



**UNIVERZITET U NIŠU
GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET**

Nemanja B. Marković

**AKTIVNI MONITORING I DETEKCIJA
OŠTEĆENJA ARMIRANO BETONSKIH
KONSTRUKCIJA PRIMENOM
PIEZOELEKTRIČNIH AGREGATA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2022.



**UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE**

Nemanja B. Marković

**ACTIVE STRUCTURAL HEALTH MONITORING
AND DAMAGE DETECTION OF REINFORCED
CONCRETE STRUCTURES USING
PIEZOELECTRIC SMART AGGREGATES**

Doctoral thesis

Niš, 2022.



Mentor:

Dr Dragoslav Stojić, dipl. građ. inž., redovni profesor Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

Članovi komisije:

Dr Zoran Grdić, dipl. građ. inž., redovni profesor Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

Dr Gordana Topličić-Ćurčić, dipl. građ. inž., redovni profesor Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

Dr Miroslav Marjanović, dipl. građ. inž., docent na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Datum odbrane disertacije:

23.11.2022.



Naslov doktorske disertacije:

Aktivni monitoring i detekcija oštećenja armirano betonskih konstrukcija primenom piezoelektričnih agregata

Rezime:

Ova disertacija fokusirana je na razvoju metoda za detekciju i lokalizaciju oštećenja kod betonskih konstrukcija. Ovim istraživanjem pokušano je da se odgovori na zahteve monitoringa i nedestruktivnog ispitivanja i procene (NDI/P) konstrukcija kao i da se umanjí trenutni nedostatak u metodama za praćenje stanja betonskih konstrukcija. Istraživanjem su dati numerički postupci modeliranja detekcije oštećenja kod linijskih armirano betonskih (AB) elemenata počevši od modela piezoelektričnih pametnih agregata (PZT PA) pa dalje ka modelima propagacije talasa. Urađena je verifikacija numeričkih modela na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata, kao i parametarska analiza promene RMSD (koren srednjih kvadratnih odstupanja) indeksa oštećenja u odnosu na pojedine parametre. Za pločaste betonske elemente urađena je detekcija primenom postojećeg dvodimenzionalnog indeksa oštećenja upotrebom numeričkih simulacija. Za potrebe lokalizacije oštećenja razvijen je hibridni metod na bazi energetskog pristupa, vremena prostiranja dolaznog talasa od aktuatora do senzora kao i diskretne vejevlet transformacije signala. Hibridni pristup je razvijen za opšti oblik betonskog elementa, proizvoljni broj i položaj PZT aktuatora/senzora i proizvoljni oblik i položaj oštećenja. Pomenuti hibridni pristup je verifikovan kroz eksperimentalna i numerička istraživanja na modelima sa jednim i dva oštećenja. Za prostornu detekciju oštećenja kod betonskih elemenata razvijen je trodimenzionalni (3D) indeks oštećenja na bazi jednodimenzionalnog (1D) RMSD indeksa oštećenja. 3D indeks oštećenja je sračunat za različite slučajeve oštećenja na bazi rezultata dobijenih numeričkim simulacijama. Hibridni metod razvijen za pločaste elemente proširen je za prostorno lokalizovanje oštećenja. Na paralelopipednim uzorcima/modelima testiran je hibridni metod za lokalizovanje oštećenja u prostoru na osnovu eksperimentalnih i numeričkih istraživanja. Dobijeni rezultati ukazuju da su metode za detekciju i lokalizaciju oštećenja veoma efikasne za linijske i pločaste betonske elemente, dok kod prostornih betonskih konstrukcija neophodna je dalja razrada prikazane metode. Sve prikazane metode u doktorskoj disertaciji su numerički testirane a pojedine su i eksperimentalno verifikovane. Cilj



razvoja pomenutih metode za detekciju i lokalizaciju oštećenja treba dalje da vode ka upotrebi PZT aktuatora/senzora za praćenje stanja realnih betonskih konstrukcija kroz vreme.

Ključne reči:

Monitoring, Detekcija oštećenja, Nedestruktivne metode i procena stanja, Lokalizacija oštećenja, Armirano betonske konstrukcije, MKE, Numeričko modeliranje, Propagacija talasa

Naučna oblast:

Građevinarstvo

Uža naučna oblast i naučna disciplina:

Metalne i drvene konstrukcije

Naučna disciplina – Monitoring i procena stanja konstrukcija

UDK broj i klasifikaciona oznaka: 624.012.45:69.059.22(043.3)

T 220



Title:

Active structural health monitoring and damage detection of reinforced concrete structures using piezoelectric smart aggregates

Summary:

This dissertation is focused on the development of methods for the damage detection and localization in concrete structures. This research is an attempt to meet the requirements of monitoring and non-destructive testing and assessment (NDI / P) of structures, as well as to reduce the current shortcoming in methods for monitoring the condition of concrete structures. The research gives numerical procedures for modeling the damage detection in linear reinforced concrete (RC) elements, starting from the model of piezoelectric smart aggregates (PZT PA) and further to the models of wave propagation. Verification of numerical models based on experimentally obtained results was performed, as well as parametric analysis of the change in RMSD (root mean square deviations) of the damage index in relation to individual parameters. For plate concrete elements, detection was performed using the existing two-dimensional damage index based on numerical simulations. For the damage localization, a hybrid method based on energy approach, time of propagation of the incoming wave from the actuator to the sensor as well as discrete wavelet signal transformation has been developed. A hybrid approach has been developed for the general shape of the concrete element, arbitrary number and position of PZT actuators / sensors, and arbitrary shape and position of damage. The mentioned hybrid approach was verified through experimental and numerical research on models with one and two damaged points. For 3D damage detection in concrete structures, a three-dimensional (3D) damage index based on a one-dimensional (1D) RMSD damage index has been developed. The 3D damage index was calculated for different damage cases, based on the results obtained by numerical simulations. A hybrid method developed for plate elements has been extended to 3D damage localization. A hybrid method for spatial damage localization was verified on parallelepiped samples/models by comparing experimental and numerical results. The obtained results indicate that the methods for damage detection and localization are very efficient for linear and plate concrete elements, while in the case of 3D concrete structures, further elaboration of the presented method is necessary. All methods presented in the doctoral dissertation have been numerically tested and some have been experimentally verified. The main aim of the development of the aforementioned methods for the



damage detection and localization is to enable the use of PZT actuators/sensors for structural health monitoring of concrete structures over time.

Key words:

Structural health monitoring, Damage detection, Nondestructive methods and evaluation, Damage localization, Reinforced concrete structures, FEM, Numerical modeling, Wave propagation

Scientific field:

Civil engineering

Narrow scientific field and scientific discipline:

Narrow scientific field: Steel and Timber structures

Scientific discipline: Structural health monitoring and assessment of structures

UDK number: 624.012.45:69.059.22(043.3)

T 220



POSVETA

Ovo istraživanje je posvećeno mojoj dragoj supruzi Milici i voljenoj deci Irini i Veljku, koji su mi bili konstantni izvor podrške tokom izazova sa kojima sam se susretao u radu. Takođe, uvek ću biti zahvalan svojim roditeljima Borku i Zagi za njihovo razumevanje, beskrajno strpljenje i podršku tokom svog života.



ZAHVALNOST

Na izradi ove doktorske disertacije pored samostalnog rada autora, veliku energiju i trud uložen je od strane većeg broja ljudi kojima se zahvaljujem ovom prilikom.

Veliku zahvalnost dugujem profesorki Tamari Nestorović koja mi je definisala temu istraživanja za izradu ove disertacije, usmeravala me u svom radu i pomagala pri izradi doktorske disertacije. Uz njenu pomoć realizovao sam sva eksperimentalna istraživanja i sve svoje istraživačke boravke u Bohumu. Pored stručnih saveta i pomoći koje sam imao tokom naših sastanaka, profesorka Tamara Nestorović mi je pomagala i u teškim situacijama kroz koje sam prolazio pri radu na disertaciji, zbog čega joj se puno zahvaljujem.

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru Prof. dr Dragoslavu Stojiću koji me je primio da radim na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu, usmeravao i podržavao. Osim konstantne podrške koju sam imao, kako stručnu tako i ljudsku, posebnu zahvalnost dugujem profesoru Stojiću za savete koje sam dobijao od njega a koji su za mene od izuzetne važnosti za moj dalji rad i karijeru.

Svoju zahvalnost dugujem docentu Miroslavu Marjanoviću sa Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu koji mi je pomogao pri numeričkom rešavanju problema dvodimenzionalne i trodimenzionalne lokalizacije oštećenja. Osim toga, tokom svih godina rada od njega sam dobijao prijateljsku podršku i iskrene savete.

Reči iskrene zahvalnosti dugujem i svojim kolegama, docentu Radovanu Cvetkoviću, dr Nenadu Stojkoviću i dr Nikoli Velimiroviću koji su mi pomagali tokom celokupnog svog rada svojim savetima, konkretnim delima i moralnom podrškom.

Veliko hvala dugujem i profesoru Rudigeru Heferu sa Ruhr Univerziteta u Bohumu, gde sam imao veći broj svojih istraživačkih boravaka. Pored stipendije koju sam dobio od SEEFORM programa profesor Rudiger Hefer mi je uvek izlazio u susret i omogućio boravak u Nemačkoj i nakon isteka stipendije.



Svoju zahvalnost dugujem i Laboratoriji za Građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, profesoru Zoranu Grdiću, profesorski Gordani Topličić-Ćurčić, dr Nenadu Ristiću, dr Dušanu Grdiću i kolegi Dejanu Krstiću, koji su mi pomogli u pripremi uzoraka za eksperimentalna istraživanja. Takođe, svoju zahvalnost dugujem i Laboratoriji za Adaptivnu mehaniku Ruhr Univerziteta u Bohumu u Nemačkoj, kolegama Miroslavu Trajkovu i Luan Ngujen-u, Atti Oveisi, Maksimilijanu Trap-u sa Ruhr Univerziteta u Bohumu u Nemačkoj.

Zahvaljujem se i svim drugim kolegama i kolegamicama, prijateljima i rođacima koji su me podržavali tokom svog rada. Veliku zahvalnost dugujem i svojim roditeljima Borku i Zagi, bratu Nikoli, supruzi Milici i svojoj deci Irini i Veljku, koji su me podržavali u svom radu.



Sadržaj

POGLAVLJE 1

1. UVOD

1.1. Pozadina i predmet istraživanja.....	19
1.2. Predmet i problem istraživanja.....	28
1.3. Struktura rada.....	29

POGLAVLJE 2

2. Teorijska pozadina istraživanja

2.1. Uvod	30
2.2. Piezoelektricitet i piezoelektrični senzori/aktuatori	30
2.3. 3-D propagacija talasa	37
2.4. Eksplicitna Metoda Konačnih Elemenata (EMKE)	43
2.5. Vejvlet dekompozicija signala	46

POGLAVLJE 3

3. Detekcija oštećenja kod linijskih betonskih konstrukcija

3.1. Piezoelektrični Pametni Agregati (PZT PA)	52
3.2. Monitoring.....	56
3.2.1. Monitoring na bazi vibracija	57
3.2.2. Monitoring na bazi elektromehaničke impedanse	57
3.2.3. Monitoring na bazi propagacije talasa	57
3.3. Princip detekcije oštećenja na bazi jednodimenzionalnog indeksa oštećenja	58
3.4. Jednodimenzionalni indeks oštećenja na bazi 1D RMSD DI	59
3.5. Primena 1D RMSD DI za detekciju linijskih betonskih elemenata	61
3.5.1. Eksperimentalna istraživanja	61
3.5.2. Numeričke simulacije.....	64
3.5.2.1. Numeričko modeliranje PZT PA aktuatora	65
3.5.2.2. Numeričko modeliranje propagacije talasa	71
3.5.3. Rezultati i diskusija	75
3.6. Parametarska analiza promene indeksa oštećenja	84
3.7. Zaključak	88



POGLAVLJE 4

4. Detekcija i lokalizacija oštećenja kod pločastih betonskih konstrukcija	
4.1. Uvod	90
4.2. Detekcija oštećenja kod pločastih betonskih konstrukcija	90
4.3. Hibridni algoritam za lokalizaciju oštećenja kod pločastih betonskih konstrukcija	93
4.3.1. Eksperimentalna verifikacija hibridnog algoritma za 2D lokalizaciju oštećenja	98
4.3.1.1. Određivanje Rejljevih koeficijenata prigušenja	104
4.3.2. Numeričko modeliranje propagacije talasa kod betonskih ploča	106
4.3.2.1. Modeliranje propagacije talasa upotrebom EMKE i ABAQUS/EXPLICIT	107
4.4. Rezultati i diskusija	110
4.5. Primena hibridnog pristupa za lokalizaciju materijalnih defekata	121
4.5.1. Eksperimentalna i numerička analiza lokalizacije materijalnih defekata	121
4.5.2. Rezultati i diskusija	123
4.6. Lokalizacija oštećenja kod pločastih betonskih elemenata proizvoljnog oblika	125
4.7. Zaključak	129

POGLAVLJE 5

5. Detekcija i lokalizacija oštećenja kod masivnih betonskih konstrukcija	
5.1. Uvod	131
5.2. Detekcija oštećenja kod 3D betonskih elemenata – primena 3D indeksa oštećenja	131
5.3. Primena 3D indeksa oštećenja – numerička simulacija	137
5.3.1. Numeričko modeliranje propagacije talasa kod 3D modela MP1-MP4	138
5.3.2. Rezultati i diskusija	140
5.4. Primena 3D DI za detekciju oštećenja kroz vreme	144
5.4.1. Rezultati i diskusija	146
5.5. Lokalizacija oštećenja kod prostornih betonskih elemenata pomoću hibridnog pristupa	149
5.5.1. Eksperimentalna merenja	152
5.6. Numerička simulacija	155
5.7. Rezultati i diskusija	157

POGLAVLJE 6

6. Zaključak	
--------------	--



REFERENCE.....	168
Prilog A.....	183
Prilog B.....	187
Prilog C.....	191



Popis slika

Slika 1.	Interdisciplinarna priroda monitoringa konstrukcija	19
Slika 2.	Glavne komponente MK sistema	21
Slika 3.	Glavni nivoi monitoringa konstrukcija	21
Slika 4.	Perovskit struktura piezoelektričnih materijala: a) Perovskit struktura pri temperaturama višim od Kirijeve temperature, b) Perovskit struktura pri temperaturama nižim od Kirijeve temperature	31
Slika 5.	Proces polarizacije: šematski prikaz polikristalne strukture feroelektričnih keramičkih materijala; a) pre polarizacije, b) tokom polarizacije, c) nakon polarizacije	31
Slika 6.	Histerezisna kriva piezoelektričnog materijala: a) zavisnost polarizacije P i električnog polja E, b) zavisnost dilatacije S i električnog polja E	33
Slika 7.	Longitudinalni (d_{33}) i transversalni (d_{31}) efekat aktuatora	34
Slika 8.	Longitudinalni (d_{33}) i transversalni (d_{31}) efekat senzora	34
Slika 9.	Z-invarijanta prostornog talasa	41
Slika 10.	Morletova Vejvlet funkcija u zavisnosti od parametara s i τ : Levo – realni deo Morletove Vejvlet funkcije; Desno – Furijeova transfor. Morletove Vejvlet funkcija	48
Slika 11.	Jednostepeni filter signala	49
Slika 12.	Algoritam brze diskretne vejvlet dekompozicije signala	50
Slika 13.	Algoritam diskretne vejvlet dekompozicije signala	51
Slika 14.	Glavne faze pri proizvodnji PZT PA: a) Sečenje PZT pločice iz veće ploče, b) Varenje (Lemljenje) 24/2 kabal za PZT pločicu, c) Fiksiranje električnog kabla za BNC konektor, d) Hidro zaštita PZT pločice, e) Fiksiranje PZT pločice za oplatu, f) Punjenje oplate cementnom pastom	53
Slika 15.	Primeri PZT PA: a) cementni PYT PA cilindričnog oblika, b) Mermerni kuboidni PZT PA, c) Struktura mermernog PZT PA	53
Slika 16.	Fiksiranje PZT PA unutar betonske konstrukcije: a) ugradnja PZT PA za drvenu oplatu AB grede [90], b-c) PZT PA fiksiran za armaturni koš	54
Slika 17.	Princip detekcije oštećenja na bazi propagacije talasa	59
Slika 18.	Izlazni signali senzora izmereni za neoštećene betonske uzorke SA1 i SA2	63
Slika 19.	Izlazni signali senzora izmereni za betonski uzorak SB1 sa različitom veličinom zareza	63
Slika 20.	Izlazni signali senzora izmereni za betonski uzorak SC1 sa različitom veličinom rupe	64
Slika 21.	Izlazni signali senzora izmereni za betonske uzorke SD1 i SD2 sa različitom materijalnom ispunom	64
Slika 22.	Numerička simulacija – primenjeni pristup modeliranju	65
Slika 23.	Geometrijske karakteristike modela PZT PA (dimenzije prikazane u mm)	66
Slika 24.	Rezultati modela PZT PA: a) Odnos između električnog napona $Q(V)$ i dilatacije U_z u kontrolnim tačkama; b) nedeformisani i deformisani model PZT PA urađen u ABAQUS/STANDARD	71
Slika 25.	Deformacija PZT PA: a) krive deformacije za različite vrednosti električnog napona; b) način aproksimacije pomer. pri modeliranju propagacije talasa u ABAQUS/EXPL	71
Slika 26.	Geometrijske karakteristike modela i eksperimentalnih uzoraka: a) uzorak SA i model MA; b) uzorci SB i modeli MB; c) uzorci SC i modeli MC; d) uzorci SD i modeli MD	75



Slika 27. Talasno polje za model MA izazvano pomoću PZT aktuatora u različitim vremenskim trenucima: (a) $t=1.61 \times 10^{-5}$ s, (b) $t=3.20 \times 10^{-5}$ s, (c) $t=6.40 \times 10^{-5}$ s, (d) $t=8.00 \times 10^{-5}$ s, (e) $t=1.12 \times 10^{-4}$ s, (f) $t=1.28 \times 10^{-4}$ s	76
Slika 28. Talasno polje za model MB3 izazvano pomoću PZT aktuatora u različitim vremenskim trenucima: (a) $t=1.61 \times 10^{-5}$ s, (b) $t=3.20 \times 10^{-5}$ s, (c) $t=6.40 \times 10^{-5}$ s, (d) $t=8.00 \times 10^{-5}$ s, (e) $t=1.12 \times 10^{-4}$ s, (f) $t=1.28 \times 10^{-4}$ s	76
Slika 29. Talasno polje za model MC3 izazvano pomoću PZT aktuat. u različitim vremenskim trenucima: (a) $t=1.61 \times 10^{-5}$ s, (b) $t=3.20 \times 10^{-5}$ s, (c) $t=6.40 \times 10^{-5}$ s, (d) $t=8.00 \times 10^{-5}$ s, (e) $t=1.12 \times 10^{-4}$ s, (f) $t=1.28 \times 10^{-4}$ s	77
Slika 30. Izlazni signal senzora za neoštećeni model MA	78
Slika 31. Izlazni signali senzora za modele sa zarezom (modeli MB2 i MB3)	78
Slika 32. Izlazni signali senzora za modele sa rupom (modeli MC2 i MC3)	79
Slika 33. Poređenje eksper. i numeričkih izlaznih signala senzora za neoštećenu gredu	80
Slika 34. Poređenje eksperimentalnih i numeričkih izlaznih signala senzora za betonske uzorke/modele sa različitim veličinama zarezova	80
Slika 35. Poređenje eksperimentalnih i numeričkih izlaznih signala senzora za betonske uzorke/modele sa različitim veličinama prečnika rupa	80
Slika 36. Vrednosti 1D RMSD DI: a) rezultati za uzorke SB1 i SB2 i model MB; b) Rezultati za uzorke SC1 i SC2 i model MC	81
Slika 37. Vrednosti 1D RMSD DI za uzorke SD1, SD2, SD3 i SD4 i modele MD1 i MD2	83
Slika 38. Normalizovane amplitude: a) uzorci i modelu sa zarezom i rupom; b) neoštećeni uzorci (modeli) i sa materijalnim defektom	83
Slika 39. Geometrijske karakteristike numeričkih modela za parametarsku analizu	85
Slika 40. Indeksi oštećenja za modele ME – položaj i veličina oštećenja su promenljive	86
Slika 41. Indeksi oštećenja za modele MF – nagib i veličina oštećenja u promenljive	86
Slika 42. Indeksi oštećenja za modele MG – položaj PZT PA i veličina oštećenja su varirani	87
Slika 43. Levo: Horizontalni PZT A/S pravci; Desno: Vertikalni PZT A/S pravci	91
Slika 44. Betonska ploča sa pod-domenima za proračun 2D indeksa oštećenja	92
Slika 45. a) Položaj PZT A/S i pravci između njih kod oštećene betonske ploče nepravilnog; b) podela betonske ploče na trouglove u smeru suprotnom od smera skazaljke na satu	93
Slika 46. Pravci PZT A/S (tanke sive linije – pravci koji ne zadovoljavaju sve kriterijume hibridnog algoritma, deblje crvene linije – pravci koji zadovoljavaju sve kriterijume), a) Model M5; b) Model M10	94
Slika 47. Delovi interpolacione ravni: (a) ravan $r'-k'-l'$, (b) ravan $r'-q'-k'$	96
Slika 48. Linearna interpolacija indeksa oštećenja DI unutar površi $q-r-k-l$	97
Slika 49. Algoritam za 2D lokalizaciju oštećenja pomoću hibridne procedure	97
Slika 50. Geometrija uzoraka/modela: uzorci SP1-SP3 i modeli M1-M3	99
Slika 51. Geometrija uzoraka/modela: Levo) uzorci SP4-SP6/ modeli M4-M6; Desno) uzorci SP7-SP9/ modeli M7-M9	99
Slika 52. Geometrija uzoraka/modela: Levo) uzorci SP10-SP12/ modeli M10-M12; Desno) uzorci SP13-SP15/ modeli M13-M15	100
Slika 53. Eksperimentalna postavka za hibridni PZT-Laser system skeniranja: levo – Pojačivač, generator talasa, PC kompjuter i hardver za ultrazvučni laser, desno – postavljen betonski uzorak na sto za izolaciju spoljašnjih vibracija zajedno sa PZT aktuatorom i glavom ultrazvučnog lasera	102
Slika 54. a) Eksperimentalna postavka za modele M13-M15, b) histogram i normalna distribucija maksimalne amplitude za model M2 pri položaju aktuatora A12 i senzor S2	104



Slika 55. Izlazni signal senzora za uzorke SP2 i SP5 pri položaju aktuatora A12 i senzora S2. Ulazni signal je skaliran koeficijentom 0.1	104
Slika 56. Talasno polje za model M5 izazvano pomoću PZT aktuatora u različitim vremenskim trenucima: (a) $t=5.0 \times 10^{-5}$ (s); (b) $t=7.0 \times 10^{-5}$ (s); (c) $t=1.0 \times 10^{-4}$ (s); (d) $t=1.4 \times 10^{-4}$ (s)	109
Slika 57. Numerički i eksperimentalni izlazni signali senzora za model M2 pri položaju aktuatora A12 i senzora S2	109
Slika 58. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M4	113
Slika 59. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M5	113
Slika 60. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M6	113
Slika 61. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M7	114
Slika 62. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M8	114
Slika 63. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M9	114
Slika 64. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M10	115
Slika 65. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M11	115
Slika 66. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M12	115
Slika 67. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M13	116
Slika 68. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M14	116
Slika 69. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M15	116
Slika 70. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP4; (b) Model M4; (c) Uzorak SP5; (d) Model M5; (e) Uzorak SP6; (f) Model M6	117
Slika 71. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP7; (b) Model M7; (c) Uzorak SP8; (d) Model M8; (e) Uzorak SP9; (f) Model M9	118
Slika 72. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP13; (b) Model M13; (c) Uzorak SP14; (d) Model M14; (e) Uzorak SP15; (f) Model M15	119
Slika 73. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP13; (b) Model M13; (c) Uzorak SP14; (d) Model M14; (e) Uzorak SP15; (f) Model M15	120
Slika 74. Eksperimentalna postavka za hibridni PZT-Laser system skeniranja za modele sa materijalnim nepravilnostima: levo – Eksperimentalna oprema, desno: Uzorci S2 i S3 sa ispunom od gline	122
Slika 75. Geometrija uzoraka / modela: Levo - uzorci SP2 i SP4 i modeli M2 i M4; Desno - uzorci SP3 i SP5 i modeli M3 i M5	122
Slika 76. Talasno polje izazvano pomoću PZT aktuatora A3 u različitim vremenskim trenucima: Levo – Model M2; Desno – Model M3	123
Slika 77. Lokalizacija oštećenja pomoću hibridnog pristupa za uzorke S2 i S3 i modele M2 i M3	124
Slika 78. Lokalizacija oštećenja pomoću hibridnog pristupa za uzorke S4 i S5 i modele M4 i M5	125
Slika 79. Geometrija modela i položaj PZT A/S: levo – Model MAR1, sredina – Model MAR2, desno – Model MAR3	126
Slika 80. 3D modeli pripremljeni u CAD softveru: levo: model sa 1 oštećenjem; desno: model sa dva oštećenja	126
Slika 81. „Isosurface contour plot“ prikaz talasnog polja za model MAR1 izazvanog pomoću PZT aktuatora A1 u različitim vremenskim trenucima	128
Slika 82. Lokalizacija oštećenja pomoću hibridnog pristupa za modele sa proizvoljnim oblikom: Levo - Model MAR2; Desno - Model MAR3	129
Slika 83. Diskretizacija betonskog tela proizvoljnog oblika pomoću ortogonalnih ravni	132
Slika 84. Definicija pod-domena proizvoljnog betonskog tela	133
Slika 85. Presečni pravci za ravan ZY	133



Slika 86. Geomet. modela za detek. oštećenja pomoću 3D DI: levo – model MP1; desno – model MP2.....	137
Slika 87. Geomet. modela za detek. oštećenja pomoću 3D DI: levo – model MP3; desno – model MP4.....	138
Slika 88. Talasno polje za model MP4 izazvan pomoću PZT aktuatora pri različitim vremenskim tranucima: (a) $t=2.50 \cdot 10^{-5}(s)$, (b) $t=5.00 \cdot 10^{-5}(s)$, (c) $t=7.50 \cdot 10^{-5}(s)$, (d) $t=8.00 \cdot 10^{-5}(s)$	139
Slika 89. Rezultati 3D DI: levo – Model MP1; desno – model MP2.....	140
Slika 90. Rezultati 3D DI: levo – Model MP3; desno – model MP4.....	141
Slika 91. Modeli MT1, MT2, MT3 i MT4.....	145
Slika 92. Rezultati 3D DI: levo - model MT2; desno – model MT3.....	146
Slika 93. Rezultati 3D DI: levo - model MT4; desno – ukupni indeks oštećenja i komponente 3D DI za pod-domene.....	147
Slika 94. Hibridni pristup za 3D lokalizaciju oštećenja prostornog betonskog tela.....	151
Slika 95. Priprema eksperimentalnog uzorka za merenje i merenje laserom.....	153
Slika 96. Eksperimentalna merenje na uzorku M2.....	154
Slika 97. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M1.....	155
Slika 98. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M2.....	156
Slika 99. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M3.....	156
Slika 100. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M4.....	157
Slika 101. 3D lokalizacija za model M2.....	158



Popis Tabela

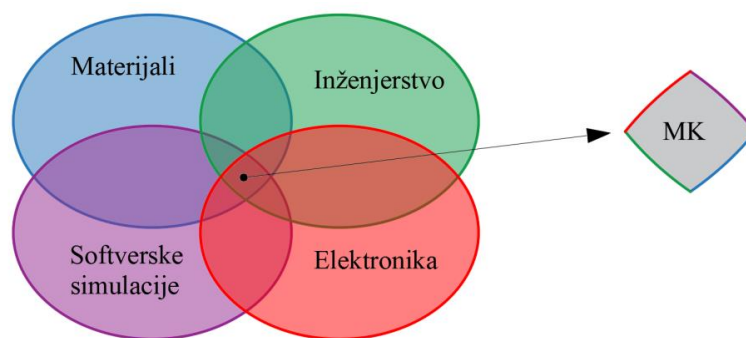
Tabela 1. Karakteristike eksperimentalnih uzoraka	61
Tabela 2. Materijalne karakteristike PZT pločice za MKE analizu	70
Tabela 3. Karakteristike numeričkih modela	73
Tabela 4. Materijalni model betonske grede	73
Tabela 5. Vrednosti indeksa oštećenja za eksperimentalnu i numeričku analizu	82
Tabela 6. Karakteristike numeričkih modela – Parametarska analiza	84
Tabela 7. Vrednosti indeksa oštećenja – Parametarska analiza	88
Tabela 8. Karakteristike eksperimentalnih betonskih uzoraka	98
Tabela 9. Odnos ugrađenih sastojaka primenjenog betona	99
Tabela 10. Zapremnska težina eksperimentalnih uzoraka	101
Tabela 11. Normalna distribucija i test normalnosti	103
Tabela 12. Materijalni model betona sa Rejljevom koeficijentom prigušenja	107
Tabela 13. Modeli za MKE konvergenciju veličine konačnog elementa	108
Tabela 14. Opis eksperimentalnih uzoraka i numeričkih modela	121
Tabela 15. XY koordinate PZT aktuatora/senzora	126
Tabela 16. Karakteristike numeričkih modela MP1-MP4	138
Tabela 17. Vrednosti 3D DI vektora i ukupnog indeksa oštećenja – Modeli MP1 i MP2	140
Tabela 18. Vrednosti 3D DI vektora i ukupnog indeksa oštećenja – Modeli MP3 i MP4	143
Tabela 19. Geometrija oštećenja kod numeričkih modela MT1-MT4	144
Tabela 20. Vrednosti vektora 3D DI i ukupnog indeksa oštećenja – Modeli MP1 i MP2	148
Tabela 21. Zapremnska težina eksperimentalnih uzoraka za 3D lokalizaciju	152
Tabela 22. Voigtova notacija	183
Tabela 23. Pretvaranje tenzorskih indeksa u matricne	183
Tabela 24. Odnosi između konstanti	184
Tabela 25. Definicija i opis simbola primenjenih u konstitutivnim piez. jednačinama	185

1. UVOD

U ovom delu disertacije prikazan je kratak pregled literature sa trenutnim stanjem nauke iz oblasti koju disertacija obuhvata. Najpre, u pozadini i pregledu istraživanja prikazane su opšte definicije monitoringa konstrukcija, vrste monitoringa, kao i pregled metoda za detekciju, lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja kod linijskih, površinskih i prostornih betonskih konstrukcija. Ukazano je na prednosti i mane pomenutih metoda, kao i na trenutne nedostatke u naučnoj oblasti. Nakon toga, prikazan je predmet i problem istraživanja dok je na kraju priložena struktura rada.

1.1. Pozadina i pregled istraživanja

Monitoring Konstrukcija (MK) predstavlja integraciju senzora i po potrebi aktuatora u cilju detektovanja, analiziranja, lokalizovanja i predviđanja različitih uticaja i oštećenja na konstrukciju na način da nedestruktivno ispitivanje i procena (NDI/P) postaju sastavni deo konstrukcije i materijala [1]. Takođe, MK implementira senzore i aktuatora, pametne materijale, prenos podataka i kompjutersko-softverske potencijale sa konstrukcijom u cilju da detektuje, lokalizuje, kvantifikuje i procenjuje oštećenje koje može uticati na kolaps konstrukcije u datom trenutku ili kroz vreme [2,3]. Monitoring konstrukcija je interdisciplinarna naučna oblast (Slika 1) sa primenom, između ostalog, u avio industriji [4-7], građevinarstvu [8-12], mašinstvu [13,14] i brodogradnji [15-17].



Slika 1. Interdisciplinarna priroda monitoringa konstrukcija

Metode MK obuhvataju tri veoma važna elementa za detekciju oštećenja: 1) poznavanje konstrukcije koja se posmatra i moguće scenarije oštećenja; 2) senzore i opremu koja se koristi za dobijanje signala/podataka koji se kasnije koriste za detekciju oštećenja; i 3) relevantnu analizu na osnovu koje se mogu dobiti informacije o potencijalnim oštećenjima i celokupnom integritetu konstrukcije [18]. Numeričko modeliranje, softverske simulacije i analiza podataka su veoma važni za ove tri aktivnosti detekcije oštećenja. Primena odgovarajućeg MK sistema zavisi od tipa

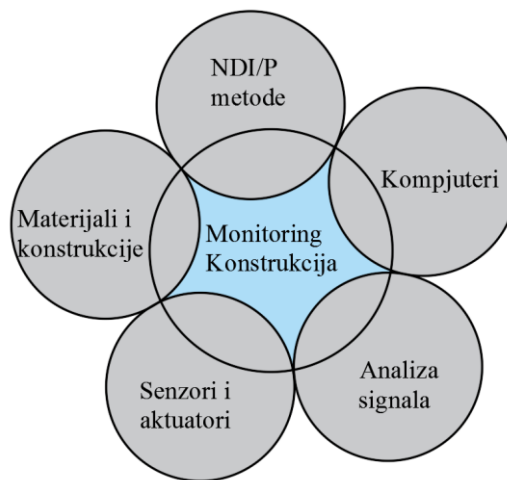


konstrukcije koji se posmatra, vrste očekivanih oštećenja, dostupnosti konstrukcije i starosti konstrukcije (novosagrađene ili je određen period u upotrebi). U zavisnosti od kompleksnosti problema trenutni MK sistemi i NDI/P metode mogu u potpunosti ili delimično da ispune projektovane uslove. Naravno, ukoliko se monitoring konstrukcija radi na novim objektima onda je procenat uspešnosti znatno veći u odnosu na stare objekte kod kojih je početno stanje oštećenosti konstrukcije teško merljivo. Jedan klasični sistem MK sastoji se iz sledećih komponenti (Slika 2): a) NDI/P metode; b) konstrukcije; c) senzora i aktuatora; d) analiza signala; e) kompjutera (hardver i softver).

MK može se podeliti u šest glavnih nivoa (Slika 3): I) Detekcija oštećenja; II) Lokalizacija oštećenja; III) Kvantifikacija oštećenja; IV) Procena oštećenja; V) Prognoza preostalog životnog veka konstrukcije; i VI) “Pametne” konstrukcije (sa sposobnošću samoprocene, samoisceljenja i kontrole) [18]. Detekcija oštećenja daje odgovor na pitanje: Da li oštećenje postoji ili ne?; Lokalizacija oštećenja definiše položaj oštećenja, dok Kvantifikacija oštećenja određuje njegovu veličinu, oblik i orijentaciju. Procenom oštećenja vrši se predviđanje pojave oštećenja i daljeg prostiranja, a prognoza preostalog životnog veka predviđa dalji upotrební vek konstrukcije do neophodne sanacije ili kolapsa. Prva tri nivoa spadaju u grupu identifikacije sistema, dok četvrti i peti nivo povezan je sa prognostikom stanja, pouzdanošću, metodama procene, mehanikom loma i analizom zamora. Poslednji nivo sumira sve prethodne nivoe u jedan formirajući “pametnu” konstrukciju. U opštem smislu MK se može podeliti na aktivni i pasivni monitoring konstrukcija. Pasivni MK podrazumeva primenu senzora i merenje podataka o ponašanju konstrukcije usled spoljašnjih uslova. Za razliku od pasivnog MK, aktivni monitoring podrazumeva primenu senzora i aktuatora. Pomoću aktuatora moguće je izazvati u konstrukciji propagaciju talasa na lokalnom nivou i na osnovu senzora pratiti stanje. Aktivni sistemi monitoringa konstrukcija pružaju širi okvir delovanja i daju veći prostor donosiocima odluka. Podaci dobijeni monitoringom konstrukcija treba da daju dovoljno pouzdanih i merljivih podataka na osnovu kojih je moguće doneti odluke o sledećim parametrima konstrukcije: a) definisanje stanja konstrukcije, b) preostali životni vek i c) trenutak potencijalnih sanacija.

Konstrukcije u građevinarstvu se projektuju da zadovolje kriterijume sigurnosti, pouzdanosti, trajnosti, upotrebljivosti i održivosti kroz upotrební vek konstrukcije. Da bi se zadovoljili svi ovi kriterijumi neophodno je da se raspolaže pouzdanim podacima na osnovu kojih je moguće što tačnije definisati karakteristike materijala, realne intenzitete dejstava i druge uticaje tokom

eksploatacionog veka objekta. Nedovoljan broj ulaznih podataka pri proračunu konstrukcije rezultira povećanjem parcijalnih koeficijenata sigurnosti za materijale i dejstva. Unapređenjem metoda MK može se doći do neophodnih podataka, što dalje može doprineti smanjenjem parcijalnih koeficijenata sigurnosti i projektovanju ekonomski jeftinijih konstrukcija. Na Slici 3 prikazane su faze monitoringa konstrukcija od početnih faza detekcije i lokalizacije oštećenja do finalnih faza koju čine pametne konstrukcije.

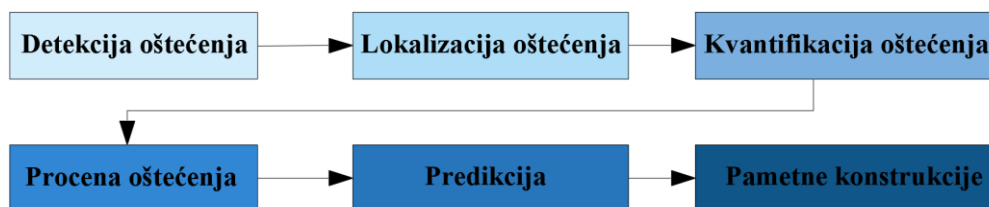


Slika 2. Glavne komponente MK sistema

U oblasti monitoringa konstrukcija oštećenje predstavlja prekid kontinuuma materijala koji se može pojaviti kao imperfekcija, defekt ili prslina koje dovode do popuštanja (otkazivanja) odnosno do promene u funkcionalnim i eksploatacionim karakteristikama konstrukcije. Nešto preciznija definicija oštećenja može se uraditi ako se ono posmatra pri analizi sistema. Konstrukcija se u tom smislu može modelirati kao sistem kod koga je ulaz pobuda konstrukcije a izlaz izmereni signali. U tom smislu oštećenje se može posmatrati kao dodatni izvor pobude konstrukcije koji dovodi do promene energije sistema prouzrokujući promenu u izlaznim signalima [18]. U najopštijem smislu, oštećenje se može shvatiti kao promena nastala u konstrukciji koja utiče na trenutnu ili buduću funkcionalnost objekta ili pojedinačnog elementa konstrukcije. U tom smisli, oštećenje razdvaja dva stanja konstrukcije: 1) početno stanje, koje se često smatra neoštećenim (u generalnom smislu nije uvek slučaj) i 2) oštećeno stanje konstrukcije [19]. Posebni izazov je detekcija, lokalizacija i kvantifikacija početnih oštećenja a posebno prslina kao najčešći vid oštećenja kod betonskih konstrukcija. Prslina se može posmatrati kao nastali materijalni diskontinuitet konstrukcije i posledica je najčešće lokalnog materijalnog loma. Najopštija podela prslina je na dva glavna tipa: glavne i sekundarne prsline [20]. Najčešće, prsline betona koje zahtevaju veću pažnju



su one koje imaju otvor od 0.05mm do 0.1mm, dok prslina sa otvorima od 0.3mm do 0.4mm predstavljaju veliki problem konstrukciji i vrlo lako mogu propagirati do velikih otvora od nekoliko centimetara što često rezultira lomom konstrukcije [21]. Na osnovu pravca prostiranja prslina, nastanka i položaja, u grednim elementima mogu se javiti sledeće vrste prslina [22]: i) *transverzalne (vertikalne) prslina* – prostiru se upravno na pravac pružanja grednog elementa i direktno utiču na smanjenje nosivosti grednih elemenata; ii) *longitudinalne (horizontalne) prslina* – su one koje se prostiru paralelno pravcu pružanja betonskih greda i nisu česta pojava u realnim konstrukcijama; iii) *kose prslina* – prostiru se pod uglom u odnosu na pravac pružanja grede i utiču na smanjenje nosivosti na torziju; iv) *trenutne prslina* – ove prslina se otvaraju kada je element opterećen na zatezanje i zatvaraju se kada se javi pritisak; v) *trajne prslina* – takođe se zovu i zarezi i ostaju otvorene i ne zatvaraju se; vi) *površinske prslina* – javljaju se na površini i mogu se detektovati vizuelnom inspekcijom (osim za nepristupačne delove konstrukcije); i vii) *unutrašnje prslina* – prostiru se unutar betonskih elemenata i mogu se detektovati pomoću metoda na bazi prostiranja talasa.



Slika 3. Glavni nivoi monitoringa konstrukcija

Oštećenja u betonskim konstrukcijama mogu nastati usled velikog broja različitih dejstava: a) spoljašnje mehaničko opterećenje, b) zamor, c) usled fizičkih procesa kao što su ciklusi smrzavanja-odmrzavanja, d) usled skupljanja, e) temperaturnih promena, f) zatim hemijskih procesa kao što je alkalno-silikatna reakcija, uticaj sulfata, i g) usled korozije. Same prslina nastale usled mehaničkog uticaja mogu se razlikovati prema mehanizmima nastanka na: a) prslina usled prekoračenja spoljašnjeg statičkog ili dinamičkog opterećenja; b) pojava prslina usled ponovljenog ili cikličnog opterećenja (nisko ili visoko-ciklični zamor) i c) prslina nastale usled pojave koncentracije napona. Tok propagacije prslina do loma konstrukcije može se razdvojiti na sledeća tri stanja: 1) *nastanak prslina* – u ovom stanju konstrukcije prslina su često nevidljive golim okom i imaju otvor manji od 100 μ m; 2) *propagacija prslina* – pri ovom stanju prslina propagiraju u određenom pravcu i imaju otvor obično oko 0.30-0.40mm; 3) *stanje loma* – kada prslina dostignu kritičnu vrednost i njihova



propagacija ide bez prestanka do loma. Obzirom na veliki broj različitih uzroka oštećenja, tipova i oblika oštećenja koje se mogu javiti u betonskim konstrukcijama, postoji jasan motiv i izazov da se unaprede postojeće i razviju nove metode za detekciju, lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja.

Za detekciju oštećenja građevinskih objekata postoje sledeće metode MK: 1) metode na bazi vibracija [23-24]; 2) metode na bazi primene ultrazvučnih talasa [25-27]; na bazi električne impedanse [28-29]; vrtložne struje (eddy current - EC) [30]; impuls eho [31-32]; akustične emisije [33]; na bazi termalnih slika [34]; i na bazi analize digitalnih fotografija [35-37]. Metode MK na bazi vibracija baziraju se na merenju odgovora konstrukcije usled izazvanih nisko-frekventnih vibracija koristeći najčešće akcelerometar. Ove metode prate promenu oblika oscilovanja konstrukcije i globalnog su karaktera, zbog čega imaju slabu osetljivost na detekciju oštećenja malih dimenzija. Metode na bazi impedanse prate pojavu oštećenja konstrukcije na osnovu promene mehaničke impedanse posmatrane konstrukcije. Pomoću PZT aktuatora vrši se pobuda konstrukcije u visoko-frekventnom domenu i prati promena impedanse, pri čemu postoji direktna zavisnost između mehaničke impedanse konstrukcije i električne impedanse PZT senzora/aktuatora. Metode na bazi vrtložnih struja baziraju se na promenama magnetnih polja na osnovu Faradejevog zakona. U detekciji oštećenja često se koristi impuls EC (IEC) termografija koja kombinuje IEC i tehnike nedestruktivnog termografskog ispitivanja (TNDI). Ove metode MK koriste vrtložne struje da zagreju materijal i onda na osnovu infracrvenih kamera mogu se uočiti nepravilnosti odnosno oštećenja u samom materijalu [38]. Impuls eho metode se baziraju na upotrebi kratkih mehaničkih pobuda konstrukcije koji generišu propagaciju mehaničkih talasa koji se zatim putem senzora detektuju na površini kao direktni ili reflektovani talasi [39]. Za razliku od metoda na bazi ultrazvučnih talasa, impuls eho metode karakteriše mogućnost oslobađanja znatno veće energije izazvane mehaničkim udarom, što u nekim situacijama može biti od značaja. Akustične emisije (AE) je pojava prostiranja akustičnih talasa u konstrukciji usled promene stanja unutar konstrukcije, najčešće izazvano pojavom prslina. AE koristi prostiranje talasa koje nastaje usled nukleacije i propagacije prslina i na osnovu detekcije tih talasa moguće je praćenje stanja betonskih konstrukcija u realnom vremenu [40]. Infracrvena Termografija (ICT), je takođe jedan vid formiranja termalnih slika, koristi infracrveni spektar da detektuje razlike u rasipanju toplote u konstrukciji korišćenjem termalnih kamera. Jednostavnije, kada se konstrukcija zagreje od spoljašnjeg izvora kao što je na primer sunce, spoljašnja temperatura, trenje ili neki drugi toplotni izvor, onda konstrukcija emituje radijaciju u infracrvenom opsegu elektromagnetnog spektra koji je moguće detektovati termografskim kamerama [41]. I konačno, metode na bazi digitalnih slika (DIS) koristi analizu



digitalnih slika urađenih kamerama visokih rezolucija. Detekcija oštećenja ili propagacije oštećenja kroz vreme, ovom metodom sprovodi se na osnovu praćenja promene fotografije na nivou piksela. DIS obzirom na ubrzani razvoj rezolucije kamera i metoda za analizu fotografije ima rastući trend upotrebe u monitoringu konstrukcija, ali je ipak limitirana na površinska oštećenja koja su dostupna kameri.

Veliki broj metoda MK bazirano je na upotrebi usmerenih talasa – guided waves (UT). Glavne prednosti metoda na bazi usmerenih talasa su sledeće: (a) senzori/aktuatori su obično veoma jeftini, lako se mogu ugraditi u konstrukciju i male su težine; (b) poseduju mogućnost praćenja velike površine uz mali broj senzora; (c) imaju mogućnost korišćenja visokih frekvenca i praćenje pojave oštećenja u istom trenutku; (d) prigušenje nema toliko veliki uticaj na ove metode kao kod niskofrekventnih metoda na bazi vibracija [42]. U laboratorijskim uslovima MK metode na bazi usmerenih talasa pokazale su se kao pouzdane i efikasne za upotrebu, međutim, primena kod realnih kompleksnih sistema sa složenim slikama oštećenja zahtevaju posebnu pažnju. Urađena su različita istraživanja u cilju detektovanja realnih kompleksnih sistema. Na primer, urađena su istraživanja uticaja položaja senzora na propagaciju talasa i detekciju oštećenja što je prikazano u radu [43]. Zaključeno je da broj i položaj optimalne mreže senzora direktno utiče na pouzdanost i tačnost detekcije i lokalizacije oštećenja na bazi usmerenih talasa. Sledeći primer primene UT MK sistema urađen je za kompozitnu noseću konstrukciju aviona u realnim dimenzijama [44]. Drugi problem u praćenju stanja konstrukcija je uticaj sredine i spoljašnjih uslova. U istraživanju [45] analizirani su piezoelektrični senzori u veoma teškim uslovima kao što su veoma visoke temperature i radijacija, kao i primena aktivnih i pasivnih sistema monitoringa u ovim uslovima. Zaključeno je da ne postoje značajne promene u mikrostrukturi PZT senzora nakon što su izloženi visokim temperaturama i radijaciji, kao i da aktivne metode MK su uspešno primenjene na detekciji simuliranih prslina i korozije. Većina UT metoda za detektovanje oštećenja zahteva početno (nulto) čitanje. Kao poseban zahtev u MK traga se za metodama koje mogu detektovati oštećenje bez početnog čitanja što je neophodno u većini praktičnih situacija. Ovaj vid tehnika je uspešno primenjen u kombinaciji sa „pitch-catch“ PZT parovima, za detekciju i lokalizaciju oštećenja [46]. Za praktičnu primenu UT MK metoda neophodna je i numerička simulacija: (1) propagacije talasa, (2) nastanka oštećenja usled različitih kombinacija opterećenja i drugih faktora, (3) propagacije oštećenja i (4) detekcije oštećenja, u cilju izrade što optimalnijih MK sistema. Modeliranje Lamb talasa kod čeličnih greda primenom ABAQUS/EXPLICIT programa prikazano je u radu [47]. Modeliranje propagacije talasa kod čeličnih ili aluminijumskih konstrukcija je znatno jednostavnije u odnosu na betonske zbog



njihove homogene strukture. 3D simulacija propagacije talasa u cementnim pastama uzimajući u obzir efekat poroznosti prikazan je u [48]. Takođe, osim numeričke simulacije propagacije talasa radi detekcije prslina u betonskim elementima, urađeni su i numerički modeli simulacija UT MK metoda za detekciju prijanjanja betona i armature u armirano betonskim konstrukcijama [49-50].

Ova disertacija obuhvata primenu i razvoj metoda MK do prva tri nivoa (detekcija, lokalizacija i kvantifikacija oštećenja). Posmatrano iz ugla MK, betonske konstrukcije mogu se podeliti na linijske, površinske i prostorne, i u tom smislu biće prikazan kratak pregled SHM metoda za ove tipove konstrukcija. Detekcija oštećenja usled kvazi-statičkog opterećenja kod betonskih grednih elemenata na bazi propagacije talasa izazvanih PZT aktuatorima urađena je u velikom broju istraživanja, od kojih su izvojeni [51-52]. Utvrđeno je da je pomoću indeksa oštećenja (DI) na bazi kvadratnog korena srednjih odstupanja (RMSD) moguće detektovati nastanak oštećenja unutar betonskih linijskih elemenata (grede i stubovi), kao i dalje prostiranje oštećenja. Osim statičkog opterećenja, urađena su istraživanja na zahtevnijim situacijama kao što su dinamički uticaji usled zemljotresa. U laboratorijskim uslovima primenom seizmičkog stola ili dinamičkih hidrauličkih presa testirani su armiranobetonski (AB) stubovi [53-55] i ramovi [56]. Slično tome, testirani su AB stubovi na uticaj eksplozija [57]. Prsline nastale usled eksplozije u betonskom elementu utiču na smanjenje energije prostiranja talasa što je detektovano na osnovu vejevlet „paket“ indeksa oštećenja. Osim, klasičnog armiranog betona, detektovano je oštećenje i kod FRP-armirano betonskih greda [58], BFRP AB greda [59] korišćenjem piezoelektričnih pametnih agregata (PZT PA). Kvantifikacija oštećenja kod betonskih grednih elemenata urađena je na osnovu indeksa oštećenja na bazi vejevlet dekompozicije signala i primenom PZT PA [60]. U ovoj disertaciji urađena je detekcija i kvantifikacija oštećenja primenom RMSD DI. Ovaj indeks oštećenja za detekciju kod betonskih konstrukcija pokazao se kao veoma pouzdan i primenjiv u realnim uslovima.

Za razliku od linijskih elemenata, detekcija površinskih betonskih konstrukcija je nešto komplikovanija. Metode MK i NDI/P za detekciju površinskih konstrukcija u najvećoj meri razvijene su za čelične, aluminijumske i kompozitne konstrukcije. Neke od tih metoda su primenjive i za betonske konstrukcije, ali treba imati u vidu i specifičnosti betonskih površinskih elemenata kao što su: 1) nehomogena struktura materijala, 2) ne mala debljina ploča (gotovo je nemoguće korišćenje Lamb talasa), 3) pojava i struktura oštećenja je znatno komplikovanija u odnosu na čelične elemente i drugo. Osim RMSD indeksa oštećenja koji se uobičajno koristi za



monitoring betonskih površinskih elemenata, primenjen je i 2-D statistički indeks oštećenja [61]. RMSD DI je primenjen i za detekciju oštećenja usled udarnog opterećenja kod AB konstrukcija korišćenjem višestrukih konfiguracija piezoelektričnih senzora [62]. Uobičajno kod površinskih konstrukcija neophodna je primena PZT mreže senzora za detekciju i kvantifikaciju oštećenja [63]. Dvodimenzionalni indeks oštećenja na bazi RMSD 1D indeksa oštećenja primenjen je za detekciju oštećenja kod betonskih ploča sa jednim ili više oštećenja i u ovom istraživanju. Analizirani su različiti slučajevi položaja aktuatora/senzora, zatim oblik, položaj i broj oštećenja za koje je sračunat 2D indeks oštećenja.

Lokalizacija oštećenja za površinske (dvodimenzionalne) konstrukcije urađena je na veliki broj različitih načina uglavnom za avio industriju na kompozitnim, čeličnim ili aluminijumskim panelima. Korišćeni su različiti alati i njihove kombinacije u cilju pronalaska MK metode koja može lokalizovati oštećenje u praktičnim uslovima. Prve metode koristile su rekonstrukciju signala dobijenih na osnovu prihvatanja dolaznog UT uz pomoć PZT senzora [64]. Pri analizi signala vrlo često se koristi vreme prostiranja talasa (time of flight - ToF) i kašnjenje i suma (delay and sum - DAS) kao kriterijumi za izradu algoritama na osnovu kojih se dobija položaj oštećenja. Jedan od takvih istraživanja koristi razliku u vremenu prostiranja talasa (TDOA) i DAS u kombinaciji za lokalizovanje oštećenja kod betonskih konstrukcija [65]. Takođe, tehnika za formiranje slika oštećenja na bazi lokalnih faznih razlika brzina prostiranja talasa uspešno je korišćena upotrebom transverzalnih talasa za lokalizaciju materijalnih imperfekcija [66]. Takođe, razvijen je metod za kreiranje slika oštećenja kod kompozitnih ploča u avio industriji korišćenjem filtera prostornih talasnih karakteristika za panele sa većim brojem oštećenja. U njihovom istraživanju analizirani su različiti slučajevi položaja i orijentacije oštećenja i uspešno su detektovani korišćenjem linearnih i drugih oblika PZT mreža [67]. Druga istraživanja su podrazumevala upotrebu pod-domen identifikacije i dijagnostiku na bazi probablističkih metoda [68], kao i dekompoziciju UT u posebnom domenu i upotrebom posebnih algoritama za lokalizaciju i procenu oštećenja [69]. Preciznost metoda u lokalizaciji i kvantifikaciji oštećenja varira od visoko preciznih do onih koje mogu samo da odrede zonu gde se oštećenje nalazi. Pojedine metode su limitirane za detekciju samo jednog oštećenja, druge imaju određene „slepe zone“, dok treće „boluju“ od loše preciznosti i kvaliteta dobijenih slika oštećenja. U prevazilaženju ovih problema razvijena je metoda za dobijanje slika oštećenja visokih rezolucija korišćenjem disperzione kompenzacije i nelinearne fuzije podataka [70] i primenjena je za slučajeve lokalizacije panela sa četiri oštećenja. RAPID (Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage) algoritam, je razvijen pre



nekoliko godina, i omogućuje detektovanje i lokalizovanje oštećenja kod metalnih i kompozitnih ploča [71]. Osim toga, mogu se izdvojiti i sledeće metode za lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja: a) mašinsko učenje na bazi složenih enkodera [72], b) metode MK bez početnog čitanja koje se temelje na principu reciprociteta [73] i c) bezkontaktne laserske ultrazvučne metode skeniranja zasnovane na binarnoj pretrazi [74]. U ovom istraživanju (disertaciji) na betonskim kvadratnim pločama razvijen je hibridni metod za lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja pločastih betonskih elemenata koji kombinuje vejevlet signal decompoziciju, ToF kriterijum i energetski pristup baziran na RMSD indeksu oštećenja.

Sledeći nivo MK metoda podrazumeva prostorno (3D) detektovanje, lokalizovanje i kvantifikovanje oštećenja unutar betonskih elemenata konstrukcije. Obzirom da su betonske konstrukcije često veoma masivne, pogotovu za kapitalne i infrastrukturne objekte koji su od velikog značaja za državu i društvo, javlja se jasan motiv razvoja novih metoda koje mogu odgovoriti na ove zahteve. Imajući u vidu da veoma često prostorna slika prslina je izuzetno geometrijski komplikovana i sastoji se od velikog broja prslina različitih dimenzija, nepravilnih prostornih orijentacija, što razvoj metoda za 3D lokalizaciju oštećenja znatno komplikuje. Trenutno, u dostupnoj relevantnoj literaturi gotovo da nema istraživanja koja su dala metode za prostorno lokalizovanje realnih prslina u betonskom elementu. Čak šta više, gotovo da ne postoje metode koje su koncipirane na veštački kreiranim oštećenjima unutar betonskih elemenata, što je znatno jednostavniji problem sa aspekta lokalizacije oštećenja. Imajući u vidu trenutno stanje nauke u ovoj oblasti javlja se jasna potreba za razvojem metoda za 3D detekciju, lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja. Među retkim istraživanjima može se izvojiti primena Locadif tehnike na difuznom ultrazvuku upotrebljenog na vazдушnom tunelu za lokalizaciju i karakterizaciju tri prethodno napravljene prslina u konstrukciji [75]. Kao i PZT mrežni MK metod baziran na merenju elektromehaničke impedanse [76]. 3D detekcija oštećenja u stenama je veoma uspešno urađena primenom opšte dinamike čestica. Ovim pristupom izvedena je realna evaluacija procesa lokalizacije oštećenja kod prizmatičnih uzoraka izloženih stvarnim troosnim opterećenjima na pritisak [77]. Slični pristupi se mogu primeniti i na betonske elemente zbog sličnog mehanizama loma. U ovoj disertaciji izveden je 3D indeks oštećenja na osnovu koga je moguće detektovanje oštećenja unutar prostornih pod-domena. 3D DI baziran je na 1D RMSD indeksu oštećenja i 3D PZT aktuator/senzor mreži. Takođe, za lokalizovanje oštećenja razvijen je 3D hibridni metod baziran na istim kriterijumima kao kod 2D betonskih elemenata. Pomenuti pristupi su razvijeni za opšti oblik betonskog elementa i



položaj PZT senzora i verifikovani su na prizmatičnim betonskim modelima/uzorcima putem numeričkih simulacija i eksperimentalnih merenja.

1.2. Predmet i problem istraživanja

Do sada monitoring betonskih konstrukcija urađen je u najvećoj meri primenom jednodimenzionalnih ili dvodimenzionalnih indeksa oštećenja. Urađena su opširna, pre svega eksperimentalna istraživanja, na osnovu kojih je dokazano da se primena piezoelektričnih pametnih agregata u monitoringu betonskih konstrukcija može veoma efikasno primeniti u detekciji oštećenja kod betonskih konstrukcija primenom RMSD indeksa oštećenja. Međutim, lokalizacija oštećenja kod betonskih pločastih elemenata konstrukcije gotovo da nije zastupljena u relevantnoj literaturi, za razliku od čeličnih ili kompozitnih konstrukcija. Uspešno testirane metode za lokalizaciju oštećenja kod metalnih ili kompozitnih konstrukcija do sada su nedovoljno primenjene na betonskim konstrukcijama uzimati u obzir specifičnosti betona kao materijala i specifičnosti betonskih konstrukcija. Osim toga, prostorna detekcija i lokalizacija oštećenja u prostoru betonskih konstrukcija je veoma slabo istražena. Obzirom da su betonske konstrukcije u suštini masivne konstrukcije, prostorna detekcija i lokalizacija oštećenja je od suštinskog značaja za praćenje stanja ovih konstrukcija.

Predmet istraživanja u ovoj disertaciji je razvoj i unapređenje metoda za detekciju i lokalizaciju oštećenja kod betonskih konstrukcija. Ovim istraživanjem pokušano je da se odgovori na zahteve monitoringa i NDI/P konstrukcija kao i da se umani trenutni nedostatak u metodama za praćenje stanja betonskih konstrukcija. Istraživanjem su dati numerički postupci modeliranja detekcije oštećenja kod linijskih AB elemenata počevši od modela PZT PA pa dalje ka modelima propagacije talasa. Urađena je verifikacija numeričkih modela na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata, kao i parametarska analiza promene RMSD indeksa oštećenja u odnosu na pojedine parametre. Za pločaste betonske elemente urađena je detekcija primenom postojećeg dvodimenzionalnog indeksa oštećenja primenom numeričkih simulacija. Za potrebe lokalizacije oštećenja razvijen je hibridni metod na bazi energetske pristupa, vremena prostiranja dolaznog talasa od aktuatora do senzora kao i diskretne vejevlet transformacije signala. Hibridni pristup je razvijen za opšti oblik betonskog elementa, proizvoljni broj i položaj PZT aktuatora/senzora i proizvoljni oblik i položaj oštećenja. Pomenuti hibridni pristup je verifikovan kroz eksperimentalna i numerička istraživanja na modelima sa jednim i dva oštećenja. Za prostornu detekciju oštećenja kod betonskih elemenata razvijen je 3D indeks oštećenja na bazi 1D RMSD indeksa oštećenja. 3D indeks oštećenja je



sračunat za različite slučajeve oštećenja na bazi rezultata dobijenih numeričkim simulacijama. Hibridni metod razvijen za pločaste elemente proširen je za prostorno lokalizovanje oštećenja. Na paralelopipednim uzorcima/modelima testiran je hibridni metod za lokalizovanje oštećenja u prostoru na osnovu eksperimentalnih i numeričkih istraživanja. Pomenute metode razvijene za detekciju i lokalizaciju oštećenja treba dalje da vode ka upotrebi PZT aktuatora/senzora za praćenje stanja realnih betonskih konstrukcija kroz vreme.

Osnovna motivacija za rad na ovoj disertaciji je bio nedostatak metoda za detekciju i lokalizaciju oštećenja kod betonskih konstrukcija. Velika većina metoda razvijenih u drugim istraživanjima su primenjena na čeličnim, kompozitnim ili aluminijumskim konstrukcijama, koje su obično površinskog karaktera sa jako malom debljinom. Cilj istraživanja je bio da se razviju metode za detekciju i lokalizaciju oštećenja koje će biti pogodne za primenu u betonskim konstrukcijama. Tako da je glavni značaj ove disertacije metoda koja je razvijena tokom ovog istraživanja a kojom je moguće detektovati, lokalizovati i delimično kvantifikovati oštećenje u betonskim konstrukcijama.

1.3.Struktura rada

Ovo istraživanje je podeljeno u šest poglavlja. Poglavlje 1 je uvodni deo doktorata sa pregledom istraživanja i predmetom doktorske disertacije. Poglavlje 2 su teorijske postavke istraživanja. Ono je podeljeno u četiri dela (1. Piezoelektričnost i piezoelektrični senzori/aktuatori, 2) 3D propagacija talasa, 3) Eksplicitna Metoda Konačnih Elemenata i 4) vejevlet dekompozicija signala) koji sumiraju sve relevantne teorijske pretpostavke na kojima ovo istraživanje je bazirano. Dalje, disertacija je podeljena u tri poglavlja analizirajući detekciju i lokalizaciju oštećenja u linijskim, pločastim i prostornim betonskim konstrukcijama. Tako je Poglavlje 3 (Piezoelektrični Pametni Agregati i Detekcija oštećenja kod linijskih betonskih konstrukcija), i bavi se numeričkim modeliranjem PZT PA i numeričkim modeliranjem propagacije talasa, detekcijom oštećenja kod linijskih betonskih konstrukcija primenom RMSD indeksa oštećenja, kao i parametarskom analizom uticajnih faktora na promenu RMSD indeksa oštećenja. Dvodimenzionalna detekcija i lokalizacija oštećenja prikazana je u Poglavlju 4, koji je podeljen u dva dela: 2D detekcija oštećenja i 2D lokalizacija oštećenja. Poglavlje 5 sa nazivom: 3D detekcija i lokalizacija oštećenja kod prostornih betonskih konstrukcija razmatra problem detekcije i lokalizacije oštećenja kod masivnih beotnskih konstrukcija u prostoru. Poslednje Poglavlje 6 je predviđeno za rezime, zaključak i buduća istraživanja. Konačno, na samom kraju disertacije nakon referenci, organizovana su tri priloga.



