) daje nekoliko korisnih EOF-ova, za razliku od sekvence hlađenja gdje su dostupna maksimalno dva korisna EOF-a. Za razliku od rezultata dobivenih isključivo iz sekvence hlađenja, fazni prikaz i amplitudni prikazi dobiveni iz FFT analize za cjelokupnu sekvencu daju samo nekoliko korisnih diskretnih frekvencija (tri do pet frekvencija), s time da su kod faznog prikaza oštećenja suprotnog ekstrema (hladnija od okoline) nego kod sekvence hlađenja.

U slučaju promatranja oštećenja malog promjera, boljom se metodologijom pokazalo promatranje sekvence hlađenja i naknadna obrada rezultata ispitivanja samo dijela sekvence hlađenja. U slučaju velikih oštećenja na relativno malenoj dubini, moguće je zaključiti da ne

postoji razlika između mogućnosti otkrivanja oštećenja promatranjem rezultata ispitivanja dobivenih naknadnom obradom cjelokupne sekvence ili sekvence hlađenja.

Promatrajući rezultate dobivene korištenjem PCT tehnike na sekvenci termograma tijekom zagrijavanja uzoraka, vidljivo je da se dobivaju nešto lošiji rezultati u odnosu na rezultate dobivene analizom sekvence hlađenja, zbog većeg šuma pri višim EOF-ima i posebno naglašenog utjecaja nejednolikog zagrijavanja. Iako se ni promatranjem sekvence hlađenja ne može sa sigurnošću utvrditi postojanje svih oštećenja u uzorku korištenjem FFT faznog prikaza, ipak kod promatranja sekvence hlađenja za sitna oštećenja postoji bolji kontrast između oštećenog i neoštećenog područja na uzorku nego što je to slučaj ukoliko se promatra isključivo sekvenca zagrijavanja pri FFT analizi, dok za velika oštećenja koja se nalaze na maloj dubini u uzorku, sekvenca zagrijavanja daje bolje rezultate ispitivanja (s manje šuma). Slična je tendencija primijećena i za FFT amplitudni prikaz, uz posebno veliki utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzoraka.

S druge strane, korelirani kontrast kod velikih oštećenja, u slučaju promatranja sekvence zagrijavanja, slično kao kod cjelokupne sekvence, daje znatno bolje rezultate u smislu granica oštećenja, i oblika oštećenja, nego u slučaju korištenja samo sekvence hlađenja.

8.4 Određivanje karakteristika oštećenja u betonu - zaključci

Promatrana je krivulja razvoja temperaturnog kontrasta u sekvenci hlađenja uzoraka pri čemu je utvrđeno da postoji trenutak t_{max} pri kojem krivulja temperaturnog kontrasta postiže svoj maksimum ΔT_{max}.

Promatrajući ovisnost maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} i vremena njezinog pojavljivanja t_{max} o tlačnoj čvrstoći betona i toplinskoj provodljivosti, s različitih udaljenosti toplinske pobude, utvrđeno je da u slučaju udaljenosti toplinske pobude od 2 i 3 m dolazi do samo malene promjene u iznosu maksimalne promjene normalizirane temperature ΔT_{max} s povećanjem tlačne čvrstoće betona. U slučaju udaljenosti toplinske pobude od 1,5 m vrlo je teško uspostaviti smislenu korelaciju ovisno o uzorcima s različitim tipovima oštećenja. Uzrok tome proizlazi iz nejednolikog zagrijavanja uzorka, odnosno lokalnog zagrijavanja uzorka, dok se s povećanjem udaljenosti taj efekt gubi.

Poseban je problem izbora točke koja predstavlja referentnu temperaturu površine, odnosno krivulje hlađenja površine neoštećenog materijala, pri čemu je moguće unijeti grešku

mjerenja lošim izborom referentne temperature. U ovoj disertaciji se odabire točka na neoštećenom materijalu blizu oštećenja kao mjesto za referentnu temperaturu, pri čemu se pokušalo izbjeći mjesta kod kojih je prividna temperatura povećana zbog djelovanja refleksije. Pri analizi su korištene i tehnike kod koji se koristi srednja temperatura s cijele površine uzorka kao referentna temperature, no tako dobiveni rezultati daju rezultate s velikom greškom mjerenja.

8.4.1 Karakterizacija oštećenja promatranjem krivulje hlađenja - zaključci

Promatrajući ovisnost oblika krivulje hlađenja o dubini na kojoj se nalazi oštećenje u polu-logaritamskom mjerilu, primijetilo se da s povećanjem dubine postoji promjena u nagibu krivulje hlađenja.

Za oštećenja jednake debljine, s povećanjem dubine na kojoj se ona nalaze, dolazi do smanjenja nagiba pravca (u odnosu na horizontalu) koji je dobiven linearnom regresijskom analizom krivulje hlađenja, odnosno povećanja njegova koeficijenta nagiba (koeficijent nagiba pravca je negativna vrijednost). Pokazalo se također da je mogućnost razlikovanja i kvantificiranja oštećenja znatno smanjena kod betona lošije kvalitete.

Značaj korištenja nagiba krivulje hlađenja opisanog u ovom radu za karakterizaciju oštećenja u betonu, je taj da dopušta brzu relativnu karakterizaciju oštećenja u betonu pri čemu je nužno da je oštećenje vidljivo na klasičnom termogramu, inače će se opisane krivulje hlađenja ponašati kao neoštećeno područje termograma te neće biti moguće otkriti postojanje oštećenja. Općenito se može zaključiti da ovakav način karakterizacije oštećenja uvelike ovisi o lokalnom zagrijavanju uzorka betona te ju je kao takvu potrebno koristiti s oprezom i svakako uz podršku neke druge metode karakterizacije oštećenja.

8.4.2 Određivanje promjera oštećenja - zaključci

Promjer oštećenja određuje se korištenjem prostorne distribucije površinske temperature uzoraka, odnosno korištenjem postupka poznatog pod nazivom FWHM tehnika (*Full Width, Half Maksimum technique*). Pri tome je provedena i prostorna kalibracija kamere (određivanje veličine projekcije jednog piksela detektora kamere na promatrani betonski uzorak).

U slučaju toplinske pobude udaljene 1,5 m, dobiveni su rezultati koji su značajno različiti od projektirane vrijednosti, čemu je uzrok utjecaj nejednolikog zagrijavanja uzoraka koji onemogućuje određivanje promjera oštećenja. Za udaljenost toplinske pobude od 2 m,

dobivaju se manje greške mjerenja, dok se za slučaj udaljenosti toplinske pobude od 3 m dobivaju rezultati u granicama prihvatljivih vrijednosti. Greške mjerenja dobivene ovim načinom određivanja promjera oštećenja uvelike su definirane i lateralnom difuzijom topline na površini uzoraka koja prividno povećava promjer oštećenja u odnosu na njegovu stvarnu veličinu.

8.4.3 Model za određivanje dubine oštećenja

Postavljen je model te je definirana metodologija za određivanje dubine oštećenja. Model je temeljen na teorijskim pretpostavkama provođenja topline nakon djelovanja Dirac-ovog impulsa koji zahtjeva određivanje koeficijenta kalibracije, poznavanje vremena pojavljivanja točke infleksije krivulje razvoja temperaturnog kontrasta t_{infl}, te poznavanje vrijednosti toplinske difuzivnost promatranog betona.

Utvrđeno je da vrijednost koeficijenta kalibracije modela ovisi o promjeru i debljini oštećenja, te o činjenici da li postoji armatura između oštećenja i površine betona.

Iako kod pojedinačnih mjerenja za svaku pojedinu konfiguraciju mjerenja dolazi i do znatne varijacije rezultata ispitivanja od uzorka do uzorka, greška se kreće i do 35%. Srednja vrijednost izmjerene dubine oštećenja za sve udaljenosti toplinske pobude relativno dobro poklapaju s projektiranim vrijednostima dubina oštećenja, greška je u granicama od ±10%.

Definirani su također i mogući izvori grešaka, koji se očituju u određivanju vrijednosti toplinske difuzivnosti materijala, pomaka oštećenja prilikom ugradnje betona, te određivanja referentnih točaka na neoštećenom dijelu uzorka.

Preporuča se određivanje dubine korištenjem više različitih točaka na neoštećenom dijelu uzorka koje su dovoljno blizu promatranom oštećenju, odnosno provođenje više mjerenja na istom mjernom mjestu s dovoljnim vremenskim razmakom da se toplinski pobuđeni uzorak vrati na temperaturu okoline ili ispitivanje s različitih udaljenosti.

8.4.4 Model za određivanje debljine oštećenja

Uvedena je bezdimenzionalna veličina D_e koja uspostavlja ovisnost između promjera oštećenja d_{2r}, debljine oštećenja d i debljine promatranog objekta u kojem se oštećenje nalazi L te toplinskih karakteristika (toplinske efuzivnosti) materijala oštećenja $e_{eff,d}$ i materijala objekta koji se promatra $e_{eff,obj}$ za jednoslojni materijal.