2. TEORIJSKE POSTAVKE

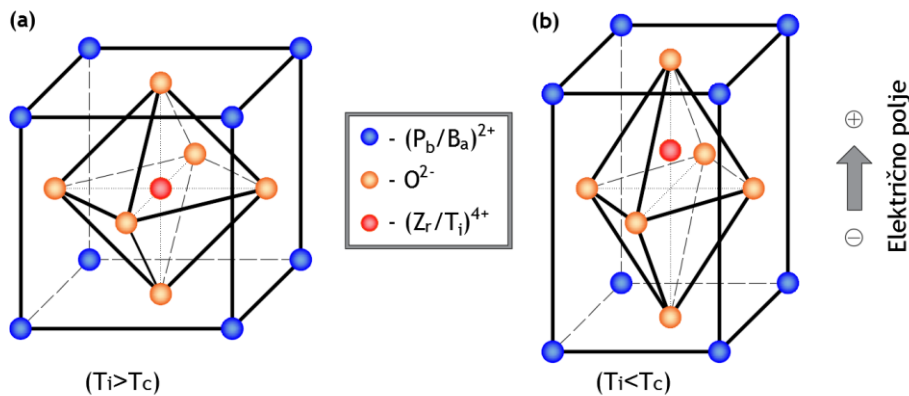
2.1. Uvod

U ovom delu disertacije prikazane se teorijske postavke iz oblasti koje su obrađene u disertaciji i koje su neophodne za razumevanje i prezentovanje istraživanja. Kratak teorijski pregled prikazan je iz sledećih oblasti:

- *Piezoelektričnost i PZT aktuatori/senzori*
- *3D propagacija talasa u krutim telima*
- *Eksplisitna metoda konačnih elemenata*
- *Vejvlet dekompozicija signala*

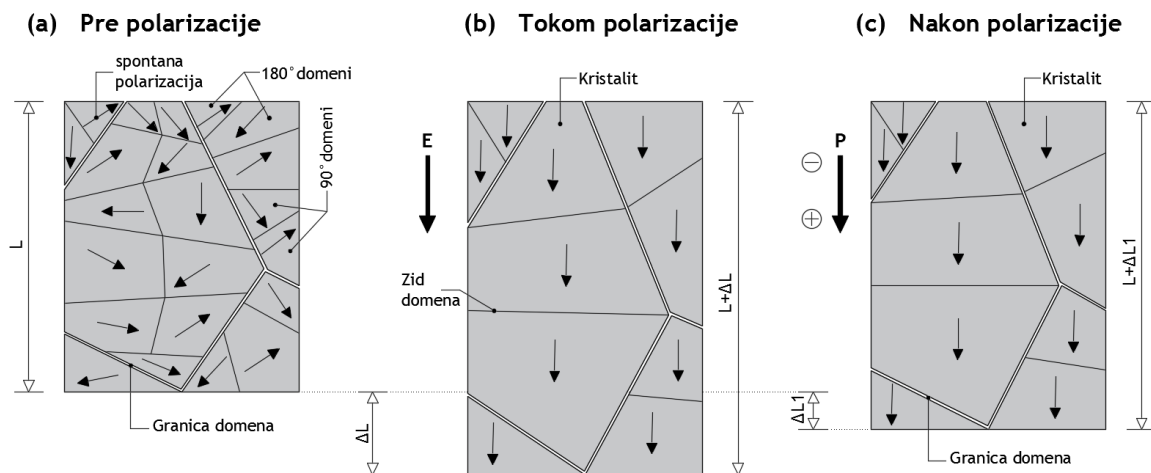
2.2. Piezoelektričnost i piezoelektrični senzori/aktuatori

Piezoelektričnost se može opisati kao sposobnost određenog materijala da generiše električni napon kada je opterećen mehaničkim pritiskom ili zatezanjem (*direktni piezoelektrični efekat*), ili suprotno tome, nakon nanetog električnog napona dolazi do mehaničkih deformacija tela (*inverzni piezoelektrični efekat*). Ove osobine u prirodi se javljaju kod određenih mono-kristala, npr. kvarcni kristali (SiO_2), turmalin i kalijum natrijum tartrat. Međutim, intenzitet piezoelektričnog efekta kod ovih kristala je veoma slaba. Nakon razvoja polikristalnih keramika, kao što su barijum titanat i olovo cirkonat titanat, zbog veoma malih troškova proizvodnje i mogućnosti različitog oblikovanja, došlo je do masovne upotrebe za različite namene u industriji. PZT keramike su keramički materijali napravljeni od olova, kiseonika i titanijuma ili cirkonijuma, i on je najviše korišćeni piezoelektrični aktuator/senzor za potrebe monitoringa konstrukcija. PZT se nalazi u Perovskit strukturi feroelektričnih kristala u obliku $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ (Slika 4). Iznad određene temperature T_C (Kirijeva temperatura), osnovne ćelije PZT materijala formiraju kockastu strukturu (Slika 4a). Pri ovim temperaturama i zbog postojanja kristalne strukture sa centralnom simetrijom gube se piezoelektrične sposobnosti.



Slika 4. Perovskit struktura piezoelektričnih materijala: a) Perovskit struktura pri temperaturama višim od Kirijeve temperature, b) Perovskit struktura pri temperaturama nižim od Kirijeve temperature

Kod pojedinačnih kristala piezoelektričnog materijala, spontani pravac polarizacije pojedinačnih ćelija je unapred određen. PZT feroelektrični kristali su polikristalna struktura, kod koje svaki individualni kristalit keramičkih jedinjenja može se smatrati feroelektričnim mono-kristalom odvojenim međusobno u pojedinačne domene ispod temperature T_c . PZT polikristali, u cilju da se ostvari piezoelektrični efekat, zagrevaju se i nanosi im se visoki električni napon ($>2000V$). Visoka temperatura dozvoljava molekulima da se lakše kreću u pravcu električnog polja, formirajući sve dipole paralelne jedni sa drugima. Nakon što se visoki napon isključi dipoli zadržavaju isti pravac. Ovaj proces se zove proces polarizacije, u kome se piezoelektrični materijal sa slučajnom polarizacijom pretvara u materijal sa polarizacijom u željenom pravcu (Slika 5) [78].



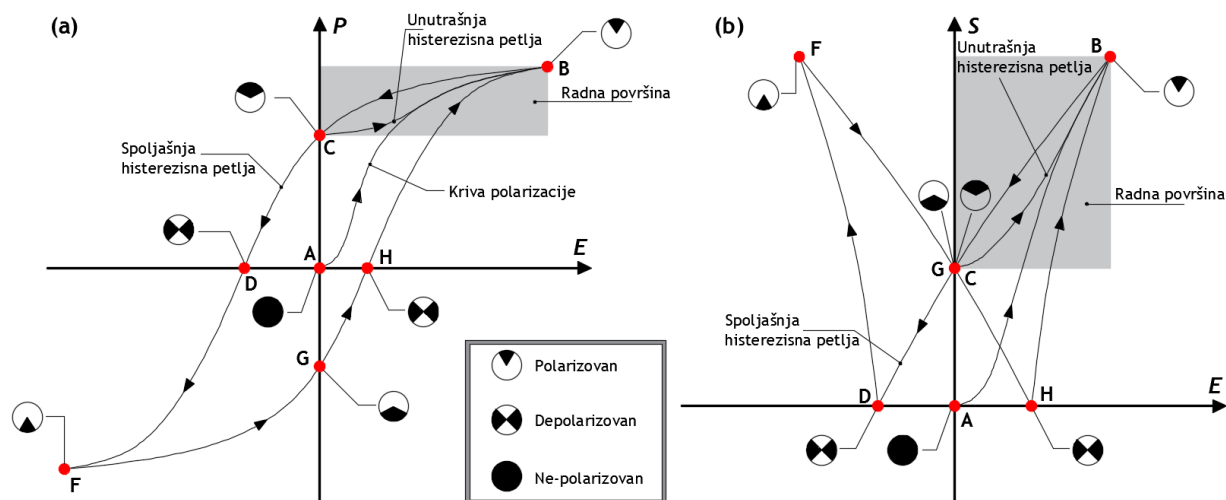
Slika 5. Proces polarizacije: šematski prikaz polikristalne strukture feroelektričnih keramičkih materijala; a) pre polarizacije, b) tokom polarizacije, c) nakon polarizacije



Elektro-mehaničko ponašanje piezoelektričnih materijala može se objasniti na osnovu histerezisnih kriva prikazanih na Slici 6. Pri nanošenju električnog napona, dolazi do promena polarizacije domena, odnosno domeni uzimaju pravac polarizacije nanetog spoljašnjeg električnog napona. Proces domena kod feroelektričnih keramičkih materijala izazvanih pomoću spoljašnjeg električnog polja je superponiran sa dielektričnim i inverznim piezoelektričnim dejstvom. Zbog procesa domena, nastaje nelinearna i histerezisna korelacija između polarizacije P i spoljašnjeg električnog polja E [78].

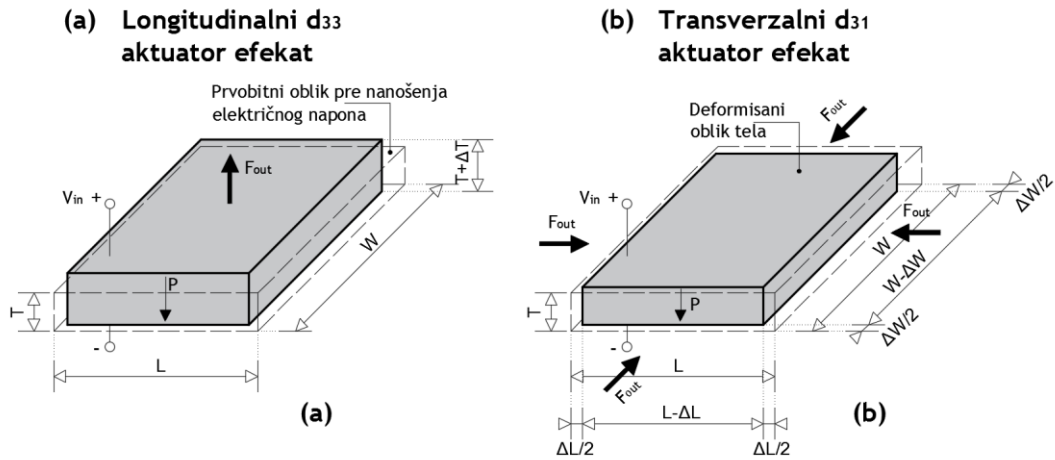
Ako posmatramo početni položaj kada je PZT material ne polarizovan (tačka A na Slici 6a). Nakon nanošenja spoljašnjeg električnog napona dolazi do reorijentacije polarizacije domena u pravcu nanetog električnog polja. Kriva $A-B$ (Slika 6a) opisuje taj proces polarizacije. Ako bi se električni napon smanjio na nulu, mali deo domena promenio bi pravac polarizacije zbog mehaničkih napona u feroelektričnom keramičkom materijalu, tako da bi ostao deo polarizacije koji se naziva preostala polarizacija P_r . Ovaj proces opisan je krivom $B-C$. Ako bi se električni napon sada naneo u suprotnom pravcu, domeni bi se reorijentisali u suprotnom pravcu prateći novo spoljašnje električno polje (kriva $C-D-F$). U tački D piezoelektrični material je depolarizovan i odgovarajući električni napon naziva se prinudno polje napona E_c . Sa ponovnom promenom smera spoljašnjeg električnog napona, promenljive E i P , prolaze kroz krivu $F-G-H-B$. Putanja $B-C-D-F-G-H-B$ se naziva spoljašnjom histerezisnom petljom. Ako se smer spoljašnjeg električnog napona promeni pre nego što se svi domeni dovedu u njegov pravac, promenljive E i P kreću se unutar polja uokvirenog spoljašnjom histerezisnom petljom i ta putanja naziva se unutrašnjom histerezisnom petljom.

Slično prethodno analiziranoj histerezisnoj krivi, sada ćemo razmotriti zavisnost dilatacije S i električnog napona E , pri istoj proceduri opterećivanja piezoelektričnog materijala. Počevši od nepolarizovane tačke A sa Slike 6b, nakon nanošenja električnog napona dolazi do orijentacije domena u pravcu nanetog spoljašnjeg električnog polja i do povećanja dilatacije (kriva $A-B$). Napon smanjenja spoljašnjeg napona na nulu, mali deo domena će promeniti polarizaciju. Javiće se zaostala dilatacija S_r prikazana u tački C na Slici 6b. Ako bi se dalje električni napon naneo u suprotnom smeru, svi domeni bi se reorijentisali i dilatacija bi se najpre smanjila na nulu (tačka D). Sa daljim povećanjem napona dilatacija se povećava dok se svi domeni ne orijentišu u pravcu nanetog električnog polja (tačka F). Ako bi se električni napon ponovo reorijentisao, promenljive (S , E) kretale bi se kroz tačke $F-G-H-B$. Kriva $B-C-D-F-G-H-B$ naziva se spoljašnjom histerezisnom petljom ili zbog svog oblika i kriva leptira.



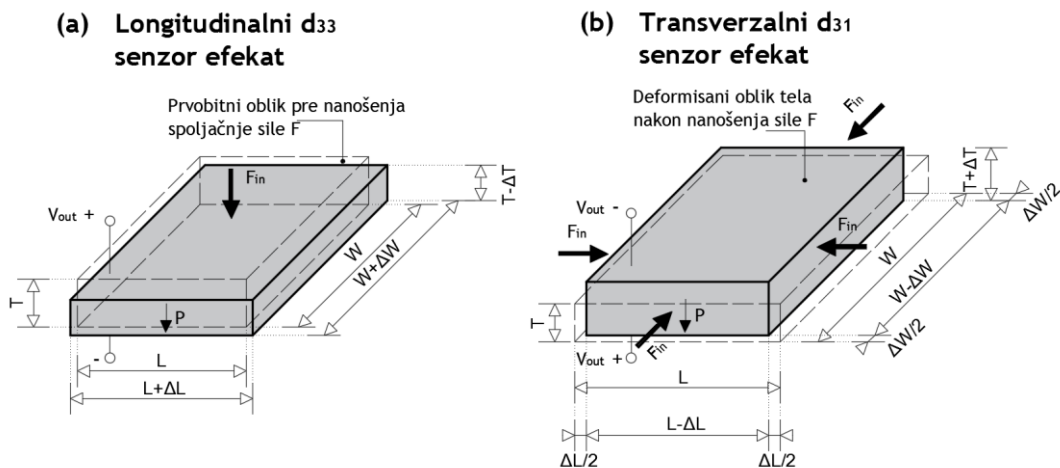
Slika 6. Histerezisna kriva piezoelektričnog materijala: a) zavisnost polarizacije P i električnog polja E , b) zavisnost dilatacije S i električnog polja E

Kao što je već pomenuto, kada se nanese električni napon na piezoelektrični material dolazi do mehaničkih deformacija tela, aktivirajući inverzni piezoelektrični efekat ili *efekat aktuatora*. Međutim, u zavisnosti od orijentacije polarizacije i električnog polja može doći do različite deformacije tela. Shodno tome, kada električno polje ima isti polaritet i orijentaciju sa poljem polarizacije u pravcu debljine PZT tela, telo povećava svoju debljinu (odnosno izdužuje se u “longitudinalnom” pravcu) u pravcu polarizacije i smanjuje svoju dužinu i širinu. Ovaj efekat je poznat kao longitudinalni d_{33} aktuator efekat (Slika 7a). Kada električno polje promeni pravac i pomeranje takođe menja pravac. Međutim, kod tankih PZT pločica promena dimenzija u pravcu njihove debljine je zanemarljiva u odnosu na pomeranja u ravni pločice. Zbog toga se kod PZT pločica mnogo više koristi transversalni d_{31} aktuator efekat (Slika 7b). Svakako, pri deformaciji PZT tela zapremina ostaje konstantna.



Slika 7. Longitudinalni (d_{33}) i transverzalni (d_{31}) efekat aktuatora

Sa druge strane, kada se na piezoelektrični material nanese mehanički napon dolazi do generisanja električnog napona, odnosno javlja se direktni piezoelektrični efekat ili *efekat senzora*. Ako se mehanički napon nanese paralelno sa pravcem polarizacije (u pravcu debljine PZT pločice), stvara se električni napon koji teži da vrati početnu debljinu piezoelektričnog tela (d_{33} efekat senzora, Slika 8a). Suprotno tome, javlja se d_{31} efekat senzora (Slika 8b).



Slika 8. Longitudinalni (d_{33}) i transverzalni (d_{31}) efekat senzora

Za linearne piezoelektrične materijale važi linearni zakon konstitutivnog odnosa između električnih i mehaničkih promenljivih iskazan sledećim jednačinama u tenzorskom obliku (poznata kao **Dilatacija-Indukcija forma**):

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k + \delta_{ij} \alpha_i^E \theta \quad (1)$$



$$D_i = d_{ikl}T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k + \tilde{D}_i \theta \quad (2)$$

gde su S_{ij} i T_{kl} mehanička dilatacija i napon, E_k i D_i su električno polje i električna indukcija, i θ je temperatura. Treba napomenuti da je uobičajni način obeležavanja u inženjerskoj terminologiji za mehanički napon (σ) a za dilataciju (ε), međutim, u ovom delu disertacije biće korišćeno obeležavanje (S , T) dato u jednačinama (1) i (2), jer je ono standardno za opisivanje piezoelektričnih materijala. Koeficijent s_{ijkl} je mehanička karakteristika zavisnosti materijala, a d_{kij} , d_{ikl} su piezoelektrične konstante (definišu odnos između električnih i mehaničkih promenljivih). Koeficijenti α_i i \tilde{D}_i su koeficijenti termičkog širenja i koeficijent temperaturnog električnog pomeranja. Termin δ_{ij} je Kronekerova delta ($\delta_{ij} = 1$ ako je $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ ako je $i \neq j$). Koeficijent ε_{ik}^T je dielektrična permitivnost materijala. Jednačina (1) služi da predvidi kolika se dilatacija javlja usled nanetog električnog polja, mehaničkog napona i temperature. Ova jednačina se još zove jednačina aktuatora i koristi se u modeliranju piezoelektričnih aktuatora.

Za inženjersku primenu mnogo pogodniji način obeležavanja je matricni prikaz konstitutivnih jednačina, pogotovu što proizvođači piezoelektričnih materijala specifikaciju proizvoda daju u matricnoj formi. Jednačine (1) i (2) mogu se napisati u matricnom obliku nakon primene Voigt notacije date u prilogu A:

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d_{kp} E_k + \delta_{pq} \alpha_q^E \theta \quad (p, q = 1, 2, \dots, 6) \quad (k = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k + \tilde{D}_i \theta \quad (q = 1, 2, \dots, 6) \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (4)$$

Odnosno u standardnoj matricnoj formi jednačine (1) i (2) mogu se prikazati:

$$\{\mathbf{S}\} = [\mathbf{s}^E] \{\mathbf{T}\} + [\mathbf{d}]^T \{\mathbf{E}\} + \{\boldsymbol{\alpha}^E\} \theta \quad (5)$$

$$\{\mathbf{D}\} = [\mathbf{d}] \{\mathbf{T}\} + [\boldsymbol{\varepsilon}^T] \{\mathbf{E}\} + \{\tilde{\mathbf{D}}\} \theta \quad (6)$$

Do sada napisane konstitutivne jednačine opisuju promenu dilatacije i električne indukcije u funkciji od nanetog mehaničkog napona, električnog polja i temperature. Ove jednačine moguće je napisati tako da se iskaže efekat senzora, odnosno, vrednost električnog polja generisanog usled nanetog mehaničkog napona, električne indukcije i temperature. Jednačine u matricnom obliku (ili **Dilatacija-Električni napon forma**):



$$S_p = s_{pq}^D T_q + g_{kp} D_k + \delta_{pq} \alpha_q^D \theta \quad (p, q = 1, 2, \dots, 6) \quad (k = 1, 2, 3) \quad (7)$$

$$E_i = g_{iq} T_q + \beta_{ik}^T D_k + \tilde{E}_i \theta \quad (q = 1, 2, \dots, 6) \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (8)$$

Ili u matricnoj formi prikazanoj na sledeći način:

$$\{\mathbf{S}\} = [\mathbf{s}^D] \{\mathbf{T}\} + [\mathbf{g}]^T \{\mathbf{D}\} + \{\boldsymbol{\alpha}^D\} \theta \quad (9)$$

$$\{\mathbf{E}\} = [\mathbf{g}] \{\mathbf{T}\} + [\boldsymbol{\beta}^T] \{\mathbf{D}\} + \{\tilde{\mathbf{E}}\} \theta \quad (10)$$

gde su g_{kp} , g_{iq} piezoelektrični naponski koeficijenti i predstavlja električno polje indukovano po jedinici napona. \tilde{E}_i je piroelektrični naponski koeficijent i predstavlja električno polje indukovano usled temperaturne promene.

Takođe, postoji još dva standardna načina prikaza konstitutivnih jednačina. Za naponsku analizu piezoelektričnih elemenata, najpogodnija forma (**Napon-Električni napon forma**) konstitutivnih jednačina odnosa električnih i mehaničkih promenljivih date su u sledećem obliku:

$$T_p = c_{pq}^E S_q - e_{kp} E_k - c_{pq}^E \delta_{pq} \alpha_q^E \theta \quad (p, q = 1, 2, \dots, 6) \quad (k = 1, 2, 3) \quad (11)$$

$$D_i = e_{iq} S_q + \varepsilon_{ik}^T E_k + \tilde{D}_i \theta \quad (q = 1, 2, \dots, 6) \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (12)$$

Ili u matricnoj formi prikazanoj na sledeći način:

$$\{\mathbf{T}\} = [\mathbf{c}^E] \{\mathbf{S}\} - [\mathbf{e}]^T \{\mathbf{E}\} - [\mathbf{c}^E] \{\boldsymbol{\alpha}^E\} \theta \quad (13)$$

$$\{\mathbf{D}\} = [\mathbf{e}] \{\mathbf{S}\} + [\boldsymbol{\varepsilon}^T] \{\mathbf{E}\} + \{\tilde{\mathbf{D}}\} \theta \quad (14)$$

sa sledećim oznakama: c_{pq}^E je matrica krutosti, $c_{pq}^E \delta_{pq} \alpha_q^E \theta$ je napon izazvan u piezoelektričnom polju usled temperaturne promene pri nuliranoj dilataciji (ili rezidualni termički napon). Poslednji standardni oblik konstitutivnih jednačina je u formi **Napon-Električno polje**:

$$T_p = c_{pq}^D S_q - q_{kp} D_k - c_{pq}^D \delta_{pq} \alpha_q^D \theta \quad (p, q = 1, 2, \dots, 6) \quad (k = 1, 2, 3) \quad (15)$$

$$E_i = -q_{iq} S_q + \beta_{ik}^S D_k + \tilde{E}_i \theta \quad (q = 1, 2, \dots, 6) \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (16)$$

ili:

$$\{\mathbf{T}\} = [\mathbf{c}^D] \{\mathbf{S}\} - [\mathbf{q}]^T \{\mathbf{D}\} - [\mathbf{c}^D] \{\boldsymbol{\alpha}^D\} \theta \quad (17)$$

$$\{\mathbf{E}\} = -[\mathbf{q}] \{\mathbf{S}\} + [\boldsymbol{\beta}^S] \{\mathbf{D}\} + \{\tilde{\mathbf{E}}\} \theta \quad (18)$$



Superskripte T , D , E i S u dosadašnjim jednačinama označavaju da su vrednosti merene pri nuliranom mehaničkom naponu ($T=0$), nuliranoj električnoj indukciji ($D=0$), nuliranom električnom polju ($E=0$) i nuliranoj mehaničkoj dilataciji ($S=0$).

Pun matricni prikaz konstitutivnih jednačina daje uvid u samu strukturu promenljivih (u prilogu A dat je oblik matrica za opšti slučaj i slučaj PZT materijala sa transverzalnom izotropijom). Konstitutivne jednačine u dilatacija-indukcija formi za PZT feroelektrične keramičke materijale sa transverzalnom izotropijom glase:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \theta \quad (19)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \tilde{D}_1 \\ \tilde{D}_2 \\ \tilde{D}_3 \end{Bmatrix} \theta \quad (20)$$

Radi što kompaktnijeg prikaza teorijskih izraza koji opisuju PZT materijale, u prilogu A priloženi su dodatni izrazi, koeficijenti i tabele. Na dalje biće obrađeno 3D prostiranje talasa kroz kruta tela.

2.3. 3-D propagacija talasa

Problemom propagacije talasa bavili su se mnogi istraživači i publikovan je veliki broj knjiga [80,81] i radova [82]. Pri pisanju ovog dela poglavlja u velikoj meri korišćena je knjiga [83].

Kada se neki deo krutog tela pobudi na male oscilacije onda on postaje izvor talasa koji se, zahvaljujući elastičnim osobinama krutog tela, prostire kroz njega. Kod prostornog krutog tela talas se prostire neometano u svim pravcima sve dok ne stigne do kraja tela, kontaktnih površina sa drugim telima ili oštećenja. Poznavanje prostiranja i odbijanja talasa u elastičnom krutom telu je od suštinskog značaja za detekciju oštećenja kod betonskih konstrukcija. U ovom delu disertacije biće prikazane osnovne jednačine kretanja prostornih talasa.



Pretpostavimo da se talas kreće duž pravca $\{\mathbf{n}\} = n_1\{\mathbf{e}_1\} + n_2\{\mathbf{e}_2\} + n_3\{\mathbf{e}_3\}$, sa talasnom amplitudom $\{\mathbf{A}\} = A_1\{\mathbf{e}_1\} + A_2\{\mathbf{e}_2\} + A_3\{\mathbf{e}_3\}$. Jednačina koja opisuje kako se talasna funkcija menja je sledećeg oblika:

$$\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{A}\} f(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct) = \{\mathbf{A}\} f(n_1x_1 + n_2x_2 + n_3x_3 - ct) \quad (21)$$

Pri čemu je c brzina prostiranja talasa a t je vreme. Koristeći 3-D jednačine kretanja (Navijeove jednačine) u Dekartovom koordinatnom sistemu (jednačina 22) i izraze za izvod funkcija (jednačina 23) dobija se homogeni linearni sistem algebarskih jednačina (jednačina 24):

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) &= \rho \ddot{u}_x \\ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) &= \rho \ddot{u}_y \\ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) &= \rho \ddot{u}_z \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct)}{\partial x_i} &= n_i \quad i \quad \frac{\partial(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct)}{\partial t} = -c \\ \frac{\partial \{\mathbf{u}\}}{\partial x_i} &= \{\mathbf{A}\} f'(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct) \frac{\partial(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct)}{\partial x_i} = \{\mathbf{A}\} n_i f'(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct) \\ \frac{\partial \{\mathbf{u}\}}{\partial t} &= \{\mathbf{A}\} f'(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct) \frac{\partial(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct)}{\partial t} = \{\mathbf{A}\} (-c) f'(\{\mathbf{n}\} \cdot \{\mathbf{r}\} - ct) \end{aligned} \quad (23)$$

Dobija se:

$$\begin{bmatrix} (\lambda + \mu)n_1^2 + (\mu - \rho c^2) & n_2 n_1 & n_3 n_1 \\ n_1 n_2 & (\lambda + \mu)n_2^2 + (\mu - \rho c^2) & n_3 n_2 \\ n_1 n_3 & n_2 n_3 & (\lambda + \mu)n_3^2 + (\mu - \rho c^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Nakon sređivanja jednačine (24) ona dobija sledeći oblik:

$$\left[(\lambda + 2\mu) - \rho c^2 \right] \left[\mu - \rho c^2 \right] = 0 \quad (25)$$

Jasno je da jednačina (20) ima tri rešenja (sopstvene vrednosti): $c_1 = c_p$ i $c_2 = c_3 = c_s$. Prva sopstvena vrednost $c_1 = c_p$ je povezana sa longitudinalnim talasima čije čestice se kreću paralelno sa pravcem prostiranja talasa $\{\mathbf{n}\}$, dok kod druge i treće sopstvene vrednosti $c_2 = c_3 = c_s$ čestice kretanja su upravne na pravac prostiranja talasa i povezane su sa transverzalnim talasima (transverzalno-



horizontalni talasi i transverzalno-vertikalni talasi). Ova dva transverzalna talasa kreću se istom brzinom ali imaju različitu polarizaciju i upravni su jedan na drugi. Izrazi za longitudinalnu brzinu prostiranja talasa (c_p) i transverzalnu brzinu prostiranja talasa (c_s) su:

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \quad - \text{(Longitudinalna brzina prostiranja talasa)} \quad (26)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad c_s^2 = \frac{\mu}{\rho}, \quad - \text{(Transverzalna brzina prostiranja talasa)} \quad (27)$$

gde su μ i λ Lamé-ove konstante:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (28)$$

sa sledećim oznakama jednačine: E je Jungov modul elastičnosti, ν je Poasonov koeficijent i G je modul smicanja. Brzine prostiranja talasa mogu se izraziti putem inženjerskih konstanti E , G i ν :

$$c_p = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{E}{\rho}}, \quad c_p^2 = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{E}{\rho}, \quad - \text{(Longitudinalna brzina prostiranja talasa)} \quad (29)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)} \frac{E}{\rho}}, \quad c_s^2 = \frac{G}{\rho} = \frac{1}{2(1+\nu)} \frac{E}{\rho}, \quad - \text{(Transverzalna brzina prostiranja talasa)} \quad (30)$$

Longitudinalni talasi se nazivaju još i dilatacioni ili P -talasi, dok transverzalni talasi se nazivaju i *distorzioni* ili S -talasi. Razmotrimo sada slučaj da je $\{\mathbf{n}\} = \{\mathbf{i}\}$ odakle sledi da je $n_1 = 1$, $n_2 = 0$, $n_3 = 0$. Dalje obeležavanje biće u skladu sa (x, y, z) – koordinatnim osama i $(\{\mathbf{i}\}, \{\mathbf{j}\}, \{\mathbf{k}\})$ – jediničnim vektorima koordinatnih osa. U ovom slučaju talasni front se prostire paralelno sa x -osom i jednačina (21) dobija sledeći oblik:

$$\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{A}\} f(x_1 - ct) \quad (31)$$

Dok sistem jednačina (24) postaje:

$$\begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu) - \rho c^2 & 0 & 0 \\ 0 & \mu - \rho c^2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu - \rho c^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Za posmatrani slučaj moguće su tri talasne jednačine sa odgovarajućim sopstvenim vektorima $\{A_x, 0, 0\}^T$, $\{0, A_y, 0\}^T$ i $\{0, 0, A_z\}^T$:



$$\{\mathbf{u}_p\} = A_x \cdot \{\mathbf{i}\} \cdot f(x_1 - c_p t) \quad - \text{(Longitudinalni talasi – P-talasi)} \quad (33)$$

$$\{\mathbf{u}_{SH}\} = A_y \cdot \{\mathbf{j}\} \cdot f(x_1 - c_s t) \quad - \text{(transverzalno-horizontanalni talasi – SH-talasi)} \quad (34)$$

$$\{\mathbf{u}_{SV}\} = A_z \cdot \{\mathbf{k}\} \cdot f(x_1 - c_s t) \quad - \text{(transverzalno-vertikalni talasi – SV-talasi)} \quad (35)$$

Ukupni talas se dobija superponiranjem tri individualna talasa:

$$\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{u}_p\} + \{\mathbf{u}_{SH}\} + \{\mathbf{u}_{SV}\} = A_x \cdot \{\mathbf{i}\} \cdot f(x_1 - c_p t) + (A_y \{\mathbf{j}\} + A_z \{\mathbf{k}\}) f(x_1 - c_s t) \quad - \text{(ukupni talas)} \quad (36)$$

Pri čemu koeficijenti A_x , A_y i A_z određuju se iz početnih i graničnih uslova. Talasne jednačine za P , SH i SV talase dobijaju sledeći oblik:

$$\{\mathbf{u}_p\} = A_x \cdot \{\mathbf{i}\} \cdot e^{i\omega\left(\frac{x}{c_p} - t\right)} \quad - \text{(P-talasi)} \quad (37)$$

$$\{\mathbf{u}_{SH}\} = A_y \cdot \{\mathbf{j}\} \cdot e^{i\omega\left(\frac{x}{c_s} - t\right)} \quad - \text{(SH-talasi)} \quad (38)$$

$$\{\mathbf{u}_{SV}\} = A_z \cdot \{\mathbf{k}\} \cdot e^{i\omega\left(\frac{x}{c_s} - t\right)} \quad - \text{(SV-talasi)} \quad (39)$$

Polje pomeranja može se opisati na osnovu Helmholtz-ovog rešenja u funkciji dve promenljive (skalarnu funkciju Φ i vektorsku funkciju $\{\mathbf{H}\}$) na sledeći način:

$$\{\mathbf{u}\} = \nabla\Phi + \nabla \times \{\mathbf{H}\} \quad (40)$$

pri čemu je $\{\mathbf{H}\} = H_x \cdot \{\mathbf{i}\} + H_y \cdot \{\mathbf{j}\} + H_z \cdot \{\mathbf{k}\}$. Jednačina (40) može se dopuniti jedinstvenim uslovom $\nabla \cdot \{\mathbf{H}\} = 0$. Pomoću Navijeovih jednačina u vektorskoj formi:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \{\mathbf{u}\}) + \mu\nabla^2\{\mathbf{u}\} = \rho\{\ddot{\mathbf{u}}\} \quad (41)$$

moгу se izvesti talasne jednačine u sledećem obliku:

$$c_p^2 \nabla^2 \Phi = \nabla \ddot{\Phi} \quad (42)$$

$$c_s^2 \nabla^2 \{\mathbf{H}\} = \{\ddot{\mathbf{H}}\} \quad (43)$$

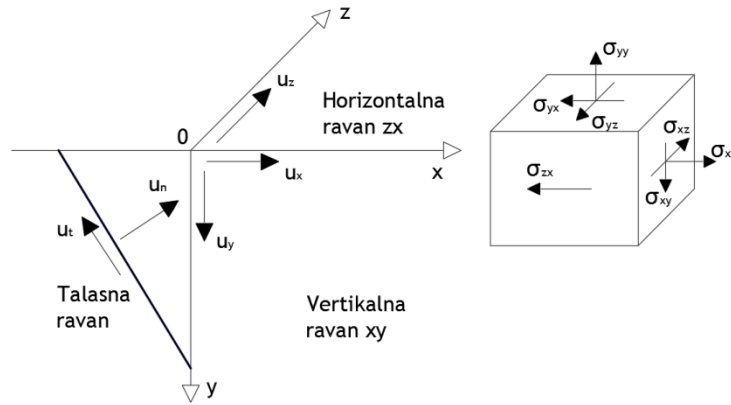
Na osnovu jednačina (42) i (43) može se zaključiti da funkcija Φ propagira pri P-talasnoj brzini, dok vektorska funkcija \mathbf{H} propagira pri S-talasnoj brzini. P-talasi su dilatacioni talasi, dok S-talasi su rotacioni talasi. U zavisnosti od načina pobude prostiranja talasa moguće je zajedničko prostiranje oba ova talasa ili pojedinačno. Dilatacione i rotacione talasne jednačine imaju oblik:

$$(\lambda + \mu)\nabla^2 \Delta = \rho \ddot{\Delta} \quad \text{or} \quad c_p^2 \nabla^2 \Delta = \ddot{\Delta} \quad - \text{(dilataciona talasna jednačina)} \quad (44)$$

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2\{\mathbf{u}\} = \rho\{\ddot{\mathbf{u}}\} \quad \text{or} \quad c_s^2\nabla^2\{\mathbf{u}\} = \{\ddot{\mathbf{u}}\} \quad - \text{(rotaciona talasna jednačina)} \quad (45)$$

gde je $\Delta = \nabla \cdot \{\mathbf{u}\}$ dilatacija. P-talasi su ne-rotacioni (imaju rotaciju jednaku nuli $\{\boldsymbol{\omega}\} = 0$) ali nisu ne-distorzioni, dok S-talasi su ravnotežni talasi (imaju dilataciju jednaku nuli $\Delta = \nabla \cdot \{\mathbf{u}\} = 0$). Takođe, bitno je napomenuti da S-talasi su distorzioni i ne-dilatacioni, dok P-talasi nisu nužno ne-distorzioni. U suštini, P-talasi sadrže oba zapreminsko prostiranje i distorziju [83].

Za potrebe MK i detekcije oštećenjena na bazi propagacije talasa i PZT actuatora/senzora veoma korisna je z-invarijanta 3D talasa. Ovi talasi su 3D ravni talasi koji su invarijantni duž jednog pravca (u ovom slučaju z-osa) talasnog fronta, i čiji talasni pikovi su paralelni sa z-osom. Normala talasnog fronta \mathbf{n} je upravna na z-osu ($\{\mathbf{n}\} \perp \{\mathbf{k}\}$) kao što je prikazano na Slici 9.



Slika 9. Z-invarijanta prostornog talasa

Obzirom da je problem z-invarijanta imamo:

$$\frac{\partial}{\partial z} \equiv 0 \quad \text{i} \quad \nabla = \{\mathbf{i}\} \frac{\partial}{\partial x} + \{\mathbf{j}\} \frac{\partial}{\partial y} \quad (46)$$

Koristeći prethodno prikazane jednačine može se izvesti talasna jednačina u sledećem obliku:

$$c_p^2 \nabla^2 \Phi = \ddot{\Phi} \quad \begin{cases} c_s^2 \nabla^2 H_x = \ddot{H}_x \\ c_s^2 \nabla^2 H_y = \ddot{H}_y \\ c_s^2 \nabla^2 H_z = \ddot{H}_z \end{cases}; \quad \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0 \quad (47)$$

Komponente vektora pomeranja su:



$$\begin{aligned}
u_x &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial H_z}{\partial y} \\
u_y &= \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\
u_z &= \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}
\end{aligned} \tag{48}$$

Na osnovu jednačine (47) jasno je da je moguće razdvojiti rešenje na dva dela: (i) deo koji se odnosi na transverzalno kretanje talasa u horizontalnoj ravni xz (SH talasa); (ii) drugi deo koji kombinuje P-talase (iskazan skalarnom funkcijom Φ) i S-talase (iskazan pomoću H_z).

Za slučaj kretanja talasa u horizontalnoj ravni važe sledeći uslovi:

$$u_x = u_y = 0, \quad u_z \neq 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} = 0 \tag{49}$$

Koristeći naponsko-dilatacionu zavisnost:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} & \sigma_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\
\sigma_{yy} &= \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} & \sigma_{yz} &= \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\
\sigma_{zz} &= \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_y}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} & \sigma_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)
\end{aligned} \tag{50}$$

i jednačine (47) i (48) mogu se izvesti naponsko-dilatacione jednačine za SH-talase:

$$\sigma_{yz} = \mu \left(-\frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y} \right) \tag{51}$$

$$\sigma_{zx} = \mu \left(-\frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} \right) \tag{52}$$

Kod drugog slučaja kretanja čestica talasa u vertikalnoj ravni, početni uslovi su sledeći:

$$u_x \neq 0, \quad u_y \neq 0, \quad u_z = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} = 0 \tag{53}$$

Slično za prethodni slučaj, uz pomoć jednačina (47), (48) i (53) mogu se izvesti naponsko-dilatacioni odnosi za talas P+SV:

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) - 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y} \right) \tag{54}$$

$$\sigma_{yy} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) - 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y} \right) \tag{55}$$



$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) \quad (56)$$

$$\sigma_{xy} = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} \right) \quad (57)$$

Deo prikazanih jednačina prostiranja 3-D talasa korišćeno je u disertaciji prilikom modeliranja propagacije talasa u betonskim elementima. Beton je u numeričkom smislu tretiran kao homogeni, izotropni elastični materijal za koji važe teorijske postavke prikazane u ovom delu disertacije.

2.4. Eksplicitna Metoda Konačnih Elemenata (EMKE)

Numeričko modeliranje ultrazvučnog prostiranja zapreminskih talasa kroz betonske elemente izazvano pomoću piezoelektričnih aktuatora urađeno je na bazi eksplicitne metode konačnih elemenata (EMKE) u programskom paketu ABAQUS/Explicit. Eksplicitna dinamička analiza u ABAQUS/Eksplicitu je direktna iterativna metoda bazirana na metodi centralnih razlika i korišćenju dijagonalnih matrica masa. Ova dinamička MKE procedura pokazala se veoma efikasnom za modeliranje i proračun visokofrekventnih dinamičkih uticaja. Kratak teorijski prikaz EMKE krenućemo od jednačine dinamičke ravnoteže:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}_a \quad (58)$$

gde su $\ddot{\mathbf{U}}$, $\dot{\mathbf{U}}$, \mathbf{U} vektori ubrzanja, brzine i pomeranja. \mathbf{M} je dijagonalna matrica masa, \mathbf{C} je matrica prigušenja, \mathbf{K} je matrica krutosti i \mathbf{F}_a je vector spoljašnjeg opterećenja. Jednačina (58) je izvedena iz statičkog rešenja u vremenu t i može se napisati na sledeći način:

$$\mathbf{F}_I + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_E = \mathbf{F}_a \quad (59)$$

pri čemu su $\mathbf{F}_I = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}$ inercijalne sile, $\mathbf{F}_D = \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}$ su sile prigušenja, i $\mathbf{F}_E = \mathbf{K}\mathbf{U}$ elastične sile, i sve one su vremenski zavisne. Prigušenje se može definisati na više načina, jedan od načina koji se veoma često koristi je Rejljevo prigušenje. Rejljevo prigušenje se može definisati u proporciji sa krutošću i masom na sledeći način:

$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K} \quad (60)$$

gde su α_R i β_R koeficijenti prigušenja proporcionalni masi i krutosti ili Rejljevi faktori prigušenja. Kritično prigušenje (ξ_i) za ton i može se iskazati pomoću koeficijenata prigušenja:



$$\xi_i = \frac{\alpha_R}{2\omega_i} + \frac{\beta_R \cdot \omega_i}{2} \quad (61)$$

gde je ω_i frekvencija tona oscilovanja i . Generalno, koeficijent proporcionalan masi (α_R) prigušuje niže frekvence, dok koeficijent proporcionalan krutosti (β_R) prigušuje više frekvence. Koeficijent α_R uvodi sile prigušenja pomoću apsolutnih brzina modela, što ukazuje da ovaj koeficijent uvodi prigušenje kao karakteristiku konstrukcije. Dok koeficijent β_R uvodi prigušenje proporcionalno dilataciji, što se može tumačiti da je to deo prigušenja koje prihvata material sa svojim karakteristikama.

Jednačina (58) predstavlja sistem linearnih diferencijalnih jednačina drugog reda i mogu se rešiti standardnim procedurama rešavanja diferencijalnih jednačina sa konstantnim koeficijentima. Međutim, ove metode mogu biti veoma kompjuterski zahtevne, pogotovu kada su matrice velike. U rešavanju praktičnog problema modeliranja propagacije talasa kod 3D betonskih elemenata bilo je neophodno korišćenje efikasnih tehnika. Izabrana je direktna integraciona metoda (EMKE) i komercionalni softver ABAQUS/Explicit. Kod direktnih integracionih metoda jednačina (58) se integrali koristeći proceduru korak-po-korak, termin “direktan” misli se na karakter numeričke procedure, tj. da ne postoji potreba za transformacijom diferencijalnih jednačina [79].

Propagacija talasa nastaje kada se početno stanje mirovanja naruši usled sile ili pomeranja unetih u model preko čvorova. Uobičajno, pobuda se unosi u sistem pomoću vremenski kratkih signala. Jednačina kretanja tela se integrali koristeći metodu centralnih razlika:

$$\ddot{\mathbf{U}}^{(t)} = \frac{1}{\Delta t^2} (\mathbf{U}^{(t-\Delta t)} - 2\mathbf{U}^{(t)} + \mathbf{U}^{(t+\Delta t)}) \quad (62)$$

$$\dot{\mathbf{U}}^{(t)} = \frac{1}{2\Delta t} (\mathbf{U}^{(t+\Delta t)} - \mathbf{U}^{(t-\Delta t)}) \quad (63)$$

gde je t vreme, Δt - vremenski korak (inkrement). Koristeći zakonitost definisanu u jednačinama (62) i (63), jednačina (58) može se napisati na sledeći način:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{U}^{(t+\Delta t)} = \mathbf{R}^{(t)} - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{U}^{(t)} - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{U}^{(t-\Delta t)} \quad (64)$$

Na osnovu jednačine (64) može se zaključiti da se rešenje za $\mathbf{U}^{(t+\Delta t)}$ dobija na osnovu uslova ravnoteže u vremenu t i $t-\Delta t$, i zbog ovog razloga se ova integraciona procedura zove eksplicitna integraciona metoda. Kompjuterska efikasnost zasniva se na tri aspekta eksplicitne šeme: (i) za



razliku od implicitne metode, ne postoji potreba za transformacijom globalne matrice masa; (ii) eksplicitna procedura ne zahteva iteracije u svakom pojedinačnom vremenskom koraku; (iii) dijagonalna matrica masa koristi se pri proračunu ubrzanja na sledeći način, što nije slučaj kod implicitne metode:

$$\ddot{\mathbf{U}}^{(t)} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_a^{(t)} - \mathbf{F}_I^{(t)}) \quad (65)$$

Da bi proračun pomoću metode centralnih razlika bio moguć neophodno je u vremenu $-Δt$ definisati početne uslove:

$$\mathbf{U}^{(-Δt)} = \mathbf{U}^0 - Δt\dot{\mathbf{U}}^0 + \frac{Δt^2}{2}\ddot{\mathbf{U}}^0 \quad (66)$$

Eksplicitna MKE na bazi metode centralnih razlika integrali kroz vreme koristeći obično veoma male vremenske korake $Δt$. Integraciona šema koja zahteva korišćenje vremenskog koraka $Δt$ manjeg od kritičnog vremenskog koraka $Δt_{cr}$ kaže se da je uslovno stabilna. Eksplicitna procedura je uslovno stabilna za neprigušene sisteme ako je zadovoljen sledeći uslov:

$$Δt \leq Δt_{cr} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (67)$$

gde je ω_{max} najveća frekvencija najmanjeg elementa u modelu. Kod modela sa prigušenjem, stabilni vremenski korak je definisan sledećom jednačinom:

$$Δt \leq Δt_{cr} = \frac{2}{\omega_{max}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right) \quad (68)$$

Kod modeliranja propagacije talasa, gde se pretpostavlja mala deformacija konačnih elemenata, uobičajna aproksimacija koja se usvaja je ta da kritični vremenski korak predstavlja vreme prolaska longitudinalnog talasa kroz najmanji konačni element u modelu [79]:

$$Δt \leq Δt_{cr} = \frac{L_e}{c_d} \quad (69)$$

gde je L_e karakteristična dimenzija konačnog elementa, c_d je longitudinalna brzina prostiranja talasa. Korišćeni vremenski korak u simulaciji podeljen sa kritičnim vremenskim korakom za taj model predstavlja Korantov (ili CFL) broj:

$$CFL = \frac{Δt}{Δt_{cr}} \quad (70)$$



U ABAQUS/Eksplicit proračunu zapreminska viskoznost se uvodi kroz prostornu dilataciju i njegova uloga je da poboljša modeliranje incidentnih dinamičkih pojava (dinamičke pojave sa veoma visokom frekvencom), kao što je ultrazvučno prostiranje talasa. Jednačine (71) i (72) definišu linearni i kvadratni zapreminski viskozitet kroz prostornu dilataciju na sledeći način:

$$p_{bv1} = b_1 \cdot \rho \cdot c_d \cdot L_e \cdot \dot{\epsilon}_{vol} \quad (71)$$

$$p_{bv1} = \rho \cdot (b_2 \cdot L_e \cdot \dot{\epsilon}_{vol})^2 \quad (72)$$

Pri čemu su b_1 , b_2 koeficijenti prigušenja, ρ je zapreminska težina, $\dot{\epsilon}_{vol}$ je prostorna dilatacija.

Eksplicitna dinamička procedura je veoma povoljna za modeliranje dinamičkih uticaja sa veoma visokom frekvencom kao što su: propagacija talasa, udarna opterećenja i drugo. Kod modeliranja propagacije talasa neophodno je koristiti najmanje nekoliko konačnih elemenata po jednoj talasnoj dužini (jedna od preporuka je najmanje 7 a za pojedine analize ova preporuka ide do broja 40). Što je frekvencija talasa veća to je njegova talasna dužina manja i neophodna veličina konačnog elementa (KE) je manja što dalje rezultira manjim vremenskim korakom (jednačina 69), što explicitnu procedure u velikoj meri ograničava na simulaciju relativno malih modela. Pri modeliranju propagacije talasa korišćenjem eksplicitne MKE generalni saveti su sledeći: (i) koristiti vremenski korak ne mnogo manji od kritičnog vremenskog koraka, (ii) koristiti što manju frekvencu koja zadovoljava potrebe detekcije oštećenja, (iii) što manji i jednostavniji modeli na kojima se mogu izvesti željeni zaključci. U građevinarstvu to sužava mogućnosti na modeliranje uzoraka relativno malih laboratorijskih veličina.

2.5. Vejvlet dekompozicija signala

Najpoznatija i najzastupljenija metoda u analizi signala je Furijeova Transformacija (FT). Ova transformacija analizira signal kroz beskonačnu seriju trigonometrijskih funkcija. Međutim, pošto trigonometrijske funkcije imaju beskonačnu dužinu vremena, Furijeova Transformacija ne može dati informacije o promeni frekvencije u funkciji vremena. Takođe, neupotrebljiva je za nelinearne i nestacionarne signale. Zbog toga, prvo je nastala kratkotrajna (brza) Furijeova Transformacija (STFT) kako bi se pomenuta mana FT eliminisala. STFT funkcioniše tako što se signal množi sa krovnom funkcijom koja je različita od nule samo u kratkom vremenskom delu dok se na ostatku signala radi klasična FT. Ovakav pristup je rešio deo problema ali nije zadovoljio mogućnost kompletne vremensko-frekventne analize signala. Jer STFT ima fiksnu rezoluciju, tako da sa širom krovnom funkcijom dobija se bolja frekventna rezolucija a lošija vremenska rezolucija i obrnuto. U



potraži za transformacijom koja će zadovoljiti dobre frekventne i vremenske rezolucije istovremeno, nastala je Vejvlet Transformacija (*Wavelet transformation* - WT).

Vejvlet je funkcija talasne (oscilatorne) prirode sa kompaktnim nosačem, tj. sa konačnim domenom na kome je različita od nule [84].

Osnovna Wavelet Funkcija ili „Mother“ WF (*MWF*) $\psi(t)$ je funkcija sa srednjom vrednošću jednakom nuli:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (73)$$

Koji je proširen (skaliran ili kompresovan) sa parametrom skaliranja s , i transliran sa parametrom τ :

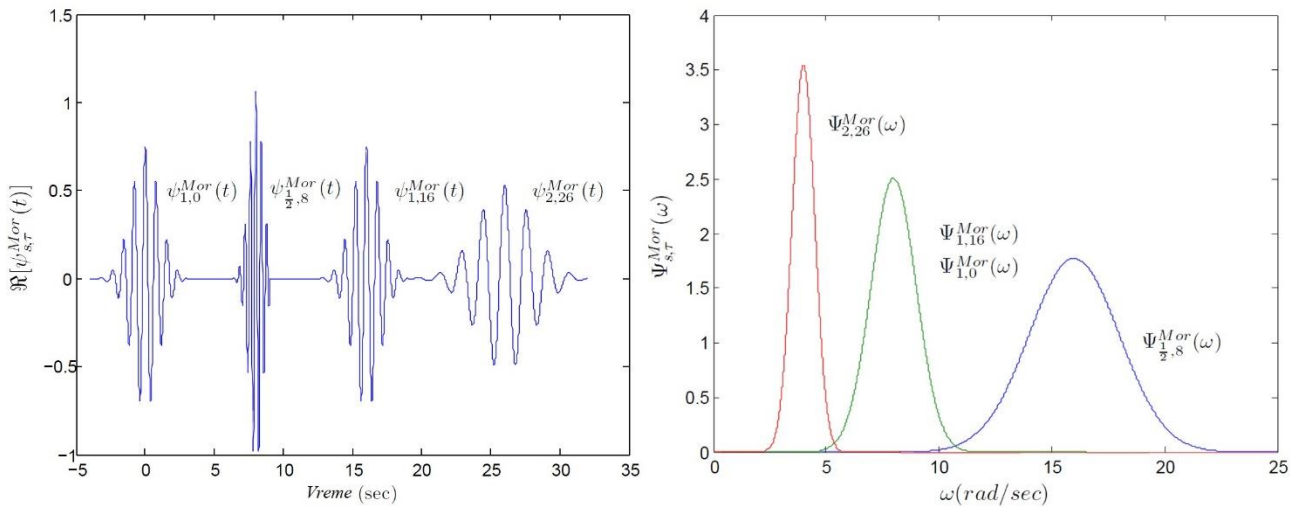
$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (74)$$

gde je $s, \tau \in \mathbb{R}^+$, dok $\psi_{s,\tau}(t)$ je bazisna wavelet funkcija (ili Baby Wavelet Function - *BWF*). Parametar skaliranja s definiše širinu *BWF* signala, parametar translacije τ kontroliše lokaciju *BWF* duž vremenske ose (Slika 10levo). Sa povećanjem parametra s *BWF* se izdužuje ali joj se smanjuje amplituda, dok sa smanjenjem parametra s *BWF* se skraćuje i povećava mu se amplituda. Na Slici 10levo prikazano je kako parametri (s , τ) utiču na promenu realnog dela od Morlet Wavelet funkcije. Dok na Slici 10desno prikazano je kako parameter skaliranja s utiče na *BWF* u frekventnom domenu pri Furijeovoj transformaciji. Konačno može se zaključiti da sa povećanjem parametra skaliranja utiče se na smanjenje frekventne rezolucije ali povećanja vremenske rezolucije i obrnuto.

Kontinualna Wavelet Transformacija (*CWT*) signala $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ definisana je proizvodom funkcije $f(t)$ i bazisnog vejvlet signala [85]:

$$CWT(s, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt = \langle f(t), \psi_{s,\tau}(t) \rangle \quad (75)$$

gde je $L^2(\mathbb{R})$ Hilbertov prostor, $CWT(s, \tau)$ je *CWT* koeficijent pri parametrima (s , τ), dok simbol $*$ i \langle, \rangle označavaju kompleksan konjugovan i unutrašnji proizvod vektora.



Slika 10. Morletova Vejvlet funkcija u zavisnosti od parametara s i τ : Levo – realni deo Morletove Vejvlet funkcije; Desno – Furijeova transformacija Morletove Vejvlet funkcije [84]

U monitoringu konstrukcija izlazni mereni signali senzora su diskretni, zbog čega je neophodno koristiti Diskretnu Wavelet Transformaciju (DWT). Najjednostavniji način da se diskretizuje funkcija $f(t)$ jeste da se izmere njene vrednosti $\{f(n\Delta t)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ u vremenskim intervalima Δt . Nakon diskretizacije BWF jednačina (74) može se napisati na sledeći način:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \psi\left(\frac{t - k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right) \quad (76)$$

pri čemu je $s = s_0^j$, i $\tau = k\tau_0 s_0^j$, za ($s_0 \geq 1$, $\tau_0 \geq 1$), i $j, k \in \mathbb{Z}$ je skup celih brojeva. Zbog kompjuterske efikasnosti, diskretni parametri obično se usvajaju da imaju vrednosti ($s_0 = 2$, $\tau_0 = 1$), što vodi ka binarnom skaliranju 2^j i parnoj translaciji $k2^j$. Sada bazična Vajvlet funkcija (jednačina 76) je definisana sledećim izrazom:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t - k2^j}{2^j}\right) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (77)$$

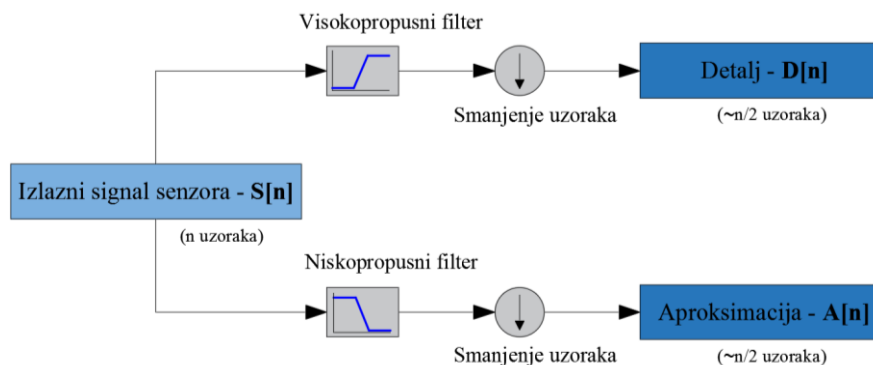
Koristeći diskretnu BWF definisanu jednačinom 77, moguće je na osnovu izraza (75 i 77) definisati Diskretnu Wavelet Transformaciju (DWT):

$$DWT(j,k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (78)$$

gde je $DWT(j,k)$ - DWT koeficijent pri setu koeficijenata skaliranja-transformacije (j, k) .

Pre nego što razmotrimo slučaj višestruke diskretne dekompozicije signala, potrebno je definisati filtere signala, odnosno dekomponovanje signala u dva nova koja se nazivaju aproksimacija i detalj. Aproksimacija je komponenta signala sa niskom frekvencijom i visokom rezolucijom skaliranja, dok detalj je komponenta signala sa visokom frekvencijom i niskom rezolucijom skaliranja. Proces filtriranja, ili jednostepena dekompozicija signala prikazana je na Slici 11. Nakon što diskretni signal senzora $S(n)$ koji ima n podataka, prođe kroz niskopropusni filter njemu se smanji uzorkovanje za 2 (jednostavno se svaki drugi uzorak/podatak izbaciti), dobija se aproksimacija $A(n)$ sa približno $n/2$ podataka. Aproksimacija sadrži niskofrekventne informacije signala i čini veliku većinu energije samog signala što je u velikom broju analiza čini značajnijom od detalja. Slično prethodnom postupku, detalj $D(n)$ se dobija kada signal prođe kroz visokopropusni filter (Slika 11).

Višestruka dekompozicija signala je razlaganje signala na više manjih signala niže rezolucije pomoću nisko i visokopropusnih filtera naziva se Vejvlet Dekompoziciono Stablo – WDS). Najpoznatije WDS su brza diskretna vejvlet dekompozicija i diskretna vejvlet paket dekompozicija.

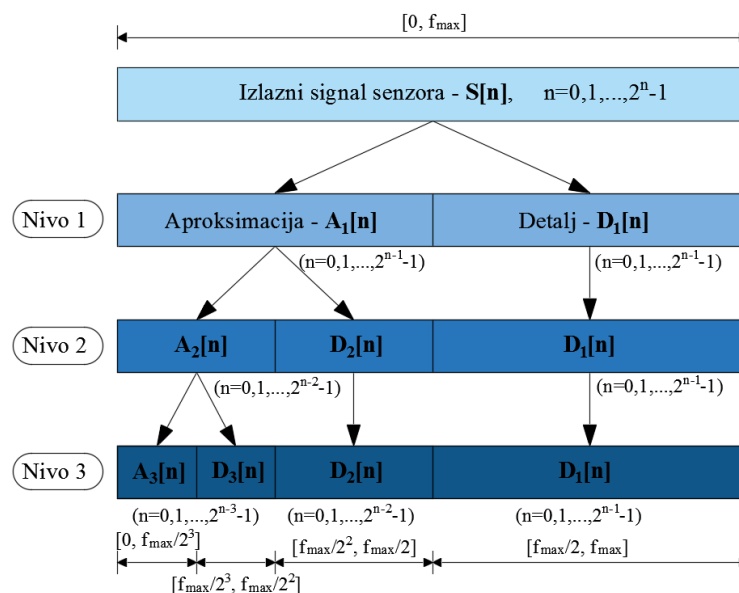


Slika 11. Jednostepeni filter signala

Razmotrimo slučaj Brzog Diskretnog Vejvlet Dekompozicionog Stabla ($FDWDT$) u m -nivoa od izlaznog signala senzora $S(n)$ koji ima 2^n podataka i frekventni opseg $0-f_{max}$. Sa H_0 i H_1 označimo niskopropusni i visokopropusni filter. Signal senzora $S(n)$ u nivou 1 prolazi kroz H_0 i H_1 filtere, uz smanjenje uzorkovanja za faktor 2. Dekomponovani signal koji je prošao kroz niskopropusni filter H_0 , uz smanjenje uzorkovanja za faktor 2, ima 2^{n-1} podataka i sadrži frekventni opseg između 0 i $f_{max}/2$, i naziva se aproksimacija u nivou 1, označenom sa $A_1(n)$. Slično tome, detalji u nivou 1 dobijaju se tako što signal $S(n)$ prođe kroz visokopropusni filter H_1 , uz smanjenje uzorkovanja za



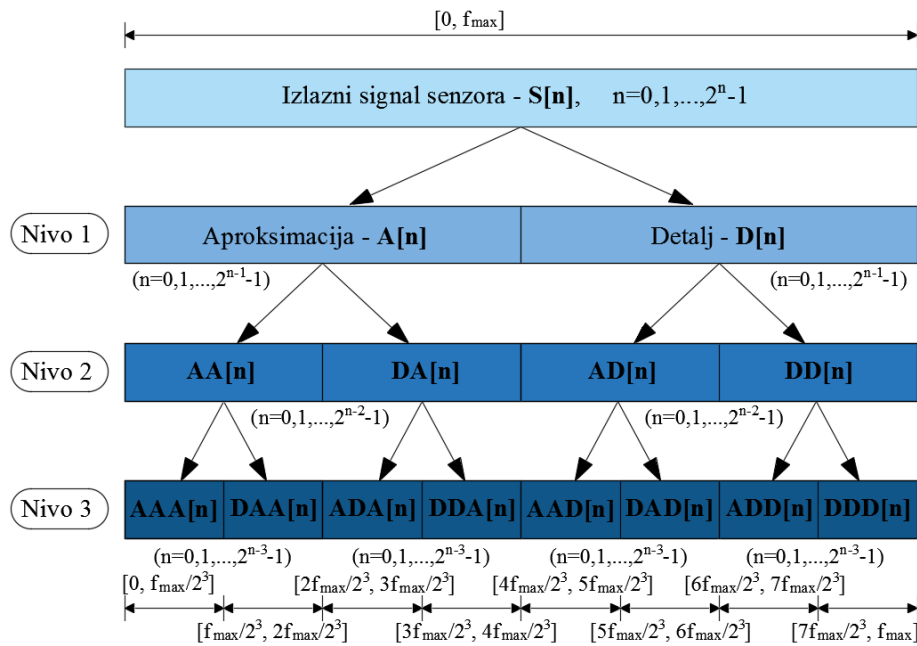
faktor 2, sa frekventnim opsegom $(f_{max}/2)$ - f_{max} . Dalje u *nivou* 2 samo aproksimacija $A_1(n)$ prolazi kroz H_0 i H_1 filtere, sa smanjenjem uzorkovanja za faktor 2, formirajući novu aproksimaciju $A_2(n)$ i detalj $D_2(n)$ koji imaju 2^{n-2} podataka. Detalj $D_1(n)$ se jednostavno prebacuje u *nivo* 2. Aproksimacija $A_2(n)$ ima frekventni opseg 0 - $(f_{max}/4)$, dok detalj $D_2(n)$ ima frekventni opseg $(f_{max}/4)$ - $(f_{max}/2)$. Dalje se procedura ponavlja do željenog nivoa dekomponovanja signala. Konačno, u m -*nivou* početni signal $S(n)$ može se predstaviti sledećim setom dekomponovanih signala $\{A_m(n), D_m(n), D_{m-1}(n), \dots, D_2(n), D_1(n)\}$. Frekventni opseg aproksimacije $A_m(n)$ je 0 - $(f_{max}/2^m)$, dok frekventni opseg detalja $D_j(n)$ nekog *među-nivoa* $1 \leq j \leq m$ je $(f_{max}/2^j)$ - $(f_{max}/2^{j-1})$. Prethodno opisana procedura brzo diskretne vejjlet dekompozicije prikazana je na Slici 12.



Slika 12. Algoritam brze diskretne vejjlet dekompozicije signala

Algoritam Diskretne Vejjlet Paket Dekompozicione (DWPDS) je slično FDWDS algoritmu osim što se kod DWPDS u svakom nivou dekompozicije iznova dekomponuje i detalj. Izlazni signal senzora $S(n)$ takođe prolazi kroz H_0 i H_1 filtere, uz smanjenje uzorkovanja za faktor 2, formiraju dva nova signala (aproksimaciju $A(n)$ i detalj $D(n)$). U sledećem koraku dekompozicije, aproksimacija prolazi kroz filtere, i formira dva nova signala (aproksimaciju $AA(n)$ i detalj $DA(n)$). Međutim, i detalj prolazi kroz filtere, i formira takođe dva nova signala (aproksimaciju $AD(n)$ i detalj $DD(n)$), što nije bio slučaj kod FDWDS. Procedura se dalje nastavlja do željenog nivoa dekompozicije. Na Slici 13 prikazana je DWPDS u tri nivoa. DWPDS može se smatrati kao generalizovani FDWDS. Ono što je prednost DWPDS u odnosu na FDWDS je što se početni signal $S(n)$ može dekodirati na

više načina. Tako na primer za dekompoziciju u tri nivoa prikazanu na Slici 13 signal $S(n)$ može se iskazati kao: (a) koristeći samo signale iz trećeg koraka dekompozicije $S(n)=AAA(n)+DAA(n)+ADA(n)+DDA(n)+AAD(n)+DAD(n)+ADD(n)+DDD(n)$, ili (b) kombinujući različite korake $S(n)=AAA(n)+DAA(n)+DA(n)+AAD(n)+DAD(n)+DD(n)$.



Slika 13. Algoritam diskretne vejlvet dekompozicije signala

Primena vejlvet dekompozicije signala dobila je na značaju nakon potrebe analize merenih signala mernom opremom u laboratoriji ili na gradilištu. Signali koji se dobijaju tim putem potrebno je analizirati u frekventnom i vremenskom domenu. Zbog toga je vejlvet dekompozicija signala veoma pogodna u ovoj primeni. Pored toga široko je zastupljena i u uklanjanju šumova u podacima, klimatologiji, medicini, seizmologiji, obradi slika i drugog.

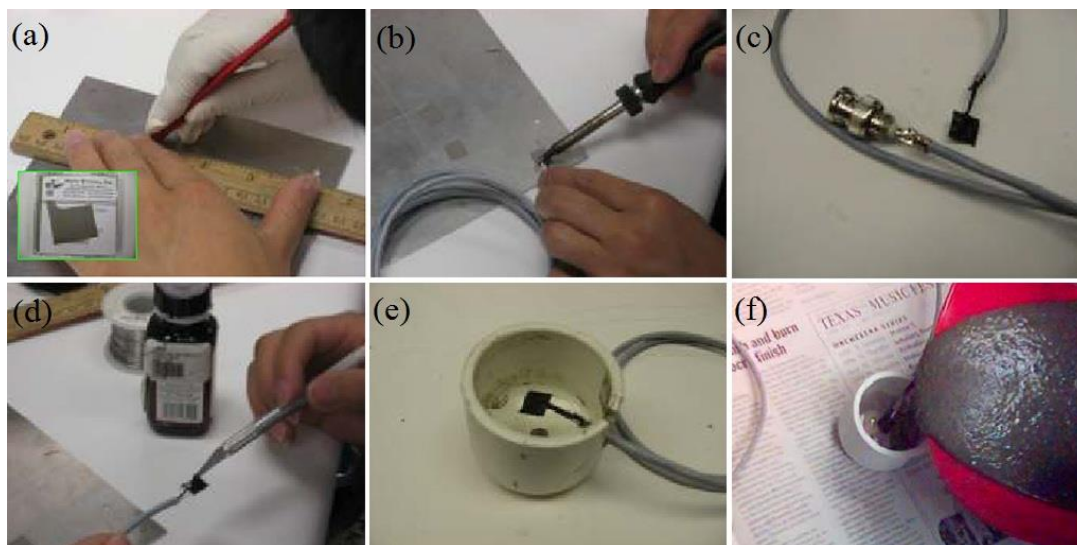


3. DETEKCIJA OŠTEĆENJA KOD LINIJSKIH BETONSKIH KONSTRUKCIJA

3.1. Piezoelektrični pametni agregati (PZT PA)

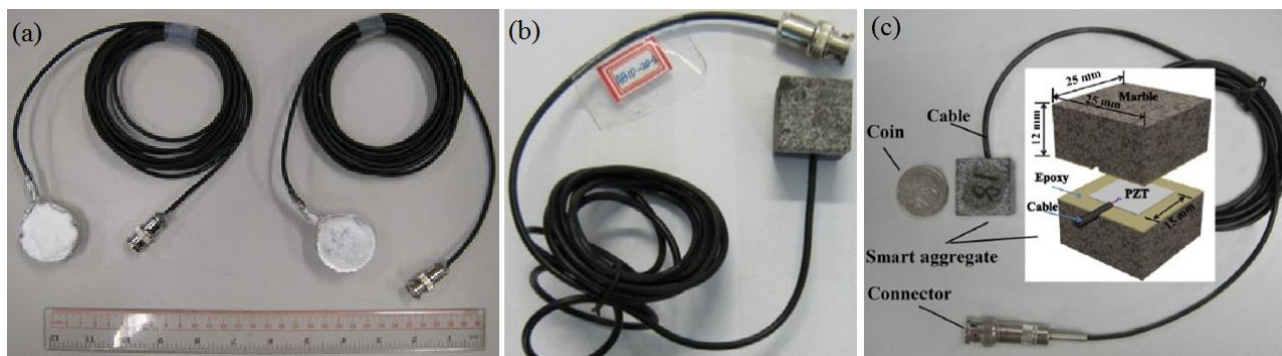
Monitoring i detekcija oštećenja armiranobetonskih konstrukcija upotrebom piezoelektričnih aktuatora/senzora postala je moguća i realna za praktičnu primenu nakon razvoja piezoelektričnih pametnih agregata (PZT PA). Multifunkcionalni pametni senzori nazvani piezoelektrični pametni agregati su razvijeni i patentirani na Hjuston Univerzitetu u Americi. Od tada je urađeno puno istraživanja u cilju ispitivanja mogućnosti primene PZT PA za detekciju oštećenja i monitoringa kod AB konstrukcija u realnom vremenu ili njemu bliskom. Cilj razvijenih metoda i postupaka za detekciju, lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja jeste prikupljanje dovoljnog broja pouzdanih podataka na osnovu kojih bi se donela odluka o daljim intervencijama. Dalje intervencije (pod pretpostavkom da je detekcijom utvrđeno postojanje oštećenja u konstrukciji) podrazumevaju donošenje odluke o vizuelnoj inspekciji, eventualnom detaljnom ispitivanju konstrukcije, na osnovu čega se donesi definitivna odluka o merama sanacije, rekonstrukcije ili rušenja objekta.

Olovna cirkonatna titanitna (PZT) pločica, zaštićena hidroizolacionim slojem i ugrađena u veoma mali betonski blok, mermer ili stenu predstavlja PZT PA. Piezoelektrični Pametni Agregat (*Piezoelectric Smart Aggregate*) je dobio takav naziv: **Piezoelektrični** (*Piezoelectric*) - jer u sebi sadrži pločicu sa piezoelektričnim svojstvima (efektima), **Pametni** (*Smart*) - jer ima pametne karakteristike i multifunkcionalni karakter, **Agregat** (*Aggregate*) - jer je ugrađen u mali betonski blok (npr. oblik jednakostraničnog kvadra $20 \div 30 \text{ mm}$, ili valjka prečnika i visine $20 \div 30 \text{ mm}$) veličine realnog zrna agregata $16 \div 31,5 \text{ mm}$. Postupak proizvodnje PZT PA uglavnom se sastoji iz sledećih koraka: a) odabir veličine i oblika PZT pločice (Slika 14a), b) lemljenje (zavarivanje) električnog kabla za PZT pločicu (Slika 14b), povezivanje električnog kabla za BNC konektor (Slika 14c), zaštita pločice hidroizolacionim slojem (Slika 14d), pravljenje cementne paste (mešavina cementa, vode i sitnog peska), pravljenje oplata (od plastike, drveta ili čelika) odgovarajućeg oblika i veličine, podmazivanje oplata zbog lakšeg vađenja PZT PA iz oplata nakon očvršćavanja cementne paste, fiksiranje PZT pločice unutar oplata (Slika 14e), nalivanje sveže cementne paste (Slika 14f), negovanje 48h i konačno vađenje PZT PA iz oplata.



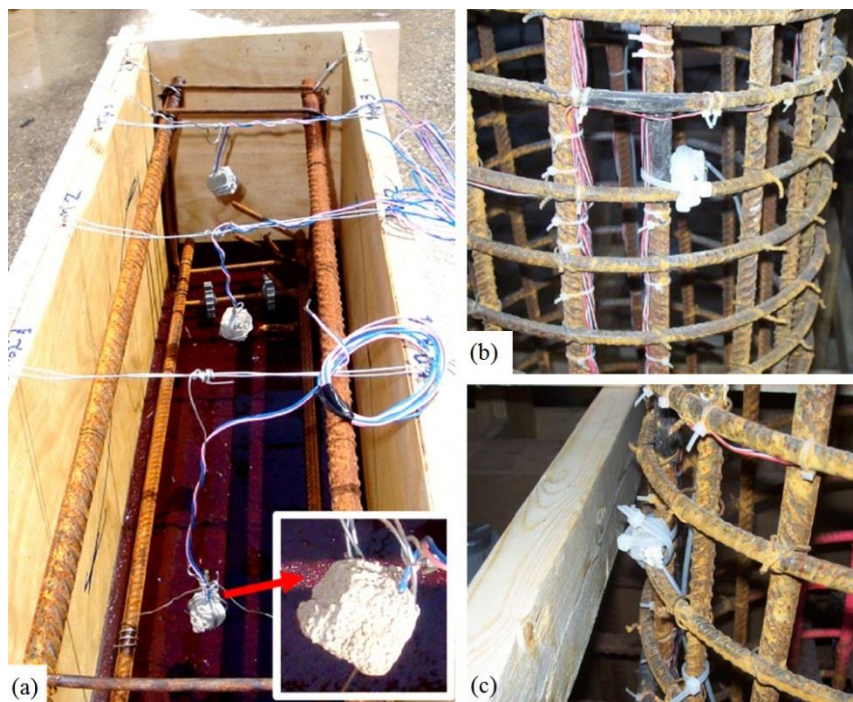
Slika 14.– Glavne faze pri proizvodnji PZT PA: a) Sečenje PZT pločice iz veće ploče, b) Varenje (Lemljenje) 24/2 kabal za PZT pločicu, c) Fiksiranje električnog kabla za BNC konektor, d) Hidro zaštita PZT pločice, e) Fiksiranje PZT pločice za oplatu, f) Punjenje oplata cementnom pastom. [86]

Pored ugrađivanja PZT pločice u cementnu pastu (Slika 15a), pločice se mogu ugraditi u male mermerne blokove (Slika 15b, 15c) ili blokove od drugih vrsta stena.



Slika 15. – Primeri PZT PA: a) cementni PZT PA cilindričnog oblika [87], b) Mermerni kuboidni PZT PA [88], c) Struktura mermernog PZT PA [89].

PZT pločice karakteriše velika krtoš i osetljivost na vlagu zbog čega su nepođodne za primenu u građevinarstvu bez adekvatne zaštite. PZT PA štiti PZT pločicu od vlage i mehaničkih udara prilikom izlivanja svežeg betona i tokom eksploatacije objekta. Ugradnja PZT PA u realnoj konstrukciji sprovodi se fiksiranjem za armaturu (Slika 16b ,16c) ili oplatu (Slika 16a) na unapred predviđenom mestu. Kod ugradnje bitno je voditi računa da se mesto i orijentacija PZT PA ne promeni tokom izlivanja sveže betonske mase.



Slika 16. – Fiksiranje PZT PA unutar betonske konstrukcije: a) ugradnja PZT PA za drvenu oplatu AB grede [90], b-c) PZT PA fiksiran za armaturni koš [91].

Nakon ugradnje PZT PA u AB konstrukciju, za detekciju oštećenja obično se koristi uređaj za generisanje naponskog signala (uglavnom „sweep“ sinusoidni, kratki impulsni signali i dr.). Pomenuti naponski signal dalje se pojačava pomoću pojačivača amplitude, koji dalje prenosi napon na PZT PA aktuator ugrađen u AB konstrukciju. Prostorni elastični talasi se prostiru kroz AB konstrukciju kao posledica aktiviranja PZT PA aktuatora koristeći inverzni piezoelektrični efekat. Sa druge strane, drugi PZT PA koristi se kao senzor da prihvati dolazni talas i pretvori ga u naponski signal na bazi direktnog piezoelektričnog efekta. Konačno, ovaj izlazni signal senzora se prenosi u skladištenje podataka. Gore napisano predstavlja kratak opis procedure i opremu koja se koristi prilikom detekcije oštećenja AB konstrukcije primenom PZT PA.

Primena PZT PA na detekciji oštećenja je analizirana za različite slučajeve oštećenja, različite konstruktivne elemente, slučajeve opterećenja itd. U laboratorijskim uslovima detekcija oštećenja na bazi energetskog pristupa i jednodimenzionalnog indeksa oštećenja urađena je za gredne elemente [92,93]. Nanošenje opterećenja na grede urađeno je pomoću hidrauličkih presa i praćena je pojava prslina kao i njihova dalja propagacija [94]. Zaključeno je da primenjeni postupak detekcije oštećenja može da detektuje oštećenje, ali detaljnije informacije o prslinama, kao što su njena lokacija, dimenzije, orijentacija, nije moguće utvrditi ovim postupkom [95]. Takođe, urađen je



monitoring AB zidova pod pseudo-statičkim opterećenjem do postepene pojave prvih prslina i dalje do loma [96]. Eksperimentalni rezultati pokazuju da primenjeni vejevlet-paket-indeks oštećenja je efikasan u određivanju količine oštećenja u različitim delovima AB zida. Osim toga, primena PZT PA testirana je eksperimentalnim i numeričkim putem na AB ramovima. U cilju detekcije oštećenja primenjen je energetski jednodimenzionalni indeks oštećenja, dok za potrebe prikupljanja informacija o propagaciji oštećenja tokom vremena i položaju oštećenja, primenjena su dva tipa indeksa oštećenja: a) matrični indeks oštećenja na bazi istorije senzora (sensor-history damage index matrix - SHDIM) i b) matrični aktuator-senzor indeks oštećenja (actuator-sensor damage index matrix - ASDIM). Konačno, u ovom istraživanju navodi se da pristup na bazi primene PZT PA i indeksa oštećenja imaju veliki potencijal za monitoring konstrukcija građevinskih objekata u realnim dimenzijama za različite slučajeve loma, uključujući lokalni ili globalni lom [97]. Osim statičkog ili kvazi-statičkog opterećenja, urađena su eksperimentalna istraživanja na AB konstruktivnim elementima usled dinamičkog opterećenja. Tako je urađeno istraživanje primene PZT PA za detekciju oštećenja kod kružnih AB stubova i stubova ojačanih polimernim vlaknima usled cikličnog kombinovanog opterećenja za različite kombinacije faktora torzionog momenta [98]. U ovom slučaju primenjeni su trodimenzionalni PA za detekciju oštećenja. Eksperimentalno istraživanje je pokazalo da orijentacija PZT pločice utiče na amplitudu odgovora ali ne utiče na trend prigušenja energije prostirućeg talasa [99]. Slično prethodnom istraživanju, urađena su eksperimentalna merenja na AB stubovima usled seizmičkog opterećenja i praćen je dobijeni odgovor u PZT PA. Došlo se do zaključka da PZT PA mogu da detektuju ozbiljnost nastalog oštećenja u AB stubovima usled seizmičkog opterećenja, ali osim toga, PZT PA mogu se koristiti za detekciju seizmičkog odgovora u zonama stubova na osnovu kojih se može odrediti jačina seizmičkog udara [100].

Do sada prikazani primeri eksperimentalnih laboratoriskih istraživanja ukazuju da PZT PA imaju budućnost u monitoringu realnih građevinskih konstrukcija. To je i pokazano na primeru mosta Niu-Dou u Yi-Lan oblasti u Tajvanu 2010 godine [101]. Nacionalni centar za istraživanje seizmičkog dejstva (The National Center for Research on Earthquake Engineering - NCREE) uradio je seizmičko istraživanje pojave oštećenja na stubovima mosta i detekciju primenom PZT PA. Kao i u prethodnim istraživanjima, PZT PA su uspešno primenjeni u detekciji realnih konstrukcija velikih dimenzija. Pored nadzemnih AB elemenata konstrukcije, u realnim uslovima ispitan je koncept detekcije oštećenja pomoću ugrađenih PZT PA u betonskim šipovima zabijenim u tlo. Nakon izvedenih eksperimentalnih istraživanja došlo se do zaključka da PZT PA mogu da izazovu



prostiranje elastičnih talasa kroz betonski šip i da prihvate elastični talas. Takođe, da postojanje oštećenja utiče na promenu energije prostiranja talasa koje je moguće pratiti putem već pomenutih postupaka detekcije oštećenja na bazi 1D indeksa oštećenja [102].

PZT PA su multifunkcionalni aktuatori/senzori koje karakterišu sledeće osobine: jednostavnost, niska cena, brz odgovor, visoka pouzdanost, stabilan odgovor, mala težina, širok frekventni opseg i multifunkcionalnost. Multifunkcionalni su jer osim za detekciju oštećenja, koriste se, između ostalog, i za: a) detekciju udara [103], b) određivanje ranih čvrstoća betona [103], c) praćenje procenta vlažnosti u betonu [104], d) monitoring brzina longitudinalnih talasa u betonu [105], e) detekcija prijanjanja betona i armature [106], f) monitoring normalnih i smičućih napona usled seizmičkih uticaja [107].

3.2. MONITORING

Gredni (linijski) betonski elementi predstavljaju konstrukcijske elemente koji imaju jednu dimenziju izraženu u odnosu na druge dve. Najčešći vid ovih elemenata su štapovi, grede i stubovi. Poprečni preseci uglavnom su pravougaoni, kvadratni ili kružni, ali mogu biti i 'T' ili 'I' preseka. Ovaj tip betonskih elemenata primenjuje se kod skeletnih konstrukcija koje su u potpunosti napravljene od greda i stubova ali može se javiti u pojedinim delovima panelnih ili masivnih konstruktivnih sistema. Gredni betonski elementi su nosećeg karaktera u konstrukciji i samim tim njihova uloga u prenošenju opterećenja je značajna. Na stabilnost objekta krucijalnu ulogu imaju stubovi i njihov monitoring je od velikog značaja kako bi se obezbedila kvalitetnija analiza sigurnosti objekta. Konačno, zastupljenost skeletnih konstrukcija kod postojećih i novoprojektovanih objekata je velika i samim tim značaj detekcije oštećenja i praćenje razvoja oštećenja je bitna za preciznije definisanje pouzdanosti i stabilnosti objekta kroz vreme. U ovom delu disertacije biće prikazan postupak detekcije oštećenja kod linijskih betonskih konstrukcija na bazi ultrazvučnog prostiranja talasa izazvanog piezoelektričnim aktuatorima, vejevlet dekompozicije izlaznih signala senzora i jednodimenzionalnog energetskog indeksa oštećenja.

Monitoring betonskih konstrukcija pomoću piezoelektričnih aktuatora/senzora je poslednjih godina veoma popularan zbog svojih odličnih karakteritika, od kojih se mogu izdvojiti: visoka pouzdanost, brz odgovor, niska cena senzora, mala težina senzora, širok frekventni opseg, multifunkcionalnost piezoelektričnih PA. Generalno, postoji tri glavne kategorije monitoringa i detekcije oštećenja kod betonskih konstrukcija na bazi piezoelektričnih aktuatora/senzora:



- 3.2.1. Monitoring na bazi vibracija:** ovaj pristup podrazumeva pobudu konstrukcije spoljašnjim izvorom i detekciji oscilovanja konstrukcije pomoću piezoelektričnog senzora koji su postavljeni na površini konstrukcije ili su ugrađeni u nju. Uspešno su primenjeni pristupi na bazi praćenja karakteristika vibracije konstrukcije (modalna analiza i frekvencija modela) [108]. Princip na bazi analize vibracija konstrukcije je globalni princip koji je obično slabo osetljiv na mala lokalna oštećenja i teško može da lokalizuje oštećenje. Dobar je za određivanje dinamičkih karakteristika konstrukcije i njihove promene sa nastankom oštećenja, ali se ne preporučuje za praćenje stanja oštećenja.
- 3.2.2. Monitoring na bazi elektromehaničke impedanse:** je metod monitoringa u realnom vremenu kojim je moguće detektovanje i kvantifikovanje oštećenja. Princip funkcionisanja metode je baziran na elektromehaničkim karakteristikama piezoelektričnih materijala. Generalno, monitoring na bazi elektromehaničke impedance (EMI) koristi male piezoelektrične senzore, fiksirane za betonsku konstrukciju tako da simulatano mogu vršiti pobudu konstrukcije visokim frekvencama i da mere promenu u izmerenoj impedansi. Pošto je piezoelektrična pločica direktno zalepljena za konstrukciju, mehanička impedansa konstrukcije je u direktnoj vezi sa električnom impedansom PZT pločice [109]. EMI tehnika monitoring se bazira na direktnoj vezi mehaničke-električne impedance konstrukcije i PZT senzora/aktuatora [110]. EMI tehnika je, između ostalog, uspešno primenjena za detekciju oštećenja kod betonskih konstrukcija usled seizmičkog opterećenja [111], detekciju većeg broja oštećenja unutar betonskih greda [112], monitoring AB ramovskih konstrukcija [113] i masivnih betonskih blokova [114]. Najveća mana ovog pristupa je neophodnost primene veoma visokih frekvencija za pobudu PZT aktuatora.
- 3.2.3. Monitoring na bazi propagacije talasa:** ovaj pristup koristi PZT aktuator/senzore zalepljene za konstrukciju da generišu prostiranje Lamb talasa po površini konstrukcije ili PZT PA za pobudu prostornih talasa unutar betonske konstrukcije. Lamb talasi se poslednjih godina veoma puno koriste u detekciji oštećenja zbog svojih odličnih karakteristika prostiranja na relativno velikim udaljenostima uz relativno mala prigušenja. Međutim, ovaj pristup je gotovo nezastupljen kod betonskih konstrukcija jer su betonske konstrukcije često geometrijski kompleksne i nisu tankozidne konstrukcije



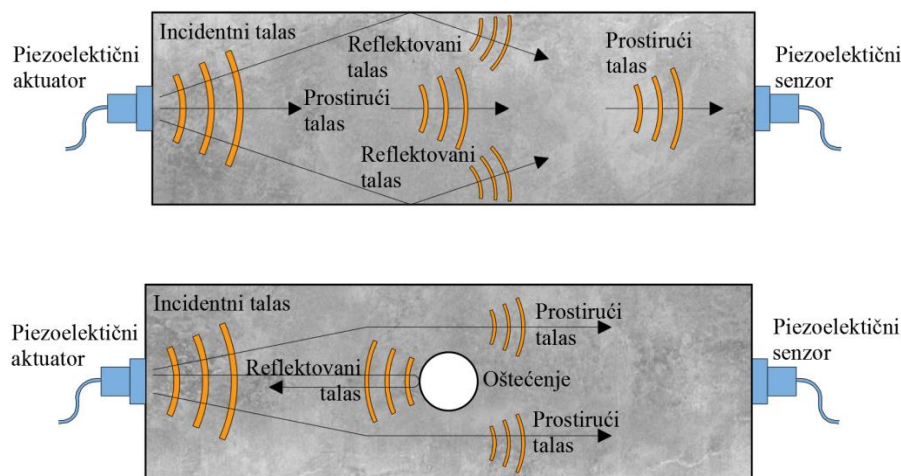
kod kojih je moguće prostiranje Lamb talasa. Zbog toga, pristup sa Lamb talasima našao je primenu kod čeličnih, aluminijumskih i tankih kompozitnih ploča.

Drugi tip pristupa na bazi prostiranja talasa predstavlja korišćenje talasa u betonskim konstrukcijama izazvanih pomoću PZT PA aktuatora. Korišćeni opseg frekvenca prostornih talasa je različit i kreće se u opsegu niskih frekvenca (nekoliko desetina ili stotina Hz) i u opsegu ultrazvuka (20kHz-200kHz). Oba pomenuta pristupa koriste sledeće konfiguracije za detekciju oštećenja: a) “*Pitch-catch*” konfiguracija: [115] (jedan PZT transducer se koristi kao aktuator da emituje talas kroz konstrukciju dok se drugi PZT transducer koristi kao senzor da prihvati dolazni talas); b) “*Pulse-echo*” konfiguracija: [116] (neophodan samo jedan PZT uređaj, pomoću koga se emituje prostiranje talasa i detektuje reflektovani talas od oštećenja) i c) “*Time-reversal*” konfiguracija: (signal emitovan pomoću aktuatora stiže do senzora pošto se modifikuje usled uticaja sredine kroz koju prolazi. Ukoliko se izlaznom signalu senzora preokrene vreme i emituje sada od senzora ka aktuatoru, onda se i efekat sredine takođe preokrene [117].) Ovaj pristup obično ne zahteva početno čitanje. U ovoj disertaciji korišćen je pristup monitoringa konstrukcija pomoću prostornih talasa sa “pitch-catch” konfiguracijom i sa signalom emitovanja pri frekvenci od 100 kHz.

3.3. Princip detekcije oštećenja na bazi jednodimenzionalnog indeksa oštećenja

Princip detekcije oštećenja koji će biti korišćen u ovom delu disertacije zasnovan je na primeni piezoelektričnih efekata. Piezoelektrični efekat predstavlja fenomen generisanja električnog napona kada je na piezoelektrični materijal nanešen mehanički napon (direktni piezoelektrični efekat), ili suprotno, stvaranje mehaničkih deformacija kao posledica nanetog električnog napona (inverzni piezoelektrični efekat). Kada se električni napon nanese na piezoelektričnu aktuator pločicu u vremenski ograničenom interval (ulazni signal), početno stanje mirovanja se narušava i talas počinje da propagira kroz betonsku konstrukciju. Druga piezoelektrična pločica (senzor) stvara električni napon izazvan usled mehaničkog napona prouzrokovanog dolazećim talasom. U slučaju da oštećenje postoji između piezoelektričnog aktuatora i senzora, onda energija dolaznog talasa slabi. Praćenjem promena u izlaznim signalima senzora moguće je detektovati nastanak i dalje prostiranje oštećenja kod betonskih linijskih konstrukcija. Princip detekcije oštećenja upotrebom propagacije talasa i “pitch-catch” konfiguracije aktuatora/senzora koja se može primeniti za monitoring betonskih konstrukcija prikazana je na Slici 17. Na slici 17 gore predstavljen je neoštećeni element dok je na donjoj slici prikazan element sa kružnim oštećenjem. Kao što se može

videti na slikama, kod neoštećenog elementa postoji nesmetano prostiranje talasa od aktuatora prema senzoru. Aktiviranjem PZT aktuatora dolazi do prostiranja talasa i reflektovanja samo od spoljašnjih strana betonskog elementa. Međutim, kod elementa sa oštećenjem postoji reflektovanje prostirućeg talasa od oštećenja i do pojave ometanog prostiranja talasa unutar betonskog elementa. Ova pojava povodi do promene izlaznog signala senzora na osnovu koje je moguće detektovati postojanje oštećenja unutar betonskog elementa.



Slika 17. – Princip detekcije oštećenja na bazi propagacije talasa

Dekompozicija izlaznog signala senzora može se uraditi različitim metodama analize signala od kojih su najpoznatije Furijeova, Vejvlet i Hilbert-Huang transformacija. U ovoj disertaciji biće korišćena brza diskretna vejvlet dekompozicija (FDWD) signala za potrebe detekcije oštećenja. Osnovna prednost ovog pristupa je što FDWD signal može da tretira lokalno za razliku od Furijeove transformacije. Kao parameter kvantifikacije oštećenja koristiće se jednodimenzionalni indeks oštećenja na bazi korena kvadrata srednjih odstupanja i energije dekomponovanih signala neoštećene i oštećene konstrukcije.

3.4. Jednodimenzionalni indeks oštećenja na bazi korena srednjih kvadratnih odstupanja (1D RMSD DI)

Jednodimenzionalni indeks oštećenja na bazi korena srednjih kvadratnih odstupanja (1D RMSD DI ili na dalje u tekstu samo DI) je široko rasprostranjen indeks oštećenja koji je upotrebljen za veliki broj različitih tipova konstrukcija i slučajeva oštećenja. U ovom delu disertacije biće korišćen za detekciju oštećenja kod linijskih AB elemenata. Postupak njegovog formiranja podrazumeva sledeće korake. Izlazni signal senzora $S[n]$ se dekomponuje pomoću m-nivoa (korišćeno $m=3$) brze



diskretne vejtlet dekompozicije u setove signala (A_1, D_1) , (A_2, D_2) , (A_3, D_3) koristeći algoritam prikazan na Slici 12 (Teorijske postavke).

Pri čemu svaki pojedinačni dekomponovani signal može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$X_j = [x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,n-1}, x_{j,n}] \quad (79)$$

pri čemu je n broj prikupljenih podataka, j je nivo vejtlet dekompozicije. Nakon dekomponovanja izlaznog signala senzora, energija svakog pojedinačnog dekomponovanog signala može se sračunati pomoću sledeće jednačine:

$$E_{i,x} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} |X[n]|^2 \quad (80)$$

pri čemu je $E_{i,x}$ energija dekomponovanog signala, $X[n]$ je dekomponovan signal (aproksimacija ili detalj). Superskript i je vremenski indeks i služi prilikom monitoringa i detekcije oštećenja kroz vreme, odnosno praćenja potencijalnog povećanja oštećenja u vremenu. Za početno (nulto čitanje) merenje $i=h$ (neoštećeno stanje), zatim, za prvo sledeće merenje $i=1$ i na dalje $i=2,3,4\dots$. Na osnovu jednačine (80) moguće je sračunati energiju za sve dekomponovane signale i formirati odgovarajuće vektore za neoštećeno (E_h) i oštećeno (E_i) stanje betonske konstrukcije na sledeći način:

$$E_h = [E_{h,1}, E_{h,2}, \dots, E_{h,q-1}, E_{h,q}] \quad (81)$$

$$E_i = [E_{i,1}, E_{i,2}, \dots, E_{i,q-1}, E_{i,q}] \quad (82)$$

gde je E_i vektor energije oštećene betonske konstrukcije, E_h je vektor energije neoštećene konstrukcije. Konačno, energetski jednodimenzionalni indeks oštećenja na bazi korena srednjih kvadratnih odstupanja je definisan sledećom jednačinom:

$$DI = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^q (E_{i,k} - E_{h,k})^2}{\sum_{k=1}^q (E_{h,k})^2}} \quad (83)$$

pri čemu DI je 1D RMSD indeks oštećenja. Vrednost $DI=0$ znači da je konstrukcija neoštećena a $DI>0$ da konstrukcija ima oštećenja. Veća vrednost DI ukazuje na veća oštećenja konstrukcije. Na osnovu ove karakteristike indeksa oštećenja, pomoću DI moguće je pratiti razvoj promene oštećenja



kroz vreme kod linijskih betonskih elemenata. Međutim, vrednost indeksa oštećenja ne može direktno da se poveže sa veličinom, brojem i položajem oštećenja jer oni zavise od velikog broja parametara: položaja aktuatora, položaja senzora, položaja i veličine oštećenja, broja oštećenja itd. DI se zbog toga može koristiti da se uoči trend stanja oštećenja u konstrukciji, odnosno da li se oštećenje povećava ili ne, bez preciznijih podataka o slici oštećenja. Za određivanje slike oštećenja potrebno je primeniti nešto komplikovanije algoritme, što je prikazano u Poglavljima 2 i 3.

3.5. Primena 1D RMSD DI za detekciju linijskih betonskih konstrukcija

U ovom delu disertacije biće analizirana primena DI na grednim elementima sa pasivnim veštački kreiranim oštećenjima. Analizirana su eksperimentalno urađena merenja i kreirani su adekvatni numerički modeli. Eksperimentalna istraživanja i njihovi rezultati koji su prikazani u ovom delu disertacije su preuzeti iz istraživanja [118]. Numeričke simulacije su urađene korišćenjem standardne metode konačnih elemenata (MKE) u softverskom paketu ABAQUS/STANDARD za modeliranje PZT PA dok eksplicitna metoda konačnih elemenata (EMKE) u komercijalnom paketu ABAQUS/EXPLICIT za modeliranje propagacije talasa.

3.5.1. Eksperimentalna istraživanja

Analizirano je ukupno 10 eksperimentalnih betonskih uzoraka dimenzija 406.4x127x127mm. Po dva uzorka su urađena sa sledećim karakteristikama: a) neoštećeni uzorak, b) uzorak sa zarezom, c) uzorak sa rupom, d) uzorak sa rupom popunjenom metalom, e) uzorak sa rupom popunjenom glinom. Uzorci SA1 i SA2 su neoštećeni i služe kao početna merenja. Uzorci sa zarezom su označeni kao SB1 i SB2 a uzorci sa rupom označeni su sa SC1 i SC2. Analizirani su zarezi sa sledećim veličinama 25.4, 50.8, 76.2 i 101.6mm. Isti betonski uzorak postepeno je sečen od najmanje do najveće vrednosti visine zareza i merenja su urađena za svaku pojedinačnu vrednost zareza, slično tom postupku pripremljeni su i uzorci sa rupom. Uzorci sa metalnim i gipsanim materijalnim defektom obeleženi su sa SD1, SD2 i SD3, SD4. Za svaki tip oštećenja mereno je po dva uzorka kako bi se izbegle mogućnosti slučajnih grešaka pri merenju. Geometrijske karakteristike i opis eksperimentalnih uzoraka prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike eksperimentalnih uzoraka

Geometrijske karakteristike eksperimentalnih uzoraka		
Dužina - L (mm)	Širina - B (mm)	Visina - H (mm)
406.40	127.00	127.00

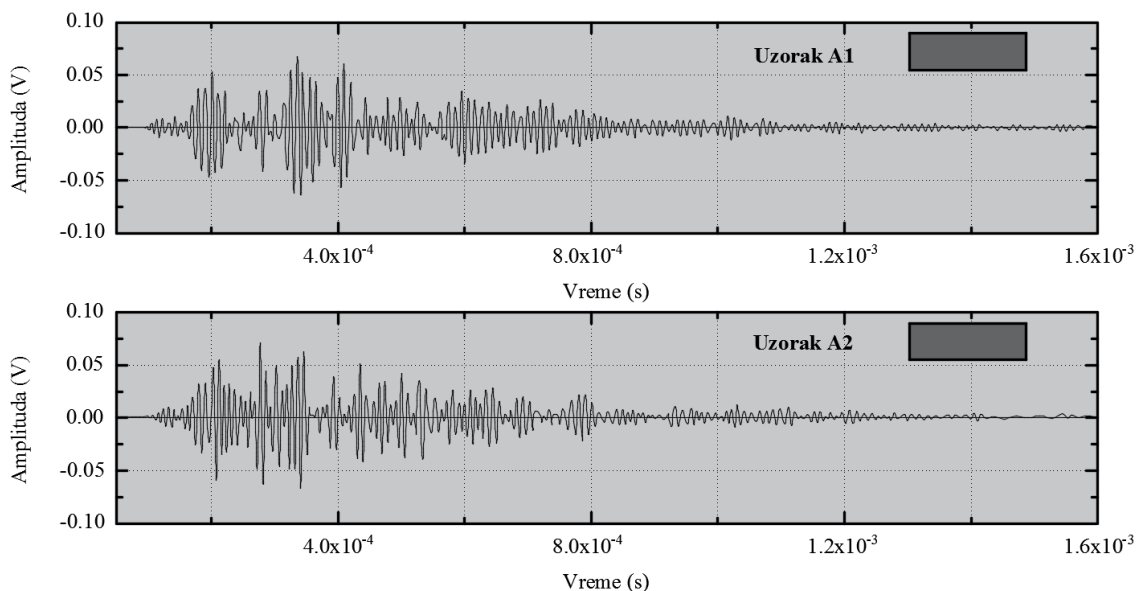


Eksperimentalni uzorci	
Oznaka uzorka	Opis uzorka
SA1, SA2	Neoštećeni uzorci
SB1, SB2	Uzorci sa zarezom Visina zareza - h_{dem} (25.4; 50.8; 76.2; 101.6 mm) Dužina zareza - $B_{dem}=127$ mm Ugao nagiba - $\alpha=90^\circ$
SC1, SC2	Uzorci sa rupom Prečnik rupe - d_{dem} (25.4; 38.1; 50.8; 63.5 mm) Dužina rupe - $B_{dem}=127$ mm Ugao nagiba - $\alpha=90^\circ$
SD1, SD2	Uzorci sa metalnom ispunom rupe Prečnik ispune - d_{dem} (50.8 mm) Dužina ispune - $B_{dem}=127$ mm Ugao ispune - $\alpha=90^\circ$
SD3, SD4	Uzorci sa glinenom ispunom rupe Prečnik ispune - d_{dem} (50.8 mm) Dužina ispune - $B_{dem}=127$ mm Ugao ispune - $\alpha=90^\circ$

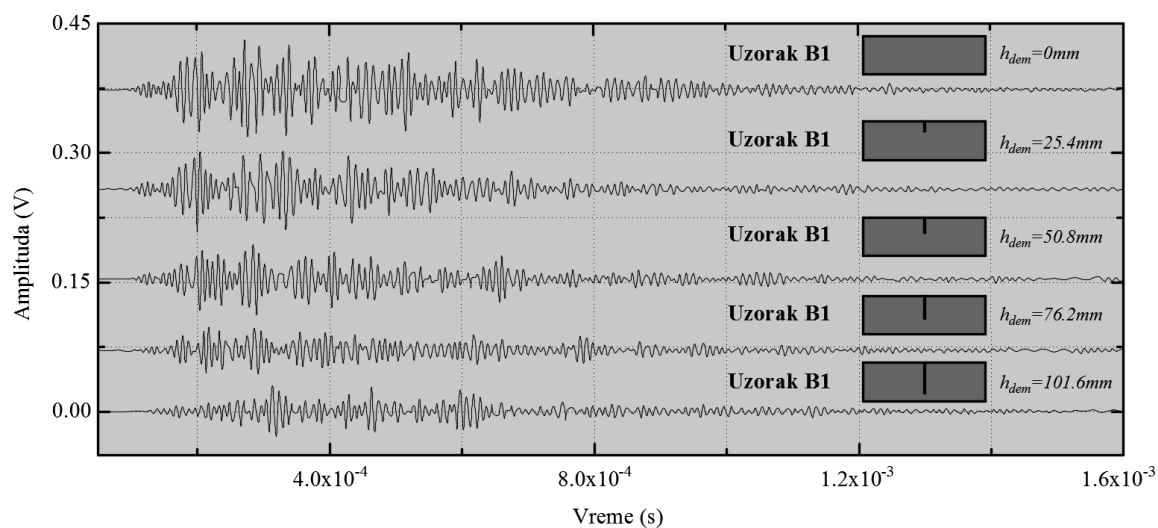
Eksperimentalni betonski uzorci napravljeni su prema sledećem odnosu : Cement/voda/sitni agregat/ krupni agregat jednak 0.6:1:3.4:5 po masi. Pri krajevima leve i desne strane uzorka u centralnoj osi ugrađeni su piezoelektrični pametni agregati. Jedan je korišćen kao aktuator da emituje prostiranje talasa dok je drugi korišćen kao sensor da prihvati dolazni mehanički talas (“pitch-catch” konfiguracija). Ulazni signal je 3.5-ciklusni “Hanning-windowed tone burst”, sa centralnom frekvencom od 100 kHz. Eksperimentalno merenje koristi tri vrste uređaja: kompjuter, instrument za merenje i pojačivač. U instrument za merenje integrisane su sledeće funkcije: osciloskop, generator talasa i uređaj za čuvanje podataka. Generator signala (talasa) se prvo pojačava pomoću pojačivača a onda šalje aktuatoru PZT PA 1. Zatim, PZT PA2 koji se koristi kao senzor prihvata dolazni signal (talas). Konačno, detektovani signal od strane senzora se čuva pomoću instrumenta za merenje i šalje dalje u kompjuter. Kod ovog eksperimenta, korišćena je virtuelna platforma LabVIEW za generisanje ulaznog signala i merenje izlaznih signala. [118].

Na Slikama 18-21 prikazani su izlazni signali izmereni ekperimentalnim putem. Izlazni signal izmeren za neoštećene uzorke prikazan je na Slici 18. Na Slici 19 prikazani su signali detektovani PZT PA na uzorku SB1 sa zarezom, dok na Slici 20 prikazani su signali za uzorak SC1 sa rupom različitih prečnika. Konačno, na Slici 21 prikazani su signali za uzorke sa čeličnom i gipsanom

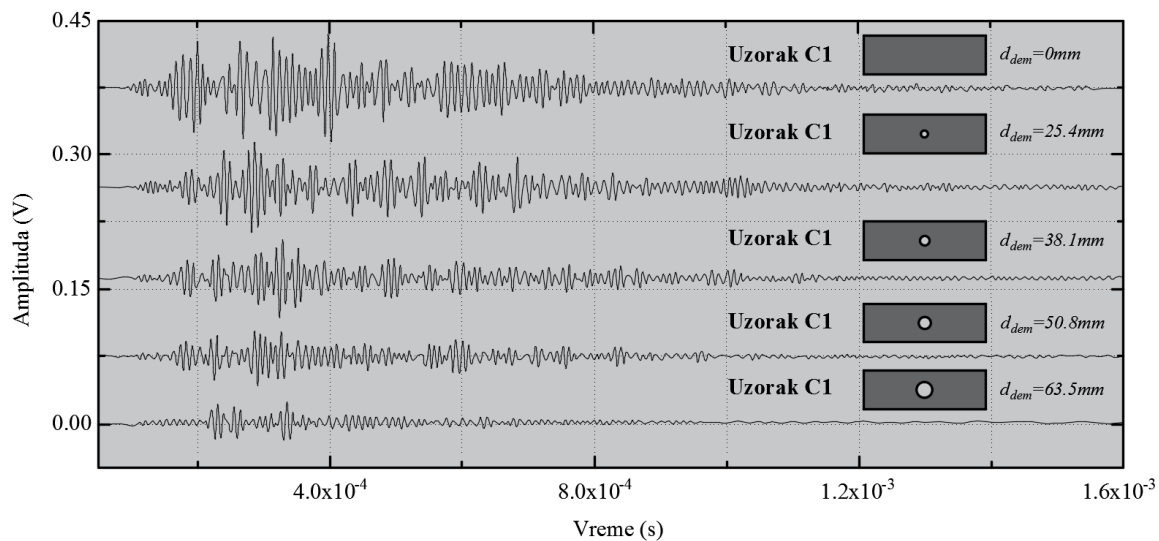
ispunom. Svi prikazani signali su naponski vremenski signali. Trajanje signala je $1.6 \times 10^{-3}(s)$ i za to vreme za sve uzorke talas se prigušio. Maksimalna amplituda za neoštećene uzorke je oko $0.07 V$.



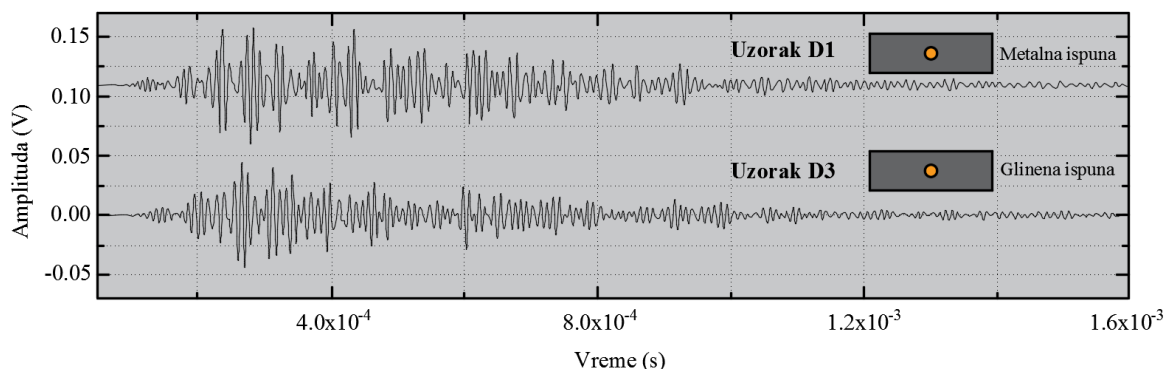
Slika 18. – Izlazni signali senzora izmereni za neoštećene betonske uzorke SA1 i SA2



Slika 19. – Izlazni signali senzora izmereni za betonski uzorak SB1 sa različitom veličinom zareza



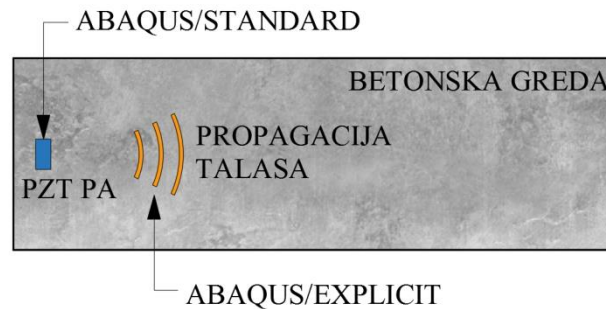
Slika 20. – Izlazni signali senzora izmereni za betonski uzorak SC1 sa različitom veličinom rupe



Slika 21. – Izlazni signali senzora izmereni za betonske uzorke SD1 i SD2 sa različitom materijalnom ispunom

3.5.2. Numeričke simulacije

Numerička simulacija urađena je na ukupno 11 prostornih modela upotrebom standardne MKE za modeliranje PZT PA u programskom paketu ABAQUS/STANDARD i EMKE za modeliranje ultrazvučnog prostiranja talasa u programskom paketu ABAQUS/EXPLICIT. Model MA je neoštećen i njegov izlazni signal senzora korišćen je kao nulto čitanje. Modeli sa zarezom označeni su sa oznakom MB (modeli MB1, MB2, MB3 i MB4 imaju sledeće dužine zareza $l=25.4mm$; $50.8mm$; $76.2mm$; $101.6mm$, redom). Modeli sa rupom označeni su sa MC (modeli MC1, MC2, MC3 i MC4 imaju sledeće prečnike rupe $d=25.4mm$; $38.1mm$; $50.8mm$; $63.5mm$, redom). Konačno, model sa metalnom ispunom označen je kao MD1 i model sa ispunom od gline označen je sa MD2. Oznake, geometrija i opis modela prikazane su u Tabeli 3 i na Slici 26.



Slika 22. – Numerička simulacija – primenjeni pristup modeliranju

3.5.2.1. Numeričko modeliranje PZT PA aktuatora

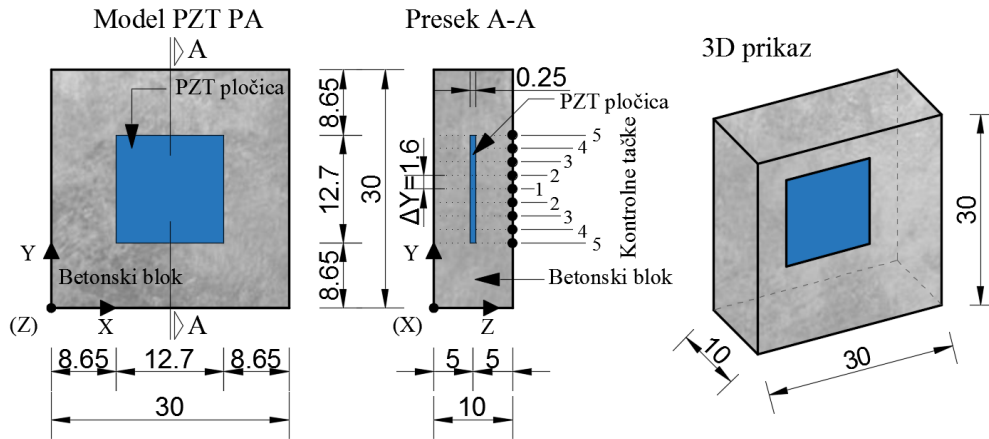
Kao što je već pomenuto i prikazano na Slici 22, modeliranje PZT PA aktuatora urađeno je u programskom paketu ABAQUS/STANDARD. Numerička simulacija PZT PA urađena je na trodimenzionalnom modelu koristeći standardnu metodu konačnih elemenata. Model pametnog agregata sastoji se iz dva dela, piezoelektrična pločica (12.7x12.7x0.25mm) i mali betonski blok (30x30x10mm), prikazano na Slici 23. MKE procedura korišćena za modeliranje PZT PA primenom odabranog softvera (ABAQUS/STANDARD) tretira elektromehaničke karakteristike piezoelektričnih elemenata na sledeći način:

- Proračun piezoelektričnih elemenata može se tretirati kroz statičku i dinamičku ananlizu, modalnu analizu, proračun sopstvenih frekvenca ili procedura dinamičke ravnoteže;
- neophodno je korišćenje piezoelektričnih konačnih elemenata;
- električni napon izaziva mehaničku dilataciju, dok mehanički napon izaziva pojavu električnog polja;
- može se koristiti za modeliranja problema kontinuma u jednoj, dve ili tri dimenzije;
- zahteva korišćenje piezoelektričnih materijalnih karakteristika;
- može se koristiti za obe, linearnu ili nelinearnu analizu (kod nelinearne analize piezoelektrični deo modela tretira se kao linearni).

Primenjeni MKE model PZT pločicu tretira sa sledećim materijalnim osobinama:

- pruža linearnu zavisnost između mehaničkih i električnih karakteristika materijala;
- kod piezoelektričnih elemenata postoje mehaničke i električne promenljive;

- PZT materijal je onaj kod koga električno polje izaziva mehaničku deformaciju, dok mehanički napon izaziva pojavu električnog polja.



Slika 23. – Geometrijske karakteristike modela PZT PA (dimenzije prikazane u mm)

MKE modeliranje piezoelektričnih pločica bazirano je na konstitutivnim jednačinama elektromehaničkog ponašanja PZT materijala. Definisane mehaničkih i električnih osobina pomoću konstitutivnih jednačina moguće je uraditi u tri forme: (1) forma mehanički-električni napon (jednačina 84), (2) dilatacija –električni napon forma (jednačina 85) i (3) dilatacija-električna snaga (nestandardna forma):

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^E \varepsilon_{kl} - e_{mij}^\varphi E_m \quad , \quad q_i = e_{ijk}^\varphi \varepsilon_{jk} + D_{ij}^{\varphi(\varepsilon)} E_j \quad (84)$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}^E \sigma_{kl} - d_{mij}^\varphi E_m \quad , \quad q_i = d_{ijk}^\varphi \sigma_{jk} + D_{ij}^{\varphi(\sigma)} E_j \quad (85)$$

sa sledećim oznakama: σ_{ij} , ε_{kl} - tenzor mehaničkog napona i dilatacije; q_i - vector električnog “pomeranja”; D_{ijkl}^E - matrica elastične krutosti; e_{mij}^φ - matrica piezoelektričnih naponskih koeficijenata; d_{mij}^φ - matrica piezoelektričnih dilatacionih koeficijenata; φ – električni potencijal; $D_{ij}^{\varphi(\sigma)}$ - dielektrična karakteristika materijala; E_j - električno polje.

PZT pločica reaguje mehaničkom deformacijom usled nanetog električnog napona (efekat aktuatora), dok električni napon stvara se usled nanetog mehaničkog napona (senzor efekat). Ova veza između električnog polja napona i mehaničke dilatacije je osobina piezoelektričnih materijala. Pri modeliranju PZT PA korišćen je samo prvi piezoelektrični efekat – aktuator efekat (jednačina 85). Na osnovu jednačine (85), očigledno je da elektro-mehaničke osobine zavise od dielektričnog



svojstva $D_{ij}^{\varphi(\sigma)}$ i matrice piezoelektričnih koeficijenata d_{mij}^{φ} . PZT pločica u ovoj analizi mehanički je tretirana kao linearno elastični model.

Jednačine mehaničke ravnoteže i kontinuiteta električnog fluksa za PZT MKE analizu su iskazane na sledeći način:

$$\int_V \sigma : \delta \varepsilon \cdot dV = \int_S t \cdot \delta u \cdot dS + \int_V f \cdot \delta u \cdot dV \quad (86)$$

$$\int_V q \cdot \delta E \cdot dV = \int_S q_S \cdot \delta \varphi \cdot dS + \int_V q_V \cdot \delta \varphi \cdot dV \quad (87)$$

pri čemu je σ Košijev napon u posmatranoj tački; t je sila po površini tela; f je gravitaciona sila po jedinici zapremine tela; δu je virtualno polje brzine; $\delta \varepsilon = \text{sym}(\partial \delta u / \partial x)$; q je vector električnog fluksa; q_S je električni fluks po jedinici površine tela; q_V je električni fluks po jedinici zapremine tela; $\delta \varphi$ je virtuelni potencijal i $\delta E = -\partial \delta \varphi / \partial x$.

Električno polje napona i dilatacija za piezoelektrične elemente analizira se na nivou čvorova i aproksimira se interpolacionim funkcijama:

$$u = N^N u^N, \quad \varphi = N^N \varphi^N \quad (88)$$

gde su u^N , φ^N vrednosti u čvorovima dok je N^N niz interpolacionih funkcija. Gradijent električnog polja napona i dilatacija dati su sledećim jednačinama:

$$E = -B_{\varphi}^N \varphi^N, \quad \varepsilon = B_u^N u^N \quad (89)$$

pri čemu B_u^N i B_{φ}^N su izvodi funkcije N^N . Sistem jednačina je definisan u funkciji od čvornih vrednosti:

$$M^{MN} \ddot{u}^N + K_{uu}^{MN} u^N + K_{\varphi u}^{MN} \varphi^N = P^M \quad (90)$$

$$K_{\varphi u}^{MN} u^N - K_{\varphi \varphi}^{MN} \varphi^N = -Q^M \quad (91)$$



Sa sledećim oznakama: M^{MN} - matrica masa; K_{uu}^{MN} - matrica krutosti; $K_{\varphi\varphi}^{MN}$ - dielektrična matrica; $K_{\varphi u}^{MN}$ - piezoelektrična matrica; P^M - vektor mehaničkog opterećenja; Q^M - vektor električnog napona. Jednačinama (92)-(94) opisani su članovi prethodnih izraza:

$$M^{MN} = \int_V \rho N^M \cdot N^N dV \quad , \quad K_{uu}^{MN} = \int_V B_\varphi^M : D_m : B_u^N dV \quad (92)$$

$$K_{\varphi\varphi}^{MN} = \int_V B_\varphi^M \cdot D_\varphi \cdot B_\varphi^N dV \quad , \quad P^M = \int_V N^M \cdot P_v dV + \int_S N^M \cdot P_s dS + P_e^M \quad (93)$$

$$K_{\varphi u}^{MN} = \int_V B_\varphi^M \cdot e : B_u^N dV \quad , \quad Q^M = \int_V N^M \cdot Q_v dV + \int_S N^M \cdot Q_s dS + Q_e^M \quad (94)$$

Pri čemu je ρ zapreminska masa, D_m , D_φ i e su mehanički, električni i piezoelektrični koeficijenti odnosa.

Materijalne karakteristike piezoelektričnih pločica koje su korišćene u ovoj analizi predstavljene su sledećim jednačinama (95)-(99) i Tabelom 2. Dielektrične osobine materijala se definišu pomoću dielektrične matrice koja može biti izotropna, ortotropna i anizotropna. Ortotropni model je korišćen za definisanje dielektričnih osobina PZT pločica pomoću sledećih vrednosti $D_{11}^{\varphi(e)}$, $D_{22}^{\varphi(e)}$, $D_{33}^{\varphi(e)}$, i jednačinom (95):

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} D_{11}^{\varphi(e)} & D_{12}^{\varphi(e)} & D_{13}^{\varphi(e)} \\ D_{21}^{\varphi(e)} & D_{22}^{\varphi(e)} & D_{23}^{\varphi(e)} \\ D_{31}^{\varphi(e)} & D_{32}^{\varphi(e)} & D_{33}^{\varphi(e)} \end{bmatrix} \quad (95)$$

Piezoelektrične karakteristike materijala definisane su pomoću matrice piezoelektričnih dilatacionih koeficijenata. Ova matrica se uvek unosi u opštoj formi sa svih 18 komponenti, od kojih su neki članovi jednaki nuli:

$$[d] = \begin{bmatrix} d_{111}^\varphi & d_{122}^\varphi & d_{133}^\varphi & d_{112}^\varphi & d_{113}^\varphi & d_{123}^\varphi \\ d_{211}^\varphi & d_{222}^\varphi & d_{233}^\varphi & d_{212}^\varphi & d_{213}^\varphi & d_{223}^\varphi \\ d_{311}^\varphi & d_{322}^\varphi & d_{333}^\varphi & d_{312}^\varphi & d_{313}^\varphi & d_{323}^\varphi \end{bmatrix} \quad (96)$$



gde su $[\varepsilon]$, $[d]$ dielektrična i piezoelektrična matrica. Mehaničke karakteristike mogu se definisati pomoću matrice krutosti $[c]$ ili inženjerskih konstanti (jednačine 97 i 98), uzimajući u obzir transverzalnu izotropiju PZT feroelektričnih keramičkih materijala:

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (97)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (98)$$

Pri čemu važi sledeća relacija:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (99)$$

Okolni betonski blok modeliran je kao izotropni linearno elastični materijal sa materijalnim karakteristikama definisanim u Tabeli 4. Kontakt između betonskog bloka i PZT pločice je definisan površinskim “tie” graničnim uslovom, simulirajući potpuni kontakt ova dva elementa. Površina PZT pločice definisana je kao „glavna“ površina, dok površina betonskog bloka definisana je kao “pomoćna” površina. Granični uslovi definisani su na spoljašnjim ivičnim čvorovima gde im je sprečeno pomeranje u sva tri pravca. Sa jedne strane PZT pločice fiksiran je električni napon jednak nuli pomoću graničnih uslova, dok je sa druge strane nanešen površinski električni napon u vrednostima od 10V-100V sa korakom od 10V. Mreža konačnih elemenata urađena je pomoću „sweep“ tehnike omrežavanja sa približnom veličinom konačnog elementa od 0.03mm. Konačni element korišćen za modeliranje betonskog bloka je standardni-linearni-3D naponski KE: C3D8R – 8-čvorni linearni blok sa redukovanom integracijom i „hourglass“ kontrolom. Dok za modeliranje PZT pločice korišćen je standardni-linearni-piezoelektrični KE: C3D8E – 8-čvorni linearni piezoelektrični blok. Urađen je proračun sa paralelnim korišćenjem procesora. U kontrolnim



tačkama prikazanim na Slici 24 merena su pomeranja u z-pravcu za sve međukorake nanetog električnog napona.

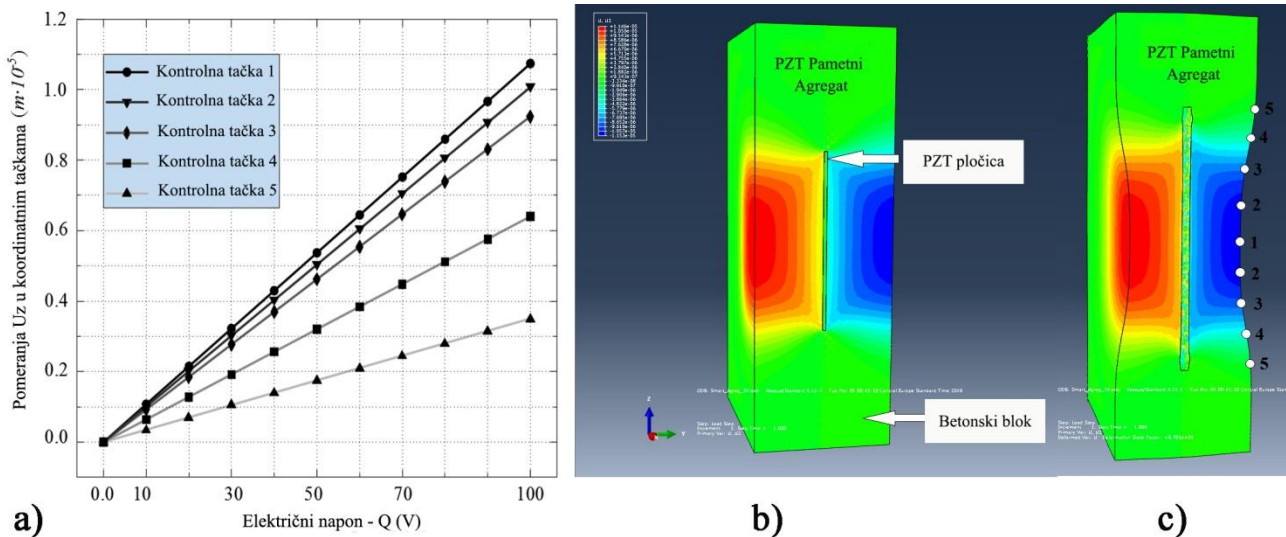
Tabela 2. Materijalne karakteristike PZT pločice za MKE analizu

Zaprem. tež. (kg/m^3)	Dielektrične karakteristike (CV^{-1}/m) $\cdot 10^{-8}$				
$\rho=7500$	$D_{11}=1,505$		$D_{22}=1,301$		$D_{33}=1,505$
Piezoelektrične karakteristike (F/m) $\cdot 10^{-10}$					
$d_{111}=0$	$d_{122}=0$	$d_{133}=0$	$d_{112}=7,41$	$d_{113}=0$	$d_{123}=0$
$d_{211}=-2,74$	$d_{222}=5,93$	$d_{233}=-2,74$	$d_{212}=0$	$d_{213}=0$	$d_{223}=0$
$d_{311}=0$	$d_{322}=0$	$d_{333}=0$	$d_{312}=0$	$d_{313}=0$	$d_{323}=7,41$
Materijalna svojstva - Inženjerske konstante					
$E_1=60,61$ GPa	$E_2=48,31$ GPa	$E_3=60,61$ GPa	$\nu_{12}=0,512$	$\nu_{13}=0,289$	$\nu_{23}=0,408$
$G_{12}=23,0$ GPa		$G_{13}=23,5$ GPa		$G_{23}=23,0$ GPa	

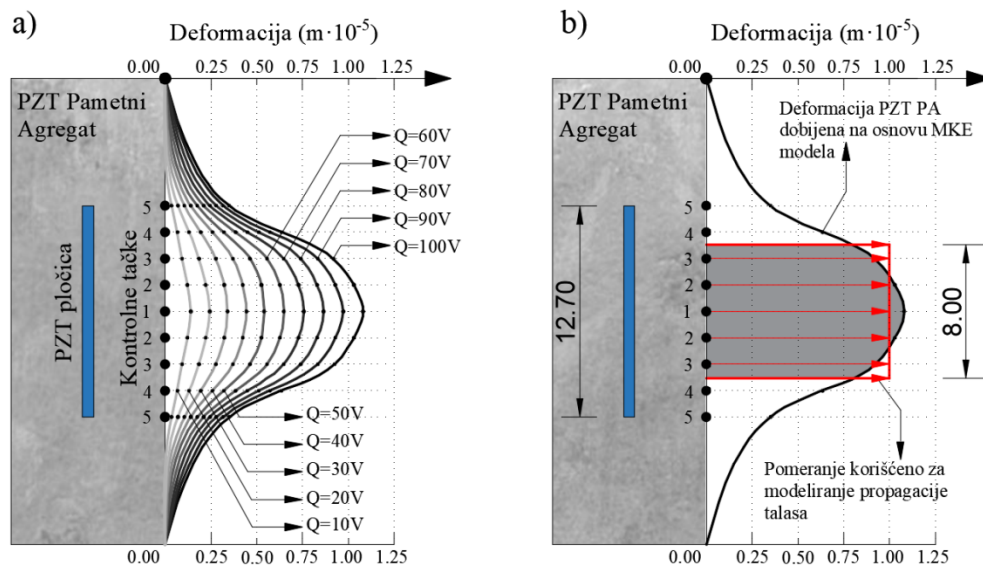
Dobijeni rezultati na osnovu MKE analize PZT PA prikazani su na Slikama 24 i 25. Na Slici 24a prikazana su pomeranja dobijena u kontrolnim tačkama u funkciji nanetog električnog napona. Jasno se može videti linearna zavisnost između električnog napona i dobijenih pomeranja. Takođe, najveća pomeranja dobijena su u kontrolnoj tački 1 i smanjuju se nelinearno prema tački 5, što se jasnije može videti na Slici 24c. Na Slici 24b prikazana su dobijena pomeranja na nedeformisanom modelu, dok na Slici 24c prikazana su ista pomeranja na deformisanom modelu, kako bi se jasnije uočio oblik deformisanja PZT PA.