Uspostavljena je ovisnost između normalizirana razlika temperatura D_T i bezdimenzionalne veličine D_e iz kojeg proizlazi da je omjer $\frac{d \cdot d_{2r}}{D}$ konstantna vrijednost

8.5 Izvorni znanstveni doprinos

Istraživanja provedena u okvirima ovoga doktorskog rada dala su sljedeći izvorni znanstvenim doprinos:

1. Definirane su donje granice veličine oštećenja koje je moguće otkriti primjenom IC termografije u ovisnosti o kvaliteti betona, udaljenosti toplinske pobude, te termo-higrometrijskim uvjetima pri kojima se provodi ispitivanje
2. Razvijena je metodologija za toplinsku stimulaciju armiranog betona u svrhu otkrivanja i karakterizacije oštećenja primjenjiva pri terenskim ispitivanjima
3. Modificirana je Parkerova metoda mjerenja toplinske difuzivnosti materijala korištenjem halogene lampe kao toplinske pobude
4. Razvijene su nestacionarne metode vrućeg diska za mjerenje toplinske provodljivosti i toplinske efuzivnosti betona
5. Razvijena je komparativna tehnika za mjerenje toplinske efuzivnosti betona
6. Unaprijeđena je tehnika analize termograma primjenom termografije glavnih komponenti, korelacijskih operatora i brze Fourierove transformacije
7. Definirana je ovisnost oblika krivulje hlađenja uzoraka o dubini na kojoj se nalazi oštećenje u betonu te su unaprijeđeni postojeći matematički modeli za kvantifikaciju oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama korištenjem metode IC termografije

8.6 Preporuke za daljnja istraživanja

Istraživanja korištenja aktivne IC termografije za otkrivanje oštećenja u betonu su vrlo rijetka, dok istraživanja karakterizacije oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama ima tek nekoliko. Iako su u sklopu ovog rada prikazani rezultati koji potvrđuju potencijal korištenja aktivne IC termografije kao metode za provođenje nerazornih ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija, tijekom izrade disertacije pojavile su se ideje o mogućem daljnjem istraživanju primjene IC termografije kod ispitivanja armiranobetonskih

konstrukcija, a sve s ciljem uspostavljanja IC termografije kao standardne metode nerazornih ispitivanja.

Preporuča se:

- Izraditi numeričke simulacije prema konfiguracijama ispitivanja definiranima u ovoj disertaciji te usporediti rezultate ispitivanja s rezultatima dobivenima iz numeričkih modela. Također, bilo bi zanimljivo pokušati uspostaviti numerički model za određivanje dubine oštećenja temeljem izmjerenog temperaturnog kontrasta.
- Definirati numerički model za određivanje utjecaja lateralne difuzije topline na površini uzoraka, čime se može povećati točnost određivanja promjera oštećenja.
- Definirati inverzne tehnike za otkrivanje dubine na kojoj se nalazi oštećenje.
- Unaprjeđenje metodologije ispitivanja toplinske difuzivnosti i toplinske efuzivnosti te istražiti točnost predložene metode kod ispitivanja različitih vrsta betona, s različitim vrstama cementa, i različitim vrstama agregata i dodataka te ovisno o različitim vlažnostima betona prilikom provođenja ispitivanja.
- Usporedba rezultata ispitivanja toplinskih svojstava betona s apsolutnim metodama mjerenja.
- Poboljšavanje predloženih modela za karakterizaciju oštećenja na poligonu s dubljim oštećenjima te oštećenjima većeg promjera i debljine, koja su realnija za pojavljivanje u armiranobetonskim konstrukcijama.
- Uspostavljanje točnije međuovisnosti između dubine, debljine i promjera oštećenja s posebnom pažnjom na određivanje debljine oštećenja.
- Potpuno automatiziranje postupka naknadne obrade rezultata mjerenja s izradom grafičkih sučelja u okružju i programskom jeziku MatLab za obradu sekvenci termograma. Trenutno dostupni programski paketi za upravljanje i naknadnu obradu sekvenci su u potpunosti prilagođeni ispitivanjima materijala visoke toplinske provodljivosti, čime su neiskoristivi za ispitivanje armiranobetonskih konstrukcija.
- Proširenje saznanja o pouzdanosti mjerenja i poboljšanje pouzdanosti mjerenja metodom IC termografije s primjenom u armiranobetonskim konstrukcijama.
- Utvrđivanje praga detekcije te određivanje vjerojatnosti detekcije oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama.

LITERATURA:

Abdel-Qader, I., Yohali, S., Abudayyeh, O., & Yehia, S. (2008). Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks. NDT & E International, 41(5), 395–405. doi:10.1016/j.ndteint.2007.12.003

ACI. (1998). Committee 228.2R - Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (p. 62).

ACI Committee 122. (2002). ACI 122R_02 Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems (p. 21).

Albers, A. P. F., Restivo, T. A. G., Pagano, L., & Balbo, J. B. (2001). Effect of testing conditions on the laser flash thermal diffusivity measurements of ceramics. Thermochimica Acta, 370, 111–118.

Almond, D. P., Hamzah, R., Delpech, P., Wen, P., Beheshty, M. H., & Saintey, M. B. (1996). Experimental investigations transient thermography of defect sizing by transient thermography. QIRT 1996 - 3rd Conference on Quantitative infrared thermography (pp. 233–238). Stuttgart: Edizioni ETS.

Andrassy, M., Boras, I., & Švaić, S. (2008). Osnove termografije s primjenom (p. 172). Zagreb: Kigen.

Ashby, M. F. (2011). Materials Selection in Mechanical Design (Fourth edi., p. 665). Elsevier Ltd.

ASTM:D-4788. (2003). Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM E 1461-01. (2001). Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM:E 1543-00. (2011). Standard Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems. doi:10.1520/E1543-00R11

Azenha, M., Faria, R., & Figueiras, J. A. (2006). Thermo-mechanical properties of young concrete. In M. S. Konsta-Gdoutos (Ed.), Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties: An International Symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah (pp. 91–97). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Badghaish, A. a., & Fleming, D. C. (2008). Quantitative characterization of resistive defects in thick composites using step heating thermography. In V. P. Vavilov & D. D. Burleigh (Eds.), Thermosense XXX Proc. of SPIE Vol. 6939 (Vol. 6939, pp. 693916–693916–12). Orlando, FL: SPIE Digital Library. doi:10.1117/12.777064

Bajorek, M., & Nowakowski, A. (2012). Identification of structural defects using a simplified algorithm of thermal tomography. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.

Balageas, D. L. (2010). Thickness or diffusivity measurements from front-face flash experiments using the TSR (thermographic signal reconstruction) approach. In X. P. V. Maldague (Ed.), QIRT 2010 - 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (Vol. 2, p. 10). Quebec, Canada.

Banjad Pečur, I., Štirmer, N., & Galić, J. (2009). Ispitivanja polimerom modificiranog betona nerazornim metodama. Građevinar, 61(7), 655–662.

Batsale, J.-C. (2002). Real time processing with low cost uncooled plane array IR camera—Some possible linear transformations of data in the case of thermal NDE. Colloquium Lagrangianum. Varenna.

Bentz, D. P. (2000). A computer model to predict the surface temperature and time-of-wetness of concrete pavements and bridge decks (p. 29).

Bentz, D. P. (2007). Transient Plane Source Measurements of the Thermal Properties of Hydrating Cement Pastes. Materials and Structures, 40(12), 1073–1080.

Bentz, D. P., Peltz, M. A., Duran-Herrera, A., Valdez, P., & Juarez, C. A. (2011). Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. Journal of Building Physics, 34(3), 263–275.

Benítez, H. D., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., Maldague, X. P. V., Loaiza, H., & Caicedo, E. (2008). Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography. Infrared Physics & Technology, 51(3), 160–167. doi:10.1016/j.infrared.2007.01.001

Berge, B. (2009). The ecology of building materials (Second edi., p. 447). Elsevier Ltd.

Bison, P., Bortolin, A., Cadelano, G., Ferrarini, G., & Grinzato, E. (2012). Comparison of some thermographic techniques applied to thermal properties characterization of porous materials. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.

Bisson, J. F., & Fournier, D. (1998). Influence of diffraction on low thermal diffusivity measurements with infrared photothermal microscopy. Journal of Applied Physics, 83(2), 1036–1042.

Boltzmann, L. (1878). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. Sitzungsberichte Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, 76(2), 373–435.

Boritu, A. et al., 2011. Non-Destructive Inspection of Composite Structures Using Active Ir-Thermography Methods. The Scientific Bulletin, University Politechnica of Bucharest, 73(1), pp.71–84.

Bosnjak, D. (2000). Self induced cracking problems in hardening concrete structures. The Norvegian University of Science and Technology, Trondheim.

Breitenstein, O., Warta, W., & Langenkamp, M. (2010). Lock-in Thermography, Basics and Use for Evaluating Electronic Devices andMaterials. (K. Itoh, T. Lee, T. Sakurai, W. M. C. Sansen, & D. Schmidtt-Landsiedel, Eds.) (Second Edi., p. 259). Springer.