Na Slici 25 prikazana su dobijena pomeranja u kontrolnim tačkama na osnovu MKE modela urađenog u programu ABAQUS/STANDARD. Na Slici 25a prikazana su pomeranja u funkciji od električnog napona. Na osnovu ove Slike može se videti da sa povećanjem električnog napona povećavaju se deformacije PZT PA. Deformacija PZT PA pri električnom naponu od 100V (crna deblja linija) prikazano je na Slici 25b. Pomeranja dobijena pri ovom naponskom stanju korišćena su kao ulazni parametar za modeliranje propagacije talasa, pri čemu je usvojena izvesna aproksimacija prikazana na Slici 25b (crvena linija). Ovakav način modeliranja urađen je zbog toga što ne postoje piezoelektrični konačni elementi u eksplicitnoj MKE analizi u programu ABAQUS, a modeliranje propagacije talasa u standardnoj MKE analizi je nemoguće uraditi zbog obimnosti modela. Zbog toga, umesto PZT PA aktuatora, u modelu propagacije talasa korišćeni su granični

uslovi u vidu pomeranja upravnog na PZT pločicu u vrednosti $1.0 \cdot 10^{-5}$ (m) na površini $8 \times 8 \text{ mm}$ (što je $4 \times 4 \text{ FE}$).



Slika 24. – Rezultati modela PZT PA: a) Odnos između električnog napona Q (V) i dilatacije U_z u kontrolnim tačkama; b) nedeformisani i deformisani model PZT PA urađen u ABAQUS/STANDARD



Slika 25. – Deformacija PZT PA: a) krive deformacije za različite vrednosti električnog napona; b) način aproksimacije pomer. pri modeliranju propagacije talasa u ABAQUS/EXPL. (dužine u cm)

3.5.2.2. Numeričko modeliranje propagacije talasa

Modeliranje propagacije talasa izazvano piezoelektričnim PA aktuatorom u grednom betonskom modelu urađeno je pomoću eksplicitne metode konačnih elemenata u komercijalnom softveru ABAQUS/EXPLICIT. Implicitna ili standardna metoda konačnih elemenata je neefikasna i za



praktične potrebe često neupotrebljiva pri modeliranju propagacije talasa. Osnovne jednačine i principi EMKE prikazani su u Poglavlju 2.4 doktorske disertacije.

Modeliranje je urađeno za 11 3D modela čije su geometrijske karakteristike i opis dati u Tabeli 3 i na Slici 26. Svi modeli su dimenzija $127 \times 127 \times 400 \text{ mm}$. PZT PA aktuator i senzor postavljeni su centrično na suprotne krajeve betonske grede udaljeni 30mm od početka/kraja. Model MA je neoštećeni model čiji izlazni signal služi kao nulto čitanje. Modeli sa veštački kreiranim zarezom imaju ime MB. Vertikalni zarez ($\alpha=90^\circ$) je postavljen na sredini betonske grede ($L_{dem}=200\text{mm}$) u punoj širini grede ($B_{dem}=127\text{mm}$). Analizirano je ukupno 4 različita modela sa promenom dužine zareza. Model MB1 ima dužinu zareza $h_{dem}=25.4\text{mm}$, model MB2 $h_{dem}=50.8\text{mm}$, model MB3 $h_{dem}=76.2\text{mm}$ i model MB4 $h_{dem}=101.6\text{mm}$. Analizirani su modeli sa istim dužinama zareza kao kod eksperimentalnog istraživanja u cilju verifikacije numeričkog postupka simulacije prostiranja talasa. Modeli MC imaju kružno oštećenje sa sledećim veličinama prečnika: $d_{dem}=25.4\text{mm}$ (MC1), $d_{dem}=38.1\text{mm}$ (MC2), $d_{dem}=50.8\text{mm}$ (MC3) i $d_{dem}=63.5\text{mm}$ (MC4). Pored ovih modela, analizirani su i modeli sa kružnim oštećenjem prečnika $d_{dem}=50.8\text{mm}$ ispunjenim metalom MD1, i glinom MD2. Poslednji modeli u praktičnom smislu mogu se koristiti za detektovanje slučajnih nepravilnosti pri betoniranju, pri čemu se mogu javiti delovi zemlje ili druge vrste materijala unutar betonskog elementa.

Generalno, prostorni i površinski talasi emitovani pomoću piezoelektričnih aktuatora mogu se prostirati kroz betonsku konstrukciju. Prostorni talasi, koji sadrže longitudinalne (C) i transverzalne (T) talase, prostiru se kroz unutrašnjost betonske konstrukcije. Površinski talasi (Rejljevi (R) i Lambovi (L) talasi) prostiru se po površini ili između dve paralelne ravni površinskog betonskog elementa. Ovi talasi se uglavnom koriste za detekciju oštećenja kod tankih ploča i nastaju usled piezoelektričnih aktuatora zalepljenih za površinu konstrukcije. U ovom istraživanju, kod analiziranih modela, detektovani su longitudinalni (C) i transverzalni (T) talasi.

Sa pretpostavkom da je beton izotropni elastični material i da su poprečne dimenzije betonske grede znatno veće od talasne dužine emitovanih talasa, onda se odnos između talasne brzine i materijalnih karakteristika može opisati jednačinama 26-30 (teorijske postavke). Brzina prostiranja longitudinalnih talasa iznosi $c_P=4414,7\text{m/s}$, a transverzalnih $c_L=2832,84\text{m/s}$.

Tabela 3. Karakteristike numeričkih modela

Karakteristike numeričkih modela		
Geometrija modela: $L=400\text{mm}$, $B=127\text{mm}$, $H=127\text{mm}$		
Položaj PZT PA aktuatora: $L_{\text{act}}=30\text{ mm}$, $B_{\text{act}}=63.5\text{mm}$, $H_{\text{act}}=63.5\text{mm}$ Položaj PZT PA senzora: $L_{\text{sen}}=370\text{ mm}$, $B_{\text{sen}}=63.5\text{mm}$, $H_{\text{sen}}=63.5\text{mm}$		
Oznaka Modela	Opis modela	
MA	Neoštećeni model	
MB	Modeli sa zarezom: Dužina zareza – $B_{\text{dem}}=127\text{mm}$ Nagib zareza – $\alpha=90^\circ$ Položaj zareza – $L_{\text{dem}}=200\text{mm}$	
	MB1 - $h_{\text{dem}}=25.4\text{mm}$	MB2 - $h_{\text{dem}}=50.8\text{mm}$
	MB3 - $h_{\text{dem}}=76.2\text{mm}$	MB4 - $h_{\text{dem}}=101.6\text{mm}$
MC	Modeli sa rupom: Dužina rupe – $B_{\text{dem}}=127\text{mm}$ Položaj rupe (Y - pravac) – $H_{\text{dem}}=63.5\text{mm}$ Položaj rupe (Z - pravac) – $L_{\text{dem}}=200\text{mm}$	
	MC1 - $d_{\text{dem}}=25.4\text{mm}$	MC2 - $d_{\text{dem}}=38.1\text{mm}$
	MC3 - $d_{\text{dem}}=50.8\text{mm}$	MC4 - $d_{\text{dem}}=63.5\text{mm}$
MD	Modeli sa popunjenom rupom: Dužina popune – $B_{\text{dem}}=127\text{mm}$ Položaj popune (Y - pravac) – $H_{\text{dem}}=63.5\text{mm}$ Položaj popune (Z - pravac) – $L_{\text{dem}}=200\text{mm}$ MD1 – Prečnik metalne ispune – $d_{\text{dem}}=50.8\text{mm}$ MD2 – Prečnik glinene ispune – $d_{\text{dem}}=50.8\text{mm}$	

3D modeli su urađeni za potrebe modeliranja propagacije talasa unutar betonskih greda pomoću kontinuum napon/pomeranje konačnog elementa C3D8R (osmo-čvornog linearnog konačnog elementa sa redukovanom integracijom i „hourglass” kontrolom). Betonski model sa geometrijom oštećenja urađen je na identičan način kao eksperimentalni uzorci. Beton je modeliran kao homogeni linearno elastični materijal sa Rejljevom prigušenjem (Tabela 4), u cilju da se kompenzuju efekti mikrostrukture betona.

Tabela 4. Materijalni model betonske grede

Jungov modul elastičnosti (GPa)	Poissonov koeficijent	Zapreminska težina (kg/m^3)	Rejljevo prigušenje	
			α	β
44.3	0.15	2400.0	2050.0	$1.100 \cdot 10^{-8}$



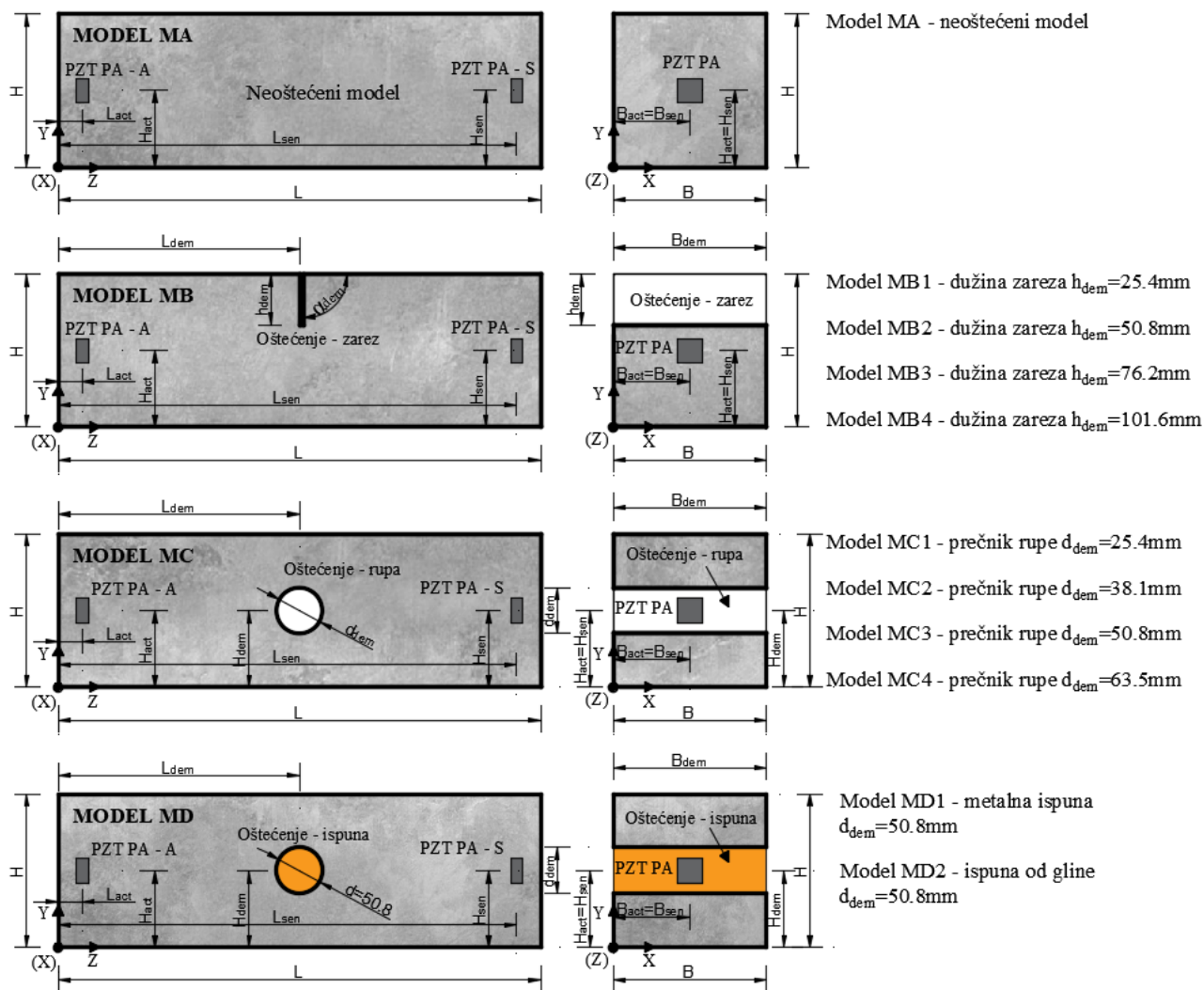
Eksplisitični dinamički model je urađen, sa linearnim i kvadratnim zapreminskim parametrima viskoziteta i sa vremenskim trajanjem u iznosu od $1.6 \cdot 10^{-3}$ (s). Stabilni vremenski inkrement primenjen u numeričkim modelima je uvek manji od kritičnog vremenskog koraka koji se može sračunati pomoću jednačine 69 (Teorijske postavke).

Piezoelektrični aktuatori su modelirani pomoću graničnih uslova unošenjem pomeranja na kontaktnoj površini između PZT PA i betonske grede. Pomeranje je naneto upravno na površinu PZT pločice sa funkcijom promene definisanom sledećom jednačinom:

$$P_{(t)} = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{N}t\right) \right] \sin(2\pi f t) & , for \quad 0 \leq t \leq \frac{N}{f} \\ 0 & , for \quad t \geq \frac{N}{f} \end{cases} \quad (100)$$

pri čemu je f centralna frekvencija ($f=100$ kHz), N je broj ciklusa ($N=3.5$), t je vreme (vreme trajanja ulaznog signala je $t=3.5 \cdot 10^{-5}$ s) i $P_{(t)}$ je funkcija varijacije intenziteta (ulazni signal). Ulazni signal definisan jednačinom (100) je upotrebljen u experimentalnom merenju za pobudu piezoelektričnog aktuatora. Izlazni signal senzora u modelu predstavlja izmereno pomeranje u čvoru na mestu senzora u z-pravcu.

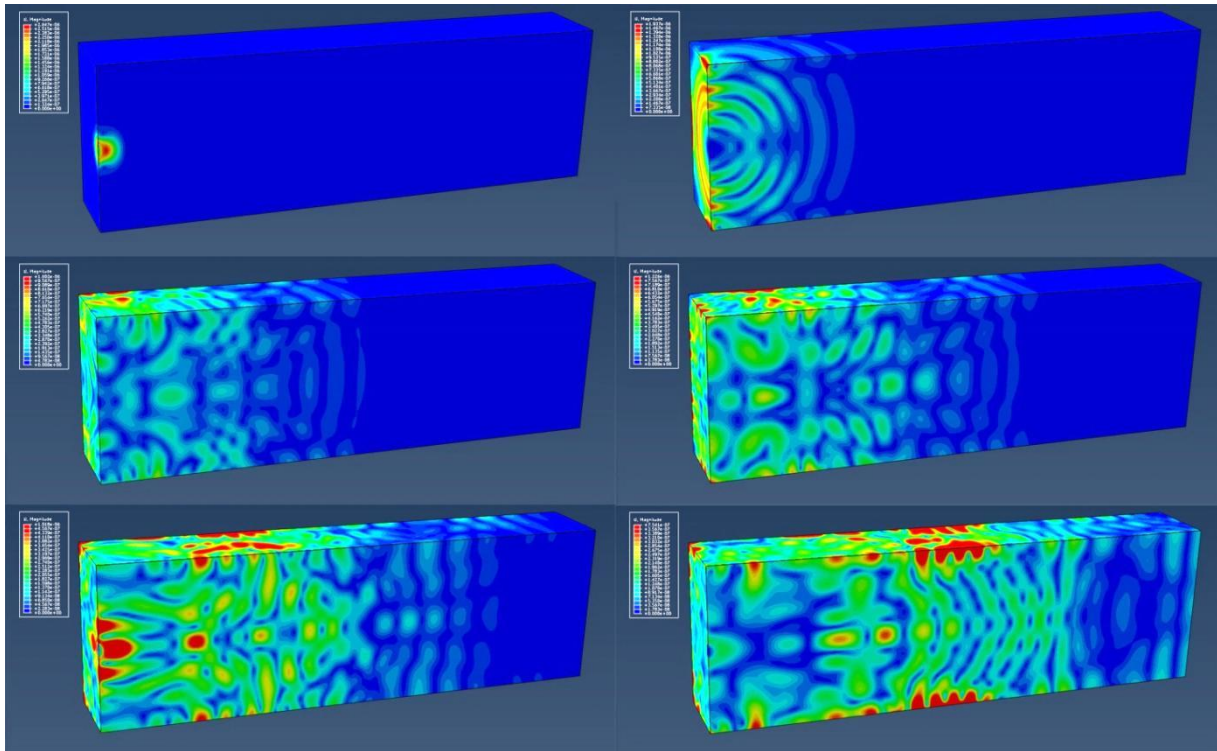
Mreža konačnih elemenata je generisana pomoću strukturne tehnike za kontrolu omrežavanja modela. Oko kružnog oštećenja, omrežavanje je zahtevalo posebnu pažnju u cilju smanjenja velikih odstupanja u veličini konačnih elemenata. Obzirom da je propagacija talasa dinamički problem, validacija dobijenih rezultata zavisi uglavnom od dva parametra: veličine konačnih elemenata i stabilnog vremenskog inkrementa. Urađena je kompletna analiza upotrebom više paralelnih procesora i jednostrukom čvornom preciznošću.



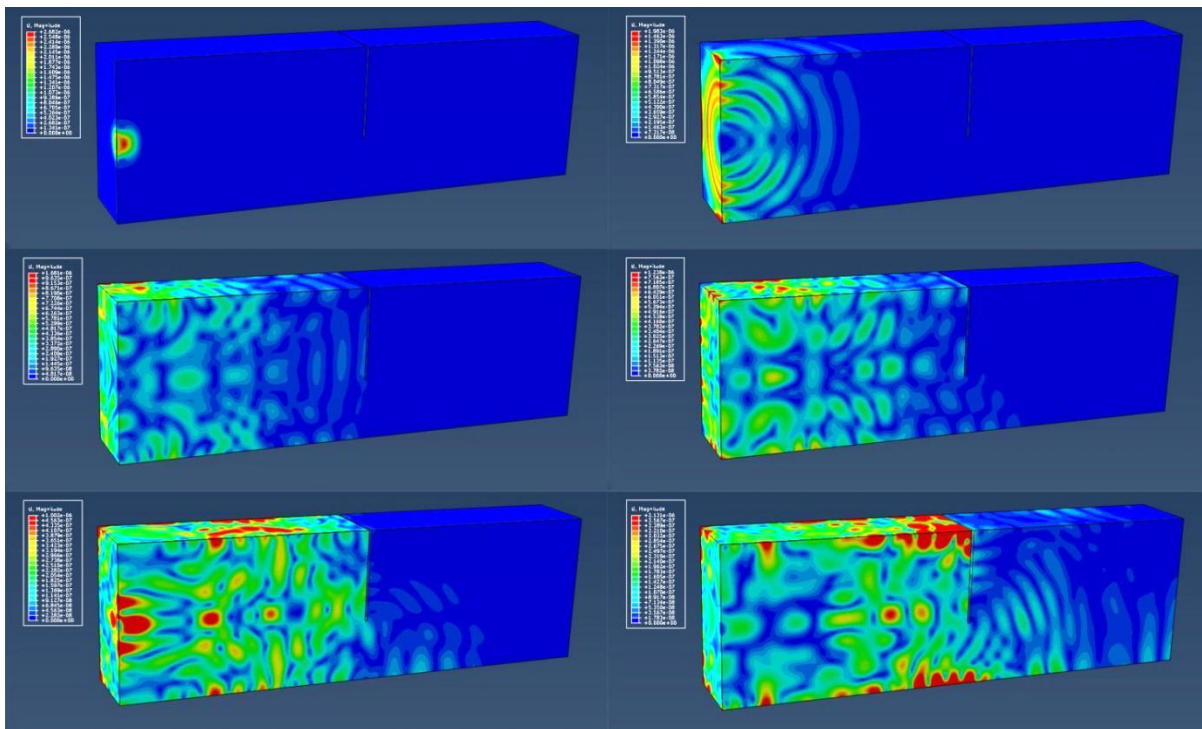
Slika 26. – Geometrijske karakteristike modela i eksperimentalnih uzoraka: a) uzorak SA i model MA; b) uzorci SB i modeli MB; c) uzorci SC i modeli MC; d) uzorci SD i modeli MD

3.5.3. Rezultati i diskusija

Eksperimentalno dobijeni rezultati indeksa oštećenja, normalizovane maksimalne amplitude signala senzora kao i izlazni signali upoređeni su sa numerički dobijenim rezultatima. Za sve analizirane slučajeve oštećenja dobijena je dobra korelacija eksperimentalnih i numeričkih rezultata.

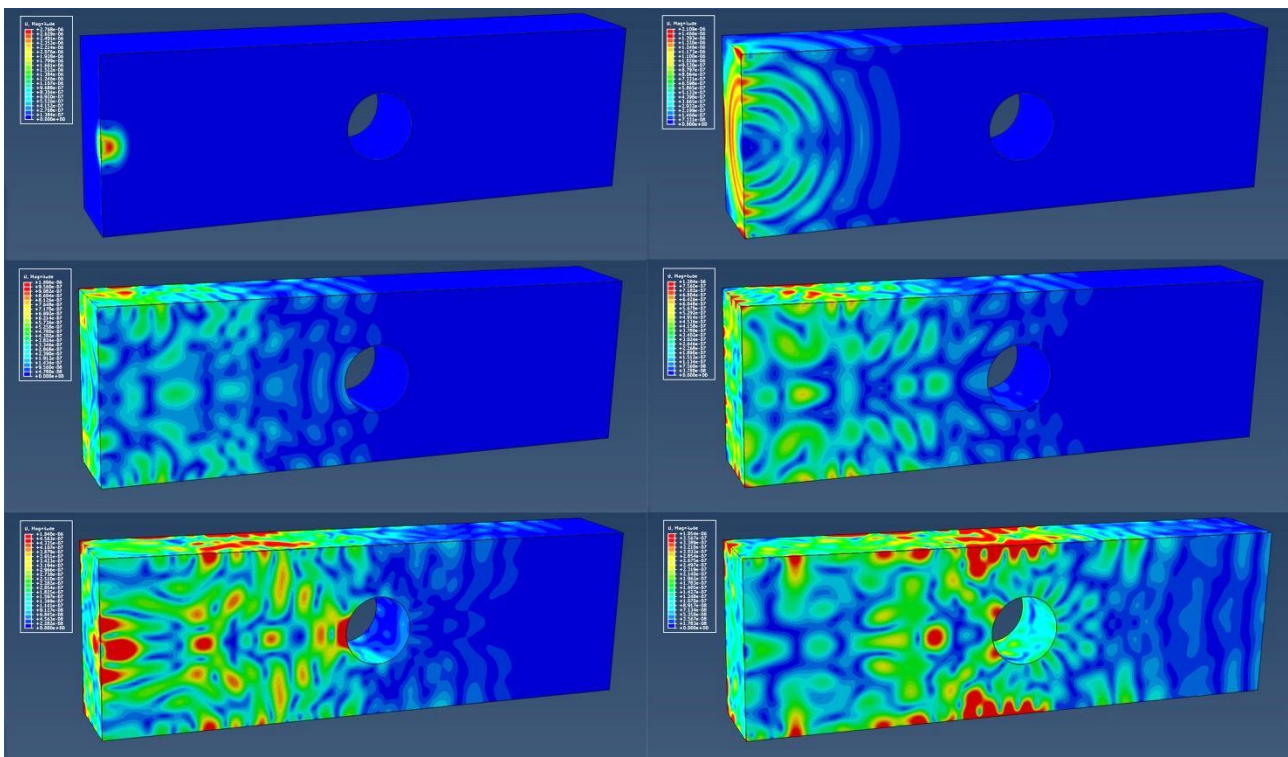


Slika 27. – Talasno polje za model MA izazvano pomoću PZT aktuatora u različitim vremenskim trenucima: (a) $t=1.61 \times 10^{-5} s$, (b) $t=3.20 \times 10^{-5} s$, (c) $t=6.40 \times 10^{-5} s$, (d) $t=8.00 \times 10^{-5} s$, (e) $t=1.12 \times 10^{-4} s$, (f) $t=1.28 \times 10^{-4} s$



Slika 28. – Talasno polje za model MB3 izazvano pomoću PZT aktuatora u različitim vremenskim trenucima: (a) $t=1.61 \times 10^{-5} s$, (b) $t=3.20 \times 10^{-5} s$, (c) $t=6.40 \times 10^{-5} s$, (d) $t=8.00 \times 10^{-5} s$, (e) $t=1.12 \times 10^{-4} s$, (f) $t=1.28 \times 10^{-4} s$

Na Slikama 27-29 prikazano je prostiranje talasa kroz neoštećeni betonski model, model sa zarezom i kružnim oštećenjem. Slika 27 prikazuje talasno polje izazvano pomoću piezoelektričnog aktuatora u neoštećenog betonskoj gredi. Prostiranje talasa se odvija slobodno kod neoštećenog modela, ograničeno samo geometrijom betonske grede, odnosno spoljnim ivicama. Za razliku od toga, kod modela MB3 sa zarezom veličine $h_{dem}=76,2\text{mm}$ (Slika 28), talas kada dođe do oštećenja reflektuje se od njega i vraća nazad prema aktuatoru. Slična situacija se dešava i kod modela MC3 sa kružnim oštećenjem veličine $d_{dem}=50,8\text{mm}$ prikazanog na Slici 29. Odbijanje talasa od oštećenja i ometano prostiranje kroz ostatak betonskog elementa, dovodi do smanjenja energije izlaznog signala senzora za modele sa oštećenjem. Što je oštećenje veće to je i smanjenje energije veće što u konačnom rezultira i većim iznosom indeksa oštećenja.

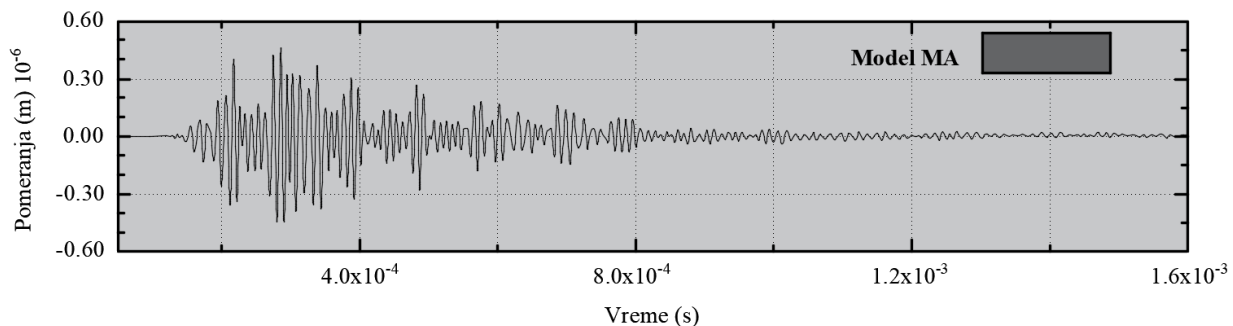


Slika 29. – Talasno polje za model MC3 izazvano pomoću PZT aktuat. u različitim vremenskim trenucima: (a) $t=1.61 \times 10^{-5}\text{s}$, (b) $t=3.20 \times 10^{-5}\text{s}$, (c) $t=6.40 \times 10^{-5}\text{s}$, (d) $t=8.00 \times 10^{-5}\text{s}$, (e) $t=1.12 \times 10^{-4}\text{s}$, (f) $t=1.28 \times 10^{-4}\text{s}$

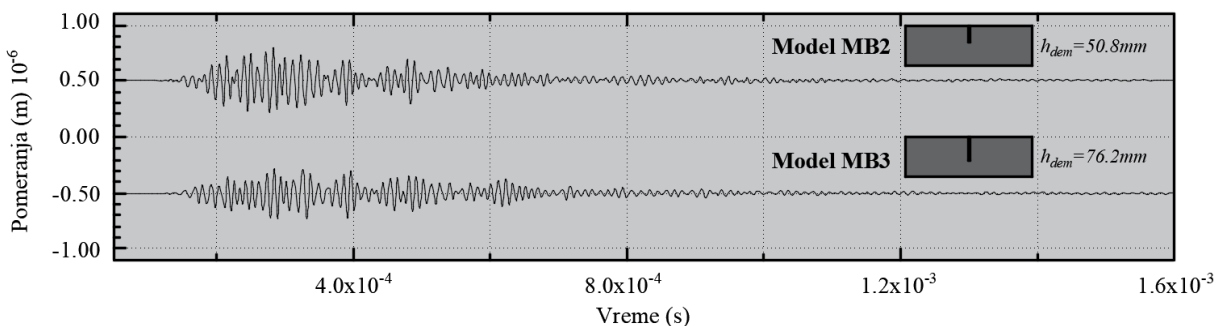
Prikazani rezultati prostiranja talasa na Slikama 27-29 dati su na isečenim modelima radi bolje prezentacije prostiranja talasa kroz unutrašnjost betonske grede. Presek je urađen kroz centalnu vertikalnu ravan. Slike prostiranja talasa urađene su u sledećim vremenskim trenucima: (a) $t=1.61 \times 10^{-5}\text{(s)}$, (b) $t=3.20 \times 10^{-5}\text{(s)}$, (c) $t=6.40 \times 10^{-5}\text{(s)}$, (d) $t=8.00 \times 10^{-5}\text{(s)}$, (e) $t=1.12 \times 10^{-4}\text{(s)}$, (f)

$t=1.28 \times 10^{-4}$ (s). Za sva tri prikazana modela korišćeni su isti vremenski trenuci u kojima je prikazano prostiranje talasa, zbog lakšeg poređenja.

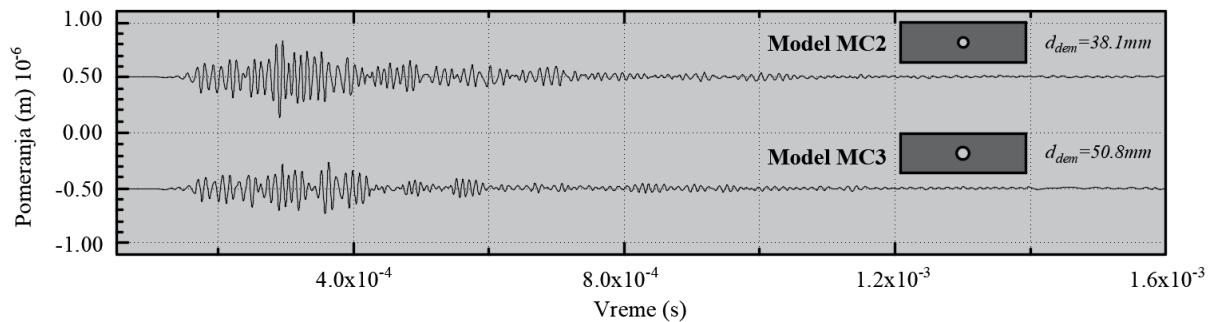
Izlazni signali dobijeni numeričkim putem izmereni na mestu senzora prikazani su na Slikama 30-32. Vreme trajanja numeričkih izlaznih signala je isto kao i kod eksperimentalnih i iznosi 1.6×10^{-3} (s). Amplituda numeričkih signala je pomeranje dobijeno na mestu senzora, dok je kod eksperimentalnih signala električni napon. Shodno tome direktno poređenje signala nije moguće. Poređenje je moguće samo ukoliko se signali najpre normalizuju. Poređenjem izlaznog signala neoštećene grede (Slika 30) sa izlaznim signalima za model sa zarezom (Slika 31) i izlaznim signalima za model sa kružnim oštećenjem (Slika 32) jasno se može videti i vizuelnim putem da postoji trend smanjenja energije izlaznog signala sa nastankom i povećanjem oštećenja. Trajanje simulacije od 1.6×10^{-3} s je identično sa trajanjem vremenskih signala merenih eksperimentalnim putem. Vremensko merenje signala je dovoljno jer se već nakon 0.8×10^{-3} s kod neoštećenog signala talas gotovo potpuno prigušuje, dok kod modela sa oštećenjem talas se prigušuje približno na 0.7×10^{-3} s.



Slika 30. – Izlazni signal senzora za neoštećeni model MA



Slika 31. – Izlazni signali senzora za modele sa zarezom (modeli MB2 i MB3)

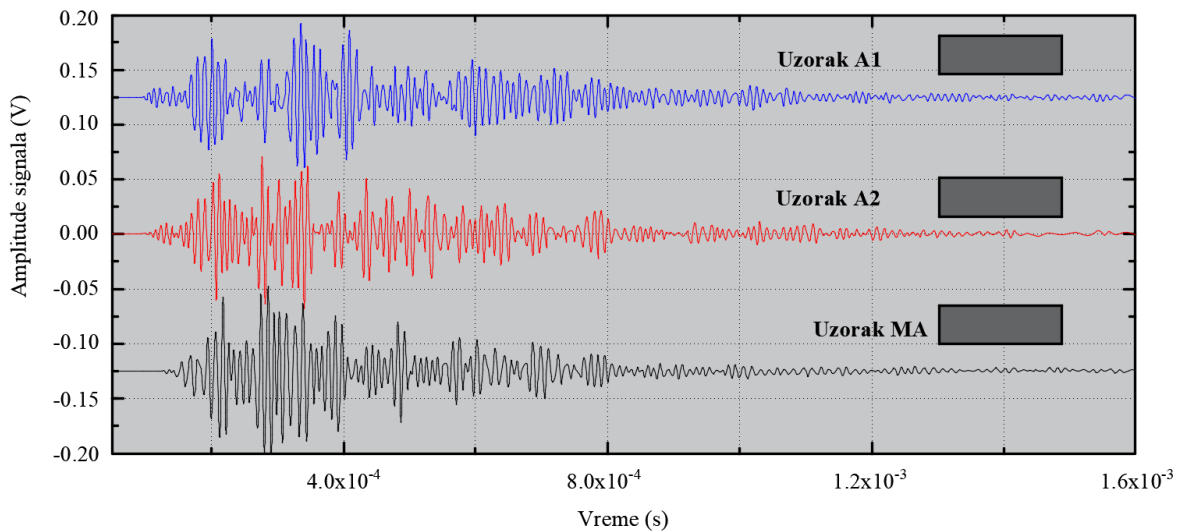


Slika 32. – Izlazni signali senzora za modele sa rupom (modeli MC2 i MC3)

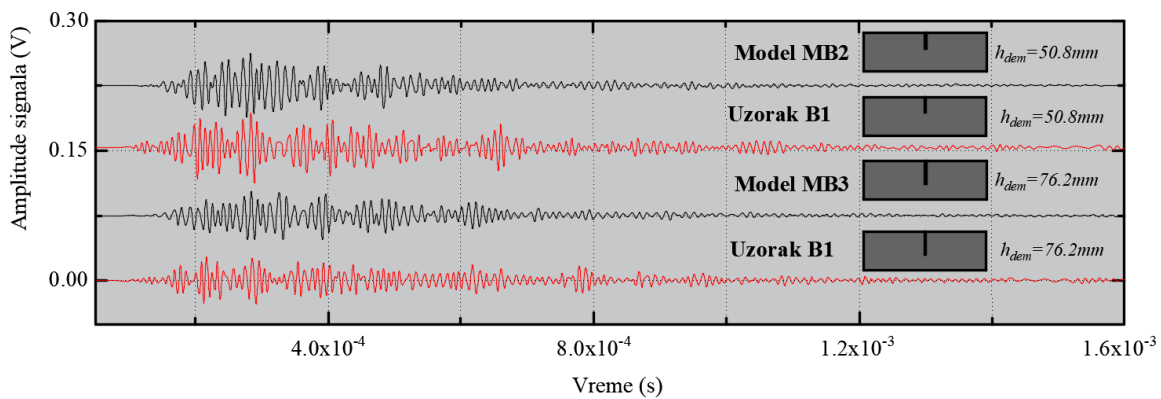
U cilju verifikacije numeričkog modela, na Slikama 16-18 urađeno je poređenje izlaznih signala senzora dobijenih eksperimentalnim merenjem i numeričkim simulacijama. Urađena je normalizacija signala kako bi poređenje moglo da se uradi. Za sve modele postoji dovoljno dobro poklapanje rezultata kako bi se zaključilo da primenjeni model može da se koristi za modeliranje. Detaljnijim pregledom signala prikazanim na Slici 16 može se uočiti da ne postoji potpuno poklapanje između eksperimentalno dobijenih signala senzora za modele A1 i A2 i numeričkog modela MA, ali da postoji velika sličnost između dobijenih signala. Međutim, poređenjem izlaznih signala senzora za modele A1 i A2 koji su urađeni u istim uslovima, mereni istom eksperimentalnom opremom, sa istom geometrijom, i istom recepturom betona, može se uočiti izvesno neslaganje dobijenih izlaznih signala, što ukazuje da mikrostruktura betona ima izvesni uticaj na prostiranje talasa. Zbog toga, između ostalog, nije očekivano potpuno podudaranje eksperimentalnih i numeričkih rezultata u svim merenim tačkama za sve vrste i veličine oštećenja.

Na Slici 17 prikazani su izlazni signali senzora za modele sa zarezom. Urađeno je poređenje modela sa veličinom zareza $h_{dem}=50.8mm$ i $h_{dem}=76.2mm$. Takođe, kao za prethodne modele može se zaključiti da postoji velika sličnost između dobijenih signala. Ono što je uočljivo da numerički dobijeni signali nešto brže se prigušuju nakon polovine dužine signala u odnosu na eksperimentalno merene signale.

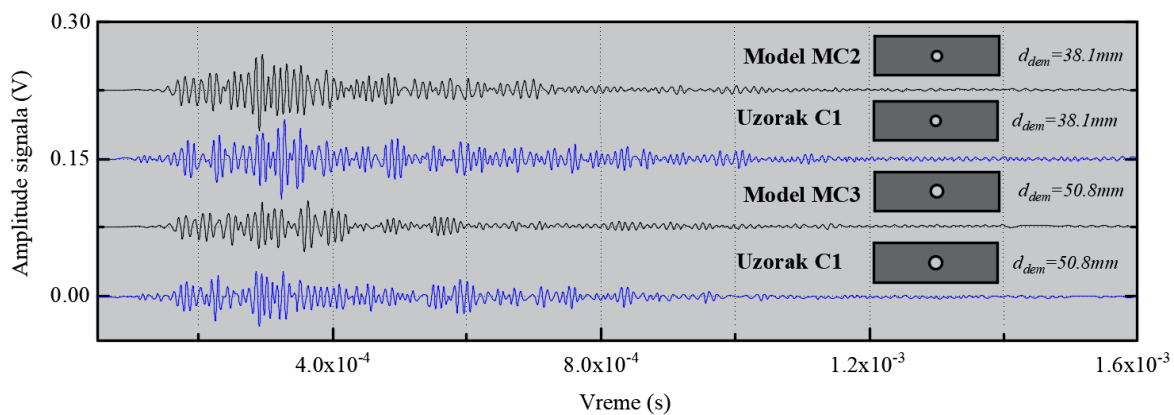
Na Slikama 33-35 prikazani su signali dobijeni eksperimentalnim i numeričkim putem.



Slika 33. – Poređenje eksperimentalnih i numeričkih izlaznih signala senzora za neoštećenu gredu

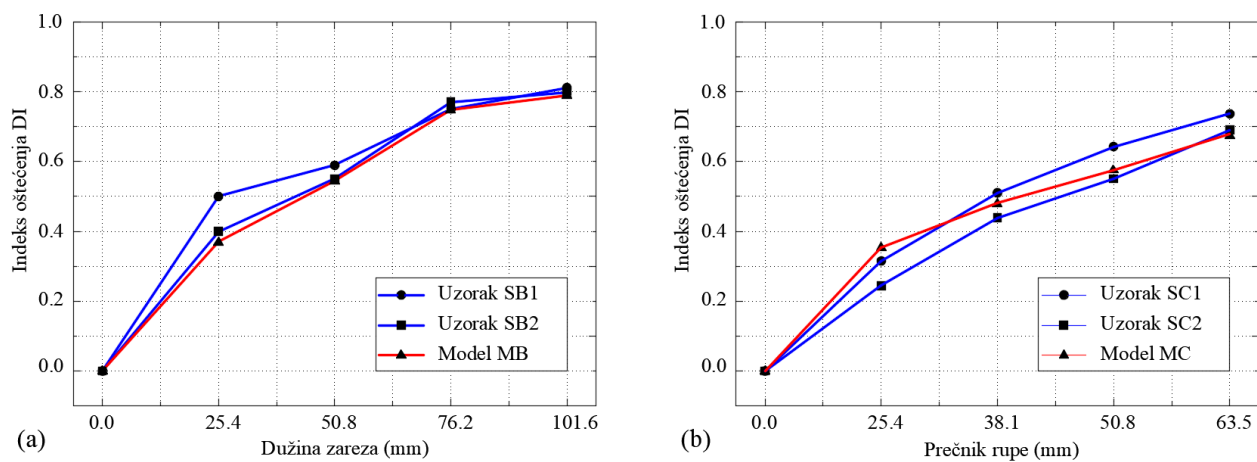


Slika 34. – Poređenje eksperimentalnih i numeričkih izlaznih signala senzora za betonske uzorke/modele sa različitim veličinama zareza



Slika 35. – Poređenje eksperimentalnih i numeričkih izlaznih signala senzora za betonske uzorke/modele sa različitim veličinama prečnika rupa

Konačno, na osnovu postupka za računanje indeksa oštećenja prikazanog u ovom delu disertacije, sračunati su DI za sve numeričke modele i upoređeni su sa dobijenim eksperimentalnim rezultatima. 1D RMSD DI za eksperimentalne uzorke SB1 i SB2, kao i za numeričke modele MB (MB1, MB2, MB3, i MB4) prikazani su na Slici 36a. Numerički dobijeni indeksi oštećenja (crvena linija) dobro prate eksperimentalne rezultate (plava linija). Najveće odstupanje od 33,97 % dobijeno je za model sa zarezom veličine $h_{dem}=25.4\text{mm}$ i eksperimentom SB1. Međutim, za tu veličinu zarez i eksperimentalna merenja (za dva različita uzorka) imaju veliko odstupanje od 25.0 %. Za ostale vrednosti odstupanja su manja od 10%. Na Slici 36b prikazane su vrednosti indeksa oštećenja za uzorke i modele sa kružnim oštećenjem. Kao i kod prethodnog modela sa zarezom i ovde imamo veoma dobro poklapanje rezultata. Kod oba modela postoji trend rasta indeksa oštećenja sa povećanjem oštećenosti konstrukcije, što ukazuje na to da se indeks oštećenja može koristiti za praćenje stanja konstrukcije. Međutim, treba primetiti da je trend rasta oštećenja (zarez ili rupa) od prve vrednosti pa na dalje linearan (za modele sa zarezom korak je 25.4mm i modele sa rupom korak je 12.7mm), dok promena indeksa oštećenja nije linearna. Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da ne postoji direktna zavisnost između geometrije oštećenja i indeksa oštećenja, odnosno da pomoću indeksa oštećenja nije moguće kvantifikovati oštećenje u konstrukciji.



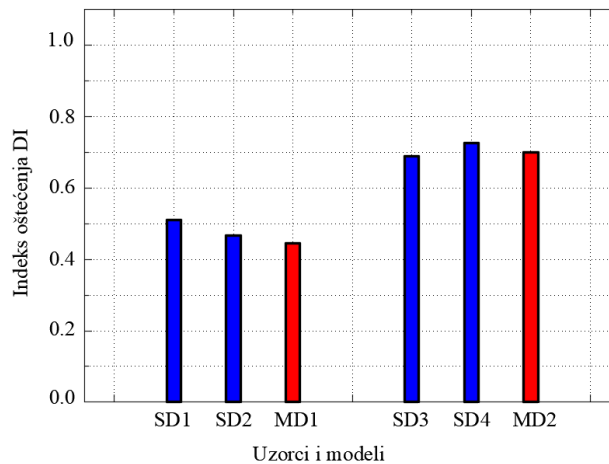
Slika 36. – Vrednosti 1D RMSD DI: a) rezultati za uzorke SB1 i SB2 i model MB; b) Rezultati za uzorke SC1 i SC2 i model MC



Tabela 5. Vrednosti indeksa oštećenja za eksperimentalnu i numeričku analizu

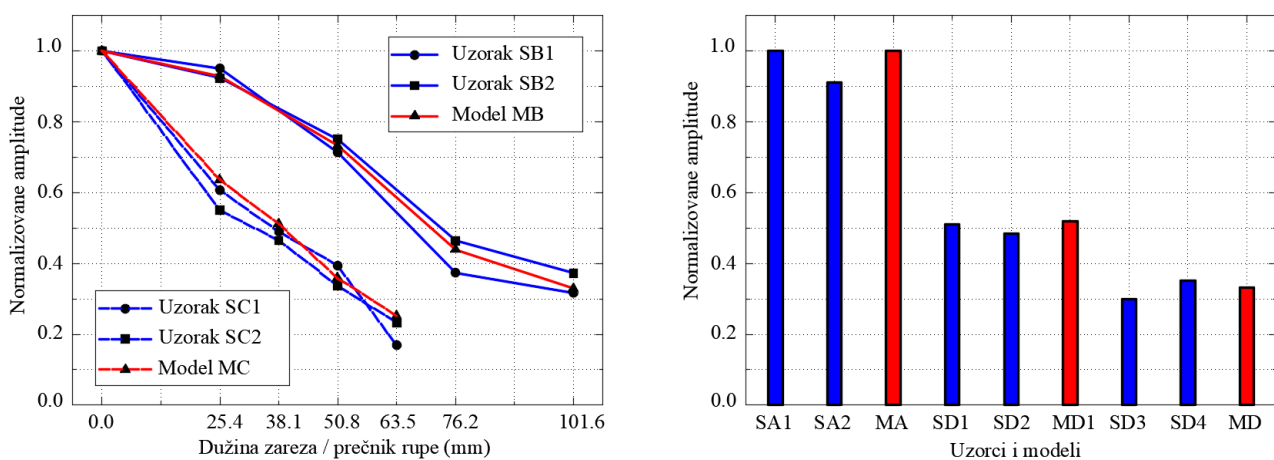
Vrednosti indeksa oštećenja za eksperimentalnu i numeričku analizu							
Uzorak	DI	Uzorak	DI	Model	DI	Model	DI
SA1; SA2, ($h_{dem}=0mm$)	0.00	SA1; SA2, ($h_{dem}=0mm$)	0.00	MA	0.00	MA	0.00
SB1; SB2, ($h_{dem}=25.4mm$)	0.50; 0.40	SC1; SC2, ($d_{dem}=25.4mm$)	0.32; 0.25	MB1	0.3732	MC1	0.3566
SB1; SB2, ($h_{dem}=50.8mm$)	0.59; 0.55	SC1; SC2, ($d_{dem}=38.1mm$)	0.51; 0.43	MB2	0.5496	MC2	0.4720
SB1; SB2, ($h_{dem}=76.2mm$)	0.75; 0.78	SC1; SC2, ($d_{dem}=50.8mm$)	0.64; 0.55	MB3	0.7586	MC3	0.5759
SB1; SB2, ($h_{dem}=101.6mm$)	0.83; 0.80	SC1; SC2, ($d_{dem}=63.5mm$)	0.73; 0.69	MB4	0.7824	MC4	0.6724
SD1; SD2, ($h_{dem}=50.8mm$)	0.51; 0.47	SD3; SD4, ($d_{dem}=50.8mm$)	0.69; 0.73	MD1	0.4735	MD2	0.7021

Dobijeni rezultati indeksa oštećenja za uzorke SD1, SD2 (uzorci sa metalnom ispunom) i SD3, SD4 (uzorci sa ispunom od gline) i numeričke modele MD1 (modeli sa metalnom ispunom) i MD2 (modeli sa ispunom od gline) prikazani su na Slici 37. Vrednost indeksa oštećenja dobijenih numeričkim putem je približno ista kao i eksperimentalna vrednost što ukazuje na dobar numerički postupak modeliranja. Poređenjem vrednosti indeksa oštećenja za modele sa metalnom i ispunom od gline, može se videti da modeli sa metalnom ispunom imaju znatno manji indeks oštećenja u odnosu na modele sa ispunom od gline a za istu veličinu materijalnog defekta. Dobijeni rezultati su očekivani obzirom da se prostiranje talasa kroz čelik odvija sa znatno manjim prigušenjem u odnosu na glinu. Poređenjem dobijenih indeksa oštećenja za modele sa čeličnom ispunom (SD1 i SD2), ispunom od gline (SD3 i SD4) i modela sa kružnim oštećenjem (SC1 i SC2) istog prečnika kao i popunjeni modeli, uočava se da čelična ispuna povoljno utiče na prostiranje talasa u odnosu na model sa kružnim oštećenjem, dok ispuna gline nepovoljno utiče na prostiranje talasa. Obzirom da se za istu veličinu oštećenja (nepopunjena rupa ili rupa ispunjena čelikom ili glinom) dobijaju znatne razlike u indeksu oštećenja, ponovo se dolazi do zaključka da pomoću indeksa oštećenja nije moguće kvantifikovati oštećenje, odnosno vrstu materijala koji je prisutan unutar betonskog elementa. Sa druge strane, pomoću 1D RMSD indeksa oštećenja moguće je detektovati nastanak oštećenja i njegovo dalje prostiranje.



Slika 37. – Vrednosti 1D RMSD DI za uzorke SD1, SD2, SD3 i SD4 i modele MD1 i MD2

Osim poređenja izlaznih signala i indeksa oštećenja, kao još jedan parametar za ocenu primenjenog numeričkog postupka, urađeno je poređenje normalizovanih amplituda. S obzirom da je izlazni signal senzora dobijenog eksperimentalnim merenjima naponski signal a numerički signal je dobijen merenjem pomeranja na mestu senzora, za njihovo međusobno poređenje adekvatno je upoređivanje normalizovanih amplituda. Normalizacija signala je urađena sa referentnom vrednošću koja je jednaka maksimalnoj amplitudi neoštećenog modela. Na Slici 38a prikazuju se normalizovane amplitude za uzorke i modele sa zarezom i kružnim oštećenjem, dok na Slici 38b prikazuju se normalizovane amplitude za uzorke i modele sa črličnom i glinenom ispunom. Na osnovu dobijenih rezultata normalizovanih amplitude može se zaključiti da numerički dobijeni rezultati imaju veoma sličan trend sa eksperimentalnim rezultatima.



Slika 38. – Normalizovane amplitude: a) uzorci i modelu sa zarezom i rupom; b) neoštećeni uzorci (modeli) i sa materijalnim defektom



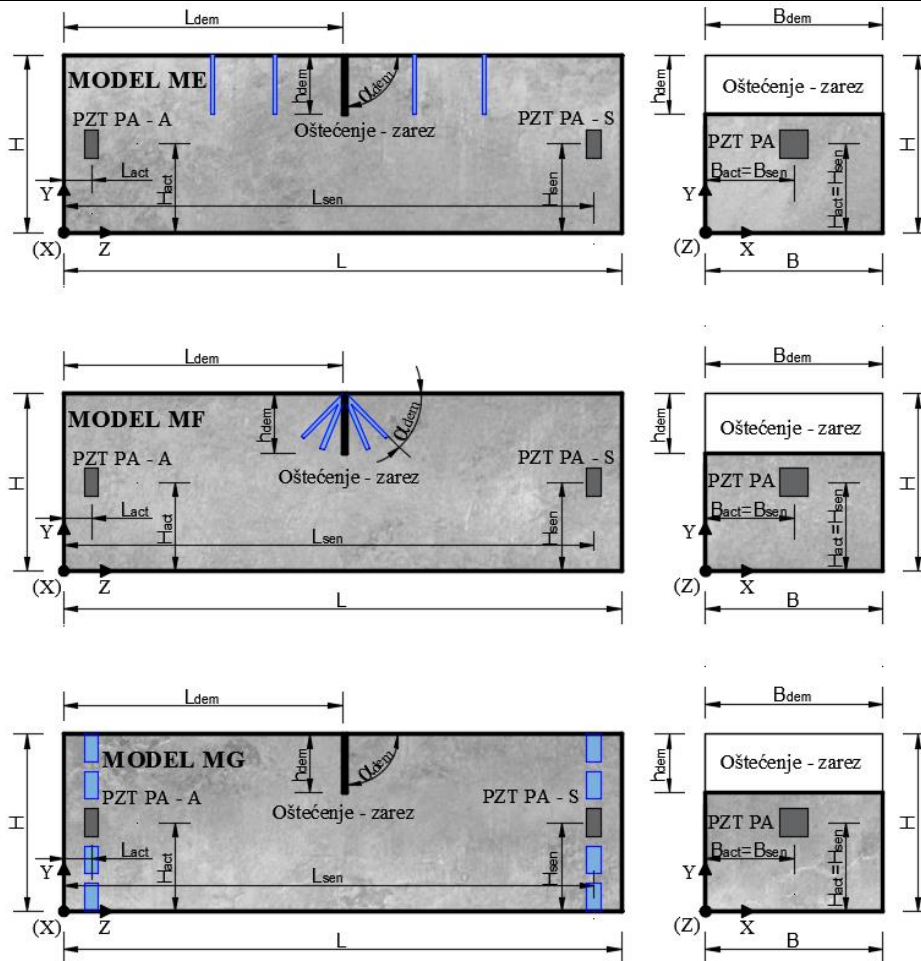
3.6. Parametarska analiza promene indeksa oštećenja

Parametarska analiza promene indeksa oštećenja u funkciji promene položaja, veličine i nagiba oštećenja (zarez) kao i promena položaja PZT PA aktuatora/senzora urađena je kako bi se bolje sagledalo fizičko ponašanje DI, a sve zbog toga što DI je u narednim poglavljima disertacije korišćen kao ulazni parameter za detekciju i lokalizaciju 2D i 3D betonskih konstrukcija. Analizirane su tri vrste modela: (a) model ME kod koga je variran položaj oštećenja (L_{dem}) i veličina oštećenja (h_{dem}), (b) model MF kod koga je variran nagib oštećenja (α_{dem}) i veličina oštećenja (h_{dem}) i (c) model MG kod koga je variran položaj PZT PA aktuatora/senzora ($H_{act/sen}$) i veličina oštećenja (h_{dem}). U Tabeli 6 i na Slici 39 prikazane su geometrijske i druge karakteristike modela analiziranih u parametarskoj analizi. Parametarska analiza je urađena na osnovu numeričkih simulacija urađenih u softverskom paketu ABAQUS. Pobuda betonske grede je urađena pomoću 3.5 Hanning windowed tone burst signala sa centralnom frekvencom od 100kHz prikazanog jednačinom (100). Za svaki varijantni model indeks oštećenja račun je poređenjem izlaznih signala senzora oštećene sa neoštećenim modelom. Indeks oštećenja računat je na osnovu jednačine (83).

Tabela 6. Karakteristike numeričkih modela – Parametarska analiza

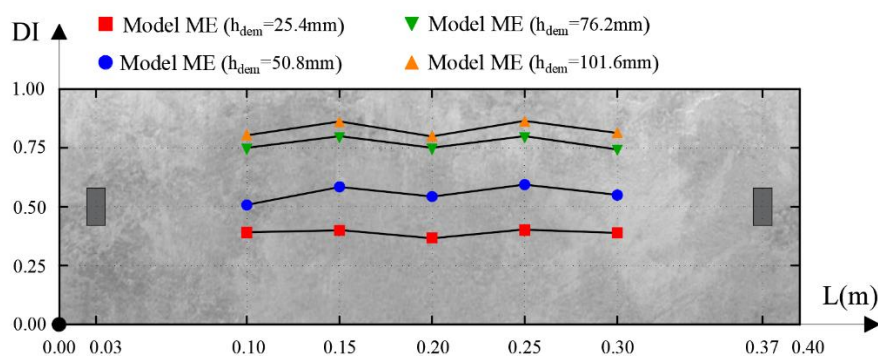
Karakteristike numeričkih modela za parametarsku analizu				
Geometrija modela: L=400mm, B=127mm, H=127mm				
MA – neoštećeni model				
Položaj aktuatora: $L_{act}=30$ mm, $B_{act}=63.5$ mm, $H_{act}=63.5$ mm Položaj senzora: $L_{sen}=370$ mm, $B_{sen}=63.5$ mm, $H_{sen}=63.5$ mm				
ME – modeli sa zarezom (položaj zareza je varijabilna vrednost)				
Položaj aktuatora: $L_{act}=30$ mm, $B_{act}=63.5$ mm, $H_{act}=63.5$ mm Položaj senzora: $L_{sen}=370$ mm, $B_{sen}=63.5$ mm, $H_{sen}=63.5$ mm Dužina zareza – $B_{dem}=127$ mm; Nagib zareza – $\alpha=90^\circ$;				
ME1: $L_{dem}=100$ mm	ME2: $L_{dem}=150$ mm	ME3: $L_{dem}=200$ mm	ME4: $L_{dem}=250$ mm	ME5: $L_{dem}=300$ mm
h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)
ME1(1): 25.4mm	ME2(1): 25.4mm	ME3(1): 25.4mm	ME4(1): 25.4mm	ME5(1): 25.4mm
ME1(2): 50.8mm	ME2(2): 50.8mm	ME3(2): 50.8mm	ME4(2): 50.8mm	ME5(2): 50.8mm
ME1(3): 76.2mm	ME2(3): 76.2mm	ME3(3): 76.2mm	ME4(3): 76.2mm	ME5(3): 76.2mm
ME1(4): 101.6mm	ME2(4): 101.6mm	ME3(4): 101.6mm	ME4(4): 101.6mm	ME5(4): =101.6mm
MF - modeli sa zarezom (nagib zareza je varijabilna vrednost)				
Položaj aktuatora: $L_{act}=30$ mm, $B_{act}=63.5$ mm, $H_{act}=63.5$ mm Položaj senzora: $L_{sen}=370$ mm, $B_{sen}=63.5$ mm, $H_{sen}=63.5$ mm Dužina zareza – $B_{dem}=127$ mm; Položaj zareza – $L_{dem}=200$ mm				

MF1: $\alpha=60^\circ$	MF2: $\alpha=75^\circ$	MF3: $\alpha=90^\circ$	MF4: $\alpha=105^\circ$	MF5: $\alpha=120^\circ$
h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)
MF1(1): 25.4mm	MF2(1): 25.4mm	MF3(1): 25.4mm	MF4(1): 25.4mm	MF5(1): 25.4mm
MF1(2): 50.8mm	MF2(2): 50.8mm	MF3(2): 50.8mm	MF4(2): 50.8mm	MF5(2): 50.8mm
MF1(3): 76.2mm	MF2(3): 76.2mm	MF3(3): 76.2mm	MF4(3): 76.2mm	MF5(3): 76.2mm
MF1(4): 101.6mm	MF2(4): 101.6mm	MF3(4): 101.6mm	MF4(4): 101.6mm	MF5(4): 101.6mm
MG - modeli sa zarezom (položaj aktuatora/senzora u Y pravcu je varijabilna vrednost)				
Položaj aktuatora: $L_{act}=30$ mm, $B_{act}=63.5$ mm,				
Položaj senzora: $L_{sen}=370$ mm, $B_{sen}=63.5$ mm,				
Položaj i dužina zareza: $B_{dem}=127$ mm; $L_{dem}=200$ mm; $\alpha=90^\circ$;				
MG1: $H_{act/sen}=10.0$ mm	MG2: $H_{act/sen}=36.75$ mm	MG3: $H_{act/sen}=63.50$ mm	MG4: $H_{act/sen}=90.25$ mm	MG5: $H_{act/sen}=117.0$ mm
h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)	h_{dem} (mm)
MG1(1): 25.4mm	MG2(1): 25.4mm	MG3(1): 25.4mm	MG4(1): 25.4mm	MG5(1): 25.4mm
MG1(2): 50.8mm	MG2(2): 50.8mm	MG3(2): 50.8mm	MG4(2): 50.8mm	MG5(2): 50.8mm
MG1(3): 76.2mm	MG2(3): 76.2mm	MG3(3): 76.2mm	MG4(3): 76.2mm	MG5(3): 76.2mm
MG1(4): 101.6mm	MG2(4): 101.6mm	MG3(4): 101.6mm	MG4(4): 101.6mm	MG5(4): 101.6mm

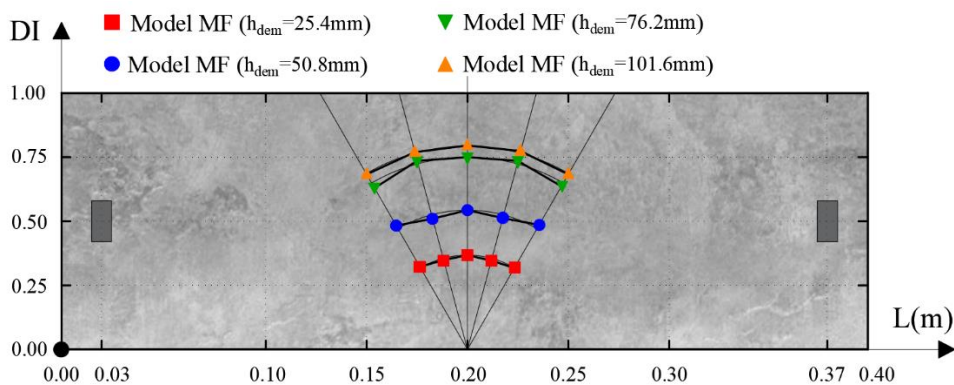


Slika 39. – Geometrijske karakteristike numeričkih modela za parametarsku analizu

Rezultati dobijeni na osnovu analiziranih numeričkih simulacija prikazani su na Slikama 40-42 i Tabeli 7. Na Slici 40 prikazani su modeli ME kod kojih je variran položaj oštećenja i njegova veličina (dužina), dok je ugao oštećenja i položaj PZT PA A/S ostao bez promene. Može se primetiti da ne postoji velika promena indeksa oštećenja za sve analizirane položaje, što ukazuje da indeks oštećenja nije previše osetljiv na položaj oštećenja između aktuatora i senzora koliko na njegovu veličinu. Takođe, za sve analizirane veličine oštećenja u položajima 0.15m i 0.25m dobijene su maksimalne vrednosti, što ukazuje da postoje određeni lokalni pikovi koji zavise od karaktera prostiranja talasa, geometrije modela i drugih parametara.



Slika 40. – Indeksi oštećenja za modele ME – položaj i veličina oštećenja su promenljive

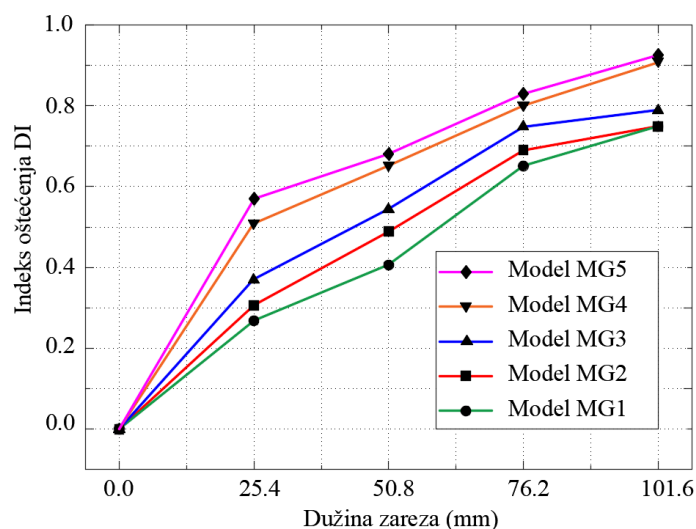


Slika 41. – Indeksi oštećenja za modele MF – nagib i veličina oštećenja u promenljive

Na Slici 41 prikazani su modeli MF kod kojih je variran ugao nagiba oštećenja i njegova veličina (dužina), dok je položaj oštećenja i položaj PZT PA A/S ostao bez promene. Na osnovu rezultata može se zapaziti da kod modela sa veličinom oštećenja $h_{dem}=25.4mm$ i $h_{dem}=50.8mm$ postoji izvesno variranje DI u relativno malim procentima, dok kod modela sa većim dužinama oštećenja gotovo da nema promene DI (osim za model MF1 i MF5 za veličinu oštećenja $h_{dem}=76.2mm$). Ovako mali procenti promene DI usled nagiba oštećenja dovode do zaključka da je osetljivost DI na nagib oštećenja mala u odnosu na njegovu osetljivost na promenu veličine oštećenja. Takođe,

osetljivost promene indeksa oštećenja na nagib oštećenja je manja u poređenju sa parametrom položaja oštećenja.

Indeksi oštećenja dobijeni na osnovu promene položaja PZT PA aktuatora/senzora i veličine oštećenja (model MG) prikazani su na Slici 42. Položaj PZT PA A/S menjan je u paru sa veličinama $H_{act/sen}$ prikazanim u Tabeli 6. Poređenjem rezultata dobijenih ovom analizom i prikazanim na Slici 42 prvo se uočava da za veličinu oštećenja $h_{dem}=25.4\text{mm}$ i $h_{dem}=50.8\text{mm}$ postoje veoma velika odstupanja za različite položaje PZT PA A/S. Sa povećanjem oštećenja procenti odstupanja nešto se smanjuju ali međusobne razlike su i dalje velike. Ovako dobijeni rezultati ukazuju da je DI veoma osetljiv na položaj PZT PA A/S ali i na to da sa DI nije moguće kvantifikovati veličinu oštećenja. Tako na primer, u slučaju monitoringa jedne AB grede dobili bismo različite rezultate DI za istu veličinu i položaj oštećenja samo ako bismo na različitim položajima postavili senzore. Ali sa druge strane, ako se pogleda Slika 42, može se uočiti da za sve modele postoji trend rasta DI sa povećanjem oštećenja, što ukazuje već pomenuti zaključak da je DI pogodan za praćenje generalnog stanja oštećenja konstrukcije, odnosno da li se oštećenje povećava kroz vreme. Takođe, obzirom da je oštećenje postavljeno na gornjoj ivici i prostire se prema donjoj ivici grede, za položaje PZT PA A/S bliže gornjoj ivici modeli MG5 i MG4 (kada je oštećenje na direktnoj liniji PZT PA A/S) dobijaju se znatno veće vrednosti. Ovaj zaključak će biti značajan za detekciju i lokalizaciju kod površinskih i prostornih oštećenja. Za sve analizirane modele u parametarskoj analizi, vrednosti indeksa oštećenja prikazani su i u Tabeli 7.



Slika 42. - Indeksi oštećenja za modele MG – položaj PZT PA i veličina oštećenja su varirani



3.7. Zaključak

Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja [118] i numeričkih simulacija moguće je izvesti sledeće zaključke:

1. Piezoelektrični pametni agregati su multifunkcionalni senzori koji se mogu koristiti za detekciju oštećenja i monitoring betonskih konstrukcija. Koriste se osim za detekciju oštećenja i za: a) detekciju udarne sile, b) monitoring ranih čvrstoća betona, c) monitoring promene vlažnosti betona, d) monitoring brzine P-talasa kod betona ranih čvrstoća, e) detekcija prijanjanja armature i betona, f) monitoring napona pritiska i smicanja usled seizmičkog uticaja.
2. Monitoring betonskih konstrukcija pomoću piezoelektricnih aktuatora/senzora karakterišu sledeće osobine: stabilan odziv, visoka pouzdanost, brz odgovor, niska cena, jako mala sopstvena težina, širok frekventni opseg i multifunkcionalnost.

Tabela 7. Vrednosti indeksa oštećenja – parametarska analiza

Vrednosti indeksa oštećenja za parametarsku analizu									
Model	DI	Model	DI	Model	DI	Model	DI	Model	DI
ME – Modeli sa različitim položajem oštećenja									
ME1(1)	0.3891	ME2(1)	0.4034	ME3(1)	0.3732	ME4(1)	0.4063	ME5(1)	0.3994
ME1(2)	0.5094	ME2(2)	0.5970	ME3(2)	0.5496	ME4(2)	0.6949	ME5(2)	0.5553
ME1(3)	0.7577	ME2(3)	0.8059	ME3(3)	0.7586	ME4(3)	0.8089	ME5(3)	0.7454
ME1(4)	0.8011	ME2(4)	0.8548	ME3(4)	0.7824	ME4(4)	0.8647	ME5(4)	0.8187
MF – Modeli sa različitim nagibom oštećenja									
MF1(1)	0.3682	MF2(1)	0.3594	MF3(1)	0.3732	MF4(1)	0.3575	MF5(1)	0.3738
MF1(2)	0.5600	MF2(2)	0.5313	MF3(2)	0.5496	MF4(2)	0.5273	MF5(2)	0.5570
MF1(3)	0.7353	MF2(3)	0.7612	MF3(3)	0.7586	MF4(3)	0.7615	MF5(3)	0.7272
MF1(4)	0.7999	MF2(4)	0.7834	MF3(4)	0.7824	MF4(4)	0.7951	MF5(4)	0.7875
MG – Modeli sa različitim položajem PZT PA aktuator/senzora									
MG1(1)	0.2750	MG2(1)	0.3145	MG3(1)	0.3732	MG4(1)	0.5282	MG5(1)	0.5732
MG1(2)	0.4150	MG2(2)	0.4885	MG3(2)	0.5496	MG4(2)	0.6567	MG5(2)	0.6887
MG1(3)	0.6584	MG2(3)	0.6863	MG3(3)	0.7586	MG4(3)	0.8016	MG5(3)	0.8377
MG1(4)	0.7586	MG2(4)	0.7512	MG3(4)	0.7824	MG4(4)	0.9130	MG5(4)	0.9342

3. Postoji tri generalne kategorije metoda detekcije oštećenja i monitoringa betonskih konstrukcija pomoću piezoelektričnih senzora: a) metode SHM na bazi vibracija, b) metoda



SHM na bazi elektromehaničke impedance i c) metode na bazi propagacije talasa sa sledećim konfiguracijama aktuatora/senzora: 1. „Pitch-Catch“, 2. „Pulse-Echo“ i 3. „Time-Reversal“.

4. Jednodimenzionalni indeks oštećenja na bazi energije izlaznih signala, na osnovu do sada izvedenih istraživanja dostupnih u relevantnoj literaturi, predstavlja parametar na osnovu koga je moguće detektovati oštećenje i vršiti monitoring betonskih konstrukcija u izvesnoj meri.
5. Korišćeni sistem modeliranja upotrebom standardne i eksplicitne FEM analize se pokazao dovoljno dobrim za potrebe simulacije detekcije oštećenja pomoću PZT PA kod betonskih grednih elemenata. Dobijeni rezultati dovoljno dobro prate eksperimentalne rezultate bez velikih odstupanja.
6. Za sve analizirane slučajeve oštećenja (zarezi, rupa, rupa ispunjena metalom ili glinom) betonske grede uspešno je detektovano prisustvo oštećenja.
7. Sa povećanjem oštećenja (zarezi, rupa) povećava se i indeks oštećenja, za sve analizirane slučajeve što dovodi do zaključka da je korišćeni indeks oštećenja pogodan za detekciju nastanka oštećenja i praćenja njegovog prostiranja kroz vreme.
8. Sa linearnim povećanjem veličine oštećenja dobija se nelinearno povećanje indeksa oštećenja, što dovodi do zaključka da ne postoji linearna veza između geometrije oštećenja i vrednosti indeksa oštećenja. Shodno tome, primenjeni indeks oštećenja nije pogodan za kvantifikovanje veličine oštećenja.
9. Na osnovu sprovedene parametarske analize može se zaključiti da osetljivost promene vrednosti indeksa oštećenja najveća je sa promenom položaja PZT SA aktuatora/senzora i promenom veličine oštećenja, zatim, sa promenom položaja oštećenja, dok je najmanja sa promenom nagiba oštećenja.



4. DETEKCIJA I LOKALIZACIJA OŠTEĆENJA KOD BETONSKIH PLOČASTIH KONSTRUKCIJA

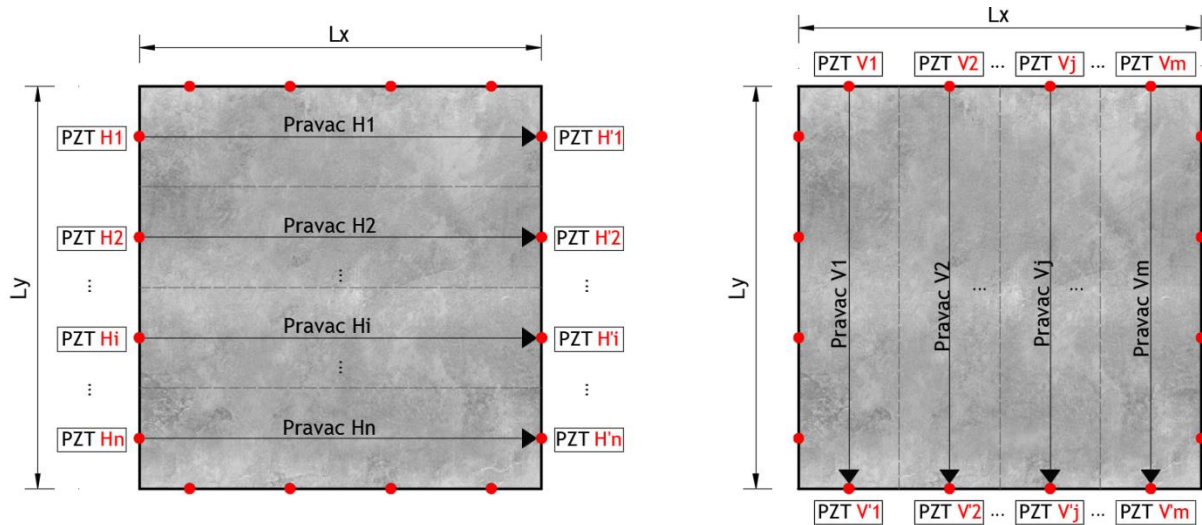
4.1. Uvod

U ovom delu disertacije, prikazaće se detekcija, lokalizacija i kvantifikacija oštećenja kod pločastih betonskih konstrukcija. Pod površinskim nosačima podrazumevamo nosače kod kojih su dve dimenzije, dužina i širina, velike u odnosu na debljinu nosača. Ovi nosači se dele na ploče, zidove i ljuske. Betonske ploče su noseći elementi čija je jedna dimenzija mala u odnosu na druge dve dimenzije, ograničena sa dve paralelne ravni i cilindričnom površinom upravno na njih. Opterećene su uglavnom vertikalnim poprečnim opterećenjem na savijanje. Betonski zidovi su noseći elementi geometrijski slični pločama ali opterećeni najčešće ravnim stanjem naprezanja. Ljuske su površinske noseće konstrukcije sastavljene od zakrivljenih površi, čija je debljina mala u odnosu na druge dve dimenzije i koje prihvataju opterećenje podužnim (membranskim) silama i savijanjem. Postupak detekcije koji će biti prikazan u ovom delu disertacije analiziran je za ploče ali je primenjiv i kod drugih tipova površinskih betonskih nosača.

4.2. Detekcija oštećenja kod pločastih betonskih konstrukcija

Za određivanje stanja oštećenosti betonskih ploča biće primenjen dvodimenzionalni indeks oštećenja (2D DI) baziran na jednodimenzionalnom indeksu oštećenja (1D DI) korišćenog u prethodnom Poglavlju disertacije. 2D DI je na bazi energije prostiranja talasa i vejevlet dekompozicije signala.

Za određivanje 2D DI, površina betonske ploče se deli na n horizontalnih traka i m vertikalnih traka prikazanih na Slici 43. Širina trake se dobija tako što se međurazmak dva pravca deli na jednake delove. Za svaki pravac postoji par PZT A/S kod kojih je jedan aktuator a drugi senzor. Za svaki horizontalni i vertikalni pravac računa se 1D DI. U slučaju nastanka oštećenja unutar betonske ploče, oštećenje se ponaša tako što sprečava slobodno prostiranje talasa i smanjuje njegovu energiju, što u krajnjem smislu povećava 1D DI.

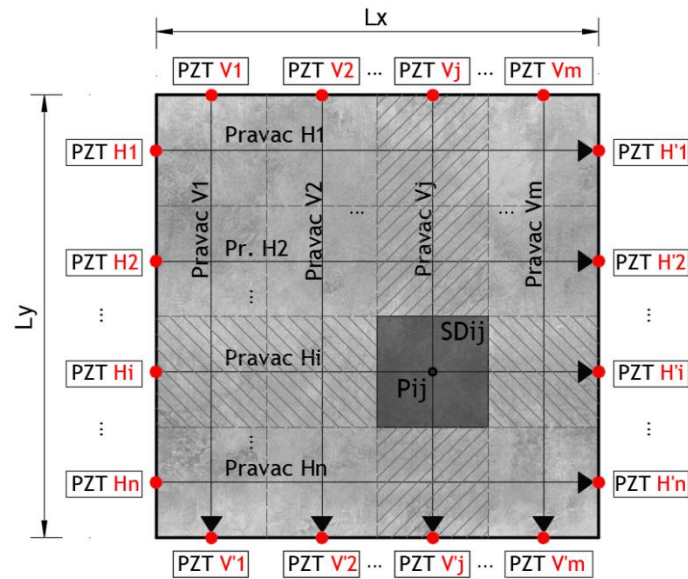


Slika 43. Levo: Horizontalni PZT A/S pravci; Desno: Vertikalni PZT A/S pravci

Jedan PZT (PZT H1) aktivira se kao aktuator da izazove prostiranje talasa unutar betonske ploče, dok se drugi PZT suprotan njemu (PZT H'1) koristi kao senzor da prihvati dolazeći talas. Zatim se aktivira sledeći PZT (PZT H2) kao aktuator i njemu upravan senzor, i procedura se dalje nastavlja do n -tog PZT para aktuatora/senzora. Zatim se ista procedura primenjuje za m vertikalnih PZT parova. Za sve PZT parove računa se 1D DI prema proceduri objašnjenj u prethodnom Poglavlju. Proračunom 1D DI za sve horizontalne pravce formira se vektor R_{Hi} ($i=1,2,\dots,n$) dok za vertikalne pravce formira se vektor R_{Vj} ($j=1,2,\dots,m$). Konačni 2D DI dobija se na osnovu sledećeg izraza u matricnoj formi:

$$M_{ij} = R_{Hi} \cdot R_{Vj} \quad (101)$$

pri čemu je M_{ij} - 2D DI matrica, $R_H = \{DI_{H1}, DI_{H2}, \dots, DI_{Hi}, \dots, DI_{Hn}\}$ je vektor indeksa oštećenja horizontalnih pravaca, dok, $R_V = \{DI_{V1}, DI_{V2}, \dots, DI_{Vj}, \dots, DI_{Vm}\}$ je vektor indeksa oštećenja vertikalnih pravaca.



Slika 44. Betonska ploča sa pod-domenima za proračun 2D indeksa oštećenja

U preseku horizontalnih i vertikalnih pravaca formira se presečna tačka P_{ij} ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$) prikazana na Slici 44. Za svaku tačku postoji pripadajući pod-domen obeležen tamno sivom bojom na Slici 44. Površina pod-domena određuje se tako što se širine međupravaca dele na jednake delove (Slika 44).

Za određivanje ukupne vrednosti oštećenosti betonske ploče formira se ukupni indeks oštećenja O_{DI} definisan sledećom jednačinom:

$$O_{DI} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} M_{ij} \quad (102)$$

gde su n i m brojevi horizontalnih i vertikalnih pod-domena, α_{ij} je težinski koeficijent i - j pod-domena sa površinom A_{ij} definisanom na sledeći način:

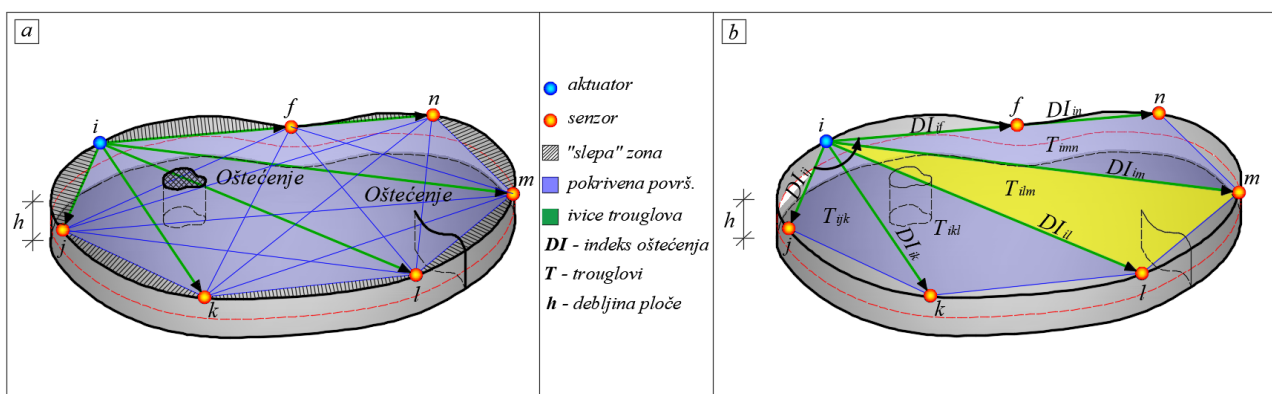
$$\alpha_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij}} \quad (103)$$

gde je broj pod-domena i i j jednak $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$, A_{ij} je površina pod-domena i - j , n i m su subdomeni u ortogonalnim pravcima ploče. Pomoću jednačina (101) i (102) može se odrediti status oštećenja pojedinačnih pod-domena kao i ukupna oštećenost betonske ploče.

4.3. Hibridni algoritam za lokalizaciju oštećenja kod pločastih betonskih konstrukcija

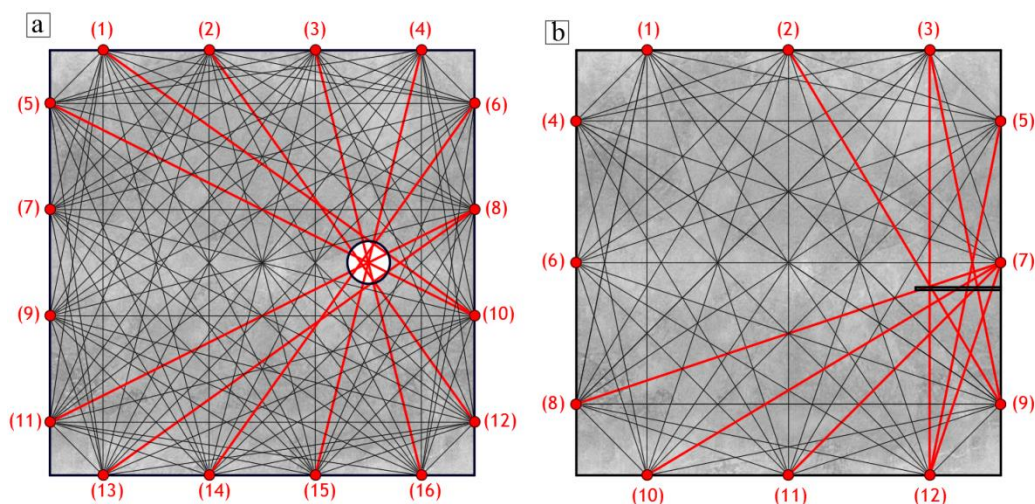
U ovom delu disertacije biće prikazan novi hibridni algoritam za lokalizaciju oštećenja kod površinskih betonskih elemenata razvijen u okviru ovog istraživanja. Pristup je nazvan hibridnim jer sadrži tri kriterijuma (energetski, vreme prostiranja talasa i diskretna vejevlet transformacija signala senzora) u postupku odlučivanja odabira merodavnih pravaca aktuatora/senzora za lokalizaciju oštećenja. Kriterijum vremena prostiranja talasa (ToF) je baziran na činjenici da dolazni talas od aktuatora (A) do senzora (S) neće biti isti za neoštećenu konstrukciju, u poređenju sa oštećenim betonskim elementom duž pravca PZT A/S. Energetski kriterijum je definisan jednačinom 1D DI (jedancina 82) i računa se za sve pravce koji prethodno zadovolje ToF kriterijum. Kriterijum diskretne vejevlet transformacije signala se odlikuje u tome da izlazni signal senzora može da se transformiše na aproksimaciju i detalj.

Razvijen je hibridni algoritam lokalizacije oštećenja za proizvoljni oblik pločastog betonskog elementa i proizvoljnu konfiguraciju i broj PZT aktuatora/senzora (Slika 45). Lokalizacija oštećenja moguća je unutar površi ograničene čvorovima gde su postavljeni PZT A/S (plava površ na Slici 45a), dok izvan nje je takozvana "slepa" zona, tj. deo 2D betonskog elementa gde ne postoje informacije o oštećenju. Ovaj nedostatak hibridnog algoritma može se prevazići ako se PZT A/S postave u uglovima betonskog elementa. Postupak lokalizacije oštećenja zahteva minimum tri PZT A/S kako bi se formirao makar jedan trougao od PZT aktuatora/senzora. Međutim, za određivanje preciznije slike oštećenja neophodno je nešto veći broj A/S. Prilikom postavljanja PZT A/S nije preporučljivo postaviti njihov veći broj na istom pravcu, već raspoređivati relativno podjednako u različitim pravcima.



Slika 45. a) Položaj PZT A/S i pravci između njih kod oštećene betonske ploče nepravilnog; b) podela betonske ploče na trouglove u smeru suprotnom od smera skazaljke na satu

Procedura lokalizacije oštećenja podrazumeva aktiviranje jednog PZT aktuatora (plava tačka na Slici 45a) koji izaziva prostiranje mehaničkog talasa, dok svi ostali PZT koriste se kao senzori da prihvate dolazeći talas (narandžasta tačka na Slici 45a). Nakon toga, sledeći PZT aktivira se kao senzor, dok svi ostali su senzori i tako redom. Na osnovu pomenute procedure, formira se mreža svih pravaca PZT A/S (crne i crvene linije na Slici 46). Od svih mogućih pravaca aktuatora/senzora na Slici 46a, samo crveni pravci (18 A/S pravaca od ukupno 380 mogućih) zadovoljavaju sva tri kriterijuma i samo za ove pravce neophodno je uraditi dekompoziciju signala i sračunati 1D DI, što u velikoj meri rasterećuje algoritam. Na Slici 46 prikazana su dva modela: a) model sa jednim kružnim oštećenjem i 16 PZT A/S, b) model sa jednim zarezom i 12 PZT A/S, kako bi se ilustrativno videlo da je neophodan mali broj pravaca za ukupnu analizu (dekompozicija signala i proračun 1D DI).



Slika 46. Pravci PZT A/S (tanke sive linije – pravci koji ne zadovoljavaju sve kriterijume hibridnog algoritma, deblje crvene linije – pravci koji zadovoljavaju sve kriterijume), a) Model M5; b) Model M10

Površina obuhvaćena lokalizacijom oštećenja dalje se deli na konačni broj trouglova, dobijenih spajanjem aktuatora sa okolnim sensorima. Na Slici 45b prikazuju se trouglovi dobijeni kada je aktuator PZT_i i senzori PZT_l , PZT_m (žuta površina). Podela na trouglove urađena je zbog numeričke interpolacije vrednosti indeksa oštećenja. Za PZT senzore koji leže na istom pravcu, samo najudaljeniji sensor se uzima u proračun (videti Sliku 45b – trougao T_{imn}).

Za sve razmatrane parove A/S sračunati su izlazni signali senzora za 2D neoštećenu ploču i oni predstavljaju početno čitanje. Nakon toga, procedura sračunavanja izlaznih signala urađena je za oštećene modele. Prvo, kriterijum ToF je testiran, odnosno, da li postoji razlika u vremenu



putovanja longitudinalnog talasa (Δt) između aktuatora i senzora za neoštećenu (t_{int}) i oštećenu (t_{dem}) konstrukciju. Ako je ovaj uslov ispunjen, onda se signal dalje dekomponuje diskretnom vejtlet dekompozicijom. Da bi se kriterijum ToF mogao praktično koristiti moraju biti ispunjeni sledeći uslovi: 1) da se merenja vrše na istoj betonskoj konstrukciji, 2) da su spoljašnji vremenski uslovi relativno jednaki (temperatura, vlažnost vazduha) ili uz manja odstupanja, 3) da su unutrašnja vlažnost betonske konstrukcije ista kao kod početnog merenja, 4) da spoljašnje vibracije nemaju veliki uticaj na izlazni signal (da je šum zanemarljiv u odnosu na energiju signala). U slučaju da neki od pomenutih parametara značajno odstupa, može doći do kašnjenja dolaznog signala usled tog parametra (npr. procenta vlažnosti betonskog elementa), što može dovesti do pogrešnog zaključka da je konstrukcija doživela oštećenje, iako su promene u ToF kriterijumu i energiji izlaznog signala direktna posledica promene vlažnosti betonskog elementa.

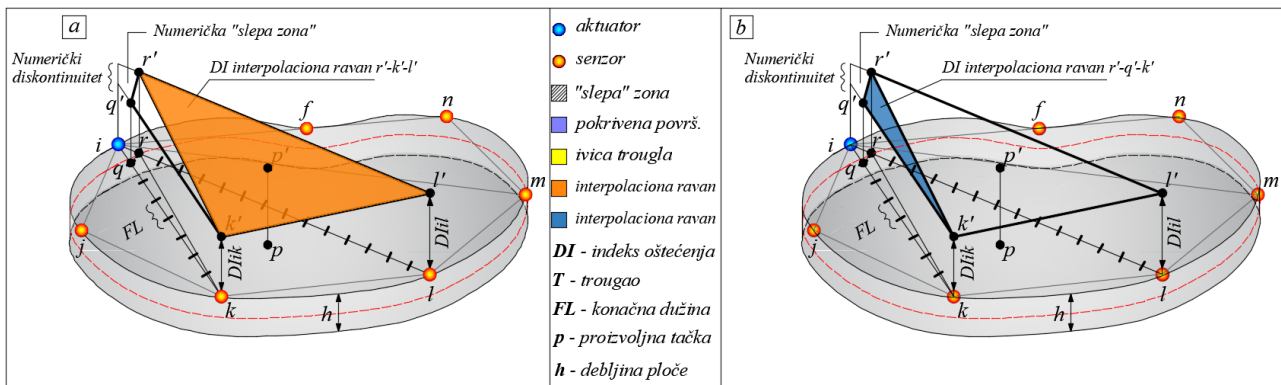
Nakon toga, za sve A/S parove koji zadovoljavaju kriterijum ToF, energetski kriterijum i diskretna vejtlet dekompozicija (DWT) primenjuje se i računa se 1D DI na osnovu jednačine (83). Samo oni pravci koji imaju različitu energiju za neoštećeno i oštećeno stanje zadovoljavaju oba kriterijuma. U ovom delu metode usvojena je pretpostavka da je do promene energije prostiranja talasa došlo usled nastanka oštećenja unutar betonske konstrukcije, bez uticaja spoljašnjih dejstava. Na Slici 46a prikazana je betonska ploča sa 16 različitih položaja PZT A/S sa svim njihovim mogućim pravcima. Crvena linija označava pravce koji zadovoljavaju sve kriterijume (energetski, ToF i DWT kriterijum), dok tanke crne linije ne zadovoljavaju makar jedan od tri kriterijuma.

Sračunati indeksi oštećenja za A/S parove unose se u matricu M_{DI} , kao što je to dato u jedanačini (104). Elementi matrice DI_{ij} ($i=j$) jednaki su nuli, dok ostali elementi su različiti od nule za A/S pravce koji zadovoljavaju sve kriterijume. Za nesimetrični problem važi $DI_{ij} \neq DI_{ji}$.

$$M_{DI} = \begin{bmatrix} DI_{11} & DI_{12} & \dots & DI_{1j} & \dots & DI_{1n} \\ DI_{21} & DI_{22} & \dots & DI_{2j} & \dots & DI_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ DI_{i1} & DI_{i2} & \dots & DI_{ij} & \dots & DI_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{n1} & DI_{n2} & \dots & DI_{nj} & \dots & DI_{nn} \end{bmatrix} \quad (104)$$

Zatim, radi se linearna interpolacija 1D DI unutar pokrivena površine betonskog elementa. Procedura primenjene interpolacije biće predstavljena na nivou jednog trougla. Na Slikama 47-48 prikazana je procedura linearne interpolacije trougla T_{ikl} . Usvojena je pretpostavka da je 1D DI

konstantan duž A/S pravca. Zatim se svi pravci A/S dele na određen broj konačnih dužina (FL), pogledati Slike 47-48. Imajući u vidu da svi pravci imaju konstantnu vrednost indeksa oštećenja, i mogu imati različite vrednosti, u čvoru aktuatora dolazi do pojave diskontinuiteta vrednosti indeksa oštećenja (Slika 47). Da bi se prevazišao ovaj problem, nove kontrolne tačke se uvode u proračun: q (duž pravca $i-k$) i r (duž pravca $i-l$), koji su na rastojanju FL od čvora i . Ovim je omogućeno da se procedura nastavi. Dalje se interpolacija DI radi na telu $q-r-k-l$, umesto na trouglu $i-k-l$. Numerička slepa zona $i-q-r$ može se praktično zanemariti, zbog toga što je veoma blizu aktuatoru. Odnosno, za veoma finu podelu (mala dužina FL), ova slepa zona praktično da ne postoji. Takođe, u slučaju nastanka oštećenja unutar numeričke “slepe zone” $i-q-r$, aktuator i ne bi bio u funkciji što bi bio jedan od pokazatelja mesta nastanka oštećenja.

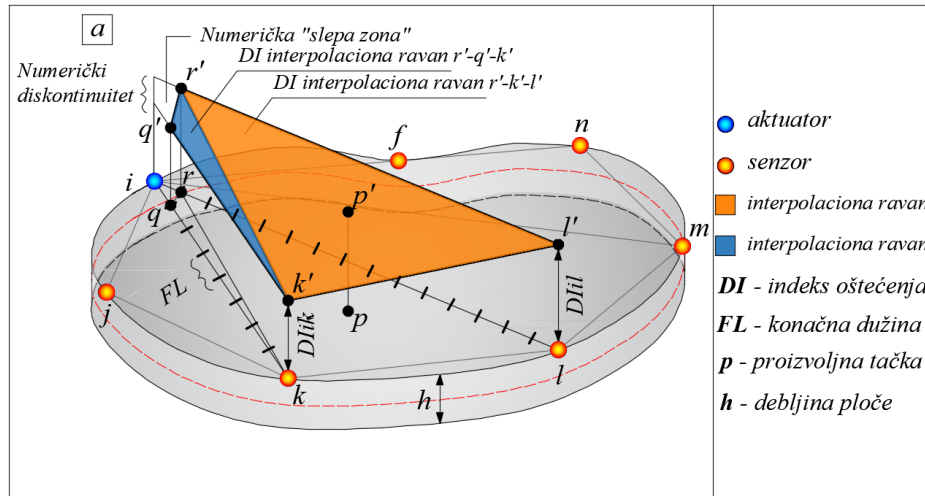


Slika 47. Delovi interpolacione ravni: (a) ravan $r'-k'-l'$, (b) ravan $r'-q'-k'$

Vrednosti indeksa oštećenja za pravce $i-k$ i $i-l$ naneti su upravno na ravan betonske ploče u generisanim diskretnim tačkama, i formirane su nove tačke q' , k' , r' i l' (Slike 47-48). Ovih četiri tačaka kreiraju dve interpolacione ravni indeksa oštećenja: ravan kreirana tačkama $q'-k'-r'$ (plava površ na Slici 47b) i ravan $r'-k'-l'$ (narandžasta površ na Slici 47a). Ove dve ravni su povezane duž linije $r'-k'$, i interpoliraju vrednosti indeksa oštećenja na ovom delu ploče. Sada za proizvoljnu tačku p indeks oštećenja može se lako odrediti (Slika 48). Konačno, nakon proračuna DI za sve pravce A/S, vrednost za proizvoljno izabranu diskretnu tačku p možemo iskazati sledećom jednačinom:

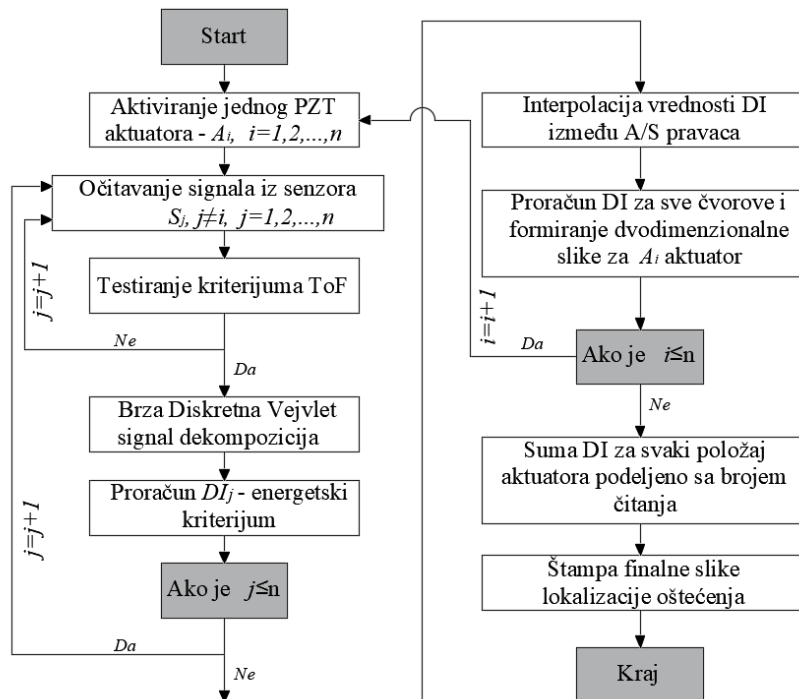
$$DI_p = \frac{\sum_{z=1}^s DI_z}{s} \quad (105)$$

gde je $\sum_{z=1}^s DI_z$ suma indeksa oštećenja za izabranu tačku za sve parove A/S, s je broj kombinacija sumiranja.



Slika 48. Linearna interpolacija indeksa oštećenja DI unutar površi q-r-k-l

Algoritam hibridne metode za lokalizaciju oštećenja prikazan je na Slici 49. Nakon aktivacije PZT pločice i prihvatanje talasa od strane senzora, na izlaznom signalu senzora primenjuje se kriterijum vremena prostiranja talasa (ToF). Samo signali koji zadovoljavaju kriterijum ToF dalje se obrađuju. Nakon toga, radi se brza diskretna vejevlet transformacija signala, sa proračunom indeksa oštećenja korišćenjem energetskog pristupa. Konačno, za implementaciju algoritma neophodno je uraditi interpolaciju vrednosti 1D DI za sve A/S parove i za sve položaje aktuatora i formirati konačnu sliku položaja oštećenja na osnovu sumiranih vrednosti DI prema jednačini (105).



Slika 49. Algoritam za 2D lokalizaciju oštećenja pomoću hibridne procedure



Kreirani su originalni MATLAB kodovi koji primenjuju prikazanu proceduru lokalizacije oštećenja (algoritmi dati u prilogu B). Prvi algoritam vrši dekompoziciju izlaznih signala senzora pomoću FDWD i proračun energetskog kriterijuma (1D DI). Dok drugi MATLAB kod interpoluje vrednosti indeksa oštećenja za sve pravce A/S. Ulazni podaci za ovaj kod su: dimenzije betonskog elementa, koordinate PZT A/S i matrica trouglova formiranih na osnovu aktuatora i dva susedna senzora. Programom se dalje vrši generisanje diskretnih tačaka, podela pravaca na konačne dužine, proračun indeksa oštećenja za sve diskretne tačke i formiranje slike oštećenja.

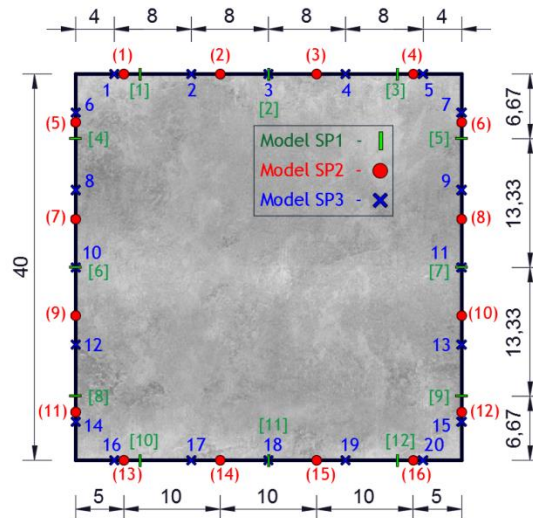
4.3.1. Eksperimentalna verifikacija hibridnog algoritma za 2D lokalizaciju oštećenja

Hibridni algoritam za detekciju oštećenja biće testiran na kvadratnim betonskim pločama dimenzija $40 \times 40 \times 4 \text{ cm}$. Devet ploča je analizirano, jedna neoštećena i osam ploča sa oštećenjem u vidu zarez, rupe ili materijalnih defekata. Za ploče sa zarezom i rupom, broj PZT A/S je variran sa vrednostima 12, 16 i 20. Oznake eksperimentalnih uzoraka, broj A/S i opis oštećenja prikazano je u Tabeli 8.

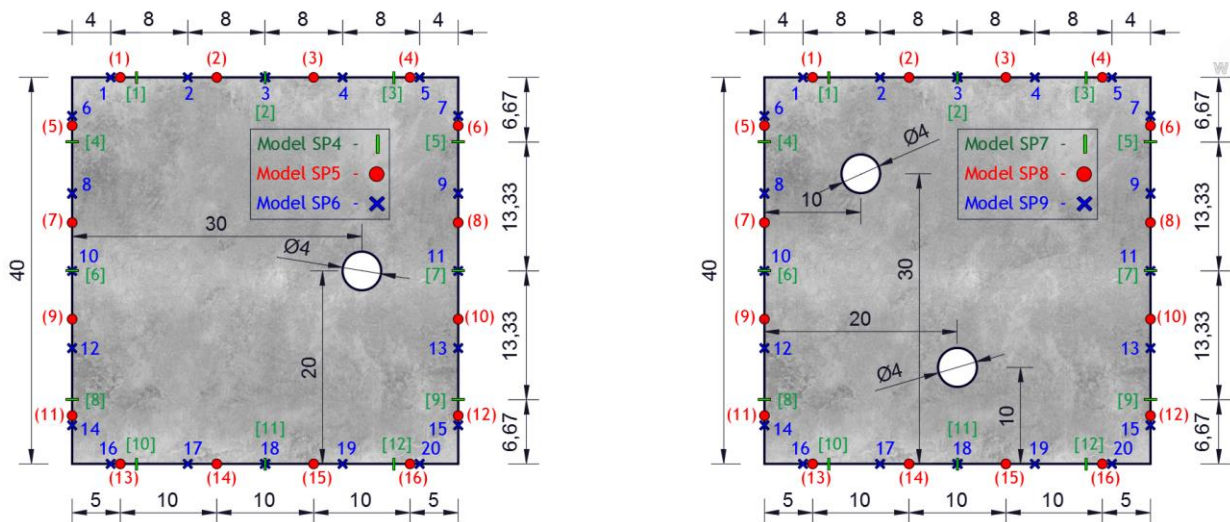
Tabela 8. Karakteristike eksperimentalnih betonskih uzoraka

Oznaka uzorka	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
Broj PZT A/S	12	16	20	12	16	20
Status oštećenja	Neoštećen	Neoštećen	Neoštećen	$\varnothing 4 \text{ cm}$ - jedna	$\varnothing 4 \text{ cm}$ - jedna	$\varnothing 4 \text{ cm}$ - jedna
Oznaka uzorka	SP7	SP8	SP9	SP10	SP11	SP12
Broj PZT A/S	12	16	20	12	16	20
Status oštećenja	$\varnothing 4 \text{ cm}$ - dve	$\varnothing 4 \text{ cm}$ - dve	$\varnothing 4 \text{ cm}$ - dve	$l_{cr}=8 \text{ cm}$ - zarez	$l_{cr}=8 \text{ cm}$ - zarez	$l_{cr}=8 \text{ cm}$ - zarez
Oznaka uzorka	SP13		SP14		SP15	
Broj PZT A/S	12		16		20	
Status oštećenja	$l_{cr1}=8 \text{ cm}, l_{cr2}=6 \text{ cm}$ - dva zareza		$l_{cr1}=8 \text{ cm}, l_{cr2}=6 \text{ cm}$ - dva zareza		$l_{cr1}=8 \text{ cm}, l_{cr2}=6 \text{ cm}$ - dva zareza	

Na Slici 50 prikazana je geometrija neoštećene betonske ploče sa tačnim položajem PZT A/S. Razmak između PZT položaja za model sa 12 A/S iskotiran je sa desne strane modela, za model sa 16 A/S iskotiran je sa donje strane modela, dok sa gornje strane modela kotiranje je urađeno za model sa 20 A/S. Raspored PZT A/S urađen je podjednako i simetrično za sve strane modela. Na Slici 51 prikazani su modeli sa kružnim oštećenjem (modeli SP4-SP9). Slično na Slici 52 prikazani su modeli SP10-SP15 (betonski modeli sa oštećenjem u vidu zarez). Dužina zarez i njihov položaj za modele SP10-SP15, kao i položaj A/S, prikazan je na Slici 52.



Slika 50. Geometrija uzoraka/modela: uzorci SP1-SP3 I modeli M1-M3



Slika 51. Geometrija uzoraka/modela: Levo) uzorci SP4-SP6/ modeli M4-M6; Desno) uzorci SP7-SP9/ modeli M7-M9

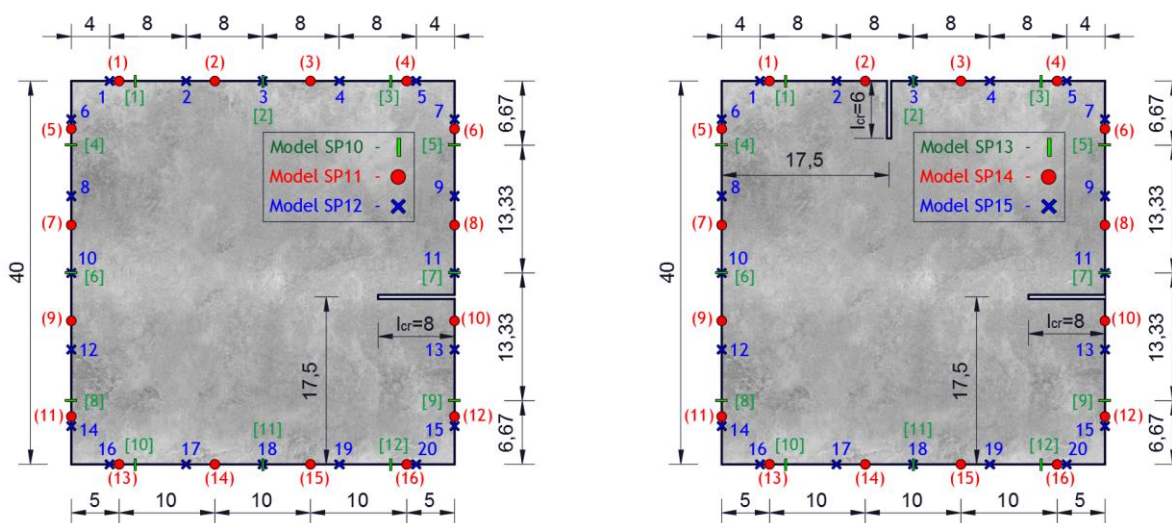
Obimna eksperimentalna istraživanja na kvadratnim betonskim uzorcima prikazani su u ovom delu disertacije. Cilj eksperimentalnog istraživanja je verifikacija hibridnog pristupa za lokalizaciju oštećenja. Efikasnost metode je testirana na 15 različitih uzoraka koji su prikazani u Tabeli 8.

Tabela 9. Odnos ugrađenih sastojaka primenjenog betona

Sitnozrni pesak (kg/m ³)	Krupnozrni pesak(kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Voda (kg/m ³)
685	1135	405	182

Betonske ploče napravljene su od betona MB30 sa frakcijama agregata prečnika 0-4mm, 4-8, i 8-16mm, sa odnosom prikazanim u Tabeli 9. Sveža betonska masa pripremljena je u laboratoriji za

Građevinske Materijale na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu, pri temperaturi od 22 ± 2 °C i ugrađena je u precizno pripremljenu oplatu. Nakon 48h ploča se vadi iz oplate i postavlja u kadu sa vodom u trajanju od 28 dana, nakon čega se vadi. Eksperimentalna merenja urađena su nakon što su se ploče osušile prirodnim putem. Zapreminska težina uzoraka je određena merenjem na vagi sa preciznošću od ± 2 grama čije vrednosti su prikazane u Tabeli 10.



Slika 52. Geometrija uzoraka/modela: Levo) uzorci SP10-SP12/ modeli M10-M12; Desno) uzorci SP13-SP15/ modeli M13-M15

Verifikacija lokalizacije oštećenja primenom hibridnog algoritma urađena je pod laboratorijskim uslovima upotrebom optičkog lasera i piezoelektričnog aktuatora za emitovanje propagacije mehaničkih talasa (Slika 53). Za pobudu konstrukcije korišćen je piezoelektrični actuator S 24 HB® (proizveden od strane Karl Deutsch) u frekventnom domenu sa centralnom frekvencom od 100Hz. Ulazni signal za pobudu PZT aktuatora korišćen je 3.5-ciklusa Hanning windowed tone burst opisan sledećom jednačinom:

$$P_{(t)} = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{N} t\right) \right] \sin(2\pi f t) & , for \quad 0 \leq t \leq \frac{N}{f} \\ 0 & , for \quad t \geq \frac{N}{f} \end{cases} \quad (106)$$

pri čemu: f je centralna frekvenca ($f=100$ kHz), N je broj ciklusa ($N=3.5$), t je vreme (trajanje signala je $3.5 \cdot 10^{-5}$ s), dok $P_{(t)}$ je ulazni signal. Centralna frekvenca od 100 kHz usvojena je tako da talasna dužina λ_w (35.8mm) je manja od veličine oštećenja i veća od najvećeg zrna agregata. U betonskim konstrukcijama, manja talasna dužina mehaničkog talasa vodi ka većim rasipanjima i prigušenju izlaznih signala usled dodira sa većim agregatom unutar betonske mase. Dok sa druge



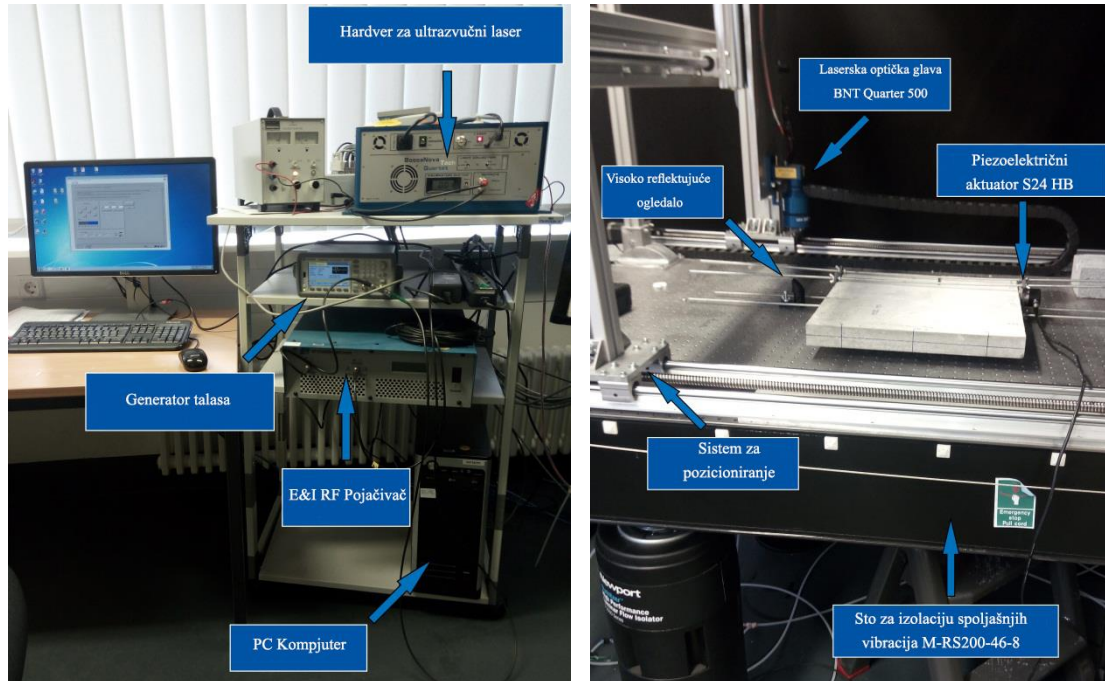
strane, upotreba veće talasne dužine može izazvati neosetljivost metode na nastala oštećenja unutar konstrukcije.

Tabela 10. Zapreminska težina eksperimentalnih uzoraka

Oznake eksperimentalnih uzoraka - SP_i	Težina - W_i (kg)	Zapreminska težina - ρ_i (kg/m^3)	Srednja vrednost - ρ_{mean} (kg/m^3)	Odstupanje $\left \frac{\rho_i - \rho_{mean}}{\rho_i} \right \cdot 100(\%)$
Neoštećene: $SP1, SP2, SP3$	15.292	2389.375	2377.3	0.505
Ploče sa jednom rupom: $SP4, SP5, SP6$	15.068	2373.025		0.180
Ploče sa dve rupe: $SP7, SP8, SP9$	14.982	2378.280		0.040
Ploče sa jednim zarezom: $SP10, SP11,$	15.078	2361.840		0.655
Ploče sa dva zarez: $SP13, SP14, SP15$	15.182	2384.110		0.286

Na kontaktu aktuatora i betonskog uzorka naneta je tečnost za ultrazvučno merenje koja ima cilj da sjedini kontaktnu površinu i da ublaži eventualne nepravilnosti na površini betona. Piezoelektrični aktuator je fiksiran za betonski uzorak pomoću privremene zatezne konstrukcije. Na pomoćnoj konstrukciji postavljen je dinamometar kako bi se merila sila kojom se aktuator fiksira za betonski uzorak. Kao sensor korišćen je ultrazvučni laserski skener BNT Quartet 500®, proizveden od Bossa Nova Technologies. Veoma fina rezolucija pozicioniranja ultrazvučnog lasera omogućena je na osnovu sistema za pozicioniranje napravljenog od strane istraživačke grupe za Mehaniku Adaptivnih Sistema na Ruhr Univerzitetu u Bohumu (Nemačka). Sistem za pozicioniranje sa optičkim laserom i uzorkom za merenje postavljen je na optičkom stolu za izolovanje spoljašnjih vibracija (Newport M-RS200-46-8®) prikazanog na Slici 53. Za merenje horizontalnih vibracija betonske ploče postavljeno je visoko reflektujuće ogledalo na bočnim stranama betonskog uzorka (Slika 54 a), u cilju reflektovanja vertikalnog zraka lasera na horizontalnu bočnu stranu uzorka. Položaj merenja senzora (položaj senzora) gde laserski zrak dodiruje betonski uzorak, prekriven je ultra tankim slojem zlata u cilju bolje refleksije zraka i dobijanja jasnijih izlaznih signala senzora. Na taj način dobijeni su intenzivniji izlazni signali senzora sa manjim uticajem spoljašnje sredine.

Procedura merenja podrazumeva sledeće korake: *i*) fiksiranje PZT aktuatora S 24 HB za betonski uzorak na tačno predviđenom položaju, *ii*) postavljanje optičkog lasera na mestu senzora zajedno sa reflektujućim ogledalom, *iii*) emitovanje mehaničkog talasa PZT aktuatorom i prihvatanje od strane senzora, *iv*) pomeranje senzora na sledeću lokalaciju i ponavljanje procedure.



Slika 53. Eksperimentalna postavka za hibridni PZT-Laser system skeniranja: levo – Pojačivač, generator talasa, PC kompjuter i hardver za ultrazvučni laser, desno – postavljen betonski uzorak na sto za izolaciju spoljašnjih vibracija zajedno sa PZT aktuatorom i glavom ultrazvučnog lasera

Za svaki položaj senzora izmereno je ukupno po 100 izlaznih signala i skladišteni su na kompjuteru. U cilju analize pouzadnosti izmerenih podataka urađena je statistička distribucija dobijenih podataka. Dobijena maksimalna amplituda izlaznih signala analizirana je statistički. Test normalnosti je urađen na osnovu *Shapiro-Wilk*, *Anderson-Darling*, *Lilliefors* i *Jarque-Bera* testa, u cilju utvrđivanja validnosti primene normalne distribucije za dobijenu populaciju podataka. *Shapiro-Wilk* test je definisan sledećim jednačinama (107-108):

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i A_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \quad (107)$$

pri čemu je: A_1, A_2, \dots, A_n su maksimalne amplitude izmerenih signala; $n=1,2,\dots,100$ je broj izmerenih podataka; $A_{(i)}$ je i -ta najmanja amplituda izmerenih podataka; $\bar{A} = (A_1 + A_2 + \dots + A_n)/n$ - srednja vrednost. Konstanta a_i određuje se sledećim izrazom:

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{\sqrt{m^T V^{-1} V^{-1} m}} \quad (108)$$



gde je: $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T$ – očekivane vrednosti nezavisnih i identično raspoređenih slučajnih varijabli uzorkovanih iz standardne normalne distribucije, V – kovarijantna matrica. *Anderson-Darling* test je baziran na kvadratnim empirijskim funkcijama distribucije (*EDF*) i udaljenosti između funkcije kumulativne distribucije (F_n) i hipotezirane funkcije distribucije (F):

$$A^2 = d \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(F_n(x) - F(x))^2}{F(x)(1 - F(x))} dF(x) \quad (109)$$

$$d = \int_{-\infty}^{\infty} (F_n(x) - F(x))^2 \omega(x) dF(x) \quad (110)$$

pri čemu je d – udaljenost između F i F_n izmeren pomoću kvadratne *EDF* a $\omega(x)$ je težinska funkcija. *Lilliefors* test normalnosti funkcije je modifikovani test *Kolmogorov-Smirnov*. *Jarque-Bera* test zasniva se na pogodnosti da li mereni uzorci imaju nagutost i zakrivljenost koji odgovara normalnoj distribuciji:

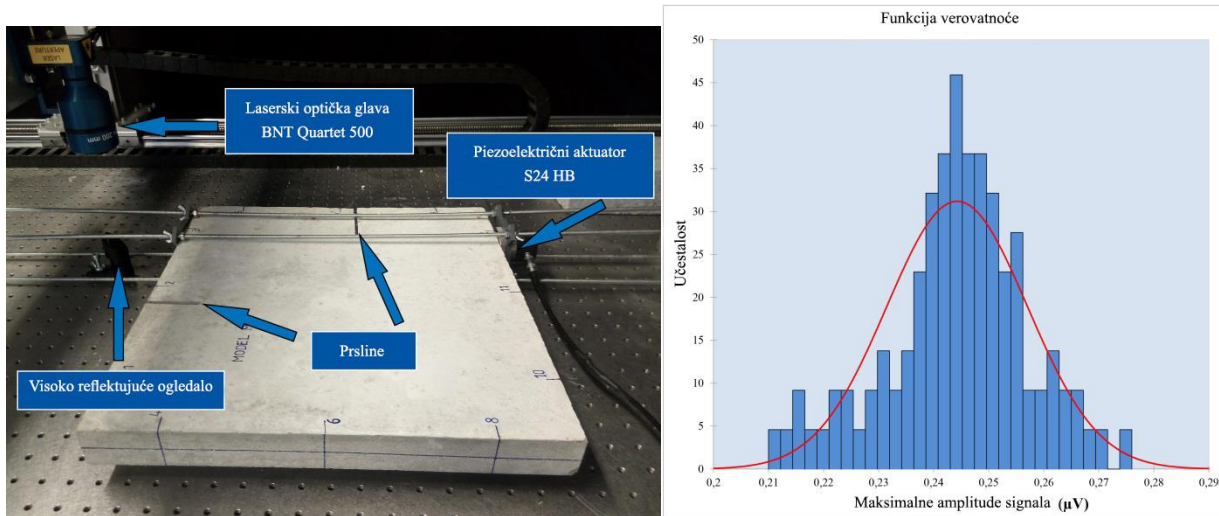
$$JB = \frac{f - r + 1}{6} \left(S^2 + \frac{1}{4} (C - 3)^2 \right) \quad (111)$$

gde je S nagutost (skewness), C je zakrivljenost (kurtosis), r je regresioni broj i f je broj stepeni slobode.

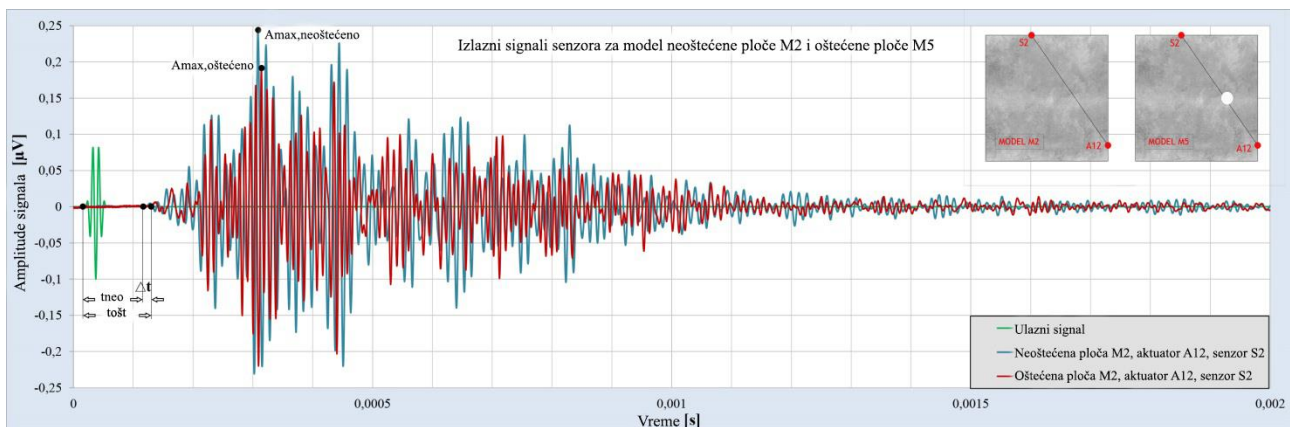
Tabela 11. Normalna distribucija i test normalnosti

<i>Shapiro-Wilk test</i>	<i>Anderson-Darling</i>	<i>Lilliefors test</i>	<i>Jarque-Bera test</i>
$W=0.981$	$A^2=0.605$	$p=0.074 > \alpha=0.05$	$JB=1.916$
$p=0.175 > \alpha=0.05$	$p=0.113 > \alpha=0.05$		$p=0.384 > \alpha=0.05$
<i>Srednja vrednost</i> $m=0.2441$		<i>Standardna devijacija</i> $\sigma=0.0144$	

Na osnovu dobijenih rezultata (Tabela 11) može se zaključiti da izmereni podaci mogu se tretirati na osnovu normalne distribucije. Histogram i normalna distribucija izmerenih podataka maksimalnih amplituda za model SP2 pri položaju aktuatora A12 i senzora S2 prikazani su na Slici 54b. Na osnovu Slike 54b gde se prikazuje normalna distribucija, može se videti da izmereni podaci nemaju velika odstupanja.



Slika 54. a) Eksperimentalna postavka za modele M13-M15, b) histogram i normalna distribucija maksimalne amplitude za model M2 pri položaju aktuatora A12 i senzor S2



Slika 55. Izlazni signal senzora za uzorke SP2 i SP5 pri položaju aktuatora A12 i senzora S2. Ulazni signal je skaliran koeficijentom 0.1

4.3.1.1. Određivanje Rejljevih koeficijenata prigušenja

Procedura za određivanje koeficijenata Rejljevog prigušenja prikazuje se u radu [119]. Procedura podrazumeva korišćenje direktne “pitch-catch” konfiguracije. Na dalje biće prikazana ukratko pomenuta procedura, koja je iskorišćena za određivanje koeficijenata prigušenja za primenjene uzorke eksperimentalnog merenja. U opštem smislu, Rejljevo prigušenje može se definisati na osnovu matrice prigušenja na sledeći način:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (112)$$

gde je $[C]$ matrica prigušenja, $[M]$ i $[K]$ su matrica masa i matrica krutosti, α i β su koeficijenti prigušenja proporcionalni masi i krutosti. Kao što je poznato, α koeficijent prigušuje niže frekvence



dok β prigušuje više. Jednačina (112) može da se iskaže na osnovu koeficijenta prigušenja ξ pomoću sledeće jednačine:

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\beta} + \beta\omega \right) \quad (113)$$

gde je ω ugaona frekvenca jednaka $2\pi f$ i f je frekvenca. Amplituda vibracija konstrukcije prati logaritamski zakon prigušenja [120], koji se može iskazati sledećom jednačinom:

$$\ln \left(\frac{u}{u_n} \right) = \frac{2n\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (114)$$

gde su u i u_n amplitude vibracija konstrukcije u trenutnom ciklusu i nakon n ciklusa. Amplitude elastičnog mehaničkog talasa na rastojanjima l_1 i l_2 od aktuatora ka senzoru biće označene sa A_1 i A_2 . Vreme prostiranja mehaničkog talasa od aktuatora ka senzoru, na rastojanju l_1 biće označena sa t_1 , dok za poziciju l_2 sa t_2 . Zavisnost između razlike rastojanja prostiranja talasa Δl i vremenskog intervala t_{int} može se definisati uz pomoć sledeće jednačine (pri čemu je C_L brzina prostiranja longitudinalnih talasa):

$$t_{int} = t_2 - t_1 = \frac{\Delta l}{C_L} = \frac{l_2 - l_1}{C_L} \quad (115)$$

Amplituda mehaničkog talasa na rastojanju l_2 ima zavisnost u odnosu na amplitudu na rastojanju l_1 koja se može iskazati sledećom jednačinom [121]:

$$A_2 = A_1 e^{-k_\omega(l_2 - l_1)} = A_1 e^{-k_\omega \Delta l} \quad (116)$$

pri čemu je k_ω koeficijent prigušenja mehaničkog talasa u betonu. Jednačina (116) može se napisati i na sledeći način [122]:

$$\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = k_\omega \Delta l \quad (117)$$

Ako se pretpostavi da prigušenje prostiranja talasa je izazvano materijalnim prigušenjem, onda se prigušenje talasa može iskazati logaritamskom zavisnošću. Koristeći da je $n = \Delta l \cdot f / C_L$ dobija se:

$$2\pi\xi \left(\frac{f \cdot \Delta l}{C_L} \right) = k_\omega \Delta l \quad (118)$$

$$k_\omega = \frac{2\pi f \xi}{C_L} = \frac{\omega \xi}{C_L} = \frac{\omega}{2C_L} \left(\frac{\alpha}{\omega} + \beta\omega \right) = \frac{\alpha}{2C_L} + \frac{\beta}{2C_L} \omega^2 \quad (119)$$



Na osnovu izraza (119) Rejlijevi koeficijenti prigušenja određeni su eksperimentalnim putem na uzorku SP3. Na osnovu izmerenih signala, brzina prostiranja talasa za sve položaje senzora je određena. Srednja vrednost dobijenih rezultata je usvojena kao eksperimentalna vrednost brzine prostiranja talasa ($C_{\text{Lexp}}=3578,43\text{m/s}$). Na osnovu toga dobijeni su koeficijenti Rejlijevog prigušenja: $\alpha = 2058.23$ i $\beta = 1.105e - 8$.