Brown, J. R. (2005). Infrared Thermography Inspection of Fiber-reinforced Polymer Composites Bonded to Concrete. UNIVERSITY OF FLORIDA.

Bungey, J. H., & Millard, S. G. (1996). Testing of Concrete in Structures (Third Edit., p. 296). London: Chapman & Hall.

Busse, G. (1994). Nondestructive evaluation of polymer materials. NDT&E International, 27(5), 253–262.

Busse, G., Wu, D., & Karpen, W. (1992). Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography. Journal of Applied Physics, 71(8), 3962–3965.

Byrnes, J. (2009). Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. (P. and B. NATO Science for Peace and Security Series B, Ed.) (pp. 21–22). Springer.

C-Therm, T. (2002). Direct thermal conductivity measurement technique.

C-Therm, T. (2009). Mathis Tci User Manual. Retrieved from www.MathisInstruments.com

Candoré, J., Bodnar, J., & Szeflinski, A. (2008). Helps with the thermal diagnosis of the building: Detection of defects of insulation by stimulated infra-red thermography. QIRT 2008 - 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Krakow, Poland. Retrieved from http://www.ndt.net/article/qirt2008/05_01_08.pdf

Cernuschi, F., Fabbri, L., & Lamperti, M. (1999). A new thermographic methodology for on-site thermal diffusivity determination. In F. Scudieri & M. Bertolotti (Eds.), AIP Conference Proceedings n° 463 Photoacoustic and Photothermal Phenomena (pp. 392–394). Rome: AIP Woodbury, New York.

Cernuschi, F., Russo, A., Lorenzoni, L., & Figari, A. (2001). In-plane thermal diffusivity evaluation by infrared thermography. Review of Scientific Instruments, 72(10), 3988. doi:10.1063/1.1400151

Clark, M. R., McCann, D. M., & Forde, M. C. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridge,. NDT&E International, 36, 265–275.

Commission Internationale de l'Eclairage, I. C. on I. (1987). International lighting vocabulary, Publication 17.4. Vienna.

Corvaglia, P., & Largo, A. (2008). IRT survey for the quality control of FRP reinforced r . c . structures. QIRT 2008 - 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Krakow, Poland.

Cupa, A., Felczak, M., Kurkiewicz, T., Lament, A., Rogal, R., Rogóż, J., Szroeder, P., et al. (2012). Thermovision and ground penetrating radar for investigation of architectural decorations – potential and limitations. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (p. 6). Napoli.

Demange, D., Beauchene, P., Bejet, M., & Casulleras, R. (1997). Mesure simultanée de la diffusivité thermique selon les deux directions principales d'un matériau. Revue Générale de Thermique, 36, 755–770.

Dillenz, A., Zweschper, T., & Busse, G. (2001). Progress in ultrasound phase thermography. In A. E. Rozlosnik & R. B. Dinwiddie (Eds.), Proc. SPIE - The International Society for Optical Engineering, Thermosense XXVIII (pp. 574–579.). Orlando, FL.

Dumoulin, J., & Averty, R. (2012). Development of an infrared system coupled with a weather station for real time atmospheric corrections using GPU computing : Application to bridge monitoring. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.

Dumoulin, J., Ibarra-Castanedo, C., Quiertant, M., Taillade, F., Bendada, A., & Maldague, X. P. V. (2010). Evaluation of FRP gluing on concrete structures by active infrared thermography. QIRT 2010 - 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Québec City (Canada).

Dupuis, K. J. (2008, September). Nondestructive testing of concrete box girder bridges using thermal imaging. Soil Mechanics and Foundation Engineering. WASHINGTON STATE UNIVERSITY. Retrieved from http://www.springerlink.com/index/10.1007/BF01705067

Elliott, C. T., & Gordon, N. T. (1993). Handbook on Semiconductors - Infrared Detectors. (C. Hilsum, Ed.)Journal of Electronic Materials (Vol. 35, pp. 841–936). Amsterdam: Elsevier.

Favro, L. D., & Han, X. (1998). Thermal Wave Material Characterization and Thermal Wave Imaging. In G. Birnbaum & B. A. Auld (Eds.), Sensing for Materials Characterization, Processing, and Manufacturing (pp. 399–415). ASNT Tones.

Favro, L. D., Han, X., Ouyang, Z., Sun, G., Sui, H., & Thomas, R. L. (2000). Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse. Review of Scientific Instruments.

FIB-Commission#5. (2005). Assessment and remediation of concrete structures (p. 103).

FLIR (2008). Uncooled detectors for thermal imaging cameras - Technical note. FLIR.

FLIR Systems. (2007). ThermaCAM Researcher Professional Edition (T559009 Re., p. 160). FLIR.

FLIR Systems, 2012. Technical Data FLIR P640 24°, Wilsonville, OR, USA.

Fourier, J.-B.-J. (1890). Oeuvres de Fourier / publiées par les soins de M. Gaston Darboux, sous les auspices du ministère de l'Instruction publique. (M. G. Darboux, Ed.) (p. 656). Paris.

Galović, A. (2003a). Termodinamika II. (I. Juraga, Ed.) (Treće prom., p. 322). Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Galović, A. (2003b). Odabrana poglavlja iz kondukcije (p. 119). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarastva i brodogradnje.

Genest, M., Ibarra-Castanedo, C., Piau, J.-M., Guibert, S., Susa, M., Bendada, A., Maldague, X. P. V., et al. (2007). Comparison of Thermography Techniques for Inspection of F / A-18 Honeycomb Structures. Aircraft Aging 2007 Conference (p. 14). Palm Springs, CA.

Giorelo, G., & Meola, C. (2002). Comparison between Pulsed and Modulated Thermography in Glass-Epoxy Laminates. NDT&E International, 35(5), 287–292.

Giorleo, G., Meola, C., & Squillace, A. (2000). Analysis of Defective Carbon- Epoxy by Means of Lock-in Thermography. Research in Nondestructive Evaluation, 12, 241–250.

Goetschel, S., Weiser, M., Maierhofer, C., & Richter, R. (2012). Data Enhancement for Active Thermography. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (p. 9). Napoli.

Gorse, C., & Highfield, D. (2009). Refurbishment and Upgrading of Buildings (Second edi., p. 272). Spon Press.

Greensite, J. (2003). PHYSICS 430 Lecture Notes on Quantum Mechanics. San Francisco.

Grinzato, E., & Vavilov, V. (Tomsk P. U. (1998). Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modelling. Revue Générale de Thermique, 37(8), 669–679. doi:10.1016/S0035-3159(98)80045-7

Grinzato, E., Vavilov, V. (Tomsk P. U., & Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. Energy and Buildings, 29, 1–9.

Grys, S. (2012). New thermal contrast definition for defect characterization by active thermography. Measurement, 45(7), 1885–1892. doi:10.1016/j.measurement.2012.03.017

Hall, M. R. (2010). Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings. (M. R. Hall, Ed.) (p. 755). Woodhead Publishing Limited.

Henč-Bartolić, V., & Kulišić, P. (1999). Valovi i optika (p. 485). Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb.

Holland, S. D., & Renshaw, J. (2010). Physics-based image enhancement for infrared thermography. NDT&E International, 43(5), 440–445. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.04.004

Holt, F. B., & Manning, D. G. (1978). Infrared Thermography for the Detection of Delaminations in Concrete Bridge Decks. Proceedings Fourth Biennial Infrared Information Exchange (pp. 61–71).

HRN EN 821-2. (2008). Advanced technical ceramics -- Monolithic ceramics -- Thermo-physical properties -- Part 2: Determination of thermal diffusivity by the laser flash (or heat pulse) method (EN 821-2:1997).

HRN EN 993-4. (2008). Methods of test for dense shaped refractory products - Part 4: Determination of permeability to gases.

HRN EN ISO 10456. (2008). Građevni materijali i proizvodi - Svojstva s obzirom na toplinu i vlagu - Tablične projektne vrijednosti i postupci određivanja nazivnih i projektnih toplinskih vrijednosti.

HRN EN 12350-2. (2009). Ispitivanje svježega betona - 2. dio: Ispitivanje slijeganjem.

HRN EN 12350-6. (2009). Ispitivanje svježega betona - 6. dio: Gustoća.

HRN EN 12350-7. (2009). Ispitivanje svježega betona - 7. dio: Sadržaj pora - Tlačne metode.

HRN EN 12390-3. (2005). Ispitivanje očvrsnuloga betona - 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka.

HRN EN 12390-7. (2005). Ispitivanje očvrsloga betona - 7. dio: Gustoća očvrsloga betona.

HRN EN 13057. (2003). Proizvodi i sustavi za zaštitu i popravak betonskih konstrukcija - Ispitne metode - Određivanje otpornosti na kapilarno upijanje.

HRN U.M1.032. (1981). Mjerenje temperature svježeg betona.

Ibarra-Castanedo, C. (2005). Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase. Universite Laval Quebec.

Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., & Maldague, X. P. V. (2007). Thermographic Image Processing for NDT. IV Conferencia Panamericana de END (pp. 1–12). Buenos Aires: AAENDE.

Ibarra-Castanedo, C., Genest, M., Piau, J.-M., Guibert, S., Bendada, A., & Maldague, X. P. V. (2007). Active Infrared Thermography Techniques for the Nondestructive Testing of Materials. In C. H. Chen (Ed.), Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization (pp. 325–348). World Scientific Publishing.

Ibarra-Castanedo, C., Genest, M., Servais, P., Maldague, X. P. V., & Bendada, A. (2007). Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography. Nondestructive Testing and Evaluation, 22(2-3), 199–215. doi:10.1080/10589750701448548

Ibarra-Castanedo, C., & Maldague, X. P. V. (2005). Pulsed phase thermography inversion procedure using normalized parameters to account for defect size variations. Procedures of SPIE, Thermosense XXVII (Vol. 5782, pp. 334–341). Spie. doi:10.1117/12.596602

Illston, J. M., & Domone, P. L. J. (2001). Construction materials - their nature and bahaviour (Third edit.). Taylor & Francis Group.

Ishikawa, M., Hatta, H., Habuka, Y., Fukui, R., & Utsunomiya, S. (2013). Detecting deeper defects using pulse phase thermography. Infrared Physics & Technology, 57, 42–49. doi:10.1016/j.infrared.2012.11.009

ISO TC 172. (2007). ISO 20473 Optics and photonics - spectral bands.

Ivančević, Z., & Jelić, S. (2009). Primjena SVD rastava matrice u dohvatu informacija i kompresiji slike. Osijek.

Jaković, M., & Slaviček, I. (2010). Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska. Sveučilište u Zagrebu.

Kaplan, H. (2007). Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment (Second edi., p. 166). SPIE Press.

Kezić, D., 2007. Energetska elektronika - priručnik za simulaciju pretvaračkih sklopova A. Munitić, ed., Split: Pomorski fakultet u Splitu. Available at: http://www.pfst.hr/old/data/materijali/Energetska elektronika - prirucnik za simulaciju pretvarackih sklopova.pdf.

Kinch, M. A. (2000). Fundamental Physics of Infrared Detector Materials. Journal of Electronic Materials, 29, 809–817.

Kirchhoff, G. (1860). Über das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. Annalen der Physik und Chemie, 109, 275–301.

Klein, M. T., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., & Maldague, X. P. V. (2008). Thermographic signal processing through correlation operators in pulsed thermography. In V. P. Vavilov & D. D. Burleigh (Eds.), Thermosense XXX Proc. of SPIE Vol. 6939 (Vol. 6939, pp. 693915–1 – 693915–6). Orlando, FL: SPIE. doi:10.1117/12.777002

Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Abreu, L. W., Chetwynd, J. H., & Anderson, G. P. (1988). Users Guide to LOWTRAN 7 (p. 146). Retrieved from http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA206773

Krapez, J.-C. (1999). Simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane diffusivity by using a grid-like mask. 5° AITA 1999. Venice.

Krapez, J.-C., & Gardette, G. (1998). Characterization of anisotropic materials by steady-state and modulated thermal ellipsometry. High Temperatures – High Pressures, 30, 567–574.

Krapez, J.-C., Gardette, G., & Balageas, D. L. (1996). Thermal ellipsometry in steady-state and by lock-in thermography: application to anisotropic materials characterization. Proceedings of Quantitative Infrared Thermography QIRT ‘96 Eurotherm Seminar 50, (pp. 257–261). Stuttgart.

Krapez, J.-C., Spagnolo, L., Frieß, M., Maier, H.-P., & Neuer, G. (2004). Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography. International Journal of Thermal Sciences, 43(10), 967–977. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2004.02.003

Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2011). Principles of heat transfer (Seventh Ed., p. 784). Global Engineering.

Kumaran, M. K. (2001). Hygrothermal Properties of Building Materials. In H. R. Trechsel (Ed.), Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes (p. 211). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. doi:10.1520/MNL40-EB

Kurita, K., Oyado, M., Tanaka, H., & Tottori, S. (2009). Active infrared thermographic inspection technique for elevated concrete structures using remote heating system. Infrared Physics & Technology, 52(5), 208–213. doi:10.1016/j.infrared.2009.07.010

Lahiri, B. B., Bagavathiappan, S., Reshmi, P. R., Philip, J., Jayakumar, T., & Raj, B. (2012). Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography. Infrared Physics & Technology, 55(2-3), 191–199. doi:10.1016/j.infrared.2012.01.001

Lamond, J. F., & Pielert, J. H. (2006). Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials (p. 661). Bridgeport, NJ: ASTM International.

Largo, A., & Angiuli, R. (2013). Thermographic Investigation of "leccese" Stone Masonry Structures. In O. Büyüköztürk, M. A. Tasdemir, Y. Akkaya, & O. Gunes (Eds.), Nondestructive Testing of Materials and Structures (pp. 1137–1142). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Larsen, C. A. (2011). Document Flash Thermography. Utah state University, Logan, Utah.

Long, C., & Sayma, N. (2009). Heat Transfer (p. 156). Ventus Publishing.

Madruga, F. J., Ibarra-Castanedo, C., Conde, O. M., Lopez-Higuera, J. M., & Maldague, X. P. V. (2008). Automatic data processing based on the skewness statistic parameter for subsurface defect detection by active infrared thermography. QIRT 2008 - 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (Vol. 1, p. 6). Krakow, Poland.

Maierhofer, C., Arndt, R., Rollig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., & Hillemeier, B. (2006). Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. Cement and Concrete Composites, 28(4), 393–401. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.02.011

Maierhofer, C., Arndt, R., & Röllig, M. (2007). Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. Infrared Physics & Technology, 49(3), 213–217. doi:10.1016/j.infrared.2006.06.007

Maierhofer, C., Arndt, R., Röllig, M., Helmerich, R., Walther, A., Hillemeier, B., & Rieck, C. (2006). Quantification of Voids and Delaminations in Real Concrete and Masonry Structures with Active Thermography□: Case Studies. In D. Balageas (Ed.), QIRT 2006 - 8th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Padova, Italy.

Maillet, D., Lachi, M., & Degiovanni, A. (1990). Simultaneous measurements of axial and radial thermal diffusivities of an anisotropic solid in thin plate: application to multilayered materials. In C. J. Cremers & H. A. Fine (Eds.), Proceedings of the twenty-first International Conference on Thermal conductivity (pp. 90–108). New York: Plenum Press.

Maldague, X. P. V. (2001). Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. (K. Chang, Ed.) (p. 684). John Wiley & Sons, Inc.

Maldague, X. P. V. (2002). Introduction to NDT by active infrared thermography. Materials Evaluation, 6, 1060–1073.

Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2004). Handbook on Nondestructive testing of Concrete (Second Edi., p. 386). CRC Press.

Maser, K. R., & Roddis, W. M. K. (1990). Principles of Thermography and Radar for Bridge Deck Assessment. Journal of Transportation Engineering, 116(5), 583–601.

Mehta, K. P., & Monteiro, P. J. M. (2006). Concrete, Microstructure-properties-and materials.pdf (Third Edit., p. 684). McGraw-Hill Companies. doi:10.1036/0071462899

Meola, C. (2007a). A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography. Materials Letters, 61(3), 747–750. doi:10.1016/j.matlet.2006.04.120

Meola, C. (2007b). Infrared thermography of masonry structures. Infrared Physics & Technology, 49(3), 228–233. doi:10.1016/j.infrared.2006.06.010

Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2004). Recent Advances in the Use of Infrared Thermography. Measurement Science and Technology, 15, 27–58.

Meola, C., Carlomagno, G. M., & Giorleo, G. (2004). The Use of Infrared Thermography for Materials Characterization. Journal of Materials Processing Technology, 155-156:, 1132–1137.

Meola, C., Carlomagno, G. M., Squillace, A., & Giorleo, G. (2002). Non- destructive Control of Industrial Materials by Means of Lock-In Thermography. Measurement Science and Technology, 13, 1583–1590.

Meola, C., Dimaio, R., Roberti, N., & Carlomagno, G. (2005). Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. Engineering Failure Analysis, 12(6), 875–892. doi:10.1016/j.engfailanal.2004.12.030

Miculescu, M., Coşmeleață, G., Brânzei, M., & Miculescu, F. (2008). Thermal diffusivity of materials using flash method applied on CoCr alloys. University Politehnica of Bucharest “The Scientific Bulletin”, 70(2), 71–81.

Mikulić, D., Skazlić, M., Stipanović, I., & Jambrešić, M. (2005). Nerazorne metode ispitivanja za ocjenu stanja betona u konstrukcijama. In J. Radić (Ed.), Prvi sabor hrvatskih mostograditelja. Zbornik radova (pp. 683–690). Brijuni: SECON HDGK.

Mikulić, D., Milovanović, B. & Gabrijel, I., 2013. Analysis of Thermal Properties of Cement Paste During Setting and Hardening. In O. Büyüköztürk et al., eds. Nondestructive Testing of Materials and Structures. Dordrecht, The Netherlands: Springer Netherlands, pp. 465–471. Available at: http://www.springer.com/engineering/civil+engineering/book/978-94-007-0722-1.