4.3.2. Numeričko modeliranje propagacije talasa kod betonskih ploča

Propagacija talasa kod površinskih betonskih elemenata može se analizirati analitičkim metodama, rešavanjem jednačine dinamičkog kretanja [123,124], polu-analitičkim metodama [125,126] ili korišćenjem numeričkih metoda. Većina praktičnih problema za potrebe detekcije, lokalizacije i kvantifikacije oštećenja može se uraditi samo numeričkim metodama, jer analitičke procedure su komplikovane i limitirane samo za specijalne slučajeve graničnih uslova, materijalnih i geometrijskih modela. Postoji određen broj metoda koji se može koristiti za numeričko modeliranje propagacije talasa. Metoda graničnih elemenata [127] koristi osnovne principe metode konačnih elemenata ali konvertuje zapreminske integrale u površinske uz pomoć Grinove funkcije. Takođe, metoda konačnih razlika [128,129] uspešno je korišćena već decenijama, ali je kompjuterski prezahtevna za velike modele ili kompleksne geometrijske forme. Metoda globalnih matrica [130] i metoda masa-opruga rešetke (mass-spring lattice method - MSLM) [131] imaju svoju upotrebu u numeričkom modeliranju propagacije talasa. „Mesh-less“ metoda (MLM) [132] i pristup na bazi primene lokalne interakcije (local interaction simulation approach - LISA) [133,134] razvijeni su u cilju pronalaženja što efikasnijeg načina za modeliranje propagacije talasa. LISA je slična metodi konačnih razlika. Metode koje koriste metod spektralnih elemenata, takođe uspešno su primenjene u cilju modeliranja propagacije talasa [135].

Najzastupljeniji numerički pristup za modeliranje propagacije talasa je sigurno metoda konačnih elemenata (MKE) [136]. U opštem smislu, postoji dva pristupa za direktnu vremensku integraciju rešenja metode konačnih elemenata za dinamičke probleme: implicitna MKE (IMKE) [137] i eksplicitna MKE (EMKE) [138,139]. Integraciona metoda je implicitna ukoliko rešenje procedure zahteva faktorizaciju efektivne matrice krutosti dok kod eksplicitne procedure to nije slučaj [140].

Obe integracione metode imaju svoje prednosti i mane, tako na primer, implicitna metoda zahteva više vremena za proračun svakog pojedinačnog vremenskog koraka u poređenju sa eksplicitnom. Ali sa druge strane, implicitna metoda za linearne probleme može imati bezuslovnu stabilnost rešenja, tako da vremenski inkrement može se izabrati na osnovu problema koji se rešava. Ovo nije



slučaj kod eksplicitne metode koja koristi dijagonalnu matricu masa. Ipak, za slučaj numeričkog modeliranja propagacije talasa treba dati prednost eksplicitnoj MKE zbog toga što magnituda vremenskog inkrementa za stabilnost rešenja je slična vremenskom inkrementu za fizičko opisivanje problema. Implicitna metoda konačnih elemenata korišćena je uglavnom za površinske elemente i modeliranje Lamb talasa koji zahtevaju znatno manje konačnih elemenata.

Ovo istraživanje analizira betonske ploče čija debljina nije zanemarljiva u odnosu na druge dve dimenzije. Obzirom na to numerički model zahteva znatno veći broj konačnih elemenata za diskretizaciju modela, u poređenju sa veoma tankim aluminijumskih ili metalnim pločama. Zbog toga, neophodno je bilo korišćenje efikasne metode za rešavanje dinamičkih problema kao što je propagacija talasa, za veoma obimne modele koji se mere milionima konačnih elemenata. Iz tih razloga korišćen je komercijalni program ABAQUS/EXPLICIT koji koristi EMKE za modeliranje propagacije talasa. Dobijeni rezultati na osnovu numeričkog modeliranja eksperimentalno su verifikovani.

4.3.2.1. Modeliranje propagacije talasa upotrebom EMKE i ABAQUS/EXPLICIT

Eksperimentalno mereni uzorci su numerički simulirani korišćenjem eksplicitne metode konačnih elemenata u programskom paketu ABAQUS/EXPLICIT. Urađeni su 3D modeli za numeričku simulaciju propagacije talasa kod betonskih ploča upotrebom konačnih elemenata C3D8R (osmočvorni linearni konačni element sa redukovanom integracijom i „hourglass“ kontrolom). Ploče i oštećenja su geometrijski identično urađeni kao eksperimentalni uzorci. Korišćen je linearno elastični materijalni model sa Rejljevom prigušenjem, u cilju kompenzacije mikrostrukture betona. Na osnovu talasne jednačine, moguće je teorijski odrediti brzinu prostiranja longitudinalnih talasa (C_{Lthe}), na osnovu sledećeg izraza:

$$C_{Lt} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = 4365.56(m/s) \quad (120)$$

Tabela 12. Materijalni model betona sa Rejljevom koeficijentima prigušenja

Jungov modul elastičnosti (GPa)	Poasonov koeficijent	Zapreminska masa (kg/m ³)	Rejljevo prigušenje	
			α	β
44.3	0.10	2377.30	2058.23	1.105·10 ⁻⁸

Eksplicitni dinamički korak je definisan, sa linearnim i kvadratnim zapreminskim parametrima viskoziteta, u vremenskom trajanju $2 \cdot 10^{-3}(s)$. Stabilni vremenski inkrement je variran u zavisnosti



od primenjene mreže konačnih elemenata, tako da uvek bude manji od kritičnog vremenskog koraka, koji se može sračunati pomoću sledećeg izraza:

$$\Delta t_{crit} = \min\left(\frac{L_e}{C_L}\right) \quad (121)$$

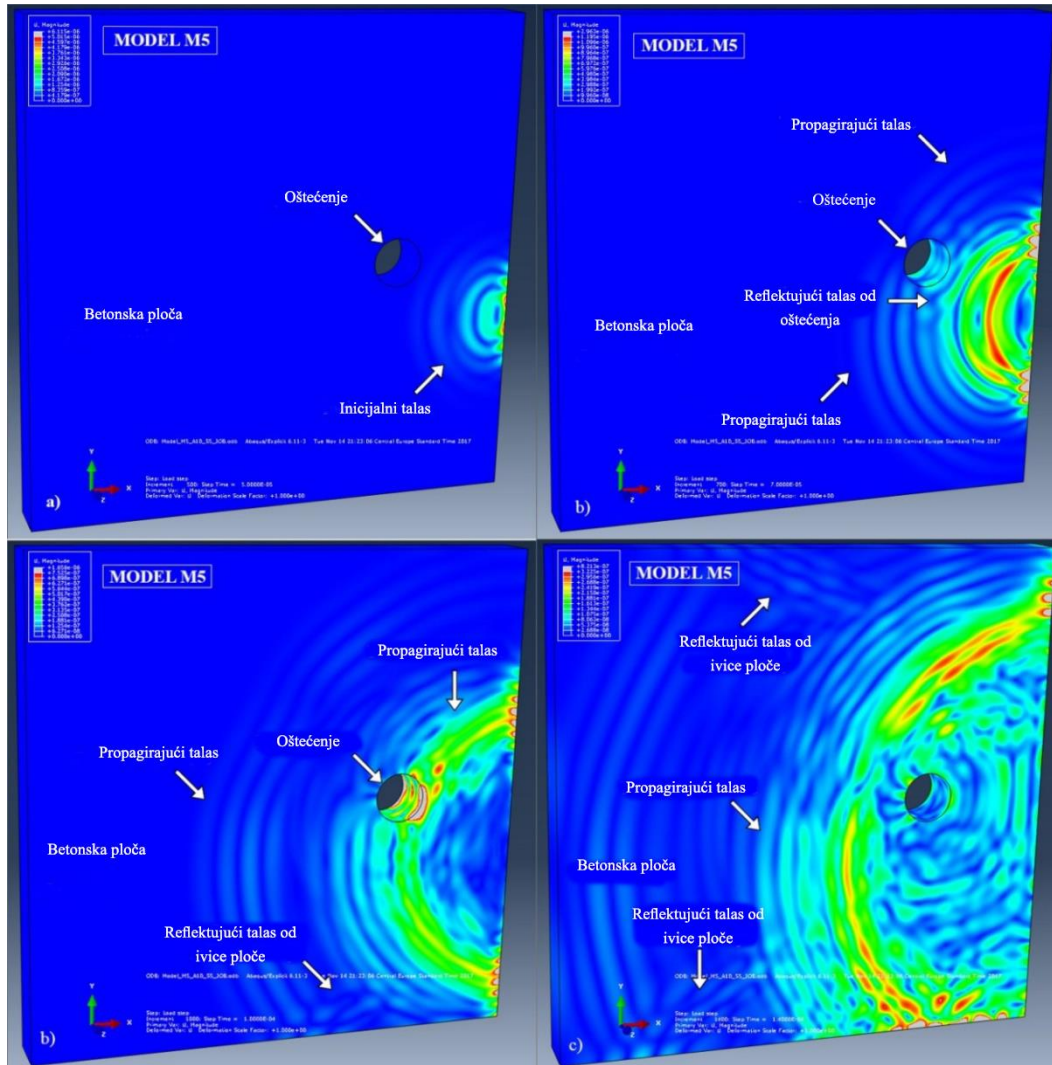
gde je L_e najmanja karakteristična dimenzija konačnog elementa, C_L je brzina longitudinalnog talasa.

Piezoelektrični aktuator S 24 HB je modeliran upotrebom graničnih uslova pomeranja na mestu kontakta između PZT pločice i okolnog betona. Polje pomeranja je definisano upravno na PZT pločicu na bočnim stranama betonske ploče na mestima gde se nalaze aktuatori, sa funkcijom promene intenziteta definisanom jednačinom (100). Izlazni signal u numeričkom modelu predstavlja izmereno pomeranje upravno na bočnu stranu betonske ploče na mestu senzora.

Tabela 13. Modeli za MKE konvergenciju veličine konačnog elementa

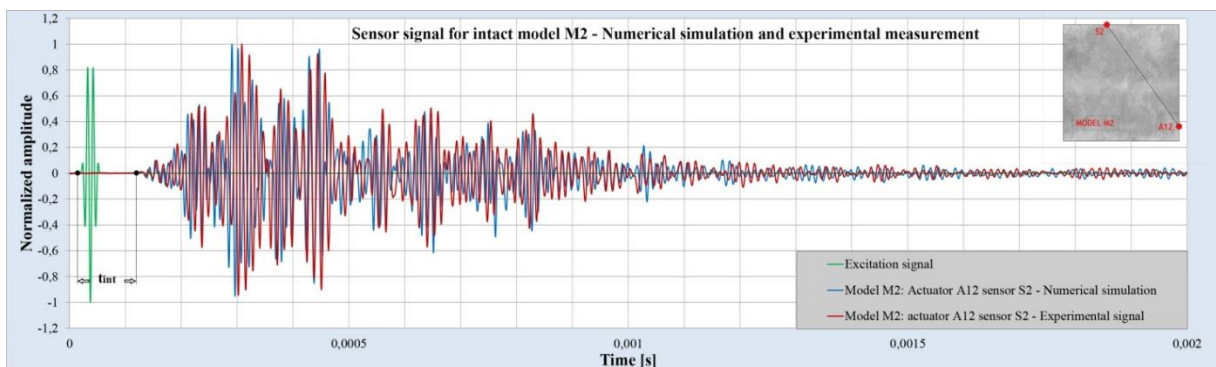
Broj KE/talas. duž.	7	10	12	14	18	20	24	28	30
Veličina KE (cm)	0.5	0.35	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.125	0.12
Broj KE	51200	150000	250000	400000	800000	1,3 mil	1,9 mil	3,25mil	4,0 mil

Mreža konačnih elemenata je kreirana upotrebom strukturalne kontrole omrežavanja. Oko otvora urađeno je omrežavanje sa posebnom pažnjom u cilju što manjeg odstupanja od projektovane veličine konačnog elementa. Pošto je propagacija talasa dinamički problem, validnost dobijenih rezultata uglavnom zavisi od dva parametra: veličina konačnog elementa i vremenski inkrement. Urađena su različita istraživanja na temu minimalnog broja konačnih elemenata po jednoj talasnoj dužini. Zaključci su različiti, zavise dosta od geometrije analiziranog problema (2D ili 3D modeli), razmatrani konačni element ili analizirana frekvencija. Broj KE po jednoj talasnoj dužini kreće se između 7 i 40. U ovom istraživanju urađena je analiza konvergencije u cilju implementacije optimalnog broja KE po jednoj talasnoj dužini. Broj KE variran je od 7 do 30, i njihove karakteristike su prikazane u Tabeli 6. Prva dva modela (sa 7 i 10 KE po jednoj talasnoj dužini) nisu zadovoljili na adekvatan način kvalitet izlaznih signala. Modeli sa 12, 14 i 18 KE po jednoj talasnoj dužini daju značajno bolje izlazne signale, ali u određenim delovima signala sa većim frekvencama dolazi do sečenja dela signala. Konvergencija u ovom istraživanju može se reći da je počela sa modelima sa 20 KE po jednoj talasnoj dužini. Zbog dodatne sigurnosti kao finalni model usvojen je model sa mrežom od 24 KE po jednoj talasnoj dužini.



Slika 56: Talasno polje za model M5 izazvano pomoću PZT aktuatora u različitim vremenskim trenucima: (a) $t = 5.0 \times 10^{-5} \text{ s}$; (b) $t = 7.0 \times 10^{-5} \text{ s}$; (c) $t = 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$; (d) $t = 1.4 \times 10^{-4} \text{ s}$

Za sve A/S kombinacije, 3D modeli su kreirani i izlazni signali su registrovani. Na osnovu Slike 57 može se zaključiti da je numerički model veoma dobar zbog visokog poklapanja izlaznih signala dobijenih numeričkim putem sa eksperimentalno merenim rezultatima.



Slika 57. Numerički i eksperimentalni izlazni signali senzora za model M2 pri položaju aktuatora A12 i senzora S2



4.4. Rezultati i diskusija

U ovom delu istraživanja prikazani su rezultati dobijeni na osnovu numeričkih simulacija i eksperimentalnih merenja, i primenom hibridnog algoritma za lokalizaciju oštećenja. Takođe, prikazani su i rezultati dvodimenzionalnog indeksa oštećenja koji služi kao kvantitativna vrednost oštećenosti betonskih pločastih konstrukcija.

Rezultati dvodimenzionalnog indeksa oštećenja i ukupnog indeksa oštećenja prikazani su za numerički analizirane modele M4 do M15. Modeli M4 do M9 su sa kružnim oštećenjem, a modeli M10-M15 su sa zarezima. Na Slici 58 prikazani su rezultati 2D DI i ukupnog indeksa oštećenja za model M4. Može se videti da najveće komponente 2D DI se nalaze u pod-domenima SD₂₂ i SD₂₃ i ove komponente ukazuju na položaj oštećenja. Obzirom da se realni položaj oštećenja nalazi u poddomenu SD₂₃ ali ne i u pod-domenu SD₂₂ to dovodi do zaključka da 2D DI prati dobro položaj oštećenja ali ima izvesno rasipanje rezultata. Ukupni indeks oštećenja za ovaj model iznosi 2.64%. 2D DI za isti model sa jednim kružnim oštećenjem ali sa 16 i 20 PZT A/S prikazan je na Slikama 59 i 60. Pod-domeni sa najvećim vrednostima komponenta 2D DI su na mestu stvarnog položaja oštećenja uz manje rasipanje rezultata na okolne pod-domene. Ukupni indeks oštećenja za model M5 iznosi 2.45% što je veoma slično modelu M4, dok za model M6 ovaj indeks oštećenja ima vrednost 1.89%. Na Slikama 61-63 prikazani su modeli sa dva kružna oštećenja. Kod ovih modela javljaju se nešto veća odstupanja najvećih komponenta 2D DI na okolne pod-domene, ali su dobijeni rezultati povoljni u smislu ocene položaja oštećenja na osnovu najvećih komponenta 2D DI. Ukupni indeks oštećenja koji služi za ocenu oštećenosti pločaste betonske konstrukcije za ove modele se kreće u sledećim vrednostima: model M7 (17.27%), model M8 (18.18%) i model M9 (12.35%). Obzirom da svi modeli imaju isto oštećenje i da je njihova razlika samo u broju i položaju PZT A/S, svi modeli trebali bi da imaju približno slične vrednosti ukupnog indeksa oštećenja. Međutim, prva dva modela M7 i M8 imaju slične vrednosti indeksa dok se za treći model javlja velika razlika. Ta razlika se može primetiti takođe i za model sa 20 PZT A/S kod modela sa jednim oštećenjem.

Na Slikama 64-66 prikazani su modeli sa jednim zarezom. Kod ovih modela javlja se idealna situacija, da je najveća komponenta 2D DI u pod-domenu gde se nalazi oštećenje, dok se kod drugih pod-domena ove vrednosti značajno smanjuju. Ukupni indeksi oštećenja ne odstupaju u velikoj meri i imaju sledeće vrednosti: model M10 (2,13%), model M11 (2,57%) i model M12 (2,79%). Na ovom modelu se može videti idealna situacija kako se 2D DI može koristiti za praćenje stanja



jednog pločastog betonskog elementa konstrukcije. Sa pojavom oštećenja u pod-domenu gde se javlja najveća vrednost dolazi do lociranja oštećenja i pomoću ukupnog indeksa oštećenja vrši se procena njegove veličine. Međutim, posmatrajući sledeće modele videće se da situacija nije uvek takva da je lako oceniti gde je položaj oštećenja na osnovu komponenata 2D DI. Modeli sa dva zareza prikazani su na Slikama 67-69. Model M13 prikazan je na Slici 67. Posmatrajući komponente 2D DI u pod-domenima SD_{13} , SD_{23} i SD_{12} koje imaju vrednost $M_{13}=0.357$, $M_{23}=0.183$, i $M_{12}=0.166$, dolazi do zaključka da se oštećenje nalazi u pod-domenu SD_{13} a da su pod-domeni SD_{23} i SD_{12} nešto manje oštećeni pod-domeni ili da je došlo do izvesnog rasipanja rezultata na okone pod-domene. Međutim, realno oštećenje je sasvim drugačije i nalazi se u pod-domenima SD_{23} i SD_{12} . Ova manjkavost 2D DI javila je se i kod modela M14 i M15. Kod modela M14 u pod-domenu SD_{14} javlja se najveća komponenta $M_{14}=0.416$, dok se oštećenje nalazi u pod-domenima SD_{12} i SD_{34} . Isto tako, kod modela M15 u pod-domenu SD_{15} javlja se najveća komponenta $M_{15}=0.489$, dok se oštećenje nalazi u pod-domenima SD_{13} i SD_{35} . Ovakvi rezultati su posledica dominantnih pravaca H_1 i V_4 kod modela M14 i H_1 i V_5 kod modela M15. Množenjem jednodimenzionalnih indeksa oštećenja za ove pravce dobija se najveća komponenta 2D DI u pod-domenu koji je neoštećen. Da bi se ovakvi rezultati izbegli potrebno je modifikovati računanje 2D DI. Jedan od načina modifikovanja mogao bi biti pomoću težinskih koeficijenata za svaki pod domen a koji bi bili u skladu sa dobijenim rezultatima 2D lokalizacije oštećenja na bazi hibridnog pristupa prikazanoj u ovom Poglavlju disertacije. Ova analiza biće jedan od budućih istraživanja.

Na Slici 70 prikazane su slike oštećenja dobijene na osnovu hibridnog pristupa za eksperimentalne uzorke SP1-SP3 i njima odgovarajuće numeričke modele M1-M3. Maksimalne osrednjene vrednosti DI prikazane su crvenom bojom na priloženim slikama, dok tamno plava boja označava njihove minimalne vrednosti. Maksimalne vrednosti DI ukazuju na položaj oštećenja. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da za uzorke/modele sa najmanjim brojem (12) PZT A/S položaj oštećenja je relativno dobro lokalizovan uz izvesna odstupanja od realnog oblika oštećenja. Sa povećanjem broja PZT A/S vidno se poboljšava oblik i veličina zone oštećenosti (crvena zona na slikama) u odnosu na veličinu i oblik realnog oštećenja. Tako da za uzorke/modele sa 16 ili 20 PZT A/S i jednim kružnim oštećenjem gotovo da nema nikakvih odstupanja između realnog oštećenja i onog dobijenog na osnovu hibridnog pristupa. Dalje, poređenjem dobijenih rezultata lokalizacije oštećenja na osnovu eksperimentalnog merenja i numeričkih simulacija može se videti da postoje beznačajne razlike, što ukazuje na dobro urađen numerički model. Takođe, kod numerički

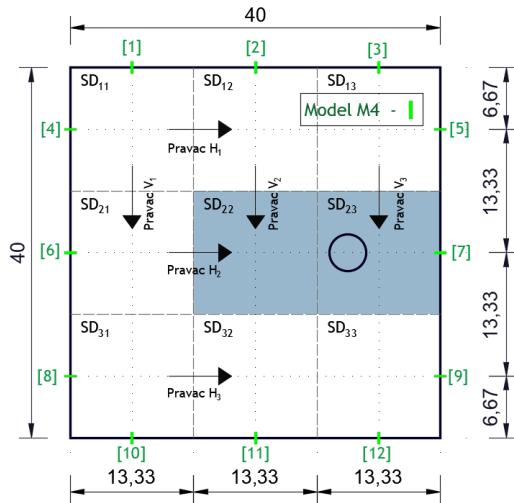


dobijenih rezultata dobija se neznatno bolja slika oštećenja što je najizraženije kod modela sa 20 PZT A/S.

Na Slici 71 prikazuju se uzorci/modeli (SP4-SP6 i M4-M6) sa dva kružna oštećenja i 12, 16 i 20 PZT A/S. Obzirom na kompleksniji problem lokalizacije oštećenja, može se videti da uzorci/modeli sa 12 PZT A/S imaju izvesna odstupanja u lokalizaciji oštećenja i da se javljaju značajna odstupanja od realnog oblika oštećenja, što dovodi do zaključka da za jako oštećene konstrukcije potreban je veći broj položaja PZT A/S kako bi se dobila preciznija slika o lokaciji i broju oštećenja. Za analizirane uzorke/modele već sa 16 PZT A/S dobija se zadovoljavajuća preciznost u lokaciji, veličini i obliku oštećenja. Sa 20 PZT A/S ne javlja se značajnija promena u slici oštećenja konstrukcije. Takođe, i kod ovih modela postoji veoma dobro poklapanje između numeričkih i eksperimentalnih rezultata. I u ovom slučaju numerički dobijeni rezultati su nešto precizniji u lokalizaciji i kvantifikaciji oštećenja u odnosu na eksperimentalne rezultate.

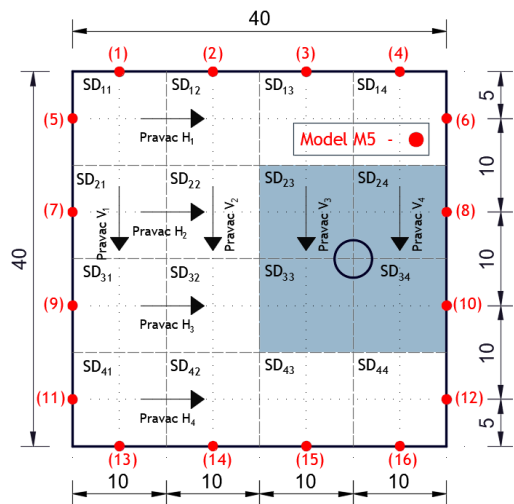
Na Slikama 72 i 73 prikazuju se uzorci/modeli sa jednim, odnosno dva zarezima. Uzorci SP7-SP9 i modeli M7 do M9 prikazani su na Slici 72. Na osnovu dobijenih slika može se videti da se na osnovu hibridnog pristupa zona oštećenosti betonske ploče (zona označena crvenom bojom) podudara se sa položajem oštećenja, međutim, njen oblik značajno odstupa od oblika zarezima. Odstupanje je veće kod uzoraka/modela sa 12 PZT A/S i smanjuje se kako se povećava broj PZT A/S. Na osnovu ovoga, može se zaključiti da je lokalizacija oštećenja uspešno urađena ali da određivanje oblike i veličine oštećenja nije na zadovoljavajućem nivou. Ovako dobijeni rezultati su posledica jednako raspodeljenih PZT A/S po obimu ploče što nije pogodno za određivanje oblika i veličine oštećenja oblika zarezima. Sa razmeštanjem položaja PZT A/S mogu se dobiti bolje slike oštećenosti u skladu sa realnim oštećenjem ali je cilj bio da sa konstantnim položajem PZT A/S testiramo hibridni pristup za različite oblike, položaje i brojeve oštećenja. Kod slika dobijenih numeričkim simulacijama nema velikih odstupanja u odnosu na slike dobijene eksperimentalnim merenjem, što ukazuje na dobar numerički model i za slučaj oštećenja oblika zarezima.

Na Slici 73 prikazani su rezultati dobijeni na osnovu merenja na eksperimentalnim uzorcima SP-13 do SP-15 i numeričkim modelima M-13 do M-15. Može se videti da su rezultati slični onim dobijenim na modelima sa jednim zarezom, ali da postoji značajno veće odstupanje i rasipanje rezultata. Takođe, kod ovog modela postoji i nešto veće odstupanje numeričkih i eksperimentalnih rezultata, pri čemu se na osnovu numeričkih rezultata značajno bolje lokalizuje oštećenje u odnosu na eksperimentalne.



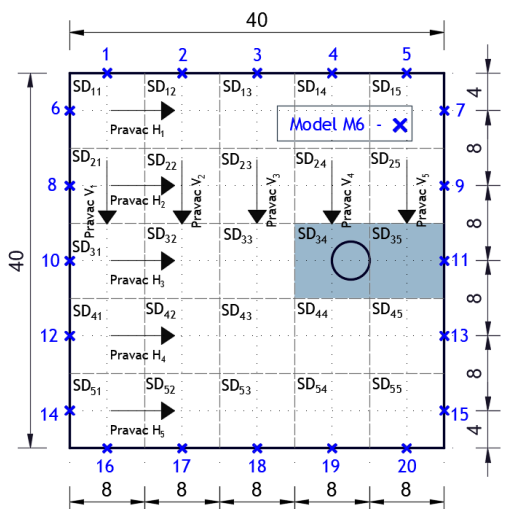
2D DI - Model M4		
M_{ij} [%]		
$M_{11}=2.18 \cdot 10^{-3}$	$M_{12}=0.016$	$M_{13}=0.019$
$M_{21}=9.38 \cdot 10^{-3}$	$M_{22}=0.069$	$M_{23}=0.084$
$M_{31}=2.25 \cdot 10^{-3}$	$M_{32}=0.016$	$M_{33}=0.020$
$A_{ij}=0.0177\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.111$		
$O_{DI}=2.64\%$		

Slika 58. 2D indeks oštećenja M_{ij} I ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M4



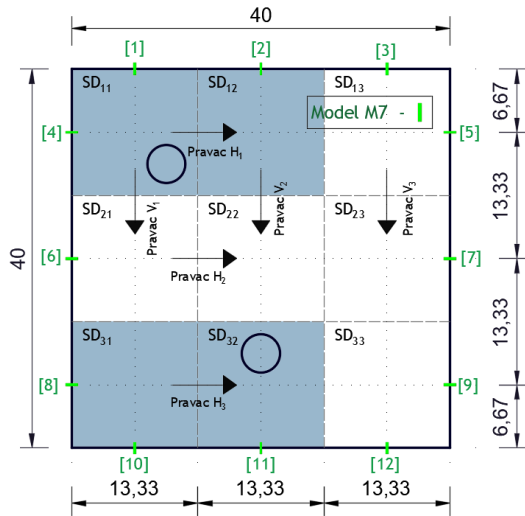
2D DI - Model M5			
M_{ij} [%]			
$M_{11}=0.43 \cdot 10^{-3}$	$M_{12}=2.71 \cdot 10^{-3}$	$M_{13}=9.32 \cdot 10^{-3}$	$M_{14}=0.011$
$M_{21}=3.31 \cdot 10^{-3}$	$M_{22}=0.021$	$M_{23}=0.0712$	$M_{24}=0.083$
$M_{31}=3.21 \cdot 10^{-3}$	$M_{32}=0.020$	$M_{33}=0.0694$	$M_{34}=0.080$
$M_{41}=0.47 \cdot 10^{-3}$	$M_{42}=2.93 \cdot 10^{-3}$	$M_{43}=0.010$	$M_{44}=0.012$
$A_{ij}=0.010\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.0625$			
$O_{DI}=2.45\%$			

Slika 59. 2D indeks oštećenja M_{ij} I ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M5



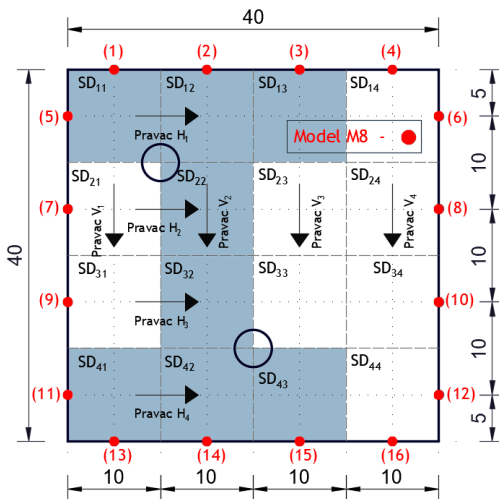
2D DI - Model M6				
M_{ij} [%]				
$M_{11}=0.53 \cdot 10^{-3}$	$M_{12}=2.76 \cdot 10^{-3}$	$M_{13}=4.55 \cdot 10^{-3}$	$M_{14}=0.016$	$M_{15}=0.011$
$M_{21}=1.06 \cdot 10^{-3}$	$M_{22}=5.51 \cdot 10^{-3}$	$M_{23}=9.01 \cdot 10^{-3}$	$M_{24}=0.033$	$M_{25}=0.022$
$M_{31}=3.89 \cdot 10^{-3}$	$M_{32}=0.020$	$M_{33}=0.0331$	$M_{34}=0.121$	$M_{35}=0.081$
$M_{41}=1.02 \cdot 10^{-3}$	$M_{42}=5.04 \cdot 10^{-3}$	$M_{43}=8.67 \cdot 10^{-3}$	$M_{44}=0.032$	$M_{45}=0.021$
$M_{51}=0.63 \cdot 10^{-3}$	$M_{52}=3.27 \cdot 10^{-3}$	$M_{53}=5.36 \cdot 10^{-3}$	$M_{54}=0.019$	$M_{55}=0.013$
$A_{ij}=0.0064\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.040$				
$O_{DI}=1.89\%$				

Slika 60. 2D indeks oštećenja M_{ij} I ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M6



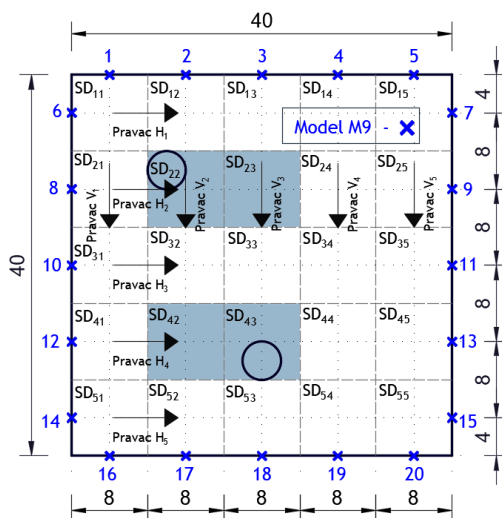
2D DI - Model M7		
M_{ij} [%]		
$M_{11}=0.255$	$M_{12}=0.317$	$M_{13}=0.077$
$M_{21}=0.071$	$M_{22}=0.088$	$M_{23}=0.021$
$M_{31}=0.286$	$M_{32}=0.355$	$M_{33}=0.086$
$A_{ij}=0.0177\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.111$		
$O_{DI}=17.27\%$		

Slika 61. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M7



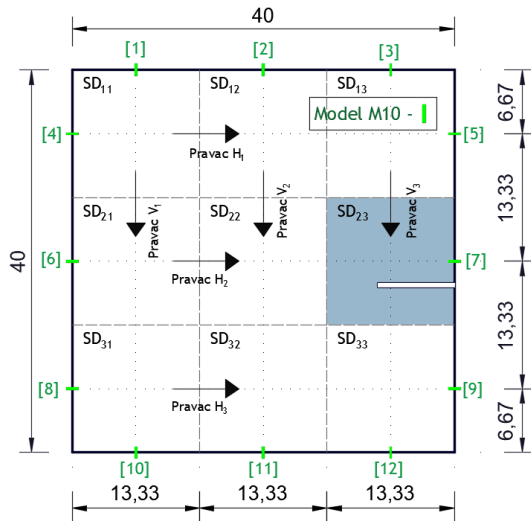
2D DI - Model M8			
M_{ij} [%]			
$M_{11}=0.242$	$M_{12}=0.306$	$M_{13}=0.215$	$M_{14}=0.067$
$M_{21}=0.174$	$M_{22}=0.221$	$M_{23}=0.155$	$M_{24}=0.048$
$M_{31}=0.182$	$M_{32}=0.231$	$M_{33}=0.162$	$M_{34}=0.050$
$M_{41}=0.249$	$M_{42}=0.316$	$M_{43}=0.222$	$M_{44}=0.069$
$A_{ij}=0.010\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.0625$			
$O_{DI}=18.18\%$			

Slika 62. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M8



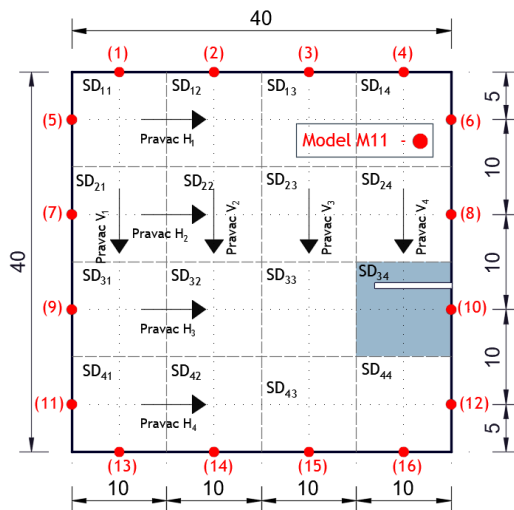
2D DI - Model M9				
M_{ij} [%]				
$M_{11}=0.067$	$M_{12}=0.119$	$M_{13}=0.166$	$M_{14}=0.054$	$M_{15}=0.024$
$M_{21}=0.174$	$M_{22}=0.310$	$M_{23}=0.434$	$M_{24}=0.142$	$M_{25}=0.064$
$M_{31}=0.040$	$M_{32}=0.077$	$M_{33}=0.108$	$M_{34}=0.035$	$M_{35}=0.016$
$M_{41}=0.133$	$M_{42}=0.237$	$M_{43}=0.331$	$M_{44}=0.109$	$M_{45}=0.048$
$M_{51}=0.060$	$M_{52}=0.111$	$M_{53}=0.154$	$M_{54}=0.051$	$M_{55}=0.023$
$A_{ij}=0.0064\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.040$				
$O_{DI}=12.35\%$				

Slika 63. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M9



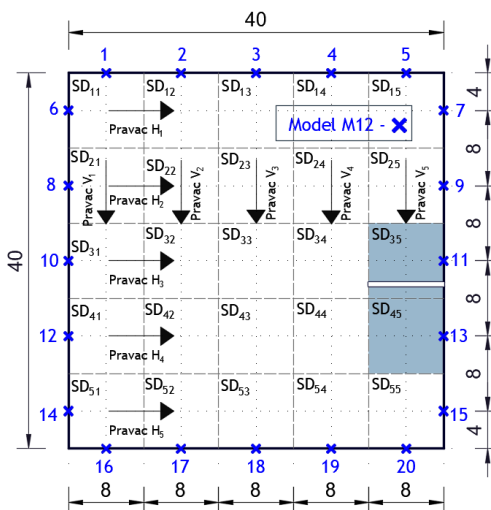
2D DI - Model M10			
$M_{ij}[\%]$			
$M_{11}=1.04 \cdot 10^{-3}$	$M_{12}=5.20 \cdot 10^{-3}$	$M_{13}=0.024$	
$M_{21}=4.20 \cdot 10^{-3}$	$M_{22}=0.021$	$M_{23}=0.095$	
$M_{31}=1.48 \cdot 10^{-3}$	$M_{32}=7.40 \cdot 10^{-3}$	$M_{33}=0.033$	
$A_{ij}=0.0177\text{m}^2; \Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2; \alpha_{ij}=0.111$			
$O_{DI}=2.13\%$			

Slika 64. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M10



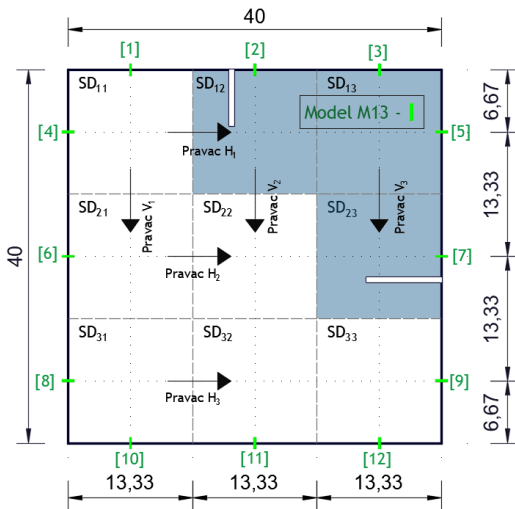
2D DI - Model M11			
$M_{ij}[\%]$			
$M_{11}=0.75 \cdot 10^{-3}$	$M_{12}=2.65 \cdot 10^{-3}$	$M_{13}=0.010$	$M_{14}=0.023$
$M_{21}=2.77 \cdot 10^{-3}$	$M_{22}=9.81 \cdot 10^{-3}$	$M_{23}=0.037$	$M_{24}=0.085$
$M_{31}=3.45 \cdot 10^{-3}$	$M_{32}=0.012$	$M_{33}=0.046$	$M_{34}=0.106$
$M_{41}=1.50 \cdot 10^{-3}$	$M_{42}=5.30 \cdot 10^{-3}$	$M_{43}=0.002$	$M_{44}=0.046$
$A_{ij}=0.010\text{m}^2; \Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2; \alpha_{ij}=0.0625$			
$O_{DI}=2.57\%$			

Slika 65. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M11



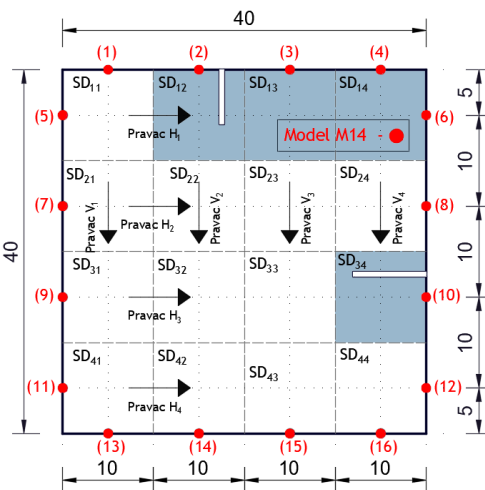
2D DI - Model M12				
$M_{ij}[\%]$				
$M_{11}=1.09 \cdot 10^{-3}$	$M_{12}=3.40 \cdot 10^{-3}$	$M_{13}=4.59 \cdot 10^{-3}$	$M_{14}=8.61 \cdot 10^{-3}$	$M_{15}=0.016$
$M_{21}=4.86 \cdot 10^{-3}$	$M_{22}=1.52 \cdot 10^{-3}$	$M_{23}=0.038$	$M_{24}=0.038$	$M_{25}=0.073$
$M_{31}=8.58 \cdot 10^{-3}$	$M_{32}=0.027$	$M_{33}=0.067$	$M_{34}=0.068$	$M_{35}=0.129$
$M_{41}=7.07 \cdot 10^{-3}$	$M_{42}=0.022$	$M_{43}=0.057$	$M_{44}=0.056$	$M_{45}=0.106$
$M_{51}=1.24 \cdot 10^{-3}$	$M_{52}=3.86 \cdot 10^{-3}$	$M_{53}=9.72 \cdot 10^{-3}$	$M_{54}=9.72 \cdot 10^{-3}$	$M_{55}=0.019$
$A_{ij}=0.0064\text{m}^2; \Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2; \alpha_{ij}=0.040$				
$O_{DI}=2.79\%$				

Slika 66. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M12



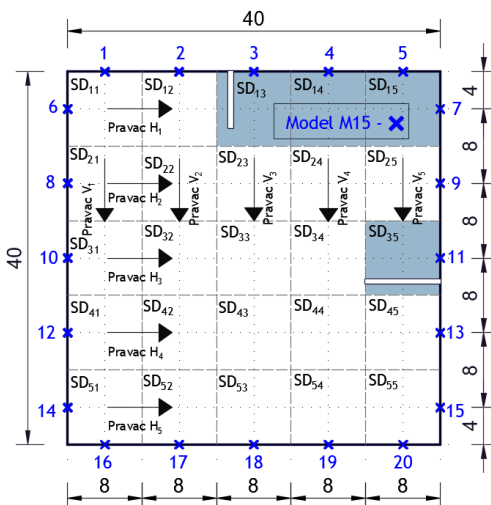
2D DI - Model M13		
$M_{ij}[\%]$		
$M_{11}=0.061$	$M_{12}=0.166$	$M_{13}=0.357$
$M_{21}=0.031$	$M_{22}=0.085$	$M_{23}=0.183$
$M_{31}=0.017$	$M_{32}=0.046$	$M_{33}=0.099$
$A_{ij}=0.0177\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.111$		
$O_{DI}=11.59\%$		

Slika 67. 2D indeks oštećenja M_{ij} I ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M13



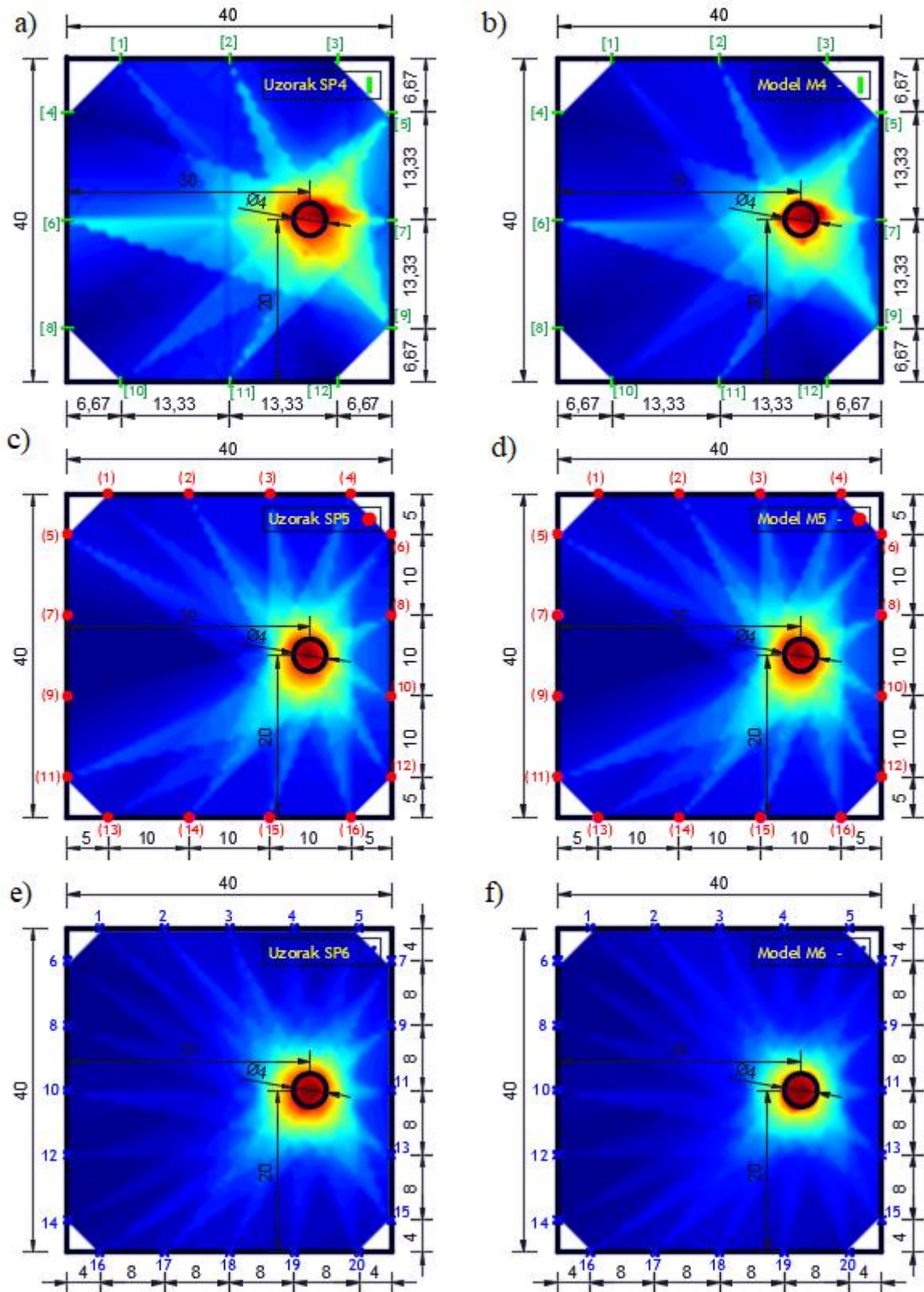
2D DI - Model M14			
$M_{ij}[\%]$			
$M_{11}=0.057$	$M_{12}=0.158$	$M_{13}=0.205$	$M_{14}=0.416$
$M_{21}=0.016$	$M_{22}=0.043$	$M_{23}=0.056$	$M_{24}=0.114$
$M_{31}=0.039$	$M_{32}=0.109$	$M_{33}=0.141$	$M_{34}=0.286$
$M_{41}=0.014$	$M_{42}=0.040$	$M_{43}=0.050$	$M_{44}=0.105$
$A_{ij}=0.010\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.0625$			
$O_{DI}=11.56\%$			

Slika 68. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M14

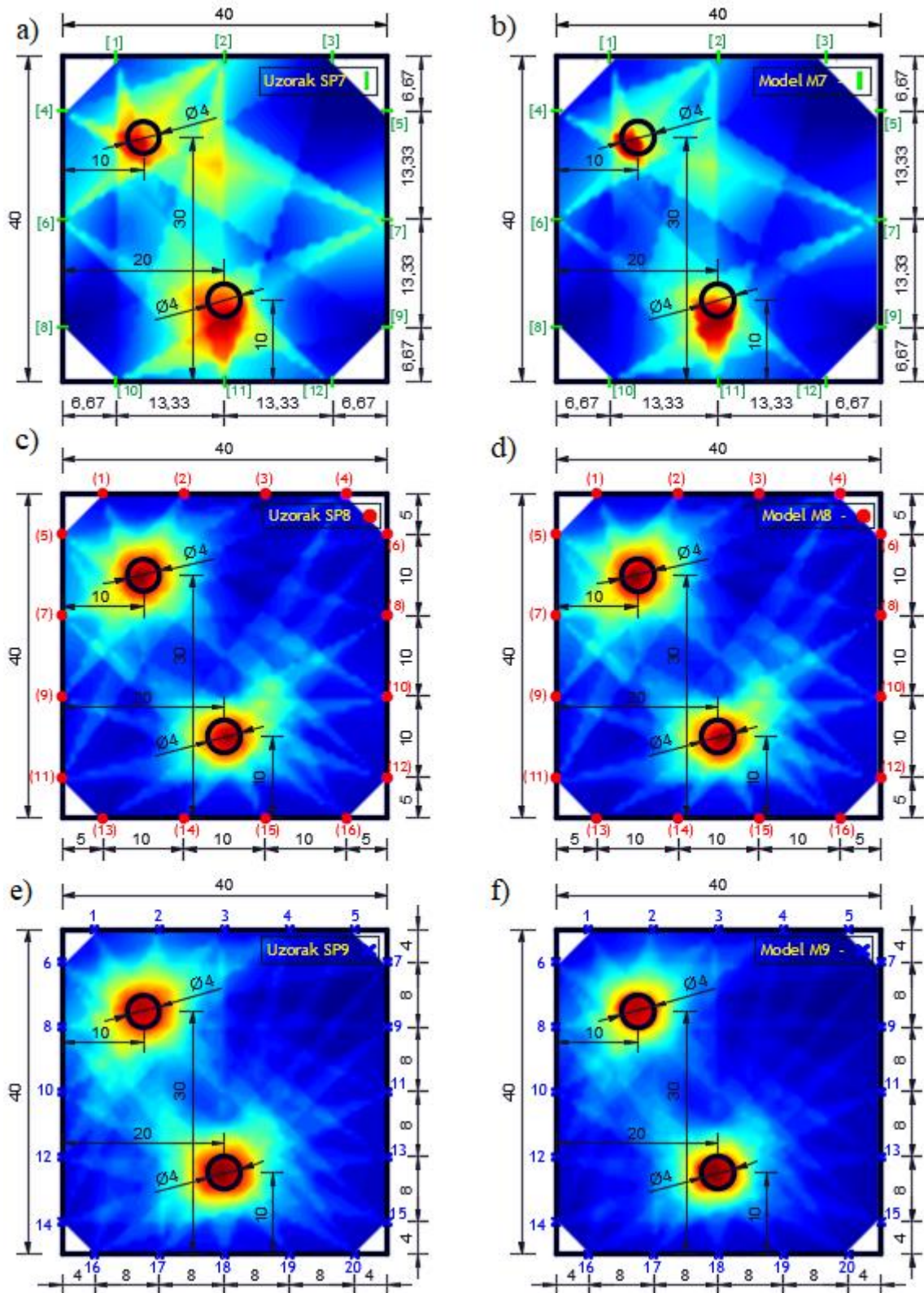


2D DI - Model M15				
$M_{ij}[\%]$				
$M_{11}=0.031$	$M_{12}=0.099$	$M_{13}=0.223$	$M_{14}=0.235$	$M_{15}=0.489$
$M_{21}=8.60 \cdot 10^{-3}$	$M_{22}=0.027$	$M_{23}=0.061$	$M_{24}=0.064$	$M_{25}=0.133$
$M_{31}=0.017$	$M_{32}=0.054$	$M_{33}=0.120$	$M_{34}=0.127$	$M_{35}=0.265$
$M_{41}=9.30 \cdot 10^{-3}$	$M_{42}=0.029$	$M_{43}=0.066$	$M_{44}=0.069$	$M_{45}=0.144$
$M_{51}=5.10 \cdot 10^{-3}$	$M_{52}=0.016$	$M_{53}=0.036$	$M_{54}=0.038$	$M_{55}=0.079$
$A_{ij}=0.0064\text{m}^2$; $\Sigma A_{ij}=0.16\text{m}^2$; $\alpha_{ij}=0.040$				
$O_{DI}=9.78\%$				

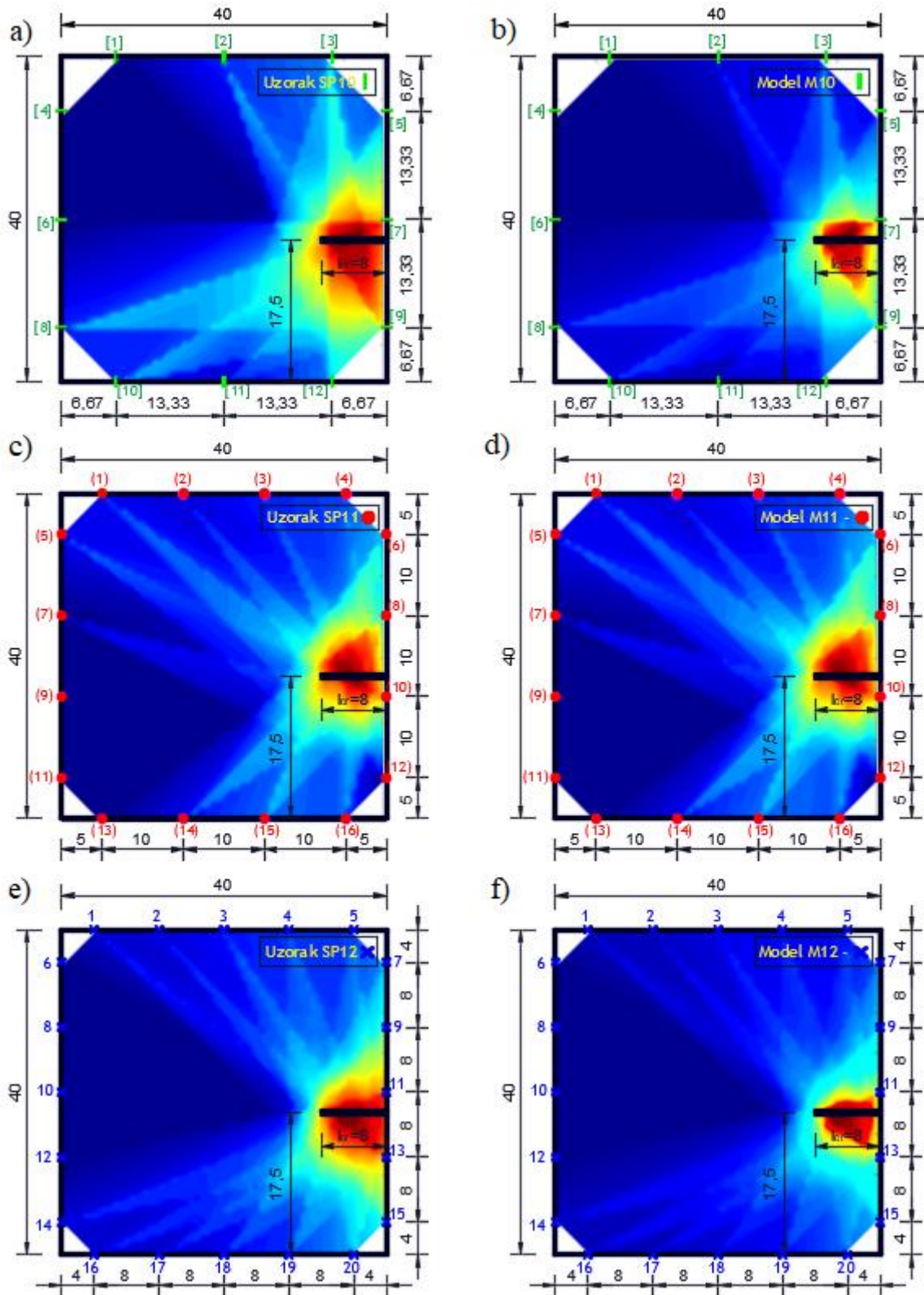
Slika 69. 2D indeks oštećenja M_{ij} i ukupni indeks oštećenja O_{DI} za model M15



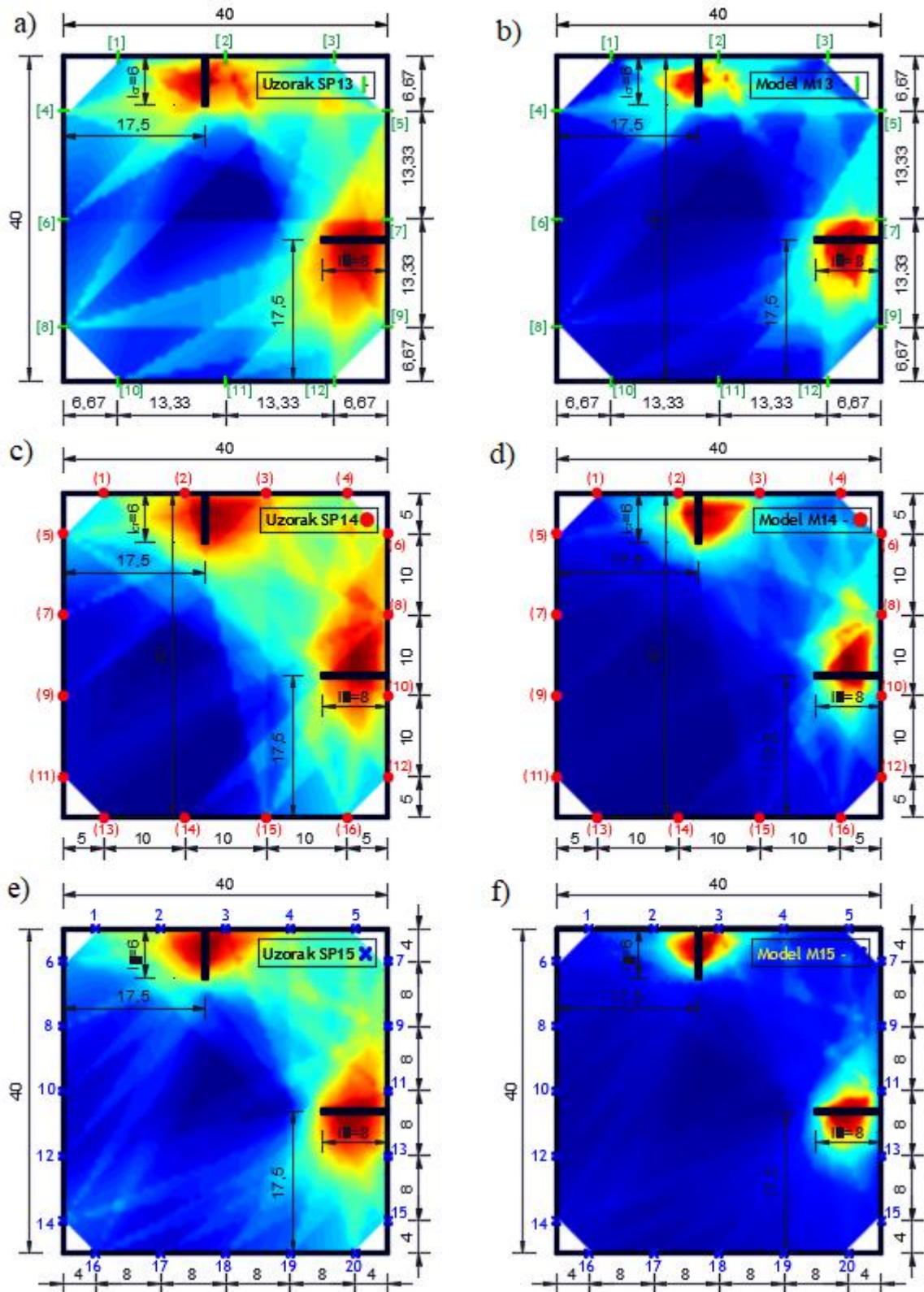
Slika 70. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP4; (b) Model M4; (c) Uzorak SP5; (d) Model M5; (e) Uzorak SP6; (f) Model M6



Slika 71. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP7; (b) Model M7; (c) Uzorak SP8; (d) Model M8; (e) Uzorak SP9; (f) Model M9



Slika 72. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP10; (b) Model M10; (c) Uzorak SP11; (d) Model M11; (e) Uzorak SP12; (f) Model M12



Slika 73. Lokalizacija oštećenja primenom hibridnog pristupa: (a) Uzorak SP13; (b) Model M13; (c) Uzorak SP14; (d) Model M14; (e) Uzorak SP15; (f) Model M15



4.5. Primena hibridnog pristupa za lokalizaciju materijalnih defekata

U ovom delu istraživanja biće testiran hibridni pristup za lokalizaciju oštećenja na betonskim pločama sa materijalnim defektima u vidu rupa ispunjenih gipsom i glinom. Hibridni pristup testiran je eksperimentalno i numerički. Eksperiment je urađen istom mernom opremom i procedurom kao i za betonske ploče sa oštećenjima, dok je numerička simulacija, takođe, na isti način sprovedena kao i u prethodnom Poglavlju. Na dalje, biće ukratko prikazana procedura eksperimentalnog merenja i numeričke simulacije testiranja hibridnog pristupa za lokalizaciju materijalnih defekata u betonskim pločama. U Tabeli 7 prikazan je opis eksperimentalnih uzoraka.

4.5.1. Eksperimentalna i numerička analiza lokalizacije materijalnih defekata

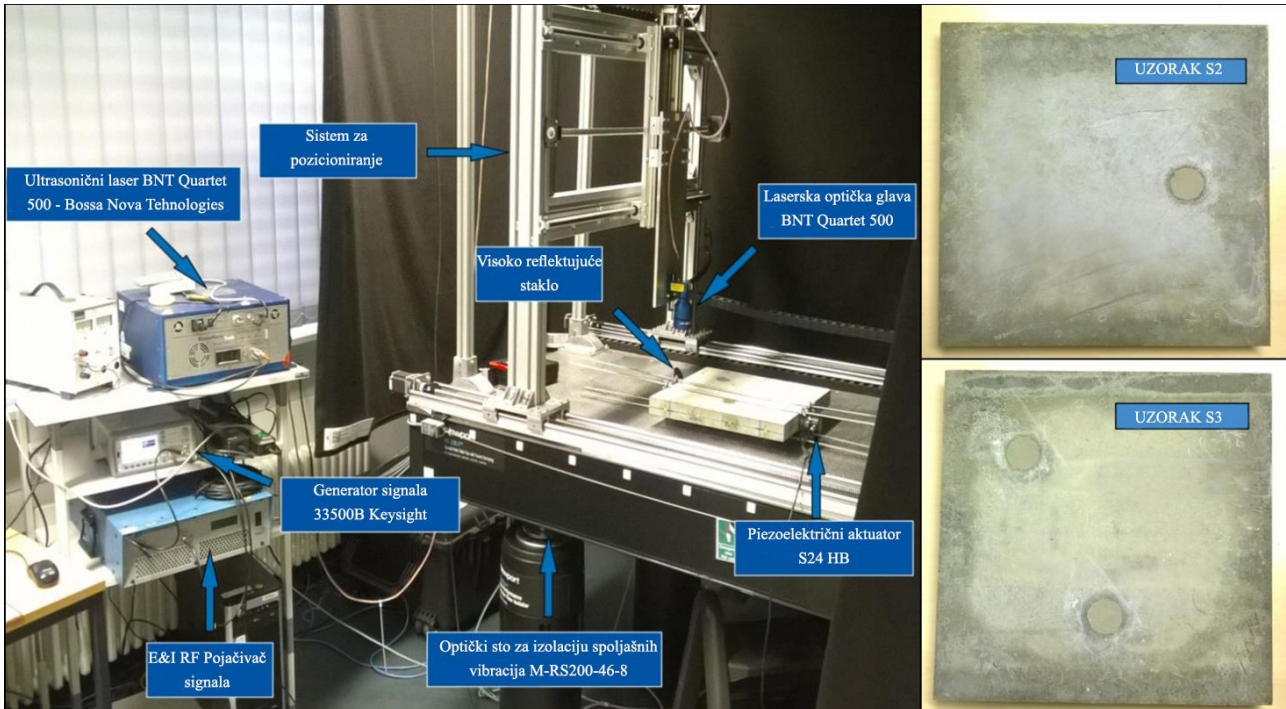
Eksperimentalna verifikacija urađena je na modifikovanim betonskim pločama korišćenim u prethodnom Poglavlju. Uzorci sa rupama su ispunjeni prvo glinom a zatim i gipsom. Merenja su urađena na sledećim uzorcima: (a) na neoštećenoj ploči sa 16 PZT A/S; (b) na ploči sa jednim kružnim oštećenjem popunjenim glinom i gipsom sa 16 PZT A/S; (c) na betonskoj ploči sa dva kružna oštećenja popunjena sa glinom i gipsom sa 16 PZT A/S, što ukupno čini 5 eksperimentalno analiziranih uzoraka. Betonski uzorci imaju iste materijalne karakteristike prikazane u prethodnom Poglavlju, dok je izmerena zapreminska težina gipsa 1210.0kg/m^3 i gline 1855.0kg/m^3 .