Miller, J., & Friedman, E. (2004). Photonics Rules of Thumb: Optics, Electro-Optics, Fiber Optics and Lasers (Second edi., p. 417). McGraw-Hill.

Miller, J. L. (1994). Principles of infrared technology: a practical guide to the state of the art (p. 578). New York: Van Nostrand Reinhold.

Milovanovic, B., Banjad Pecur, I., & Gabrijel, I. (2011). Measuring thermal properties of hydrating cement pastes. In C. Cheeseman (Ed.), Proceedings of the 31st Cement and Concrete Science Conference. London: Imperial College London, United Kingdom.

Milovanović, B., & Banjad Pečur, I. (2011). Determination of material homogeneity using infrared thermography. Proceedings of the V Conferencia Panamericana de Ensayos No DestructivosCancun. Cancun, Mexico.

Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). Infrared Thermography, Errors and Uncertanties. Chemistry & … (p. 222). John Wiley & Sons, Ltd.

Montanini, R. (2010). Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography. Infrared Physics & Technology, 53(5), 363–371. doi:10.1016/j.infrared.2010.07.002

Morabito, P. (2001). Thermal Properties Of Concrete - Variations with the temperature and during the hydration phase (p. 23).

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2011). Thermodynamics, Fundamentals of engineering. (L. Ratts, Ed.) (7th editio., p. 1026). John Wiley & Sons, Inc.

Murphy, J. C., Aamodt, L. C., & Maclachlan Spicer, J. W. (1992). Principles of photothermal detectionin solids. In A. Mandelis (Ed.), Principles and Perspectives of Photothermal and Photoacoustic Phenomena (pp. 41–94). New York: Elsevier.

Nahant, M., Paez, S., & Van Leeuwen, J. (2010). DEFBETIR Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering. QIRT 2010 - 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Québec City (Canada).

Nave, C. R. (2012). Hyperphysics: Electromagnetic Spectrum. Georgia State University. Retrieved from http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/ems3.html#c1

Neville, A. M. (1996). Properties of Concrete (4th Ed.). Harlow, England: Addison Wesley Longman Ltd.

Nixon, M. S., & Aguado, A. S. (2008). Feature Extraction and Image Processing (second., p. 360). Woburn, MA: Newnes.

Omar, M. A., Parvataneni, R., & Zhou, Y. (2010). A combined approach of self-referencing and Principle Component Thermography for transient, steady, and selective heating scenarios. Infrared Physics & Technology, 53(5), 358–362. doi:10.1016/j.infrared.2010.06.004

ONSITEFORMASONRY. (2004). Technical guidelines for an appropriate use of the suggested equipment (Vol. 11, p. 159).

Orlove, G. L. (1982). Practical thermal measurement techniques. Proceedings of the SPIE, Vol. 371 (pp. 72–81).

Osiander, R., Spicer, J. W. M., & Amos, J. M. (1998). Thermal inspection of SiC/SiC ceramic matrix composites. Proceedings of Thermosense XX Conference SPIE, vol. 3361 (pp. 339–349).

Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butter, C. P., & Abbot, G. L. (1961). Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. Journal of Applied Physics, 32, 1679–1684.

Parvataneni, R. (2009). Principal component thermography for steady thermal perturbation scenarios. Clemson University.

Pašagić, V. (2008). Primjena termografije u građevinarstvu. Građevinar, 60(12), 1055–1064.

Petela, R. (2010). Engineering thermodynamics of thermal radiation for solar power utilization (p. 416). The McGraw-Hill Companies.

Pilla, M., Klein, M., Maldague, X. P. V., & Salerno, A. (2002). New Absolute Contrast for Pulsed Thermography. QIRT 2002 - 6th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (pp. 53–58). Dubrovnik.

Pitarresi, G. (2012). Quantitative InfraRed Thermography Implementation of a fast and low cost IR-NDT technique by means of a Square Pulse Modulated Lock-In Thermography. QIRT 2012 - 11th Quantitative InfraRed Thermography Conference (p. 10). Napoli.

Planck, M. (1900). Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 2, 202–204.

Planck, M. (1914). The theory of heat radiation (p. 252). PHILADELPHIA P. BLAKISTON'S SON & CO.

Pollock, D. G., Dupuis, K. J., Lacour, B., & Olsen, K. R. (2008). Detection of Voids in Prestressed Concrete Bridges using Thermal Imaging and Ground-Penetrating Radar (p. 77). Pullman, Washington: Washington State Transportation Center.

Prevost, P. (1791). Mémoire sur l'Equilibre du feu. Journal de physique, de chemie, d'histoire naturelle et des arts, Volume 38.

Rajic, N. (2002a). Principal component thermography (p. 36). Fishermans Bend, Victoria, Australia.

Rajic, N. (2002b). Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. Composite Structures, 58(4), 521–528.

Ringermacher, H. I., Mayton, D. J., Howard, D. R., & Cassenti, B. N. (1998). Towards a flat-bottom hole standard for thermal imaging. In D. O. Thompson & D. E. Chimenti (Eds.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evalaluation (Vol. 17, pp. 425–9). New York: Plenum Press.

Rogalski, A. (2011). Infrared Detectors (Second edi., p. 900). CRC Press.

Rogalski, A. (2012). Progress in focal plane array technologies. Progress in Quantum Electronics, 36(2-3), 342–473.

Rosencwaig, A., & Busse, G. (1980). High-Resolution Photoacoustic Thermal- Wave Microscopy. Applied Physics Letters, 36(9), 725–727.

Sakagami, T., & Kubo, S. (2002). Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography. Infrared Physics & Technology, 43(3-5), 311–316. doi:10.1016/S1350-4495(02)00157-3

Salazar, A., Sanchez-Lavega, A., Ocariz, A., Guitonny, J., Pandey, G. C., Fournier, D., & Boccara, A. C. (1996). Thermal diffusivity of anisotropic materials by photothermal methods. Journal of Applied Physics, 79(8), 3984–3993.

Shepard, S. M. (2012). Advances in Thermographic Signal Reconstruction. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (pp. 1–2).

Shepard, S. M., Hou, Y., & Lhota, J. R. (2004). Quantitative characterization of thermographic sequenca data. 16th WCNDT - World Conference on NDT (pp. 1–6). Montreal, Canada.

Shepard, S. M., Lhota, J. R., Rubadeux, B. A., Wang, D., & Ahmed, T. (2003). Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences. Optical Engineering, 42(5), 1337–1342. doi:10.1117/1.1566969

Spiessberger, C., Dillenz, A., & Zweschper, T. (2010). Active Thermography for Quantitative NDT of CFRP Components. 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010 (pp. 1–7). Hamburg, Germany.

Swiderski, W. (2009). The Characterization of Defects in Multi-Layered Composite Materials by Thermal Tomography Methods. Acta Physica Polonica A, 115(4), 800–804.

Šunde, V., 2011. Prolegomena učinske elektronike.pdf, Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb.

Tissot J.L., Bertrand F., V. M. and Y. J. J. (1999). Uncooled infrared focal plane arrays – technical trends and LETI/LIR microbolometer development. In E. Grinzato (Ed.), Proceedings of 5th AITA InternationalWorkshop on Advanced Infrared Technology and Applications (pp. 57–63). Venice.

Underwood, C. P., & Yik, F. W. H. (2004). Modelling Methods for Energy in Buildings. (C. P. Underwood & F. W. H. Yik, Eds.) (p. 308). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. doi:10.1002/9780470758533

Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., & López, I. (2012). A quantitative comparison of stimulation and post-processing thermographic inspection methods applied to aeronautical carbon fiber reinforced polymer. QIRT 2012 - 11th Quantitative InfraRed Thermography Conference (p. 7). Napoli.

Vageswar, A., Balasubramaniam, K., & Krishnamurthy, C. V. (2010). Wall thinning defect estimation using pulsed IR thermography in transmission mode. Nondestructive Testing and Evaluation, 25(4), 333–340. doi:10.1080/10589751003660434

Van Leeuwen, J., Nahant, M., & Paez, S. (2011). Study of Pulsed Phase Thermography for the Detection of Honeycombing Defects in Concrete Structures. Online Workshop: NDT&E of Composite Materials.

Vavilov, V. (Tomsk P. U. (2004). Evaluating the efficiency of data processing algorithms in transient thermal NDT. In D. D. Burleigh, K. E. Cramer, & G. R. Peacock (Eds.), Thermosense XXVI, Proceedings of SPIE 5405 (p. 336). Orlando, FL: SPIE.

Vavilov, V. (Tomsk P. U. (2006). Thermal Nondestructive Testing, Handbook series: Nondestructive Testing, Vol. 5 (p. 380). Moscow, Russia: Mashinostroyenie Publishing.

Vavilov, V. (Tomsk P. U. (2010). IR thermographic nondestructive testing of composite materials - determining thermal properties, detecting and characterizing hidden defects. In V. V. Klyuev (Ed.), 10th European Conference on Non-Destructive Testing (p. 6). Moscow, Russia: Spektr.

Vavilov, V. (Tomsk P. U., & Demin, V. (2002). Infrared thermographic inspection of operating smokestacks. Infrared Physics and Technology, 43, 229–232.

Vavilov, V. (Tomsk P. U., & Marinetti, S. (2009). Comparative analysis of the thermal testing of corrosion in high and low heat-conducting metals. Russian Journal of Nondestructive Testing, 44(12), 841–846. doi:10.1134/S1061830908120061

Vavilov, V. (Tomsk P. U., & Taylor, R. (1982). Theoretical and practical aspests of the thermal nondestructive testing of bonded structures. In R. S. Sharpe (Ed.), Research Techniques in Nondestructive Testing (pp. 238–279). London: Academic Press.

Vollmer, M., & Moellmann, K.-P. (2010). Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications. Order (p. 611). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Retrieved from http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Infrared+Thermal+Imaging#0

Weil, G. J. (1989). Nondestructive Remote Sensing of Subsurface Utility Distribution Pipe Problems Using Infrared Thermography. Proceedings of Second International Conference on Pipeline Construction. Hamburg, Germany.

Weil, G. J. (1991). Infrared Thermographic Techniques. In V. M. Malhotra & N. J. Carino (Eds.), Handbook on Nondestructive Testing of Concrete (pp. 305–316). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Weil, G. J., & Rowe, T. J. (1998). Nondestructive testing and repair of the concrete roof shell at the Seattle Kingdome. NDT&E International, 31(6), 389–400.

Welch, C. S., Health, D. M., & Winfree, W. P. (1987). Remote measurement of in-plane diffusivity components in plates. Journal of Applied Physics, 61(3), 895–898.

Welch, C. S., & Johnson, J. (1999). Thermographic measurement of in-plane diffusivity in very thin plates using diffusion of thermal patterns. In D.O. Thompson & D. E. Chimenti (Eds.), Review Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 19 (pp. 1449–1456). New York: Plenum Press.

Weritz, F., Arndt, R., Roellig, M., Maierhofer, C., & Wiggenhauser, H. (2005). Investigation of concrete structures with pulse phase thermography. Materials and Structures, 38(283), 843–849. doi:10.1617/14299

Wien, W. (1896). Über die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers. Annalen der Physik und Chemie, 294, 662–669.

Willems, W. M., Dinter, S., & Schild, K. (2006). Handbuch Bauphysik Teil 1. Verlag: Vieweg.

Winfree, W. P., Heath, D. M., & Cramer, K. E. (2001). Thermal diffusivity imaging with a moving line source. Proceedings of Thermosense XXIII Conference SPIE, vol. 4360 (pp. 606–615).

Wróbel, G., & Rdzawski, Z. (2009). Determination of thermal diffusivity of carbon / epoxy composites with different fiber content using transient thermography. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 37(2), 518–525.

Wu, D., & Busse, G. (1998). Lock-in Thermography for NonDestructive Evaluation of Materials. Revue Générale de Thermique, 37, 693–703.

Wysocka-Fotek, O., Oliferuk, W., & Maj, M. (2012). Reconstruction of size and depth of simulated defects in austenitic steel plate using pulsed infrared thermography. Infrared Physics & Technology, 55(4), 363–367. doi:10.1016/j.infrared.2012.02.004

Xu, Y., & Chung, D. D. L. (2000). Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume admixtures. Cement and Concrete Research, 30, 1175–1178.

Zeng, Z., Li, C., Tao, N., Feng, L., & Zhang, C. (2012). Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography. NDT & E International, 48, 39–45. doi:10.1016/j.ndteint.2012.02.008

Zeng, Z., Tao, N., Feng, L., & Zhang, C. (2012). Specified value based defect depth prediction using pulsed thermography. Journal of Applied Physics, 112(2), 7. doi:10.1063/1.4737784

Zhoung, O., Favro, L. D., & Thomas, R. L. (1999). Measurement of diffusivities using infrared imaging of thermally blurried shadows. In F. Scudieri & M. Bertolotti (Eds.), AIP Conference Proceedings n° 463 Photoacoustic and Photothermal Phenomena (pp. 374–376). Rome: AIP Woodbury, New York.

Zi, G., Sim, J., Oh, H., & Lee, J. (2008). Optimum NDT using infrared thermography for defected concrete. In K. & F. (eds) (Ed.), Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics (pp. 1223–1230). Seul, Korea: Taylor & Francis Group.

Zweschper, T., Dillenz, A., Riegert, G., Scherling, D., & Busse, G. (2003). Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 45(3), 178–182. doi:10.1784/insi.45.3.178.53162

ŽIVOTOPIS

Bojan Milovanović rođen je 05. svibnja 1984. godine u Čakovcu. Osnovnu školu Kotoriba završio je 1998. godine, maturirao je 2002. godine u Graditeljskoj školi u Čakovcu, smjer Građevinski tehničar visokogradnje.

Na Građevinskom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu diplomirao je 2. srpnja 2007. godine na smjeru Konstrukcije, pod mentorstvom prof.dr.sc. Jure Radića naslov rada "Proračun mosta Dobra - Vrbovsko na autocesti Rijeka - Zagreb po novim propisima i usporedba sa proračunom po starim propisima". Dobitnik je nagrade za najboljeg studenta Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu za akademske godine 2002./2003.; 2003./2004.; 2004./2005.; 2006./2007., dobitnik nagrade Konstruktor inženjeringa d.d. za najboljeg studenta za akademsku godinu 2003./2004.

Poslijediplomski znanstveni studij na Građevinskom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu smjer Materijali u građevinarstvu upisao je 30. studenog 2007. godine.

Od 01. rujna 2007. godine radi na Građevinskom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za materijale, najprije kao stručni suradnik, a od 01. studenog 2007. godine je zaposlen kao znanstveni novak na znanstvenoistraživačkom projektu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta pod nazivom „On nano do makrostrukture betona“ (projekt br. 082-0822161-2990) čija je voditeljica prof.dr.sc. Nina Štirmer (do 2011. godine projekt je vodila prof.dr.sc. Dunja Mikulić).

U sklopu rada na znanstvenom projektu objavio je samostalno i u koautorstvu 1 poglavlje u knjizi, 3 znanstvena rada i 2 stručna rada u drugim časopisima, 1 pozvano predavanje na skupu s međunarodnom recenzijom, 26 znanstvena rada u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom, 6 znanstvenih i stručnih radova u zbornicima s domaćom recenzijom te 3 sažetka u zbornicima skupova bez recenzije. Sudjelovao je i održao izlaganja na 15 međunarodnih i 6 domaćih znanstvenih konferencija, te je održao 27 izlaganja na skupovima stručnog i znanstvenog usavršavanja te skupovima domaćih stručnjaka i udruga u graditeljstvu.

U okviru znanstvene djelatnosti bavi se proučavanjem:

- razornih i nerazornih metoda ispitivanja betona,

- ispitivanja toplinskih svojstava materijala,
- računalom potpomognutim projektiranjem sastava betona,
- modeliranja tijeka hidratacije cementa,
- građevinske fizike,
- energijske učinkovitosti u zgradama

Tijekom rada na Zavodu za materijale uključen je u izvođenje nastave na predmetima preddiplomskog studija *Poznavanje materijala*, *Gradiva* te do ak.god. 2010./2011. na predmetu *Osnove tehnologije betona;* na predmetima diplomskog studija *Građevinska fizika, Nerazorna ispitivanja, Numeričko modeliranje u inženjerstvu materijala* na Građevinskom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu.

Bio je neposredni voditelj studenata pri izradi sveukupno 25 završnih i diplomskih radova te 3 rada nagrađena Rektorovom nagradom.

Sudjeluje u projektu GF@U „E-učenje na Građevinskom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu“ kroz izradu i implementaciju e-kolegija „*Poznavanje materijala*“ u nastavu na 1. godini preddiplomskog sveučilišnog studija građevinarstva. Odgovoran je za provođenje kontrole kvalitete pri izradi e-kolegija na projektu „GEA - projekt implementacije e-učenja u nastavu“ u kojem sudjeluju Građevinski, Arhitektonski i Ekonomski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu.

Kao predavač sudjeluje u programima cjeloživotnog obrazovanja u organizaciji Građevinskog fakulteta, Hrvatske komore inženjera u građevinarstvu i Hrvatskog saveza građevinskih inženjera.

Sudjeluje u pripremi projektne dokumentacije, pisanju prijedloga projekta te provođenju međunarodnih projekata koje financira Europska komisija, a koordinator je Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu:

- „ECO-SANDWICH: Energy Efficient, Recycled Concrete Sandwich Facade Panel“ za europski fond CIP Eco-innovation First Application and market replication projects, Call 2011. (ECO/11/304438/SI2.626301)
- „CROSKILLS“ (BUILD UP Skills Croatia) u sklopu programa CIP Intelligent Energy Europe (IEE/12/BWI/457/SI2.623227)

Kao predstavnik Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu sudjeluje u provođenju europskog projekta INTENSE – „From Estonia till Croatia: Intelligent Energy Saving Measures for Municipal housing in Central and Eastern European countries" u okviru programa Intelligent Energy Europe.