Tabela 14. Opis eksperimentalnih uzoraka i numeričkih modela

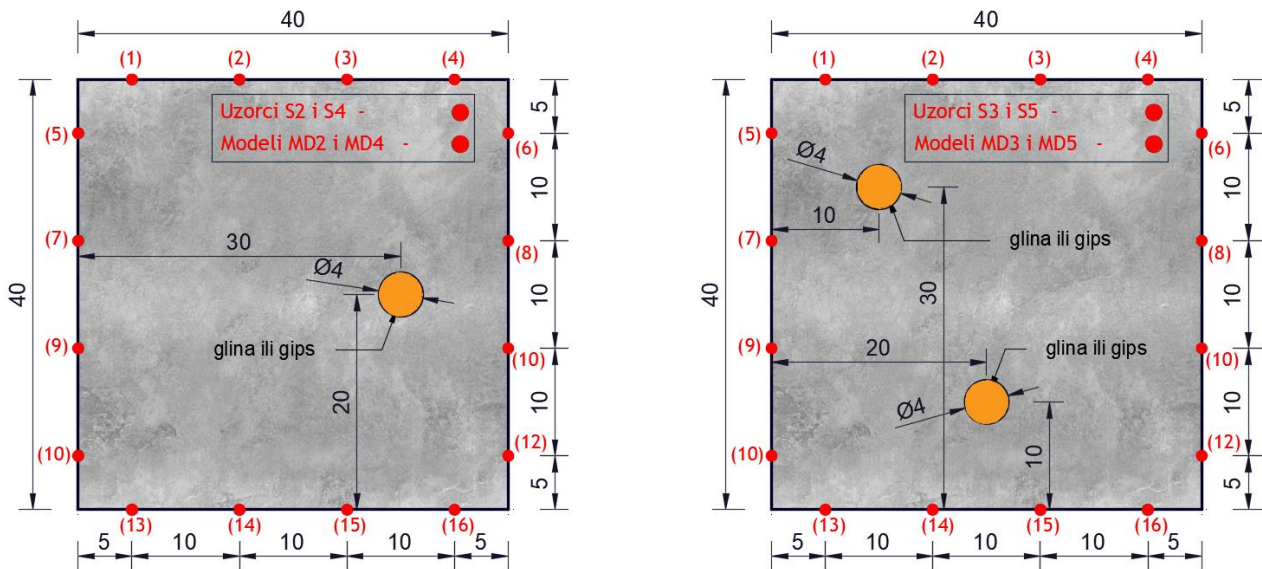
Naziv uzoraka/modela	Opis defekta
S1 / MD1	Neoštećeni uzorak / model
S2 / MD2	Uzorak / model sa jednom ispunom gline $\phi 4\text{cm}$
S3 / MD3	Uzorak / model sa dve ispune gline $\phi 4\text{cm}$
S4 / MD4	Uzorak / model sa jednom ispunom gipsa $\phi 4\text{cm}$
S5 / MD5	Uzorak / model sa dve ispune gipsa $\phi 4\text{cm}$

Na Slici 74 levo prikazana je eksperimentalna postavka za PZT-Laser sistem testiranja tokom merenja uzorka S3. Dok su na Slici 74 desno prikazani uzorci S2 (betonska ploča sa jednim kružnim oštećenjem popunjenim glinom) i S3 (betonska ploča sa dva kružna oštećenja popunjena glinom).

Numerička simulacija propagacije talasa urađena je korišćenjem EFEM u programskom paketu ABAQUS/EXPLICIT. Kreiran je eksplicitni dinamički model sa linearnim i kvadratnim zapremskim parametrima viskoziteta, sa trajanjem simulacije od $2 \cdot 10^{-3}(s)$ i stabilnim vremenom od $1 \cdot 10^{-7}(s)$. Na Slici 75 prikazana je geometrija numeričkih modela sa položajem materijalnih defekata i položajem PZT A/S.

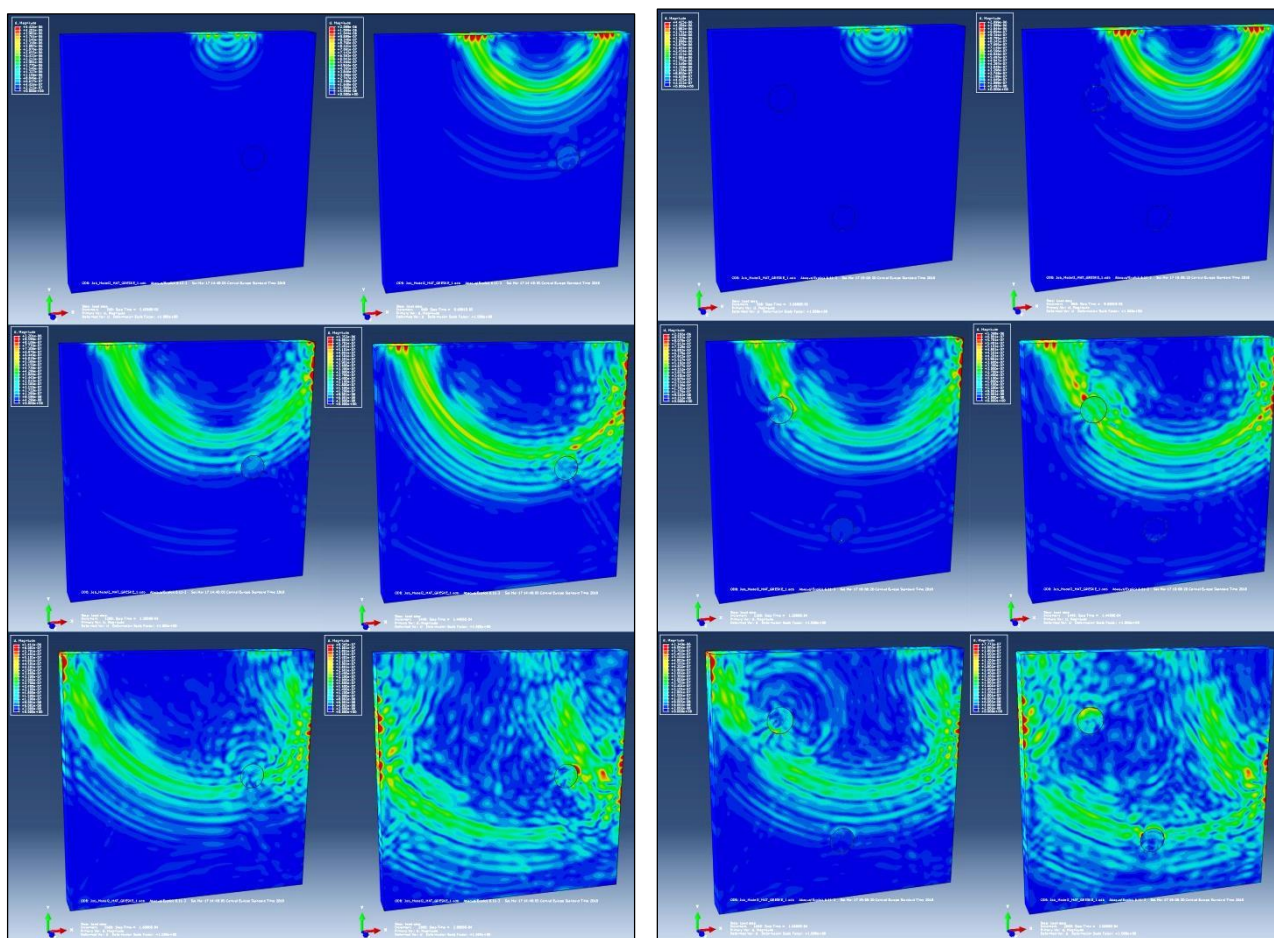


Slika 74. Eksperimentalna postavka za hibridni PZT-Laser system skeniranja za modele sa materijalnim nepravilnostima: levo – Eksperimentalna oprema, desno: Uzorci S2 i S3 sa ispunom od gline



Slika 75. Geometrija uzoraka / modela: Levo - uzorci SP2 i SP4 i modeli M2 i M4; Desno - uzorci SP3 i SP5 i modeli M3 i M5

Na Slici 76 prikazane su slike propagacije talasa kod modela MD2 i MD3. Na oba modela jasno se može uočiti odbijanje talasa od materijalnih defekata što utiče na smanjenje energije dolaznih talasa u PZT sensorima. Za sve 3D modele i kombinacije PZT A/S od značaja očitani su izlazni signali dobijeni numeričkom simulacijom. Signali su dalje analizirani brзом diskretnom veјvlet transformacijom i sračunati su jednodimenzionalni indeksi oštećenja. Sa dobijenim DI za pravce PZT A/S koji prolaze kroz materijalne defekte primenjena je procedura hibridnog pristupa za 2D lokalizaciju oštećenja.

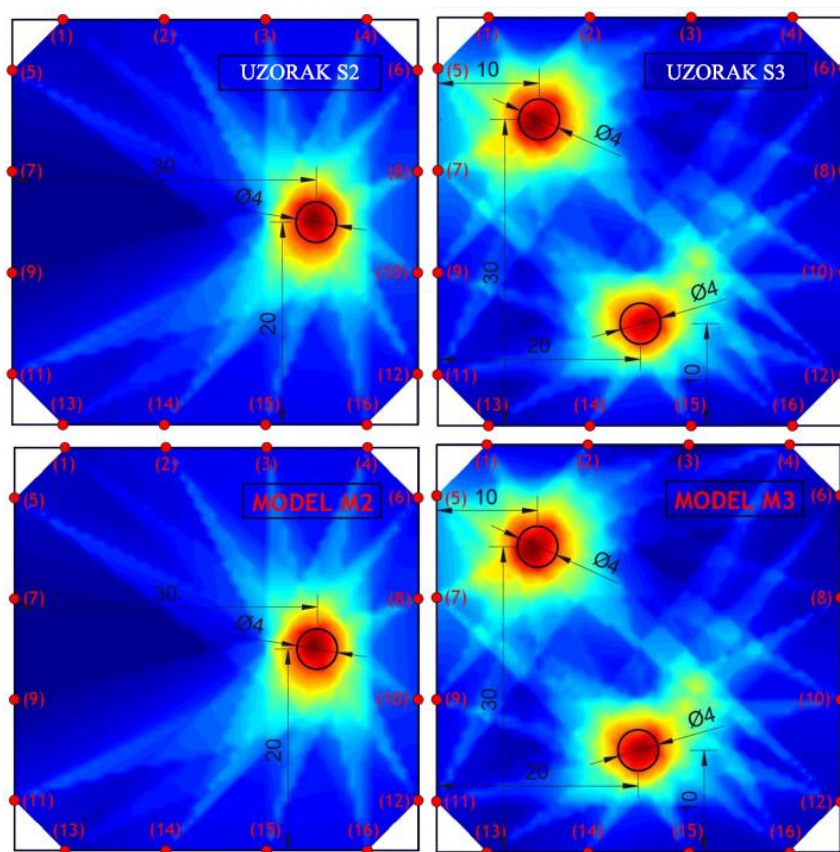


*Slika 76. Talasno polje izazvano pomoću PZT aktuatora A3 u različitim vremenskim trenucima:
Levo – Model M2; Desno – Model M3*

4.5.2. Rezultati i diskusija

Slike oštećenih modela sa materijalnim greškama dobijenih na osnovu hibridnog pristupa prikazani su na Slikama 77 i 78. Slika 77 prikazuje dobijene rezultate izmerene eksperimentalnim putem i dobijenih numeričkim simulacijama na uzorcima (S2 i S3) i modelima (MD2 i MD3) sa glinom sa jednim i dva kružna materijalna defekta. Na osnovu dobijenih slika prvo se može zaključiti da je poklapanje realnog oblika i položaja oštećenja sa dobijenim položajem oštećenja na osnovu hibridnog pristupa jako velik, tako da je lokalizovanje oštećenja veoma uspešno urađeno na ovim

modelima. Drugo, postoji visok nivo poklapanja rezultata dobijenih eksperimentalnim i numeričkim putem, što govori o dobrom numeričkom pristupu. Slike gotovo da su bez ikakvih razlika ili se one ne mogu uočiti golim okom. Rezultati jednodimenzionalnih indeksa oštećenja za izmerene A/S pravce u određenoj meri odstupaju između eksperimenta i numerike, ali je njihov odnos za ove modele bio takav da je ukupna slika gotovo identična.

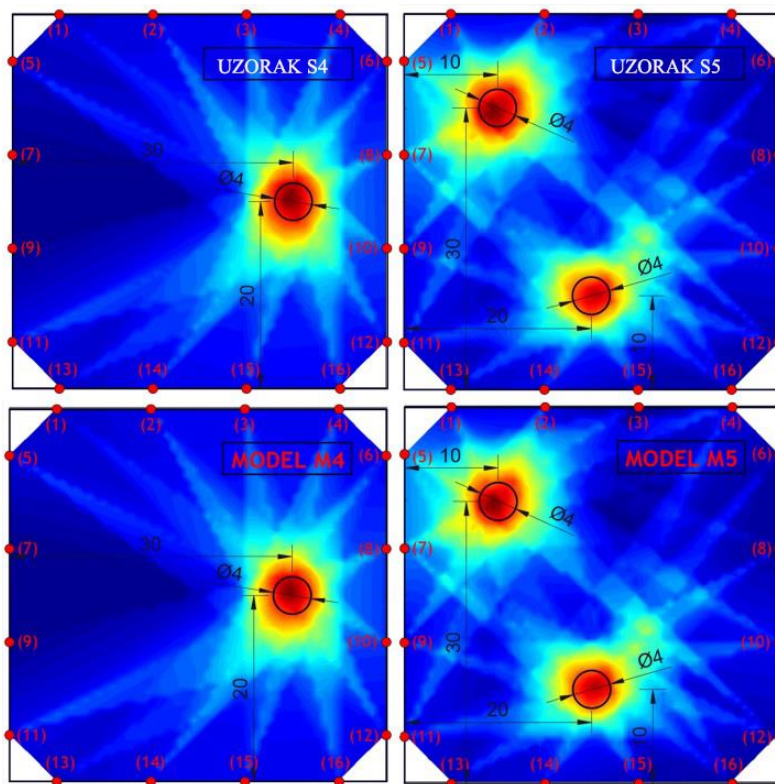


Slika 77. Lokalizacija oštećenja pomoću hibridnog pristupa za uzorke S2 i S3 i modele M2 i M3; (dužine su u cm)

Na Slici 78 prikazani su uzorci i modeli sa gipsanim defektima. Takođe, kao i za prethodni model lokalizacija i kvantifikacija oštećenja je urađena uspešno. I kod ovog modela postoji veoma dobro poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata.

Konačno, može se zaključiti da hibridni pristup može da se koristi za lokalizaciju materijalnih defekata. Treba imati u vidu, da hibridni pristup za kružna oštećenja (neispunjene rupe) analiziranih u prethodnom Poglavlju takođe je imao veoma dobro poklapanje realnog oblika i položaja oštećenja sa onim dobijenim hibridnim pristupom. Tako da treba očekivati da ako bi materijalni defect imao nešto drugačiji oblik, sličnije prslini da hibridni pristup sa ovom šemom položaja A/S ne bi imao tako dobro poklapanje oblika oštećenja. Međutim, imajući u vidu da je hibridni metod prevashodno

namenjen određivanju lokacije oštećenja a ne njegovog oblika, za sve do sada analizirane slučajeve broja, položaja i oblika oštećenja, uspešno je određen položaj oštećenja.

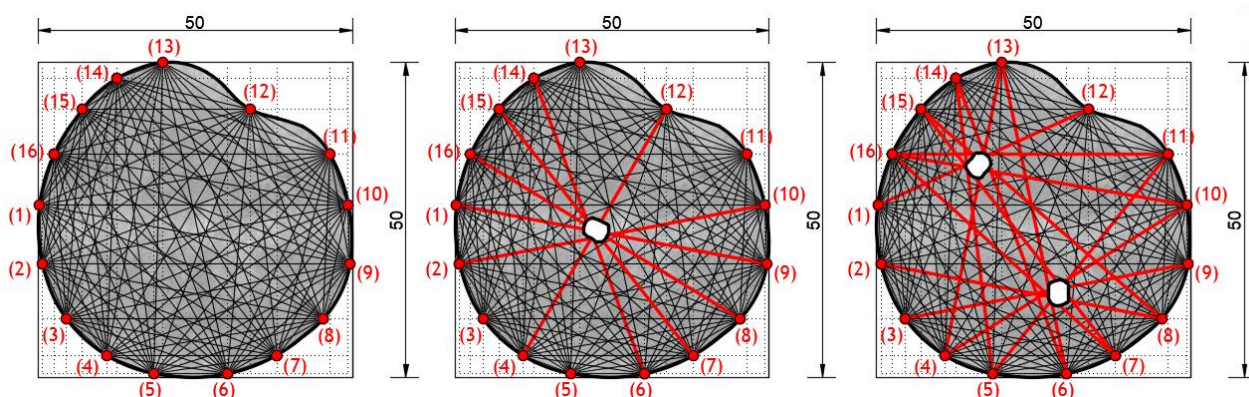


Slika 78. Lokalizacija oštećenja pomoću hibridnog pristupa za uzorke S4 i S5 i modele M4 i M5; (dužine su u cm)

4.6. Lokalizacija oštećenja kod pločastih betonskih elemenata proizvoljnog oblika

Prikazani hibridni pristup za lokalizaciju oštećenja kod pločastih betonskih elemenata biće analiziran za ravne betonske pločaste elemente proizvoljnog oblika. Verifikacija pristupa na ovako definisanim betonskim elementima konstrukcije uradiće se numeričkim putem. Numerička simulacija propagacije talasa urađena je na isti način kao kod kvadratnih betonskih ploča za koje je urađena i eksperimentalna verifikacija. Specifičnost modeliranja proizvoljnog oblika sprovedena je korišćenjem CAD tehnologije.

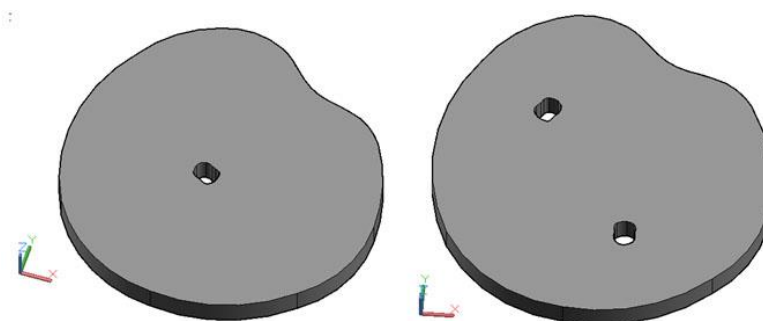
Analizirani su modeli bez oštećenja, sa jednim i sa dva oštećenja čiji oblik je prikazan na Slici 79. Lokalizacija oštećenja urađena je pomoću 16 PZT aktuatora/senzora. Položaj PZT A/S definisan je proizvoljno, ali je pri postavljanju A/S vođeno računa da njihov međusobni razmak je približno jednak. Tačan položaj svakog PZT A/S u odnosu na lokalni koordinatni system X-Y dat je u Tabeli 15. Model bez oštećenja sa 16 PZT A/S nazvan je MAR1. Model sa jednim oštećenjem i sa 16 PZT A/S nazvan je MAR2, dok model sa dva oštećenja 16 PZT A/S, nazvan je MAR3.



Slika 79: Geometrija modela i položaj PZT A/S: levo – Model MAR1, sredina – Model MAR2, desno – Model MAR3

Tabela 15. XY koordinate PZT aktuatora/senzora

Broj PZT aktuatora/senzora za modele sa nepravilnim oblikom																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Modeli sa 16 PZT aktuatora/senzora – XY koordinate																
X	0.21	0.69	4.53	10.89	18.47	30.16	37.96	45.37	49.59	49.34	46.4	33.7	19.87	12.56	7.03	2.49
Y	27.36	18.04	9.34	3.52	0.58	0.58	3.52	9.34	18.04	27.36	35.46	42.01	50.0	47.47	42.61	35.46



Slika 80: 3D modeli pripremljeni u CAD softveru: levo – model sa 1 oštećenjem, desno – model sa dva oštećenja

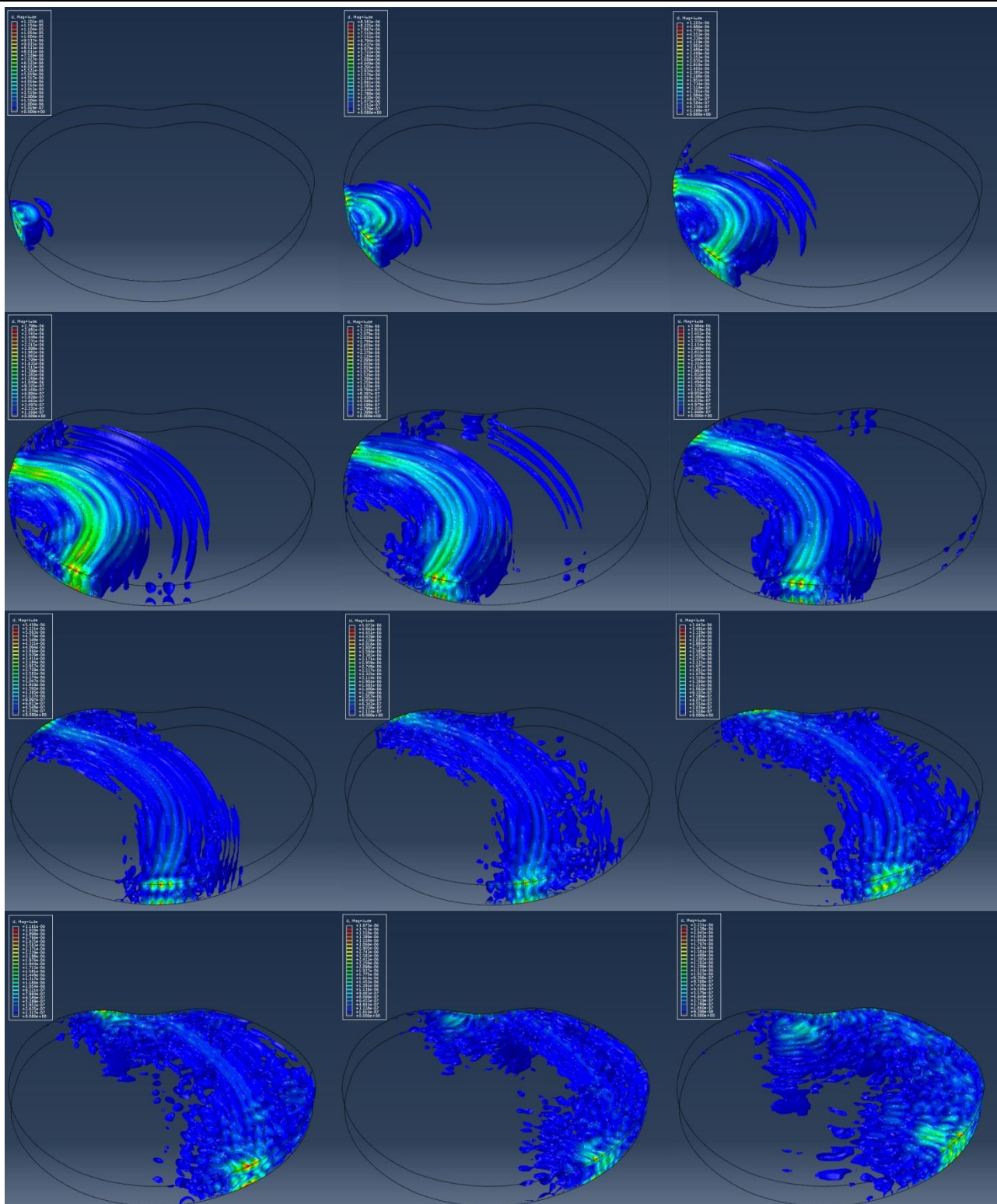
Geometrija betonskog tela je modelirana pomoću CAD tehnologije. Prvo je telo geometrijski definisano u ravni pomoću funkcije “spline” a zatim je debljina ploče određena funkcijom “extrude” u 3D AutoCad programu. Betonsko telo je modelirano u razmeri $R=1:1$, pri čemu je jedna jedinica u CAD programu jednaka $1m$. Nakon definisanja geometrije betonskog tela ona se eksportuje u SAT (Standard ACIS Text) format koji se importuje u ABAQUS/EXPLICIT kao part (moguće je i kao assembly ili model). U slučaju da se želi importovati model u program ABAQUS neophodno je prvo uraditi omrežavanje tela što je moguće uraditi u programu 3DS MAX. Ovde smo se odlučili da importujemo part a da ostale parametre (granični uslovi, omrežavanje, load...) definišemo direktno u ABAQUS-u. Granični uslovi su definisani tako da je ploča slobodno oslonjena na četiri tačke u njenom donjem delu. Pobuda konstrukcije je urađena korišćenjem



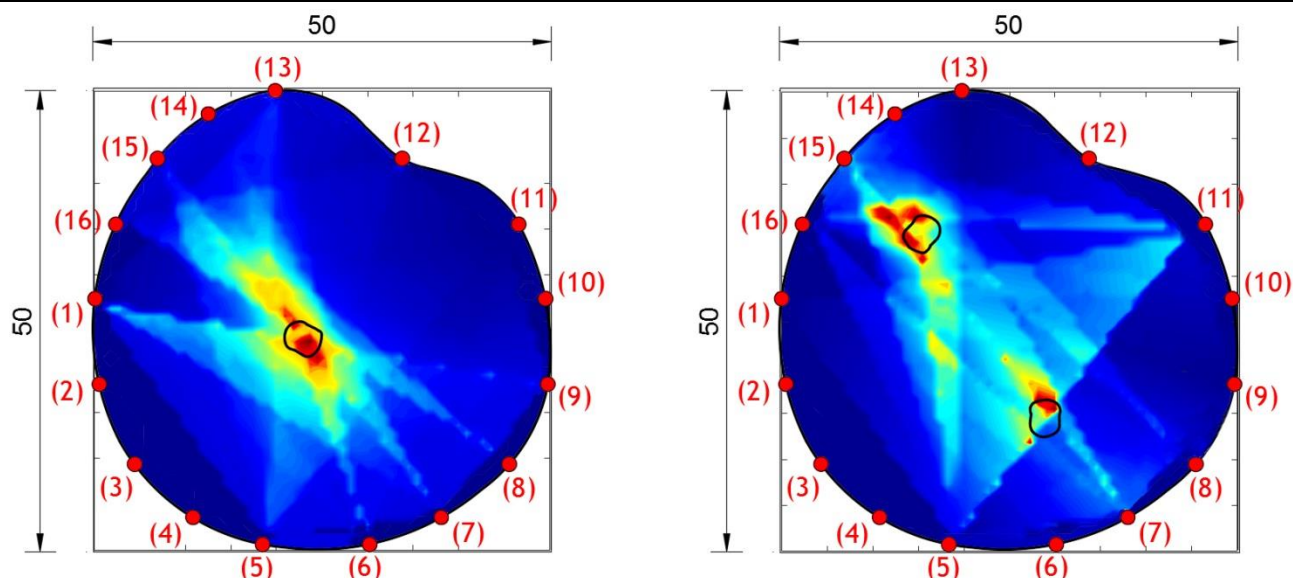
graničnih uslova kao što je to urađeno i kod kvadratnih modela. Omrežavanje je urađeno sa konačnim elementom veličine 2mm.

Na Slici 81 prikazana je propagacija talasa dobijena na osnovu numeričkog modela urađenog u programskom paketu ABAQUS/EXPLICIT. Propagacija talasa je ilustrovana pomoću 12 screenshot-ova u vremenskim trenucima počevši od $2.0 \cdot 10^{-5}(s)$ do $2.4 \cdot 10^{-4}(s)$ sa korakom $2.0 \cdot 10^{-5}(s)$. Prikaz prostiranja talasa kroz betonsku konstrukciju nepravilnog oblika je urađeno korišćenjem Isosurface Contour Plot Options, za razliku od do sada korišćenog Banded Contour Plot Options za kvadratne betonske ploče.

Na Slici 82 prikani su rezultati lokalizacije oštećenja dobijeni hibridnim pristupom za analizirani proizvoljni oblik betonskog elementa i slučajevne oštećenja. Može se videti da se na mestu oštećenja javljaju maksimalne vrednosti DI, iskazane dvodimenzionalnom slikom iz MATLAB programa. Poređenjem sa kvadratnim modelima sa kružnim oštećenjem kod modela sa proizvoljnim oblikom dobijaju se značajnija odstupanja u odnosu na njih. Međutim, na osnovu dobijenih rezultata može se konačno zaključiti da hibridni pristup može da lokalizuje oštećenje za proizvoljni oblik betonske pločaste konstrukcije, proizvoljni oblik oštećenja i proizvoljni položaj PZT A/S.



Slika 81: „Isosurface contour plot“ prikaz talasnog polja za model MAR1 izazvanog pomoću PZT aktuatora A1 u različitim vremenskim trenucima



Slika 82. Lokalizacija oštećenja pomoću hibridnog pristupa za modele sa proizvoljnim oblikom:
Levo - Model MAR2; Desno - Model MAR3

4.7. Zaključak

1. Detekcija oštećenja na betonskim kvadratnim pločama urađena je korišćenjem 2D indeksa oštećenja (M_{ij}) i ocena veličine oštećenja na osnovu ukupnog indeksa oštećenja (O_{DI}) na osnovu numerički urađenih simulacija. Detekcija je urađena na osnovu praćenja najvećih komponenti 2D DI. Kod modela sa kružnim oštećenjem, pod-domeni u kojima se nalazi oštećenje imaju uglavnom najveće vrednosti komponenta uz izvesno rasipanje rezultata na okolne pod-domena, čime se može zaključiti da 2D DI je uspešno detektovao oštećenje. Međutim, kod modela sa zarezima, dolazi do pojave da se u preseccima dominantnih pravaca A/S javljaju najveće vrednosti komponenta 2D DI u pod-domenima gde oštećenje ne postoji, što pri monitoringu konstrukcija može dovesti do pogrešnih zaključaka. Zbog toga, neophodno je modifikovati 2D DI što će biti predmet budućih istraživanja. Ukupni indeks oštećenja za sve analizirane modele uz manja ili veća odstupanja ima približno jednake vrednosti i sa povećanjem oštećenja primetan je i rast ovog indeksa, što dovodi do zaključka da se ovim indeksom oštećenja može pratiti trend rasta oštećenja u konstrukciji. Takođe, treba napomenuti da pomoću primenjenih indeksa oštećenja nije moguće precizno locirati položaj oštećenja i odrediti njegov oblik i veličinu.
2. Lokalizacija i kvantifikacija oštećenja je urađena pomoću hibridnog pristupa koji je originalno rešenje urađeno tokom istraživanja pri izradi ove doktorske disertacije. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je ovaj pristup veoma uspešno lokalizovao oštećenje za sve analizirane slučajeve. Za modele/uzorke sa kružnim oštećenjem rezultati su



značajno bolji i za ove modele hibridni pristup je prilično dobro kvantifikovao oštećenje (odnosno odredio njegov oblik i veličinu). Za modele sa manjim brojem A/S rezultati imaju veća odstupanja dok sa povećanjem broja PZT A/S lokacija, oblik i dimenzija oštećenja dobijena hibridnim pristupom sve više se podudara sa realnim oštećenjem. Kod modela sa zerezom, hibridni pristup je za sve analizirane modele/uzorke uspešno lokalizovao oštećenje, međutim, kvantifikacija oštećenja nije urađena na zadovoljavajućem nivou. Konačno može se zaključiti da hibridni pristup koji je prevashodno namenjen lokalizaciji oštećenja, uspešno je lokalizovao sve analizirane slučajeve oštećenja i za određene modele je uspešno i kvantifikovao oštećenje.

3. Rezultati dobijeni na osnovu numeričke simulacije korišćenjem EFEM u softveru ABAQUS/EXPLICIT dovoljno dobro se poklapaju sa eksperimentalno dobijenim rezultatima čime je verifikovan primenjeni numerički postupak. Numerički podaci su verifikovani preklapanjem izlaznih signala i poređenjem konačnih slika dobijenih hibridnim pristupom u MATLAB program, gde su se javila mala odstupanja.
4. Eksperimentalni rezultati urađeni korišćenjem PZT aktuatora (S24 HB®) za pobudu prostiranja talasa u betonskim uzorcima i ultrazvučnog lasera (BNT Quartet 500®) za merenje dolaznih talasa je uspešno primenjen za lokalizaciju oštećenja. Obzirom da je pri merenju korišćen vibration isolating optic table Newport M-RS200-46-8® i da su pored toga vrlo često signali imali izvesan šum, ovakav vid merenja ne preporučuju se u realnim uslovima. Za potrebe meranja u realnim uslovima mogu se koristiti PZT pametni agregati koji su već verifikovani za takve potrebe.
5. Hibridni pristup je primenjen i za lokalizaciju materijalnih grešaka. Analizirani su modeli sa kružnim rupama ispunjenim gipsom i glinom. Primenjeni pristup je za sve analizirane slučajeve (sa jenom i dve rupe ispunjene gipsom ili glinom) veoma dobro lokalizovao i kvantifikovao oštećenje, na osnovu čega se može zaključiti da hibridni pristup može da se koristi i za potrebe lokalizacije drugog materijala unutar betonskih pločastih elemenata.
6. Konačno, obzirom da je hibridni pristup razvijen da može da lokalizuje oštećenje za proizvoljni oblik betonske konstrukcije, urađena je verifikacija numeričkim putem na modelima sa proizvoljnim oblikom. Na osnovu dobijenih rezultata može se videti da je položaj maksimalnih vrednosti indeksa oštećenja u zonama zdatog oštećenja uz izvesna odstupanja. Za razliku od kvadratnih ploča sa kružnim oštećenjem, kod modela sa proizvoljnim oblikom javljaju se nešto veća odstupanja.



5. DETEKCIJA I LOKALIZACIJA OŠTEĆENJA KOD MASIVNIH BETONSKIH KONSTRUKCIJA

5.1. Uvod

Detekcija i lokalizacija trodimenzionalnih (masivnih) betonskih elemenata konstrukcije biće prikazana u ovom delu disertacije. Pod trodimenzionalnim (3D) konstruktivnim elementima podrazumevamo elemente kod kojih nijedna od tri ortogonalnih dimenzija nije zanemarljiva u odnosu na druge. U građevinarstvu pod masivnim betonskim elementima podrazumevaju se brane, masivni potporni zidovi, debele temeljne ploče itd. Međutim, treba napraviti razliku šta se sve može tretirati kao 3D element konstrukcije u građevinarstvu posmatrajući element kao deo nosive konstrukcije i iz aspekta monitoringa konstrukcije. Iz aspekta SHM pod 3D elementom može se posmatrati analizirana zona linijskog ili površinskog elementa kod koga su u okviru analizirane zone sve tri dimenzije približno istih dimenzija. Tako da iako globalno posmatrano neki element se može tretirati kao linijski ili površinski, iz aspekta SHM u zavisnosti od zone u kojoj se vrši praćenje stanja, posmatrani deo elementa se može tretirati kao 3D.

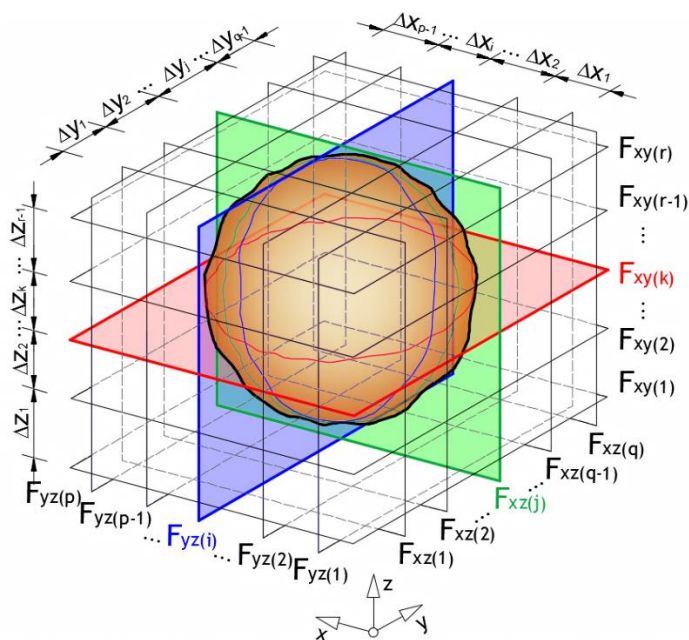
Za detekciju oštećenja kod masivnih betonskih elemenata definisan je novi 3D indeks oštećenja koristeći 1D RMSD indeks oštećenja upotrebljen u Poglavlju 2. Lokalizacija oštećenja je urađena na osnovu unapređene hibridne metode korišćene u Poglavlju tri koja omogućava lokalizovanje oštećenja unutar prostornog tela.

5.2. Detekcija oštećenja kod 3D betonskih elemenata – primena 3D indeksa oštećenja

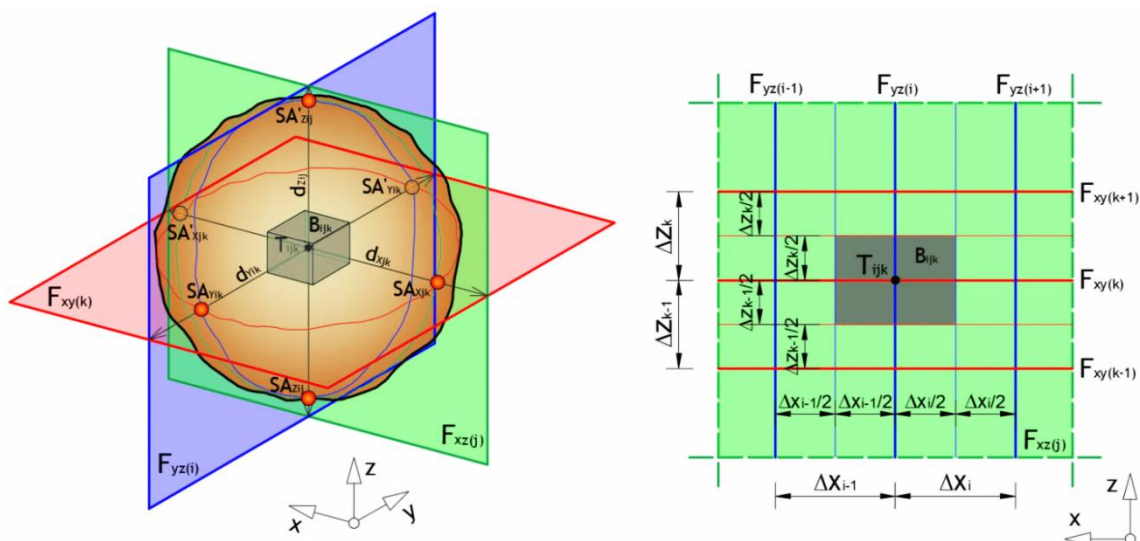
Obzirom da se betonske konstrukcije posmatrajući iz ugla SHM uglavnom mogu smatrati masivnim konstruktivnim elementima, bilo je neophodno razviti indeks oštećenja koji će mogli da detektuje oštećenje unutar betonskog elementa. Ovakav tip indeksa oštećenja do sada nije korišćen. Cilj razvoja ovakvog indeksa oštećenja jeste detekcija oštećenja lokalno unutar betonskog elementa, mogućnost praćenja razvoja oštećenja kao i relativna procena veličine oštećenja putem ukupnog 3D indeksa oštećenja. Indeks oštećenja je razvijen u formi prostornih (3D) matrica.

Krenimo od prostornog betonskog tela proizvoljnog oblika posmatranog u odnosu na 3D lokalni koordinatni sistem (LCS) x, y, z . U odnosu na LCS prostorno betonsko telo je diskretizovano pomoću međusobno ortogonalnih ravni $F_{xy}^k, F_{xz}^j, F_{yz}^i$, ($i=1,2,\dots,p; j=1,2,\dots,q; k=1,2,\dots,r$) kao što je prikazano na Slici 83. Ravni F_{xy}^k ($k=1,2,\dots,r$) su međusobno udaljene razmacima $\Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_k, \dots, \Delta z_{r-1}$, koji mogu biti istih ili različitih vrednosti. Slično tome, druge dve vrste ortogonalnih ravni (F_{yz}^i, F_{xz}^j) su međusobno postavljene na razmacima Δx_i i Δy_j koje takođe mogu

biti proizvoljno definisane. Postavljanjem ravni u tri pravca definisana je diskretizacija prostornog tela na prostorne pod-domene B_{ijk} čija geometrija se određuje postupkom prikazanom na Slici 84. Na Slici 84 levo prikazane su tri ortogonalne ravni F_{xy}^k , F_{xz}^j i F_{yz}^i u čijem preseku se nalazi tačka T_{ijk} . Dve ortogonalne ravni u svom preseku formiraju presečni pravac. Ravni F_{xy}^k i F_{xz}^j formiraju presečni pravac d_{xjk} , ravni F_{xy}^k i F_{yz}^i formiraju presečni pravac d_{yik} i ravni F_{xz}^j i F_{yz}^i formiraju presečni pravac d_{zij} . U preseku ovih pravaca nalazi se presečna tačka T_{ijk} koja je represent prostornog pod-domena B_{ijk} . Geometrija prostornih pod-domena se dobija po istom principu kao i geometrija površinskih pod-domena primenjenih kod 2D indeksa oštećenja. Geometrija prostornih pod-domena prikazana je na Slici 84 desno. Na osnovu Slike 84 desno može se videti da presečna tačka T_{ijk} nalazi se u preseku ravni F_{xy}^k i F_{yz}^i (srednja plava i crvena linija) posmatrajući u ravni F_{xz}^j . Geometrija prostornog pod-domena je ograničena međuravnima (tanke plave i crvene linije na Slici 84 desno) postavljenih na polovini razmaka susednih ravni (npr. u pravcu ose z su susedne ravni F_{xy}^{k-1} , F_{xy}^k i F_{xy}^{k+1}). Za svaki prostorni pod-doment biće definisana jedinstvena vrednost u okviru 3D indeksa oštećenja na osnovu koje se može pratiti pojava i dalje širenje oštećenja unutar prostornog betonskog elementa konstrukcije.

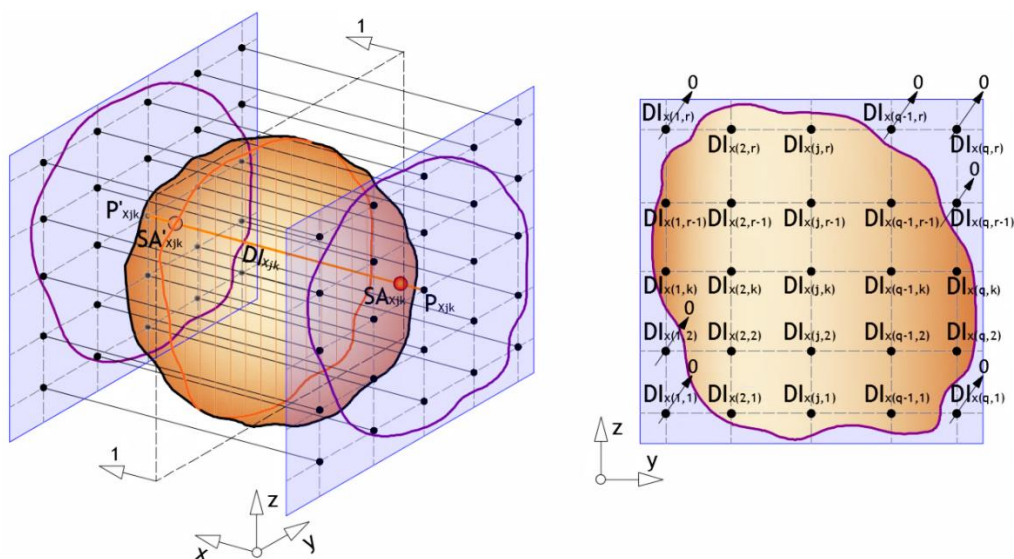


Slika 83. Diskretizacija betonskog tela proizvoljnog oblika pomoću ortogonalnih ravni



Slika 84. Definisanje pod-domena prostornog betonskog tela

Presekom svih x - z i x - y ravni dobijaju se presečni pravci d_{Xjk} ($j=1,2,\dots,q$; $k=1,2,\dots,r$) koji su prikazani na Slici 85. Deo dobijenih presečnih pravaca prolazi kroz betonsko telo a deo ne. Za pravce koji ne prolaze kroz betonsko telo dodeljuje im se vrednost 0 (Slika 85 desno), dok za pravce koji prolaze računa se 1D indeks oštećenja. Na Slici 85 desno prikazan je presek 1-1 kroz betonsko telo (deblja ljubičasta linija) ortogonalno projektovan na y - z ravan, sa projektovanim tačkama pravaca P_{Xjk} . Ako posmatramo PZT_{Xjk} kao aktuator i PZT'_{Xjk} kao sensor može se sračunati 1D indeks oštećenja DI_{Xjk} za posmatrani par aktuatora/senzora. Slično tome, za sve A/S parove u x pravcu mogu se sračunati 1D indeksi oštećenja uzimajući u obzir da se za pravce koji ne dodiruju betonsko telo vrednost indeksa oštećenja usvaja jednak 0 (Slika 85 desno). Proračunom 1D DI za sve posmatrane A/S parove paralelne sa x -osom LCS može se formirati matrica M_{jk}^{yz} .



Slika 85. Presečni pravci za ravan ZY



$$M_{jk}^{yz} = \begin{bmatrix} DI_{x_{11}} & DI_{x_{12}} & \dots & DI_{x_{1k}} & \dots & DI_{x_{1r}} \\ DI_{x_{21}} & DI_{x_{22}} & \dots & DI_{x_{2k}} & \dots & DI_{x_{2r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ DI_{x_{j1}} & DI_{x_{j2}} & \dots & DI_{x_{jk}} & \dots & DI_{x_{jr}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{x_{q1}} & DI_{x_{q2}} & \dots & DI_{x_{qk}} & \dots & DI_{x_{qr}} \end{bmatrix} \quad (122)$$

Pri čemu je M_{jk}^{yz} matrica indeksa oštećenja za pravce paralelne sa x-osom i dimenzija je qxr . $DI_{x_{jk}}$ je 1D indeks oštećenja za pravac paralelan sa x-osom za PZT A/S parove $PZT_{x_{jk}}$ i $PZT'_{x_{jk}}$. Komponente matrice vezane za pravce koji prolaze izvan betonskog tela jednaki su nuli, dok za ostale pravce unutar betonskog tela u opštem slučaju su različiti od nule. Istim pristupom mogu se sračunati i matrice za pravce paralelne sa y-osom M_{ik}^{xz} i paralelne sa z-osom M_{ij}^{xy} prikazani jednačinama (122-124):

$$M_{ik}^{xz} = \begin{bmatrix} DI_{y_{11}} & DI_{y_{12}} & \dots & DI_{y_{1k}} & \dots & DI_{y_{1r}} \\ DI_{y_{21}} & DI_{y_{22}} & \dots & DI_{y_{2k}} & \dots & DI_{y_{2r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ DI_{y_{i1}} & DI_{y_{i2}} & \dots & DI_{y_{ik}} & \dots & DI_{y_{ir}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{y_{p1}} & DI_{y_{p2}} & \dots & DI_{y_{pk}} & \dots & DI_{y_{pr}} \end{bmatrix} \quad (123)$$

$$M_{ij}^{xy} = \begin{bmatrix} DI_{z_{11}} & DI_{z_{12}} & \dots & DI_{z_{1j}} & \dots & DI_{z_{1q}} \\ DI_{z_{21}} & DI_{z_{22}} & \dots & DI_{z_{2j}} & \dots & DI_{z_{2q}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ DI_{z_{i1}} & DI_{z_{i2}} & \dots & DI_{z_{ij}} & \dots & DI_{z_{iq}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{z_{p1}} & DI_{z_{p2}} & \dots & DI_{z_{pj}} & \dots & DI_{z_{pq}} \end{bmatrix} \quad (124)$$

Matrica M_{ij}^{xy} je matrica indeksa oštećenja za pravce paralelne sa z-osom i dimenzija je pxq , dok matrica M_{ik}^{xz} je matrica indeksa oštećenja za pravce paralelne sa y-osom i dimenzija je pxr .

Konačno, novi trodimenzionalni indeks oštećenja (**3D DI**) SDI_{ijk} može se sračunati množenjem matrica prikazanih jednačinama (122-124) na sledeći način:

$$SDI_{ijk} = M_{ij}^{xy} \bullet M_{ik}^{xz} \bullet M_{jk}^{yz} \quad (125)$$

Pri čemu je SDI_{ijk} 3D indeks oštećenja dimenzija $pxqxr$, dok se pomoću operatora \bullet definiše način množenja matrica i formiranja komponenti prostorne 3D matrice. Tako na primer za vrednosti $i=3$,



$j=5$ i $k=7$, računa se komponenta prostorne matrice SDI_{357} množenjem sledećih komponenti ravanskih matrica: komponenta (indeks oštećenja) DI_{z35} matrice M_{ij}^{xy} , komponenta DI_{y37} matrice M_{ik}^{xz} i komponenta DI_{x57} matrice M_{jk}^{yz} . 3D matrica SDI_{ijk} može se predstaviti na tri različita načina: u odnosu na xy -ravan (jednačine 126 i 127), u odnosu na xz -ravan (jednačina 129) i u odnosu na yz -ravan (jednačina 130). Međutim, bez obzira na način prikaza 3D matrice, vrednost komponenti matrice za svaki prostorni pod-domen ima jedinstvenu vrednost.

$$SDI_{pqr}^{xy} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \mathbf{V}_{z11} \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{z1q} \end{matrix} & \begin{bmatrix} SDI_{11r} & SDI_{12r} & \cdots & SDI_{1jr} & \mathbf{V}_{z1q} \cdots & SDI_{1qr} \\ SDI_{11k} & SDI_{12k} & \cdots & SDI_{1jk} & \cdots & SDI_{1qk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ SDI_{i11} & SDI_{i21} & \cdots & SDI_{ij1} & \cdots & SDI_{iq1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SDI_{p11} & SDI_{p21} & \cdots & SDI_{pj1} & \cdots & SDI_{pq1} \end{bmatrix} & \begin{matrix} SDI_{2qr} \\ \vdots \\ SDI_{iqr} \\ \vdots \\ SDI_{pqr} \\ \mathbf{V}_{zpq} \end{matrix} \end{matrix} \quad (126)$$

$$SDI_{pqr}^{xy} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{z11} & \mathbf{V}_{z12} & \cdots & \mathbf{V}_{z1j} & \cdots & \mathbf{V}_{z1q} \\ \mathbf{V}_{z21} & \mathbf{V}_{z22} & \cdots & \mathbf{V}_{z2j} & \cdots & \mathbf{V}_{z2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{V}_{zi1} & \mathbf{V}_{zi2} & \cdots & \mathbf{V}_{zij} & \cdots & \mathbf{V}_{ziq} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{V}_{z_{p1}} & \mathbf{V}_{z_{p2}} & \cdots & \mathbf{V}_{z_{pj}} & \cdots & \mathbf{V}_{z_{pq}} \end{bmatrix} \quad (127)$$

Jednačinom (5) prikazana je 3D struktura matrice prostornog indeksa oštećenja, dok jednačinom (6) prostorna matrica se prikazuje kao standardna matrica pri čemu su njene komponente vektori. Vektori prikazani jednačinom (6) su dimenzija r i imaju sledeći oblik:

$$\mathbf{V}_{z_{ij}} = \{SDI_{ij1}, SDI_{ij2}, \dots, SDI_{ijk}, \dots, SDI_{ijr}\} \quad (128)$$

Druga dva oblika 3D matrice indeksa oštećenja u odnosu na ravni xz i yz prikazani su jednačinama (129) i (130):



$$SDI_{prq}^{xz} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{y_{11}} & \mathbf{V}_{y_{12}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{1k}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{1r}} \\ \mathbf{V}_{y_{21}} & \mathbf{V}_{y_{22}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{2k}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{2r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{V}_{y_{i1}} & \mathbf{V}_{y_{i2}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{ik}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{ir}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{V}_{y_{p1}} & \mathbf{V}_{y_{p2}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{pk}} & \dots & \mathbf{V}_{y_{pr}} \end{bmatrix} \quad (129)$$

$$SDI_{qrp}^{yz} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{x_{11}} & \mathbf{V}_{x_{12}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{1k}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{1r}} \\ \mathbf{V}_{x_{21}} & \mathbf{V}_{x_{22}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{2k}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{2r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{V}_{x_{j1}} & \mathbf{V}_{x_{j2}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{jk}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{jr}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{V}_{x_{q1}} & \mathbf{V}_{x_{q2}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{qk}} & \dots & \mathbf{V}_{x_{qr}} \end{bmatrix} \quad (130)$$

Pomoću prikazanog 3D indeksa oštećenja može se pratiti pojava oštećenja unutar betonskih elemenata. Obzirom, da su betonske konstrukcije sa aspekta SHM-a u velikoj većini masivne, ovaj vid detekcije oštećenja i monitoringa betonskih konstrukcija može biti od velikog interesa. Osim što se pruža mogućnost detektovanja pojave oštećenja, ovim indeksom oštećenja može se pratiti i dalje povećanje postojećeg ili pojava novih oštećenja, a sve to na nivou prostornih pod-domena unutar većeg betonskog elementa konstrukcije. Na taj način, ovim indeksom oštećenja nudi se mogućnost praćenja betonskih elemenata kroz vreme.

Za ocenu ukupne oštećenosti betonskog elementa, ili jednog njegovog dela koji se analizira mernim senzorima, definisan je **ukupni indeks oštećenja** U_o sledećom jednačinom:

$$U_o = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r \beta_{ijk} \cdot SDI_{ijk} \quad (131)$$

Pri čemu je β_{ijk} težinski koeficijent koji se određuje kao odnos zapremine posmatranog prostornog pod-domena u odnosu na ukupnu zapreminu analiziranog betonskog tela:

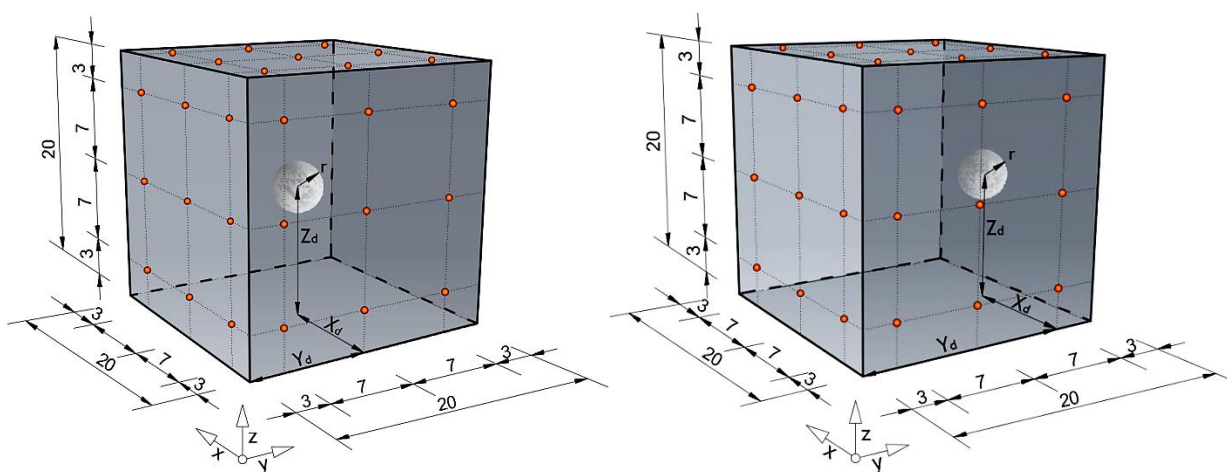
$$\beta_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r V_{ijk}} \quad (132)$$

sa sledećim oznakama: V_{ijk} - zapremina pod-domena B_{ijk} . Pomoću ukupnog indeksa oštećenja U_o može se vršiti relativna ocena oštećenosti betonskog elementa, ali nije moguće precizno dobiti

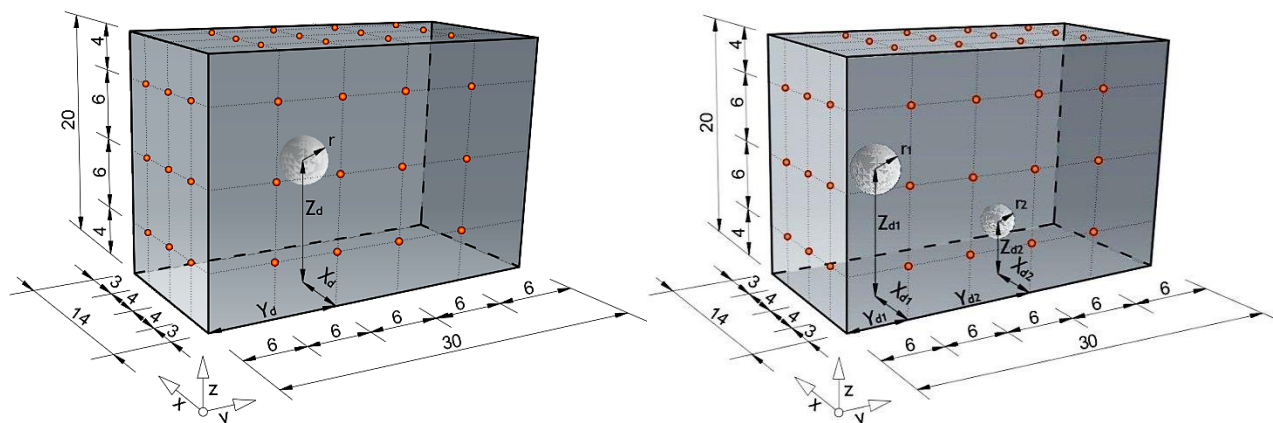
informacije o veličini oštećenja. Na dalje biće prikazana primena novog 3D indeksa oštećenja na betonskih paralelepipednim modelima urađena na osnovu numeričkih simulacija.

5.3. Primena 3D indeksa oštećenja – numerička simulacija

U ovom Poglavlju biće testiran 3D indeks oštećenja prikazan u prethodnom Poglavlju na četiri tipa modela MP1 do MP4. Modeli su u geometrijskom smislu podeljeni u dva tipa: 1) dimenzija 20x20x20cm (Modeli MP1 i MP2) i 2) 14x30x20cm (Modeli MP3 i MP4). Za prvi tip modela analizirano je po jedno kružno oštećenje poluprečnika $r=2\text{cm}$, u jednom slučaju simetrično u sredini betonskog tela – Model MP1 (Slika 86 levo) i u drugom nesimetrično – Model MP2 (Slika 86 desno). Za oba pomenuta modela primenjeno je ukupno 54 različitih položaja PZT A/S. Kod drugog tipa modela (Slike 5.6) u prvom slučaju detektovano je jedno oštećenje (Slika 87 levo), i u drugom slučaju dva oštećenja – Model MP4 (Slika 87 desno). Kod ovih modela korišćeno je 66 različitih položaja PZT A/S. U Tabeli 5.1 prikazuju se tačne dimenzije modela, položaj oštećenja i dimenzije analiziranih oštećenja. Oštećenja kod svih analiziranih modela su modelirana kao loptasta oštećenja ispunjena vazduhom.



Slika 86. Geometrija modela za detekciju oštećenja pomoću 3D DI: levo – Model MP1, desno – Model MP2



Slika 87. Geometrija modela za detekciju oštećenja pomoću 3D DI: levo – Model MP3, desno – Model MP4

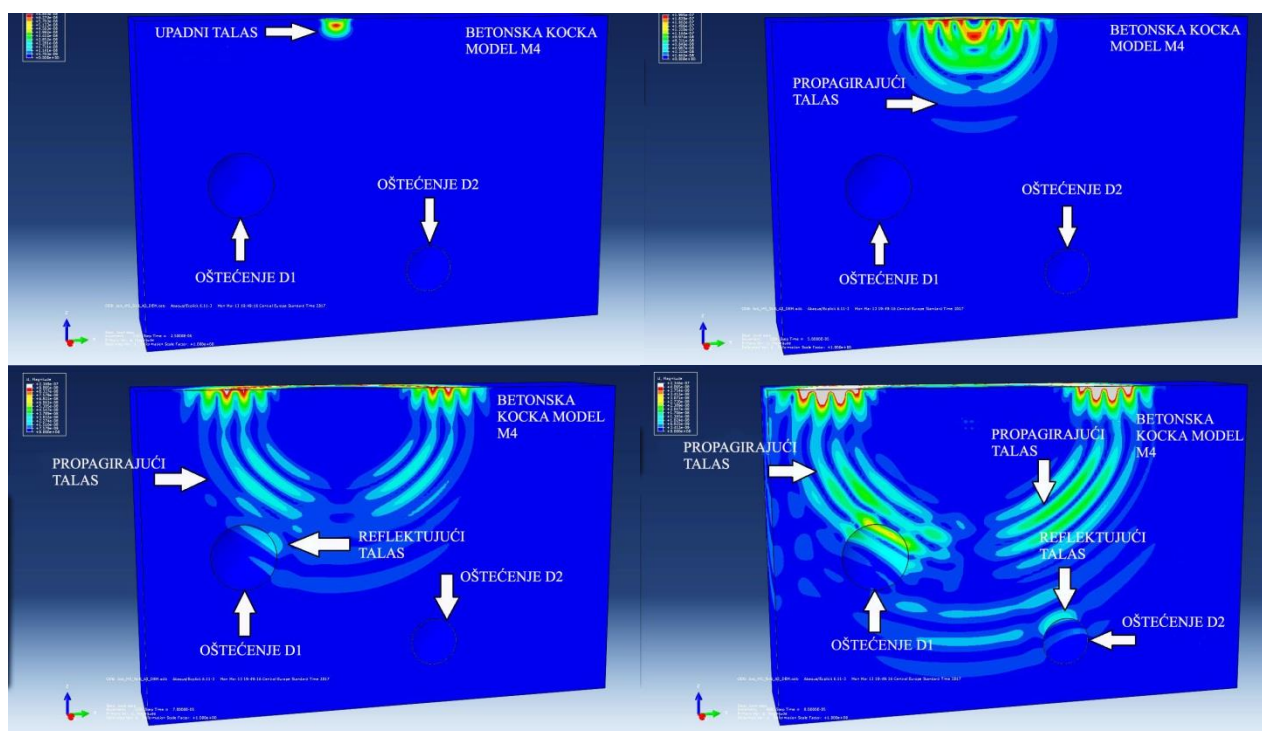
Tabela 16. Karakteristike numeričkih modela MP1-MP4

	Model MP1	Model MP2	Model MP3	Model MP4	
Karakteristike oštećenja	$r=2\text{cm}$	$r=2\text{cm}$	$r=2\text{cm}$	$r_1=2\text{cm}$	$r_2=1.5\text{cm}$
	$X_d=10\text{cm}$	$X_d=17\text{cm}$	$X_d=7\text{cm}$	$X_d=7\text{cm}$	$X_d=7\text{cm}$
	$Y_d=10\text{cm}$	$Y_d=10\text{cm}$	$Y_d=12\text{cm}$	$Y_d=6\text{cm}$	$Y_d=18\text{cm}$
	$Z_d=10\text{cm}$	$Z_d=10\text{cm}$	$Z_d=10\text{cm}$	$Z_d=10\text{cm}$	$Z_d=4\text{cm}$

5.3.1. Numeričko modeliranje propagacije talasa kod 3D modela MP1-MP4

Numeričko modeliranje ultrazvučnog prostiranja talasa kroz betonske modele prikazano je na Slici 88 i urađeno je korišćenjem eksplicitne metode konačnih elemenata u program ABAQUS/EXPLICIT. Modeliranje PZT aktuatora sa kojom se vrši pobuda prostiranja talasa kroz betonski model urađena je korišćenjem graničnih uslova pomeranja upravno na dodirnu površinu aktuatora i betona. Funkcija pobude je korišćena 3.5 tone burst hanning windowed sa centralnom frekvencom od 100kHz. Modeli koji su analizirani imaju izrazitu trodimenzionalnu strukturu (sve tri dimenzije su približno istih dimenzija), zbog čega se pobudom može očekivati prostiranje talasa u sva tri pravca uz dominantno prostiranje upravno na dodirnu ravan aktuatora i betonskog modela. PZT aktuatori se postavljaju sa spoljašnje površine betonskog modela zbog čega se javljaju sledeći tipovi talasa: 1) Reyleigh talasi koji se prostiru po spoljašnjoj površini betonskog modela; 2) Longitudinalni prostorni talasa koji se prostiru unutar betonskog modela i 3) transverzalni talasi koji se takođe prostiru unutar betonskog modela. Izlazni signali su očitani kao pomeranje upravno na spoljašnu površinu betonskog elementa u čvoru na mestu senzora.