Sudjelovao je u pripremi i prijavi europskih projekata:

- INTESORE (Intelligent energy solutions for refurbishment of existing building stock towards nearly zero energy buildings), IEE Programme call for proposals 2013
- INDOCNET (Innovative doctoral programme in new energy technologies and microgrids) u okviru programa FP7 Marie Curie Initial Training Networks (ITN) Call: FP7-PEOPLE-2012-ITN.
- „Building with nature" u okviru programa IPA – Transition Assistance and Institution Building Component EuropeAid/131867/M/ACT/HR.
- EcoConB&T (Eco-concrete with crushed brick and tile as an aggregate) u okviru programa Regional Competitiveness Operational Programme 2007-2011 for Community Assistance under the IPA Regional Development Component in Croatia
- OIKODOMOS NETWORK u okviru programa Lifelong Learning Programme Centralized, podprograma ERASMUS EAC/27/11
- MoniComp (Condition health monitoring for the surface transport sector of composite materials under severe operational conditions) u okviru programa EC - FP7 'Capacities' i poziva 'Research for the Benefit of SME Associations'
- PileInspect (Integrity Determination of Reinforced Concrete Piles) u okviru programa EC - FP7 'Capacities' i poziva 'Research for the Benefit of SME Associations'
- Safe Structure (Development of a Risk Based Screening Tool for Rapid Assessment of the Integrity of Safety Critical Pressure Systems in SME Processing Facilities) u okviru programa EC - FP7 'Capacities' i poziva 'Research for the Benefit of SME Associations'
- EKODIM (Sustav iskorištavanja energije ispušnih plinova u asfaltnim bazama) u okviru programa provjere inovativnog koncepta za znanstvenike i istraživače (SIR PoC „Public R&D")
- Sudjelovao u izradi programa stručne prekvalifikacije nezaposlenih dipl.ing.arh. i dipl.ing.građ. za Hrvatski Zavod za Zapošljavanje na temu energetske učinkovitosti u zgradarstvu

Od 2009. godine tajnik je Programa izobrazbe koji se provodi u sklopu cjeloživotnog obrazovanja na Građevinskom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu:

- „Program izobrazbe osoba koje provode energetske preglede i energetsko certificiranje zgrada“
- „Program izobrazbe termografista za LEVEL 1 i LEVEL 2 s međunarodnim certifikatom“

Uspostavlja suradnju Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu s *Infrared Training Center (ITC)* sa sjedištem u Stockholmu, u sklopu koje Građevinski fakultet postaje ovlašteni trening centar ITC-a za Hrvatsku u provođenju izobrazbe ovlaštenih termografista s međunarodnim certifikatom. Pomaže pri uspostavljanju suradnje Građevinskog fakulteta s *Fraunhofer Institute for Building Physics IBP* s podružnicom u Holzkirchenu, kao jednim od vodećih Europskih instituta koji se bavi istraživanjima u području higrotermike u zgradarstvu.

U veljači 2010. godine je završio Program izobrazbe osoba koje provode energetske preglede i energetsko certificiranje zgrada, MODUL 1 za zgrade s jednostavnim tehničkim sustavima, te Modul 2 za zgrade sa složenim tehničkim sustavom u studenom 2010.

U prosincu 2009. godine je završio Program izobrazbe za ovlaštene termografiste s međunarodnim certifikatom, Level I; a u veljači 2011. završava Level II te postaje ovlašteni Level 2 termografist. Od studenog 2011. godine Bojan Milovanović, postaje ovlašteni instruktor ITC-a za zemlje bivše Jugoslavije.

U okviru stručne djelatnosti sudjeluje u sveukupno 39 projekata i poslova u okviru stručne djelatnosti Zavoda za materijale, koji obuhvaćaju:

- istražne radove i ocjenu stanja konstrukcija na mostovima, vodospremama, odašiljačima;
- termografska ispitivanja kuća, višestambenih zgrada, trgovačkih centara, odlagališta otpada, zračne luke.
- energetske preglede i energetsko certificiranje zgrada

Kroz članstvo i funkcije u profesionalnim organizacijama i tijelima:

- Sudjeluje u radu koordinacije za provođenje energetskih pregleda i energetske certifikacije zgrada Sveučilišta u Zagrebu

- Sudjeluje u radu Povjerenstva za izradu referentnih zgrada pri Ministarstvu graditeljstva i prostornog uređenja
- Sudjeluje u radu tehničkih odbora TO 570 „Sustavi upravljanja energijom“ i TO 163 „Toplinska izolacija“ pri Hrvatskom zavodu za norme
- Član izvršnog odbora Hrvatske udruge za infracrvenu termografiju (HUICT), predstavnik za područje istraživanja i razvoja
- Član Hrvatskog društva za kontrolu bez razaranja (HDKBR), voditelj Sekcije inženjera
- Član Hrvatske udruge diplomiranih inženjera Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu;
- Član American Concrete Institute-a

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Poglavlja u knjizi:

1. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Gabrijel, Ivan. **Analysis of Thermal Properties of Cement Paste During Setting and Hardening** // Nondestructive Testing of Materials and Structures / Büyüköztürk, Oral, Taşdemir, Mehmet Ali Güneş, Oğuz ; Akkaya, Yılmaz (ur.). Dordrecht : Springer Netherlands, 2013. Str. 465-471.

Znanstveni radovi u drugim časopisima

2. Gabrijel, Ivan; Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan. **Application of Ultrasonic Measurements for Determination of Setting and Hardening in Cement Paste**. // *Journal of Civil Engineering and Architecture*. **5** (2011) , 3; 278-283

3. Štirmer Nina; Mikulić Dunja; Milovanović Bojan; Kolić Damir. **Upravljanje kvalitetom u proizvodnji betona**. // *Kvalitet*. **21** (2011) , 3-4; 79-83

4. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Gabrijel, Ivan. **Simulacija toplinskog toka u betonu**. // *Građevinar : časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*. **62** (2010) , 10; 941-950

Ostali radovi u drugim časopisima

5. Milovanović, Bojan; Banjad Pečur, Ivana. **Izobrazba za energijske preglede i certificiranje zgrada**. // *Glasnik AMCA-FA*. **10** (2011) , 1; 21-23

6. Mikulić, Dunja; Štirmer, Nina; Milovanović, Bojan; Banjad Pečur, Ivana. **Energijsko certificiranje zgrada**. // *Građevinar : časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*. **62** (2010.), 12; 1087-1096

Objavljena pozvana predavanja na skupovima

7. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Šimetin, Vladimir; Marđetko Škoro, Nada. **UPOTREBA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE U PROCESU ENERGETSKE CERTIFIKACIJE ZGRADA** // *MATEST 2009, In-service inspection, Condition Monitoring and Diagnostics, Proceedings* / Lypolt, Ana (ur.). Zagreb : Hrvatsko društvo za kontrolu bez razaranja, 2009. 13-21

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

8. Miščević, Ljubomir; Banjad Pečur, Ivana; Milovanović, Bojan. **Passive House and ECO-SANDWICH EU Eco-innovation Project for Facade Panels** // *Proceedings of 17th International Passive House Conference 2013* / Feist, Wolfgang (ur.). Frankfurt an Main : Passive House Institute, 2013. 517-518.

9. Štirmer, Nina; Banjad Pečur, Ivana; Milovanović, Bojan. **Razvoj sustava kontinuiranog obrazovanja građevinskih radnika u području energetske učinkovitosti** // *Kvalitetom protiv recesije* / Drljača, Miroslav (ur.). Zagreb : Hrvatsko društvo menadžera kvalitete, 2013. 233-243.

10. Štirmer, Nina; Banjad Pečur, Ivana; Milovanović, Bojan; Carević, Ivana. **Sustav obrazovanja u području energetske učinkovitosti** // *Kvaliteta - put izvrsnosti* / Belošević, Dragutin (ur.). Zagreb : Hrvatsko društvo za kvalitetu, 2013. 380-389.

11. Banjad Pečur, Ivana; Štirmer, Nina; Milovanović, Bojan. **Condition assessment and repair of antenna towers concrete foundations** // *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III* / Alexander, M.G. ; Beushausen, H.D. ; Dehn, F., Moyo, P. (ur.). London : Taylor & Francis Group, 2012. 219-225.

12. Banjad Pečur, Ivana; Štirmer, Nina; Milovanović, Bojan; Bijelić, Nenad. **Eco-Sandwich Wall Panel System, the Sustainable Prefabricated Wall Panel System Made of Recycled Aggregates** // *Conference Proceedings of CIB W115 Green Design Conference* / Durmisevic, Elma ; Pasic, Adnan (ur.). Sarajevo : International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), 2012. 39-42.

13. Milovanovic, Bojan; Stirmer, Nina; Milicevic, Ivana. **The Sustainable Prefabricated Wall Panel System Made of Recycled Aggregates** // *Proceedings of the International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction*. Nantes, France : IFSTTAR, 2012.

14. Milovanović, Bojan; Domitrović, Josipa; Rukavina, Tatjana. **Application of Infrared Camera for Quality Control during Paving** // *Proceedings of the 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2012)* / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb : Faculty of Civil Engineering, Department of Transpotation, 2012. 267-272

15. Milovanović, Bojan; Štirmer, Nina; Banjad Pečur, Ivana. **Važnost kvalitete izvedbe zgrada u svjetlu zahtjeva energijske učinkovitosti** // *Kvaliteta i društvena odgovornost* / Drljača, Miroslav (ur.). Zagreb : Hrvatsko društvo menadžera kvalitete, 2012. 161-175.

16. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Gabrijel, Ivan. **Analysis of thermal properties of cement paste during setting and hardening** // *Proceedings of International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures* / Rilem (ur.). Istanbul : Springer, 2011. 62-62.

17. Milovanovic, Bojan; Banjad Pecur, Ivana; Gabrijel, Ivan. **Measuring thermal properties of hydrating cement pastes** // *Proceedings of the 31st Cement and Concrete Science Conference* / Cheeseman, Cristopher (ur.). London, 2011. 180-185.

18. Milovanović, Bojan; Banjad Pečur, Ivana. **Determination of Material Homogeneity Using Infrared Thermography** // *Proceedings of the V Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos*. Cancun, 2011.

19. Milovanović, Bojan; Banjad Pečur, Ivana. **The Role of Infrared Thermography in Nondestructive testing of Civil Engineering Structures** // *MATEST 2011 Proceedings* / Krnić, Nikša (ur.). Zagreb, 2011.

20. Milovanović, Bojan; Mikulić, Dunja. **Assessment Method for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components** // *Energy Management in Cultural Heritage* / Zanki, Vlasta (ur.). Zagreb : UNDP Croatia, 2011.

21. Štirmer, Nina; Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Kolić, Damir. **Upravljanje kvalitetom u proizvodnji betona** // *Kvalitetom do poslovne izvrsnosti* / Drljača, Miroslav (ur.). Zagreb : OSKAR, Centar za razvoj i kvalitetu, 2011. 157-168.

22. Lazarević, Damir; Fresl, Krešimir; Milovanović, Bojan. **Some Discrete Properties of the Granular Contents of Silos** // *Proceedings of The Seventh International Conference on Engineering Computational Technology* / Topping, B.H.V. ; Adam, J.M. ; Pallares, F.J.: Bru, R. ; Romero, M.L. (ur.). Stirlingshire : Civil-Comp Press, 2010.

23. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan. **TCi System For Non-Destructive Determination Of Thermal Properties Of Materials** // *10th European Conference on Non Destructive Testing, NDT - Basis of Safety* / Publishing house Spektr (ur.). Moscow : Publishing house Spektr, 2010. 256-266.

24. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Kolić, Damir; Sokačić, Ana; Šimunović, Tomislav. **Potential of improving energy efficiency of residential buildings in Croatia** // *Građevinarstvo - nauka i praksa* / Lučić, Duško (ur.). Žabljak : Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2010. 1411-1416.

25. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Kolić, Damir; Sokačić, Ana; Šimunović, Tomislav. **Environmental Impact of Improving Energy Efficiency of Buildings** // *Sustainable Construction Materials and Technologes* / Zachar, J ; Claisse, P ; Naik, T.R. ; Ganjian, E. (ur.). Ancona : UWM Center for By-Products Utilization, 2010. 1183-1191.

26. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Šimetin, Vladimir; Marđetko Škoro, Nada. **Proces energetske certifikacije zgrada u Hrvatskoj - primjena infracrvene termografije** // *Građevinarstvo - nauka i praksa* / Lučić, Duško (ur.). Žabljak : Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2010. 1417-1422.

27. Gabrijel, Ivan; Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan. **Application of Ultrasonic Measurements for Determination of Setting and Hardening in Cement Paste** // *Construction in the 21st Century CITC-V Collaboration and Integration in Engineering, Management and Technology* / Birgonul, M. Talat ; Azhar, Salman ; Ahmed, Syed M. ; Dikmen, Irem ; Budayan, Cenk (ur.). Istanbul : Florida International University, Miami, Florida, U.S.A. ; Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2009. 1420-1426.

28. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Gabrijel, Ivan. **Primjena akustične emisije pri ispitivanju tlačne čvrstoće betona** // *Dosežki betonske stroke* / Združenje za beton Slovenije (ur.). Lipica : Združenje za beton Slovenije, 2009. 185-194.

29. Mikulić, Dunja; Milovanović, Bojan; Gabrijel, Ivan. **Testing of Compressive and Bending Strength of Concrete and Monitoring Acoustic Emission Parameters** // *Proceedings of 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering* / Abraham, Odile ; Derobert, Xavier (ur.). Nantes : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2009. 903-908.

30. Milovanović, Bojan; Mikulić, Dunja; Đurinek, Marija; Uzelac, Srđan. **Finite Element Simulation of Temperature and Stress Development in Mass Concrete** // *The proceedings of the first international conference on computational technologies in concrete structures* / Choi, Chang-Koon ; Meyer, Christian ; Bićanić, Nenad (ur.). Daejon, Južna Koreja : Techno-Press, 2009. 915-927

31. Bjegović, Dubravka; Mikulić, Dunja; Gabrijel, Ivan; Milovanović, Bojan. **Assessment of concrete in structure** // *Networks for sustainable environment and high quality of life* / Radić, Jure ; Bleiziffer, Jelena (ur.). Zagreb : Structural Engineering Conferences (SECON), 2008. 133-140.

32. Bjegović, Dubravka; Mikulić, Dunja; Serdar, Marijana; Milovanović, Bojan; Gabrijel, Ivan. **Service Life Estimation of Concrete Structure Exposed to Agressive Environmental Loads** // *Concrete Engineering in Urban Development* / Radić, Jure ; Bleiziffer, Jelena (ur.). Zagreb : SECON HDGK d.o.o., 2008. 561-568.

33. Mikulić, Dunja; Gabrijel, Ivan; Milovanović, Bojan. **Predicition of concrete compressive strength** // *Concrete modelling conmod '08* / Schlangen, Erik ; De Schutter, Geert (ur.). Delf, The Netherlands : Rilem publications S.A.R.L., 2008. 503-510

<u>Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom</u>

34. Banjad Pečur, Ivana; Štirmer, Nina; Milovanović, Bojan. **Sustav ECO–SANDWICH – održivi predgotovljeni zidni panelni sustav od recikliranog agregata** // *SABOR HRVATSKIH GRADITELJA 2012 Graditeljstvo → poluga razvoja ZBORNIK*

RADOVA / Prof. dr. sc. Stjepan Lakušić (ur.). Zagreb : Hrvatski savez građevinskih inženjera Zagreb, Berislavićeva 6, 2012. 123-133

35. Banjad Pečur, Ivana; Štirmer, Nina; Milovanović, Bojan. **CROSKILLS – razvoj nacionalne strategije za obrazovanje građevinskih radnika u području energetske učinkovitosti** // *Sabor hrvatskih graditelja 2012. "Graditeljstvo - poluga razvoja : zbornik radova* / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb : Hrvatski savez građevinskih inženjera, 2012. 21-30

36. Bojan Milovanović, Ivana Banjad Pečur, Nina Štirmer. **Quality Assurance of an Energy Performance of Buildings - Airtightness Testing** // *Zbornik radova GNP 2012* / Šćepanović, Biljana (ur.). Podgorica : Univerzitet Crne Gore, 2012.

37. Milovanović, Bojan. **Toplinska ovojnica zgrade – problemi i rješenja u praksi** // *Stručni simpozij Kvaliteta gradnje stambenih i javnih zgrada u republici hrvatskoj od 1991.-2011. godine* / Melita Bestvina (ur.). Zagreb : Hrvatsko Društvo Sudskih Vještaka, 2012. 37-43

38. Milovanović, Bojan; Štirmer, Nina; Miščević, Ljubomir. **Pasivna kuća : poboljšanje kvalitete stanovanja** // *12. hrvatska konferencija o kvaliteti i 3. znanstveni skup Hrvatskog društva za kvalitetu "Kvalitetom do uspješnog društva : kvaliteta za najbolji učinak" : zbornik radova* / Čehajić-Labaš, Dunja ; Štajdohar Pađen, Olga (ur.). Zagreb : Hrvatsko društvo za kvalitetu, 2012. 225-234

39. Mikulić, Dunja; Jurišić, Lordan; Milovanović, Bojan; Gabrijel, Ivan. **Modeliranje razvoja temperature u mladom betonu** // *Hrvatsko graditeljstvo pred izazovom europskih integracija* / Simović, Veselin (ur.). Zagreb : Hrvatski savez građevinskih inženjera, 2008. 273-280

Sažeci u zbornicima skupova

40. Milovanović, Bojan. **ECO-SANDWICH, održivi predgotovljeni zidni paneli od recikliranog agregata** // *8. Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva*. Zagreb, 2013. 33-33

41. Milovanović, Bojan. **Važnost osiguranja kvalitete izvođenja vrlo niskoenergetske zgrade** // *Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva 2012* / Sever, Zvonimir (ur.). Zagreb, 2012.

42. Milovanović, Bojan. **Važnost provedbe mjerenja prilikom energijskog certificiranja zgrada** // *Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva - Program skupa i sažeci predavanja*. Zagreb, 2011. 21-21