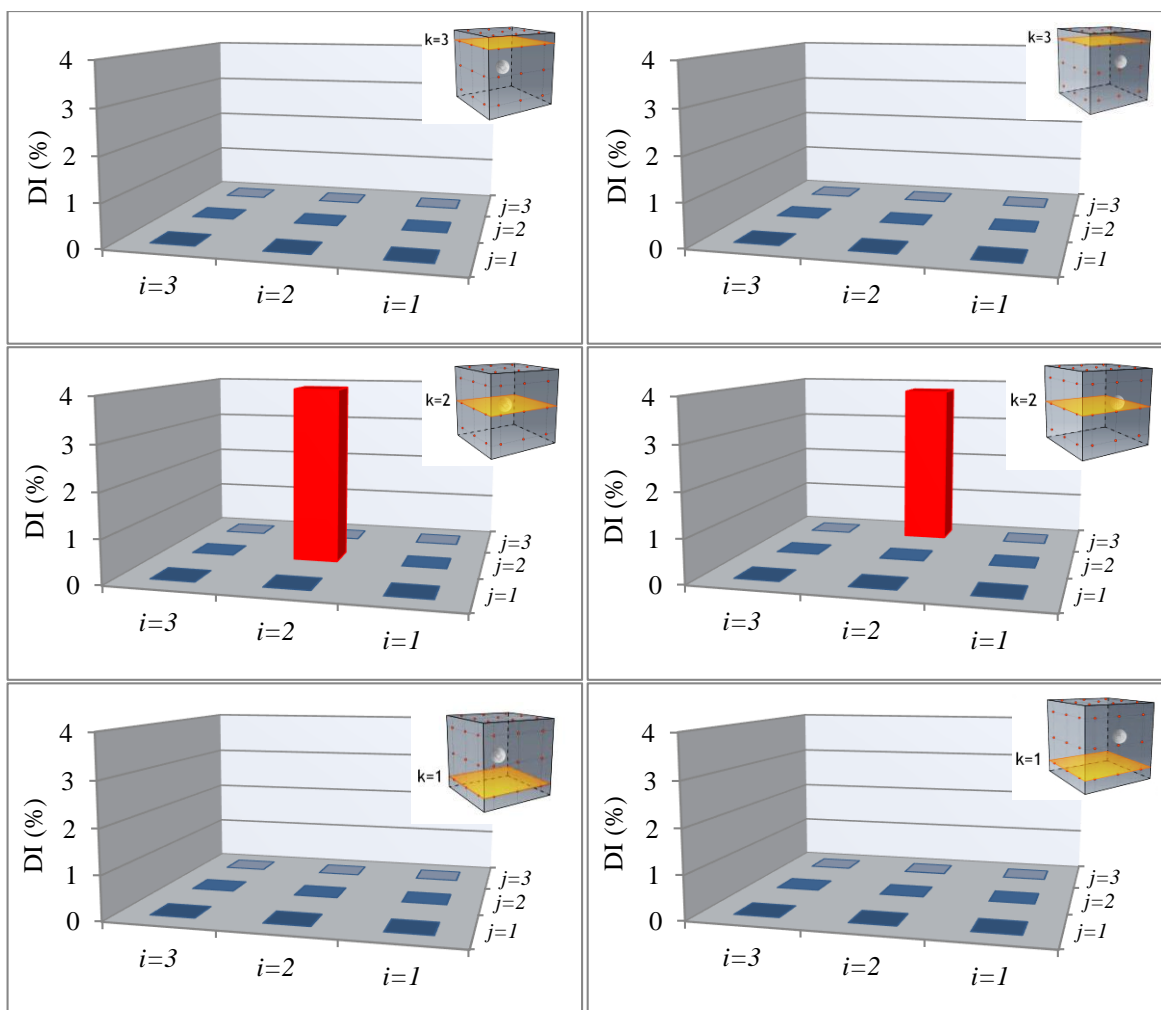
Modeliranje prostiranja talasa urađeno je uz pretpostavku da se betonski model može tretirati kao izotropna elastična sredina. Simulacije su rađene na 3D modelima geometrijski modelirani na osnovu geometrije prikazane na Slikama 86 i 87. 3D modeli su kreirani za modeliranje propagacije talasa koristeći konačni element C3D8R. Materijalni model betona je usvojen kao linearno elastični homogeni material sa Rayleigh prigušenjem. Stabilni vremenski inkrement usvojen je da je manji od kritičnog.



Slika 88. Talasno polje za Model MP4 izazvan pomoću PZT aktuatora pri različitim vremenskim trenucima: (a) $t=2.50 \cdot 10^{-5}(s)$, (b) $t=5.00 \cdot 10^{-5}(s)$, (c) $t=7.50 \cdot 10^{-5}(s)$, (d) $t=8.00 \cdot 10^{-5}(s)$,

Omrežavanje modela urađeno je pomoću strukturne kontrole omrežavanja. Oko kružnih otvora vršeno je drugačije omrežavanje u cilju dobijanja što približnijih dimenzija konačnih elemenata. Usvojena veličina konačnog elementa je 0.002m. Model je oko loptastog oštećenja omrežen sweep tehnikom omrežavanja. Za svaki položaj aktuatora formirana je puna analizu, koristeći paralelne procesore.

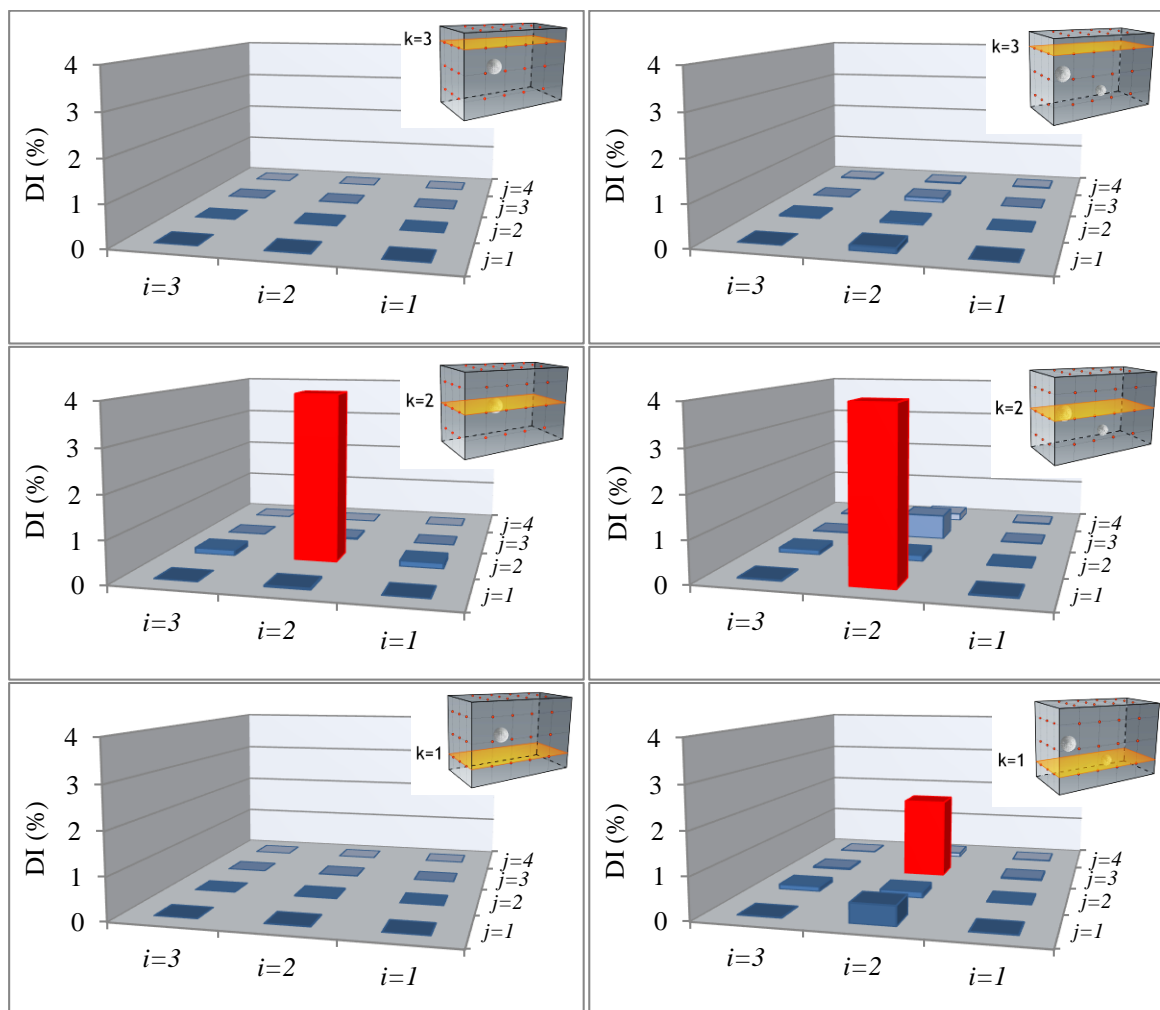
5.3.2. Rezultati i diskusija



Slika 89. Rezultati 3D DI: levo – Model MP1; desno – Model MP2

Tabela 17. Vrednosti 3D DI vektora i ukupnog indeksa oštećenja– Modeli MP1 i MP2

MODEL MP1		MODEL MP2	
Matrična forma	Vrednosti vektora (%)	Matrična forma	Vrednosti vektora (%)
$\begin{bmatrix} V_{Z_{11}} & V_{Z_{12}} & V_{Z_{13}} \\ V_{Z_{21}} & V_{Z_{22}} & V_{Z_{23}} \\ V_{Z_{31}} & V_{Z_{32}} & V_{Z_{33}} \end{bmatrix}$	$V_{Z_{11}} = \{0.022 \cdot 10^{-4}; 0.212 \cdot 10^{-4}; 0.022 \cdot 10^{-4}\}$	$\begin{bmatrix} V_{Z_{11}} & V_{Z_{12}} & V_{Z_{13}} \\ V_{Z_{21}} & V_{Z_{22}} & V_{Z_{23}} \\ V_{Z_{31}} & V_{Z_{32}} & V_{Z_{33}} \end{bmatrix}$	$V_{Z_{11}} = \{0.025 \cdot 10^{-4}; 0.036 \cdot 10^{-4}; 0.025 \cdot 10^{-4}\}$
	$V_{Z_{12}} = \{0.212 \cdot 10^{-4}; 0.239 \cdot 10^{-2}; 0.212 \cdot 10^{-4}\}$		$V_{Z_{12}} = \{0.0931 \cdot 10^{-4}; 0.232 \cdot 10^{-4}; 0.0931 \cdot 10^{-4}\}$
	$V_{Z_{13}} = \{0.022 \cdot 10^{-4}; 0.212 \cdot 10^{-4}; 0.022 \cdot 10^{-4}\}$		$V_{Z_{13}} = \{0.743 \cdot 10^{-4}; 0.328 \cdot 10^{-2}; 0.743 \cdot 10^{-4}\}$
	$V_{Z_{21}} = \{0.212 \cdot 10^{-4}; 0.239 \cdot 10^{-2}; 0.212 \cdot 10^{-4}\}$		$V_{Z_{21}} = \{0.036 \cdot 10^{-4}; 0.013 \cdot 10^{-2}; 0.036 \cdot 10^{-4}\}$
	$V_{Z_{22}} = \{0.239 \cdot 10^{-2}; \mathbf{3.508}; 0.239 \cdot 10^{-2}\}$		$V_{Z_{22}} = \{0.336 \cdot 10^{-4}; 0.0109; 0.336 \cdot 10^{-4}\}$
	$V_{Z_{23}} = \{0.212 \cdot 10^{-4}; 0.239 \cdot 10^{-2}; 0.212 \cdot 10^{-4}\}$		$V_{Z_{23}} = \{0.328 \cdot 10^{-2}; \mathbf{3.250}; 0.328 \cdot 10^{-2}\}$
	$V_{Z_{31}} = \{0.022 \cdot 10^{-4}; 0.212 \cdot 10^{-4}; 0.022 \cdot 10^{-4}\}$		$V_{Z_{31}} = \{0.025 \cdot 10^{-4}; 0.036 \cdot 10^{-4}; 0.025 \cdot 10^{-4}\}$
	$V_{Z_{32}} = \{0.212 \cdot 10^{-4}; 0.239 \cdot 10^{-2}; 0.212 \cdot 10^{-4}\}$		$V_{Z_{32}} = \{0.0931 \cdot 10^{-4}; 0.232 \cdot 10^{-4}; 0.0931 \cdot 10^{-4}\}$
	$V_{Z_{33}} = \{0.022 \cdot 10^{-4}; 0.212 \cdot 10^{-4}; 0.022 \cdot 10^{-4}\}$		$V_{Z_{33}} = \{0.743 \cdot 10^{-4}; 0.328 \cdot 10^{-2}; 0.743 \cdot 10^{-4}\}$
Ukupni indeks oštećenja	$U_0 = 0.151\%$	Ukupni indeks oštećenja	$U_0 = 0.164\%$



Slika 90. Rezultati 3D DI: levo – Model MP3; desno – Model MP4

Na Slikama 89 i 90 prikazani su rezultati 3D DI dobijeni numeričkim modeliranjem 3D modela. Dobijene vrednosti komponenta 3D indeksa oštećenja i ukupnog indeksa oštećenja prikazani su u Tabelama 17 i 18. Na Slici 89 sa leve strane prikazuju se rezultati dobijeni za model MP1 dok sa desne strane rezultati za model MP2. Prikaz je urađen u odnosu na xy -ravan. Kao što se može videti u srednjoj xy -ravni za vrednost $k=2$ i $i=j=2$ dobija se dominantna vrednost komponente 3D indeksa oštećenja. Dominatna (najveća) vrednost dobijena je za prostorni pod-domen B_{222} u kome se nalazi oštećenje, dok su vrednosti za ostale prostorne pod-domene višestruko manje. U Tabeli 17 prikazani su rezultati dobijeni za model MP1 u odnosu na xy -ravan (vektori V_{zij}). Najveća komponenta 3D DI na osnovu koje se može zaključiti gde se oštećenje nalazi dobijena je u vektoru V_{z22} i ima vrednost $S_{222}=3.508\%$. Ukupni indeks oštećenja iznosi $U_o=0.151\%$ na osnovu koga se može oceniti nivo oštećenosti betonskog elementa. Ako pretpostavimo da je poznat oblik oštećenja i da je on loptast, kao što je to slučaj kod analiziranih modela, onda možemo na osnovu ukupnog indeksa oštećenja doći do veličine oštećenja na sledeći način. Ako obeležimo sa V_M zapreminu betonskog elementa



konstrukcije (ili modela u ovom slučaju), a sa V_D zapreminu oštećenja, onda se nivo oštećenosti može iskazati kroz koeficijent $C_d=V_D/V_M$. Ocena oštećenosti konstrukcije kroz koeficijent C_d je veoma česta u praćenju stanja građevinskih konstrukcija. Izjednačavanjem ukupnog indeksa oštećenja sa koeficijentom oštećenosti $U_o=C_d$ može se dobiti veličina oštećenja na osnovu dobijenog ukupnog indeksa oštećenja. Na osnovu ovako definisanog pristupa procenjena veličina oštećenja je lopta prečnika $R=2.85\text{cm}$ (modelirana vrednost je $R=4.0\text{cm}$). Primenjeni pristup je samo orijentacioni, jer definisani ukupni indeks oštećenja svakako ne predstavlja odnos zapremine betonskog tela i oštećenja.

Na Slici 89 desno prikazuju se rezultati dobijeni za model MP2. Model MP2 je geometrijski identičan sa modelom MP1 ($20\times 20\times 20\text{cm}$), sa istim oštećenjem (lopta prečnika $R=4\text{cm}$) ali je oštećenje postaveljno nesimetrično u prostorni pod-domen B_{232} . Kod ovog modela, kao i kod prethodnog, najveća komponenta 3D indeksa oštećenja $S_{232}=3.250\%$ dobija se za prostorni pod-domen u kome se nalazi oštećenje. Vrednosti za ostale pod-domene su zanemarljive u odnosu na maksimalnu vrednost vrednost dobijenu u pod-domenu B_{232} . Vektori 3D matrice u odnosu na xy -ravan prikazani su u Tabeli 17, kao i ukupni indeks oštećenja $U_o=0.164\%$. Procenjena veličina oštećenja koristeći ukupni indeks oštećenja je lopta prečnika $R=2.93\text{cm}$ (modelirana vrednost je $R=4.0\text{cm}$). Poređenjem procenjenih vrednosti veličine oštećenja za prva dva modela može se videti da su oni približno jednaki (2.85cm i 2.93cm) sa odstupanjem od 2.8% . Na osnovu prva dva modela može se zaključiti da 3D indeks oštećenja daje mogućnost detekcije oštećenja unutar betonskog elementa uz izvesno lokalizovanje oštećenja (praćenjem maksimalnih vrednosti komponenata 3D DI) na nivou prostornih pod-domena. Na ovim modelima nije došlo do većih odstupanja od očekivanih rezultata na osnovu čega se može zaključiti da je 3D DI uspešno detektovao oštećenje. Ukupni indeks oštećenja dobijen za ova dva modela u izvesnoj meri daje mogućnost ocene ukupne oštećenosti konstrukcije. Međutim, treba imati u vidu da je kod analize ocene oštećenosti, odnosno, proračuna veličine oštećenja pretpostavljeno da se oblik oštećenja unapred zna, što u realnoj konstrukciji nije moguće. Odstupanja koja se javljaju u proceni veličine oštećenja kod modela MP1 je 40.35% dok kod modela MP2 je 36.5% .

Na Slici 90 prikazani su modeli MP3 i MP4, kao i u Tabeli 18. Rezultati 3D DI za model MP3 prikazani su na Slici 90 levo. U pod-domenu B_{222} u kome se nalazi oštećenje javlja se i najveća komponenta 3D indeksa oštećenja koja ima vrednost $S_{222}=4.141\%$. Ostale komponente u odnosu na nju su zanemarljive. U Tabeli 18 može se videti da se maksimalna komponenta 3D DI javlja u vektoru V_{z22} , dok je ukupni indeks oštećenja jednak $U_o=0.115\%$. Procenjena veličina oštećenja na



osnovu vrednosti U_0 je jednaka lopti prečnika $R=2.65cm$ (modelirana vrednost je $R=4.0cm$). Odstupanja koja se javljaju u proceni veličine oštećenja kod modela MP3 je 50.94%.

Rezultati 3D indeksa oštećenja sračunati za model MP4 sa dva loptasta oštećenja prikazani su na Slici 90 desno i u Tabeli 18. Kao što se može videti, dva maksimuma se javljaju u prostornim pod-domenima B_{231} sa vrednošću $S_{231}=1.965\%$ i B_{212} sa vrednošću $S_{212}=5.183\%$. Od ostalih vrednosti komponentata 3D indeksa oštećenja izdvajaju se dve vrednosti za prostorne pod-domene B_{211} i B_{232} sa vrednostima $S_{211}=0.464\%$ i $S_{232}=0.777\%$. Iako su znatno manje od vrednosti gde se oštećenje realno javlja mogu izazvati sumnju da li u ovim zonama postoji oštećenje. Zanimljivo je primetiti da se pomenute vrednosti za pod-domene kod kojih nema oštećenja ali imaju nezanemarljivu vrednost komponente 3D DI nalaze u presecima pravaca d_{Y22} sa d_{Z23} i d_{Y21} sa d_{Z21} . Ovi pravci su dominantni u smislu najvećih sračunatih vrednosti 1D DI, odnosno, javlja se sličan efekat kao i kod 2D DI da se u presecima pravaca gde postoji oštećenje duž pravca javljaju značajne komponente indeksa oštećenja iako u tom pod-domenu ne postoji oštećenje. Ova osobina kako 2D DI tako i 3D DI je nepovoljna naročito kod jako oštećenih konstrukcija.

Tabela 18. Vrednosti vektora 3D DI i ukupnog indeksa oštećenja – Modeli MP3 i MP4

MODEL MP3				MODEL MP4			
Matrična forma		Vrednosti vektora (%)		Matrična forma		Vrednosti vektora (%)	
$\begin{bmatrix} V_{Z_{11}} & V_{Z_{12}} & V_{Z_{13}} & V_{Z_{14}} \\ V_{Z_{21}} & V_{Z_{22}} & V_{Z_{23}} & V_{Z_{24}} \\ V_{Z_{31}} & V_{Z_{32}} & V_{Z_{33}} & V_{Z_{34}} \end{bmatrix}$		$V_{Z_{11}}=\{0.286 \cdot 10^{-4}; 0.576 \cdot 10^{-2}; 0.286 \cdot 10^{-4}\}$		$\begin{bmatrix} V_{Z_{11}} & V_{Z_{12}} & V_{Z_{13}} & V_{Z_{14}} \\ V_{Z_{21}} & V_{Z_{22}} & V_{Z_{23}} & V_{Z_{24}} \\ V_{Z_{31}} & V_{Z_{32}} & V_{Z_{33}} & V_{Z_{34}} \end{bmatrix}$		$V_{Z_{11}}=\{0.011; 0.024; 0.762 \cdot 10^{-4}\}$	
		$V_{Z_{12}}=\{0.234 \cdot 10^{-3}; 0.169; 0.234 \cdot 10^{-3}\}$				$V_{Z_{12}}=\{0.053; 0.032; 0.857 \cdot 10^{-3}\}$	
		$V_{Z_{13}}=\{0.286 \cdot 10^{-4}; 0.540 \cdot 10^{-3}; 0.286 \cdot 10^{-4}\}$				$V_{Z_{13}}=\{0.065; 0.027; 0.459 \cdot 10^{-3}\}$	
		$V_{Z_{14}}=\{0.156 \cdot 10^{-5}; 0.403 \cdot 10^{-4}; 0.156 \cdot 10^{-5}\}$				$V_{Z_{14}}=\{0.020; 0.039; 0.033\}$	
		$V_{Z_{21}}=\{1.079 \cdot 10^{-3}; 0.444 \cdot 10^{-2}; 1.079 \cdot 10^{-3}\}$				$V_{Z_{21}}=\{0.464; \mathbf{5.183}; 0.127\}$	
		$V_{Z_{22}}=\{0.0294; \mathbf{4.141}; 0.0294\}$				$V_{Z_{22}}=\{0.190; 0.187; 0.082\}$	
		$V_{Z_{23}}=\{1.079 \cdot 10^{-3}; 0.444 \cdot 10^{-2}; 1.079 \cdot 10^{-3}\}$				$V_{Z_{23}}=\{\mathbf{1.965}; 0.777; 0.140\}$	
		$V_{Z_{24}}=\{0.403 \cdot 10^{-4}; 0.182 \cdot 10^{-3}; 0.403 \cdot 10^{-4}\}$				$V_{Z_{24}}=\{0.164; 0.286; 0.051\}$	
		$V_{Z_{31}}=\{0.286 \cdot 10^{-4}; 0.576 \cdot 10^{-2}; 0.286 \cdot 10^{-4}\}$				$V_{Z_{31}}=\{0.014; 0.030; 0.856 \cdot 10^{-4}\}$	
		$V_{Z_{32}}=\{0.234 \cdot 10^{-3}; 0.169; 0.234 \cdot 10^{-3}\}$				$V_{Z_{32}}=\{0.154; 0.193; 0.063\}$	
		$V_{Z_{33}}=\{0.286 \cdot 10^{-4}; 0.702 \cdot 10^{-3}; 0.286 \cdot 10^{-4}\}$				$V_{Z_{33}}=\{0.051; 0.035; 0.459 \cdot 10^{-3}\}$	
		$V_{Z_{34}}=\{0.156 \cdot 10^{-5}; 0.403 \cdot 10^{-4}; 0.156 \cdot 10^{-5}\}$				$V_{Z_{34}}=\{0.020; 0.036; 0.043\}$	
	Ukupni indeks oštećenja		$U_0=0.115\%$		Ukupni indeks oštećenja		$U_0=0.293\%$

Ukupni indeks oštećenja za model MP4 iznosi $U_0=0.293\%$. Pretpostavljajući da je poznato da je ovaj model oštećen sa dva kružna oštećenja na osnovu ukupnog indeksa oštećenja dobijaju se



veliĉine oštećenja u vidu dve lopte preĉnika $R=2.88\text{cm}$ (realno oštećenje su jedna lopta preĉnika $R=4\text{cm}$ i druga $R=3\text{cm}$). Odstupanje u veliĉini oštećenja za prvo oštećenje iznosi 38.89% dok za drugo 4.17%.

5.4. Primena 3D DI za detekciju oštećenja kroz vreme

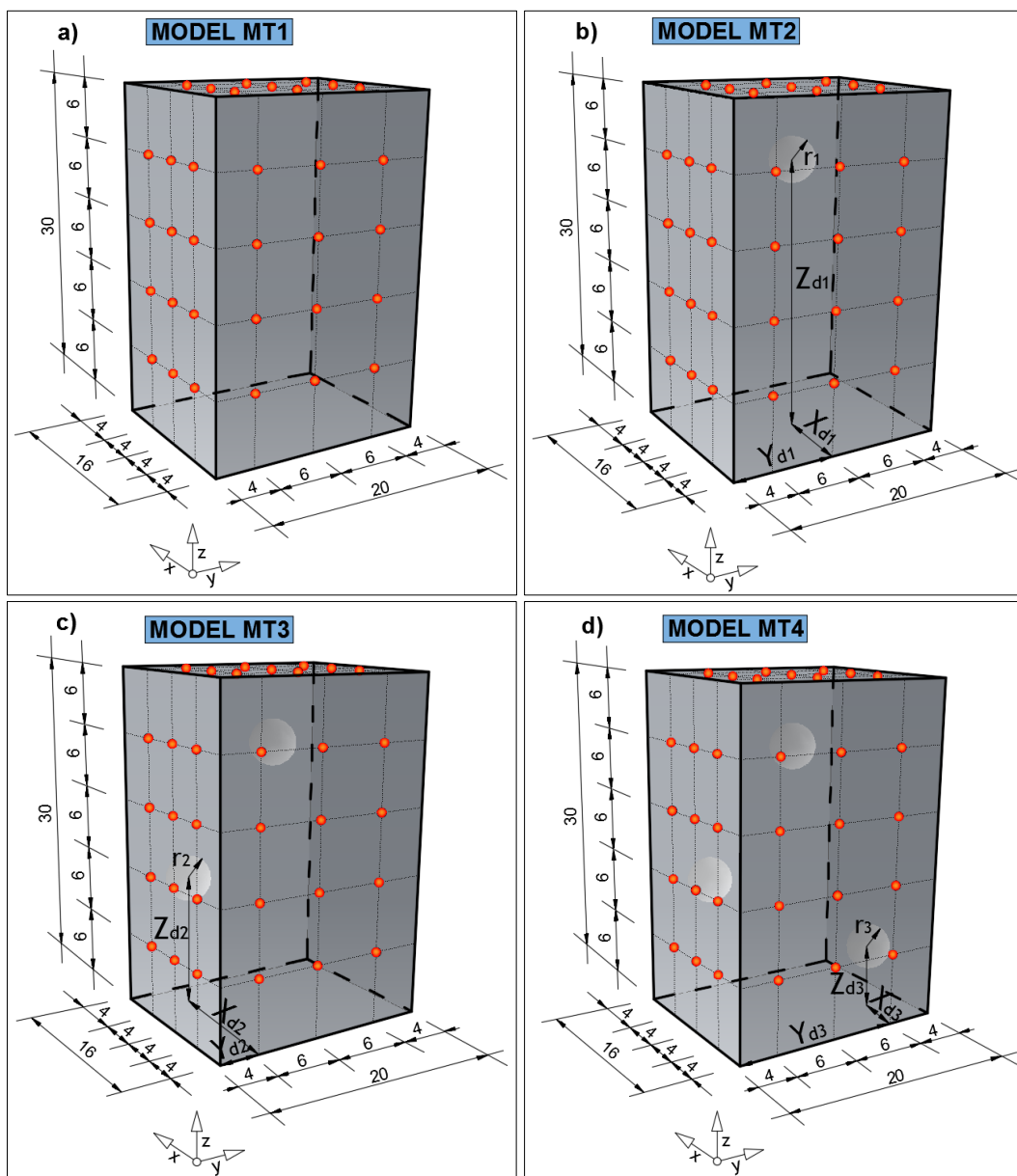
3D indeks oštećenja prikazan u ovom delu doktorata kao poĉetni parametar koristi 1D DI. 1D DI je korišćen u više publikovanih istraŹivanja kao indeks oštećenja sposoban da prati promenu oštećenosti konstrukcije kroz vreme, samim tim, obzirom da 3D DI koristi 1D DI, trebalo bi da je i 3D DI sposoban da prati promenu (razvoj) oštećenja unutar betonskog elementa kroz vreme. Kako bi se ta pretpostavka proverila uraĉena je sledeća numerička analiza. Analiza je uraĉena na ĉetiri modela MT1 do MT4. Prvi model MT1 je model bez oštećenja i simulira poĉeno stanje ($t=0$) u realnim konstrukcijama. Model MT2 je model sa jednim loptastim oštećenjem. Pretpostavimo da se oštećenje javilo u trenutku $t=t_1$ i da na promenu izlaznog signala kroz vreme utiĉe samo pojava oštećenja, odnosno, da mehaniĉke karakteristike materijala ostaju nepromenjene. Nakon pojave prvog oštećenja u sledećem vremenskom trenutku ($t=t_2$) javlja se sledeće oštećenje (model MT3). Konaĉno, u sledećem modelu MT4 dolazi do pojave još jednog oštećenja u vremenskom trenutku ($t=t_3$) uz zadrŹavanje postojećih oštećenja.

Tabela 19. Geometrija oštećenja kod numeričkih modela MT1-MT4

	Model MT1	Model MT2	Model MT3	Model MT4
	Neoštećen	Oštećenje 1	Oštećenje 1+2	Oštećenje 1+2+3
Karakteristike oštećenja		$r_1=2\text{cm}$	$r_2=2\text{cm}$	$r_3=2\text{cm}$
		$X_{d1}=8.0\text{cm}$	$X_{d2}=12.0\text{cm}$	$X_{d3}=4.0\text{cm}$
		$Y_{d1}=10.0\text{cm}$	$Y_{d2}=4.0\text{cm}$	$Y_{d3}=16.0\text{cm}$
		$Z_{d1}=24.0\text{cm}$	$Z_{d2}=12.0\text{cm}$	$Z_{d3}=6.0\text{cm}$

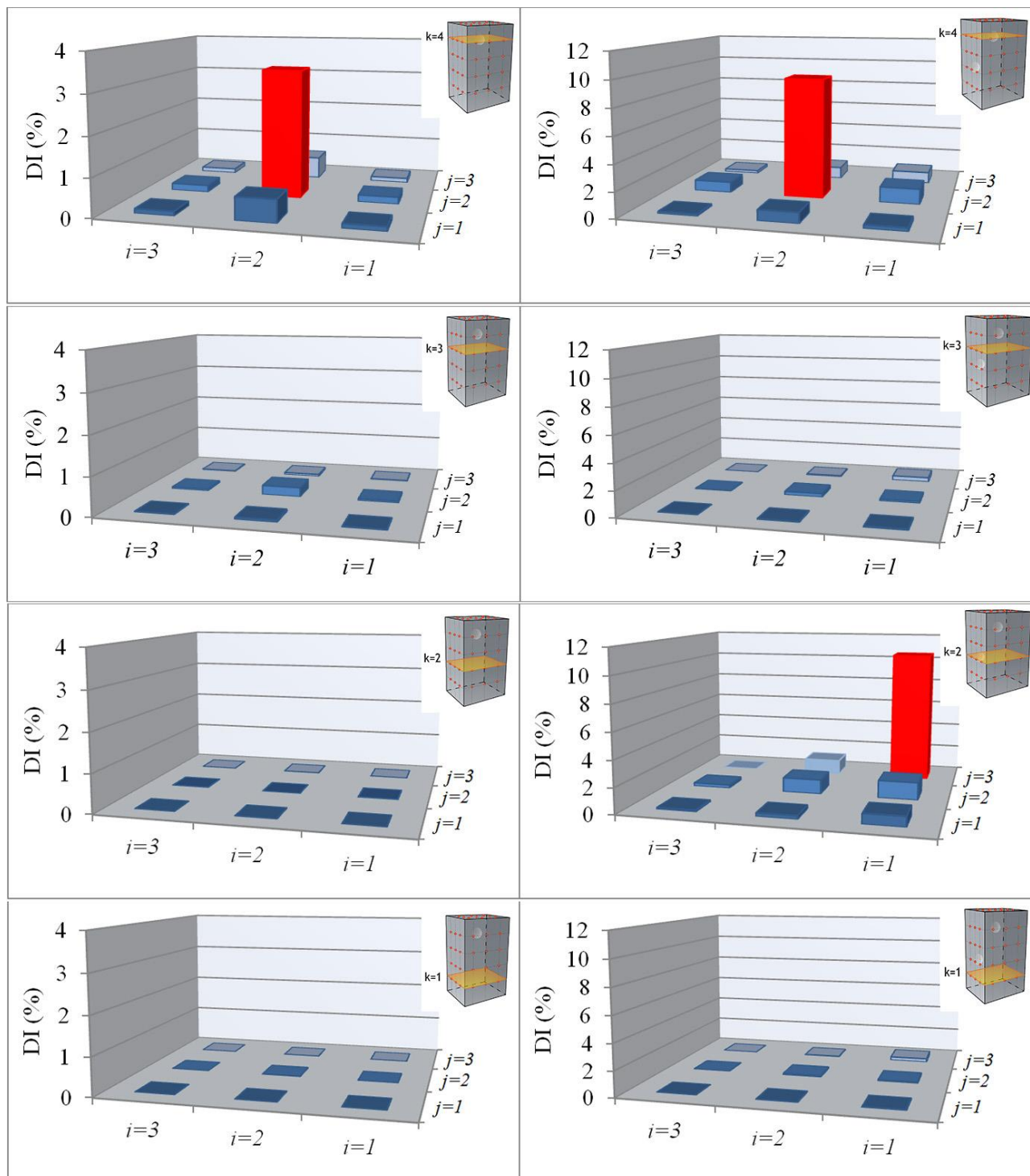
Uraĉena je numerička simulacija na 3D modelima u programu ABAQUS/EXPLICIT. Dimenzije modela, poloŹaj PZT A/S, broj PZT A/S, poloŹaj i veliĉina oštećenja prikazani su na Slici 91 i u Tabeli 19. Korišćeno je ukupno 66 razliĉitih poloŹaja PZT A/S. Za svaki poloŹaj aktuatora kreiran je jedan 3D model, izazvana je pobuda ultrazvuĉnog talasa kroz betonski model i oĉitan je vremenski izlazni signal senzora. Kao poĉetno (nulto) ĉitanje korišćeni su izlazni signali dobijeni u modelu MT1. Materijalni model betona, ulazni signal pobude aktuatora, modeliranje aktuatora

koristeći granične uslove pomeranja kao i ostale pojedinosti korišćene su na isti način kao u prethodnim Poglavljima doktorata i ovde neće biti detaljnije opisani.



Slika 91. Modeli MT1, MT2, MT3 i MT4

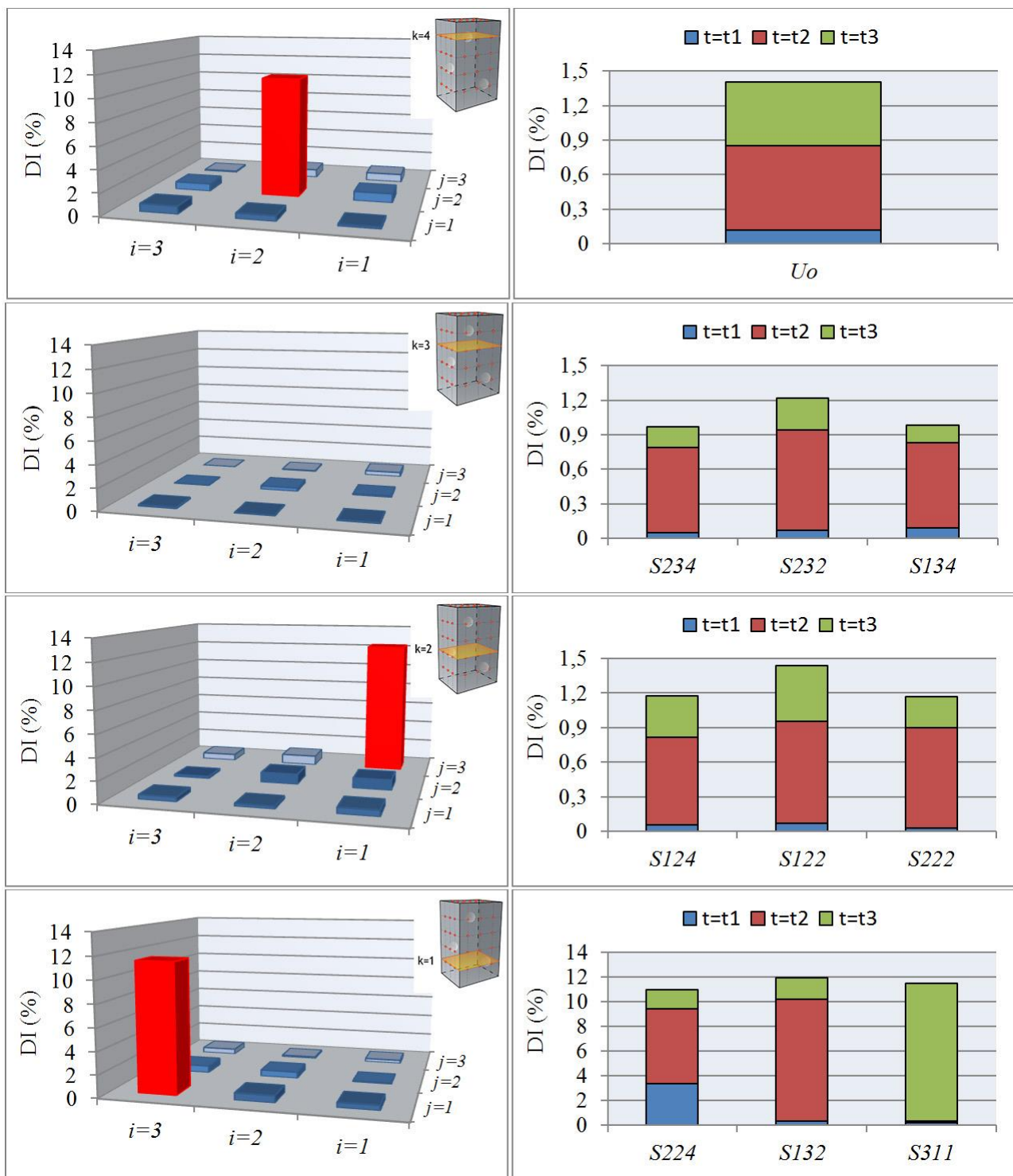
5.4.1. Rezultati i diskusija



Slika 92. Rezultati 3D DI: levo – Model MT2; desno – Model MT3

Na Slikama 92 i 93 prikazani su rezultati dobijeni numeričkim modeliranjem 3D betonskih modela i računanjem 3D DI za modele analizirane u različitim vremenskim trenucima. Dobijene vrednosti komponentata 3D indeksa oštećenja i ukupnog indeksa oštećenja prikazani su u Tabeli 20. Na Slici 92 sa leve strane prikazuju se rezultati dobijeni za model MT2 u vremenskom trenutku $t=t_1$, dok sa

desne strane prikazani su rezultati za model MT3 u vremenskom trenutku $t=t_2$. Kao što je već napomenuto, pri ovoj analizi pretpostavljeno je da na promenu prostiranja talasa a samim tim i izlaznog signala senzora utiče samo pojava oštećenja. Prikaz je urađen u odnosu na xy -ravan.



Slika 93. Rezultati 3D DI: levo – Model MT4; desno – ukupni indeks oštećenja i komponente 3D DI za pod-domene



Kao što se može videti (Slika 92 levo) u xy -ravni za vrednost $k=4$ i $i=j=2$ dobija se dominantna vrednost komponente 3D indeksa oštećenja za model MT2. Dominatna (najveća) vrednost dobijena je za prostorni pod-domen B_{224} u kome se nalazi oštećenje, dok su vrednosti za ostale prostorne pod-domene značajno manje. Vrednosti grafički prikazani na Slikama 92 i 93 prikazane su i u Tabeli 20 u odnosu na xy -ravan (vektori V_{zij}). Najveća komponenta 3D DI na osnovu koje se može zaključiti gde se oštećenje nalazi dobijena je u vektoru V_{z22} i ima vrednost $S_{224}=3.360\%$. Ukupni indeks oštećenja iznosi $U_o=0.120\%$. Na osnovu ovako definisanog pristupa procenjena veličina oštećenja je lopta poluprečnika $r=1.42cm$ (modelirana vrednost je $r=2.0cm$). Primenjeni pristup je samo orijentacioni, jer definisani ukupni indeks oštećenja svakako ne predstavlja odnos zapremina betonskog tela i oštećenja. Odstupanje koje se javlja u proceni veličine oštećenja kod modela MT2 je 40.84%.

Tabela 20. Vrednosti vektora 3D DI i ukupnog indeksa oštećenja – Modeli MP1 i MP2

MODEL MT1	MODEL MT2	MODEL MT3
Vrednost vektora (%)	Vrednost vektora (%)	Vrednost vektora (%)
$V_{z11}=\{0.217 \cdot 10^{-2}; 0.289 \cdot 10^{-2}; 0.189 \cdot 10^{-1}; 0.116\}$	$V_{z11}=\{0.045; 0.557; 0.093; 0.271\}$	$V_{z11}=\{0.444; 0.769; 0.093; 0.184\}$
$V_{z12}=\{0.396 \cdot 10^{-2}; 0.571 \cdot 10^{-2}; 0.479 \cdot 10^{-1}; 0.180\}$	$V_{z12}=\{0.101; 0.975; 0.147; 0.839\}$	$V_{z12}=\{0.117; 1.371; 0.144; 1.200\}$
$V_{z13}=\{0.217 \cdot 10^{-2}; 0.289 \cdot 10^{-2}; 0.189 \cdot 10^{-1}; 0.116\}$	$V_{z13}=\{0.262; \underline{10.49}; 0.346; 0.744\}$	$V_{z13}=\{0.299; \underline{12.24}; 0.404; 0.893\}$
$V_{z21}=\{0.476 \cdot 10^{-2}; 0.700 \cdot 10^{-2}; 0.542 \cdot 10^{-1}; 0.583\}$	$V_{z21}=\{0.029; 0.243; 0.071; 0.489\}$	$V_{z21}=\{0.625; 0.262; 0.061; 0.814\}$
$V_{z22}=\{0.154 \cdot 10^{-1}; 0.254 \cdot 10^{-1}; 0.243; \underline{3.360}\}$	$V_{z22}=\{0.129; 0.943; 0.277; \underline{9.400}\}$	$V_{z22}=\{0.577; 1.131; 0.323; \underline{10.97}\}$
$V_{z23}=\{0.476 \cdot 10^{-2}; 0.700 \cdot 10^{-2}; 0.542 \cdot 10^{-1}; 0.583\}$	$V_{z23}=\{0.043; 0.873; 0.087; 0.745\}$	$V_{z23}=\{0.149; 1.154; 0.093; 0.921\}$
$V_{z31}=\{0.217 \cdot 10^{-2}; 0.289 \cdot 10^{-2}; 0.189 \cdot 10^{-1}; 0.116\}$	$V_{z31}=\{0.013; 0.428; 0.032; 0.157\}$	$V_{z31}=\{\underline{11.49}; 0.128; 0.150; 0.721\}$
$V_{z32}=\{0.396 \cdot 10^{-2}; 0.571 \cdot 10^{-2}; 0.479 \cdot 10^{-1}; 0.180\}$	$V_{z32}=\{0.023; 0.213; 0.053; 0.701\}$	$V_{z32}=\{0.643; 0.255; 0.061; 0.864\}$
$V_{z33}=\{0.217 \cdot 10^{-2}; 0.289 \cdot 10^{-2}; 0.189 \cdot 10^{-1}; 0.116\}$	$V_{z33}=\{0.033; 0.587; 0.049; 0.186\}$	$V_{z33}=\{0.494; 0.704; 0.057; 0.224\}$
$U_o=0.120\%$	$U_o=0.853\%$	$U_o=1.408\%$

Na Slici 92 desno prikazani su rezultati dobijeni za model MT3. Modelom MT3 simulira se stanje u zamišljnom vremenskom trenutku $t=t_2$ u kome je nastalo još jedno oštećenje loptastog oblika u prostornom pod-domenu B_{132} . Kod ovog modela obzirom da ima dva oštećenja javljaju se dve dominantne vrednosti komponentata 3D indeksa oštećenja. Dominatne vrednosti javljaju se za pod-domene B_{224} ($S_{224}=9.400\%$) i B_{132} ($S_{132}=10.490\%$) i odmah se može uočiti značajno povećanje komponenti 3D DI u odnosu na prethodni model. Vektori 3D matrice za model MT3 u odnosu na xy -ravan prikazani su u Tabeli 20, kao i ukupni indeks oštećenja $U_o=0.853\%$. Procenjena veličina oštećenja koristeći ukupni indeks oštećenja su dve lopte poluprečnika $r=2.17cm$ (modelirana vrednost je $r=2.0cm$). Odstupanje koje se javlja u proceni veličine oštećenja kod modela MT3 je 7.83% što je značajno manje u odnosu na model MT2.



Rezultati 3D DI za model MT4 prikazani su na Slici 93 levo. Model MT4 je model sa tri loptasta oštećenja u zamišljnom vremenskom trenutku $t=t_3$. U pod-domenima B_{224} , B_{132} i B_{311} u kome se nalazi oštećenje javlja se i najveća komponenta 3D indeksa oštećenja koje imaju vrednost $S_{224}=10.970\%$, $S_{132}=12.240\%$, $S_{311}=11.490\%$. Može se videti da dominantne komponente nemaju značajna povećanja u odnosu na prethodni model ali su ostali pod-domeni u kojima se ne nalazi oštećenje javili izvesna povećanja. Ove vrednosti za pod-domene kod kojih se ne nalazi oštećenje su ipak značajno manji od vrednosti komponentata 3D DI u kojima je oštećenje što ne utiče na mogućnost pogrešnog odlučivanja pri analizi rezultata. U Tabeli 20 prikazuju se komponente 3D DI u odnosu na vektore V_{zij} . Ukupni indeks oštećenja za ovaj model je $U_o=1.408\%$. Procenjena veličina oštećenja na osnovu vrednosti U_o je jednaka loptama poluprečnika $r=2.24cm$ (modelirana vrednost je $r=2.0cm$). Odstupanja koja se javljaju u proceni veličine oštećenja kod modela MT4 je 10.71%. Za razliku od modela MT2 kod koga je procenjeno oštećenje značajno manje od modeliranog kod modela MT3 i MT4 procenjena oštećenja su nešto veća od modeliranog i značajno manje odstupaju.

Za sve analizirane modele (MT2, MT3 i MT4) maksimalne komponente 3D DI javljaju se u prostornim pod-domenima gde je modelirano oštećenje. Sa nastankom novog oštećenja dominantne vrednosti 3D DI u pod-domenima postojećih oštećenja zadržavaju ili povećavaju prethodno dobijene vrednosti, dok se u pod-domenima gde se javlja oštećenje javlja izraziti skok vrednosti. Na osnovu dobijenih rezultata primenom numeričkih simulacija može se zaključiti da se pomoći 3D indeksa oštećenja prikazanog u ovoj disertaciji može pratiti stanje oštećenja unutar betonskih konstrukcija. Kako bi ovaj pristup imao praktičnu primenu neophodno je uraditi eksperimentalna istraživanja najpre u laboratorijskim uslovima a zatim i u realnim uslovima kako bi se videli uticaji promene fizičko-mehaničkih karakteristika materijala kroz vreme, uticaj spoljašnjih uslova i drugog na vrednosti 3D DI. Na osnovu analize urađene u ovoj disertaciji može se zaključiti da primenjeni pristup ima potencijal za dalje istraživanje i analizu.

5.5. Lokalizacija oštećenja kod prostornih betonskih elemenata pomoću hibridnog pristupa

U ovom Poglavlju doktorske disertacije biće prikazana hibridna metoda za 3D lokalizaciju oštećenja kod prostornih betonskih elemenata konstrukcije. Hibridna metoda je razvijena za proizvoljni oblik betonskog tela i biće prikazana u daljem tekstu disertacije.

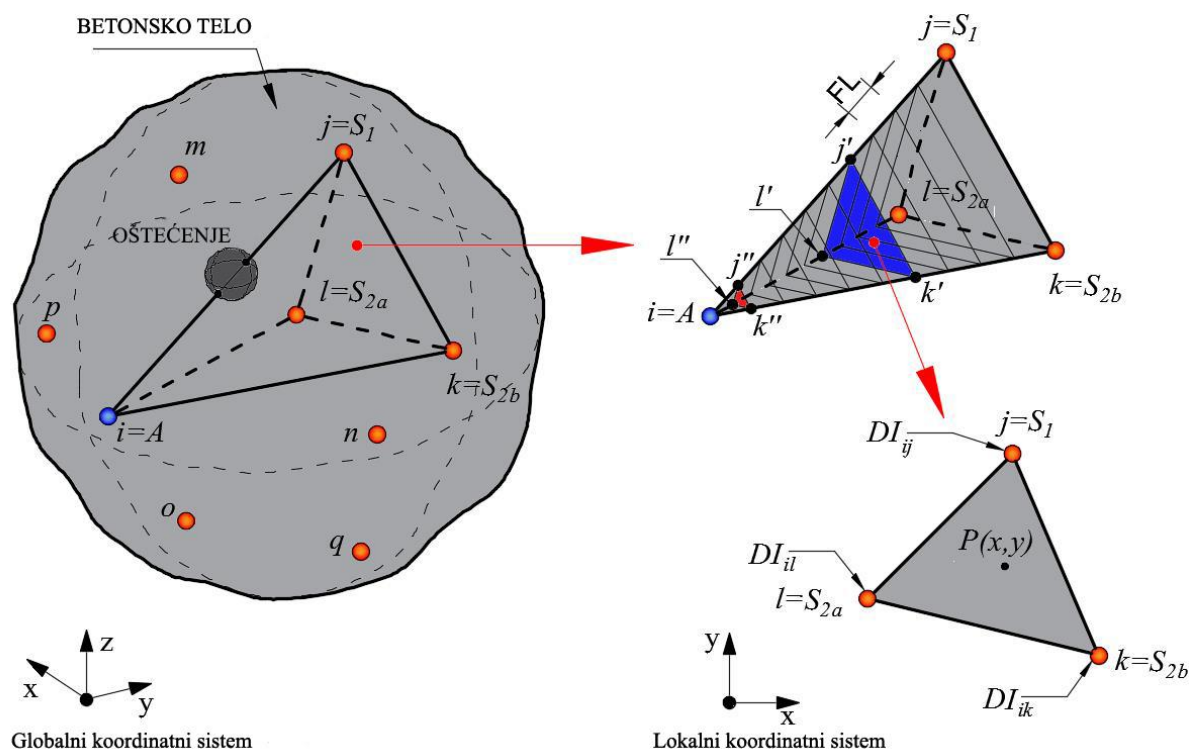
Za proizvoljno betonsko telo, proizvoljni položaj i broj PZT aktuatora/senzora kreirana je metoda za lokalizaciju oštećenja unutar ili na površini prostornog betonskog tela. Metoda koja će biti prikazana u ovom Poglavlju je proširena hibridna metoda za lokalizaciju oštećenja kod pločastih



betonskih elemenata koja je prikazana u ovoj disertaciji. Metoda se naziva hibridnom jer koristi više kriterijuma: energetski kriterijum, vreme prostiranja dolaznog talasa od aktuatora do senzora ili ToF kriterijum i diskretna wavelet transformacija signala. Energetski kriterijum je baziran na poređenju energije izlaznih signala senzora za neoštećenu i oštećenu konstrukciju u obliku 1D RMSD DI prikazanog u drugom Poglavlju ove disertacije. Kriterijum ToF je usvojen kao kriterijum kašnjenja dolaznog talasa između aktuatora i senzora usled pojave oštećenja na pravcu A/S. Treći kriterijum je diskretna wavelet transformacija signala senzora. Za ovaj kriterijum neophodno je da signali budu u vremenskom domenu, diskretni i sa jednakim brojem diskretnih talača. Kombinovanjem ova tri kriterijuma moguće je lokalizovanje oštećenja unutar prostornog betonskog elementa konstrukcije.

Posmatrajmo betonsko telo proizvoljnog oblika prikazano na Slici 94. Sa i, j, k, l, m, n, o, p i q obeleženi su PZT A/S raspoređeni proizvoljno po površini ili unutar betonskog elementa. Tamno sivom bojom obeleženo je oštećenje unutar betonskog elementa. U jednom vremenskom trenutku jedan PZT element aktivira se kao actuator (na Slici 94 PZT actuator i označen plavim kružićem) da izazove prostiranje talasa unutar betonskog tela. Ostali PZT elementi koriste se kao senzori da private dolazni talas. Izlazni signal senzora je naponski signal u vremenskom domenu. Prvo se primenjuje ToF kriterijum na svim očitanim signalima. Vrš se poređenje vremena putovanja talasa između odgovarajućih pravaca A/S za neoštećenu i oštećenu konstrukciju. Ako postoji kašnjenje dolaznog signala onda je ToF kriterijum ispunjen. Kod kriterijuma ToF uvedena je pretpostavka da na prostiranje talasa utiče samo pojava ili dalje prostiranje oštećenja, odnosno da do promene fizičko-mehaničkih, geometrijskih i drugih karakteristika betonskog elementa nije došlo i da su spoljašnji uslovi identični sa onima kada je meren neoštećeni betonski element. Za sve aktuator/senzor parove koji ispunjavaju ToF kriterijum računaju se 1D RMSD DI, dok za one koji ne ispunjavaju uslov usvaja se $DI=0$. Lociraju se oni senzori koji sa PZT aktuatorom i ispunjavaju uslov ToF. Prvo se izdvaja jedan A/S par koji je ispunio uslov ToF, na slici je to par $i-j$. Zatim se računa stanje oštećenja za položaj PZT aktuatora i pomoću sledeće procedure. PZT actuator A na položaju i , sensor $S1$ na položaju j pridodaju se još dva senzora $S2a$ (položaj l) i $S2b$ (položaj k) koji formiraju jednu trostranu piramidu. Bazu piramide čine senzori j, l i k a vrh piramide actuator i (Slika 94). Prostorna piramida je formirana kako bi se odredilo stanje oštećenja, odnosno uradila interpolacija DI unutar same piramide. Za pravce ij, il i ik poznate su vrednosti indeksa oštećenja. Posmatrani pravci se dalje dele na jednaki broj podela (konačnih dužina) kao što je prikazano na Slici 94. Tako se piramida $i-j-k-l$ deli u niz trouglova nakon čega se dalje piramida omrežava pomoću 3D konačnih elemenata. Za svaki pravac A/S kao što je već napomenuto poznata je

vrednost DI i pretpostavljeno je da je ona konstantna duž celog pravca. Obzirom da u čvoru i gde se nalazi PZT aktuator imamo u opštem slučaju tri različite vrednosti DI, kako bi se izbegao numerički diskontinuitet u ovom čvoru, formiraju se tri nove tačke j'' , l'' i k'' koje su tačke na pravcima ij , il i ik udaljene od čvora i za jednu konačnu dužinu. Tako je formirano telo $i-j''-l''-k''$ koje predstavlja numeričku „slepu zonu“, odnosno mali deo betonskog tela za koji se ne računaju vrednosti DI. Kada je podela pravca dovoljno mala ova slepa zona je zanemarljiva.



Slika 94. Hibridni pristup za 3D lokalizaciju oštećenja prostornog betonskog tela

Dalja procedura interpolacije DI vrši se za zarubljenu piramidu $j-l-k-j''-l''-k''$ i koncipirana je na nivou trouglova. Za izdvojeni trougao $j'-l'-k'$ (Slika 94) sa poznatim vrednostima DI u temenima trougla (teme j' ima vrednost DI_{ij} , teme l' ima vrednost DI_{il} i teme k' ima vrednost DI_{ik}). Interpolacija na nivou trougla je urađena poznatom linearnom interpolacijom koja se primenjuje u FEM analizi. Kada se pomenuta interpolacija primeni za sve trouglove unutar prostorne piramide onda su vrednosti DI određeni za sve čvorove unutar zarubljene piramide $j-l-k-j''-l''-k''$. Dalja procedura za A/S par ij se ponavlja za drugu kombinaciju dva senzora $S2a$ i $S2b$ sve dok se ne primene sve kombinacije senzora različitih od i i j . Nakon toga izdvaja se sledeći senzor koji sa aktuatorom i ispunjava uslov ToF i procedura interpolacije DI se ponavlja. Nakon toga, sledeći PZT element se aktivira kao aktuator i vrši se interpolacija DI za sve kombinacije A/S koji ispunjavaju ToF kriterijum, i tako za sve moguće položaje PZT aktuatora. Konačno, štampa se 3D



slika sa vrednostima DI u čvorovima koji su jednaki zbiru DI za sve kombinacije podeljeno sa brojem čitanja, odnosno srednjim vrednostima DI za čvorove mreže prostornog betonskog tela. Za prikazanu proceduru interpolacije DI i štampanje 3D slike lokalizacije oštećenja napisan je MATLAB program prikazan u Prilogu C.

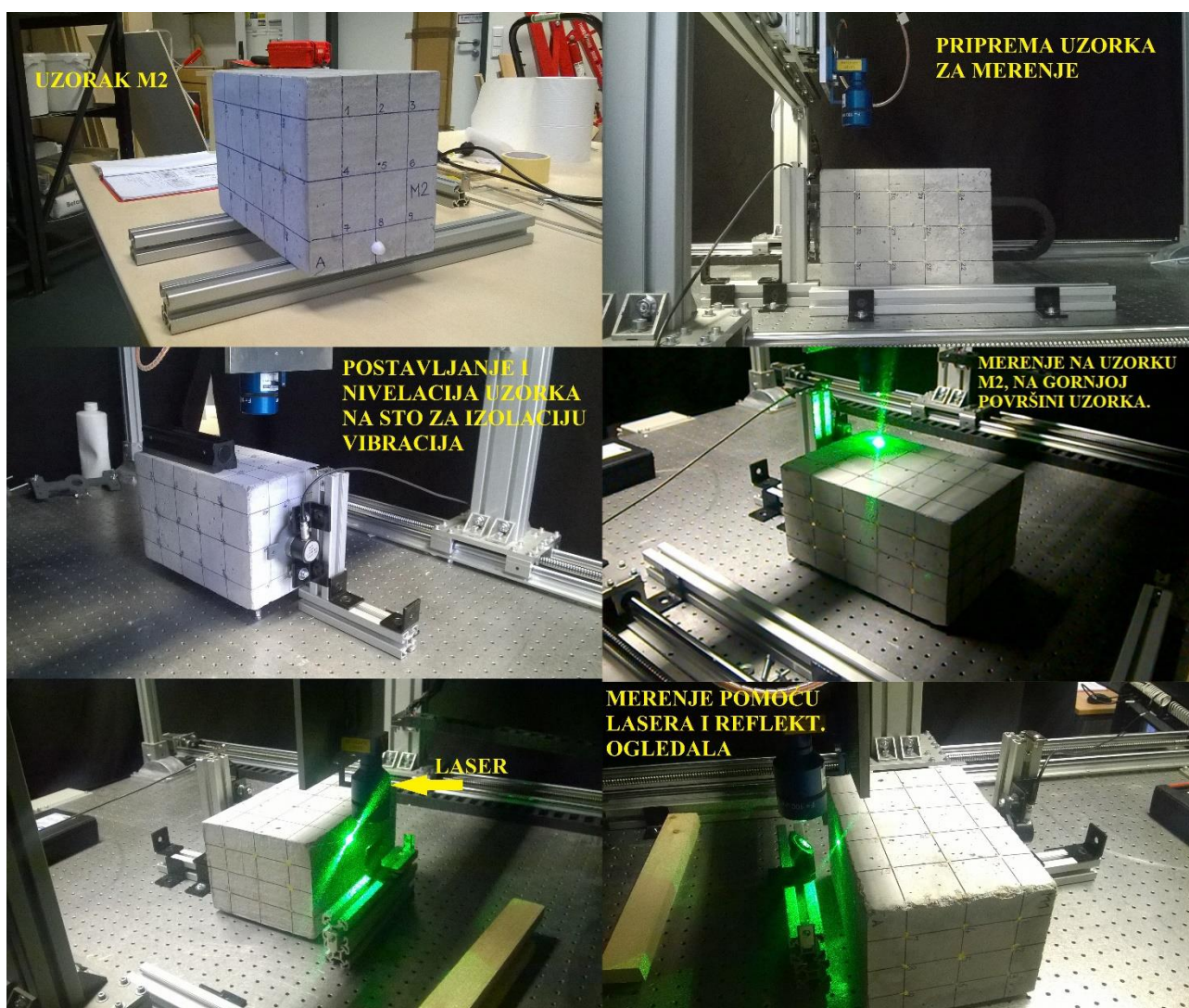
5.5.1. Eksperimentalna merenja

Prikazani hibridni algoritam je eksperimentalno testiran na prizmatičnim betonskih uzorcima dimenzija $16 \times 20 \times 30 \text{ cm}$ prikazani na Slikama 95 i 96. Napravljeno je ukupno četiri betonska uzorka od betona klase C25/30. Jedan uzorak je neoštećen dok ostala tri imaju oštećenja unutar samog uzorka. Korišćen je trofrakcijski beton sa frakcijama agregata $0-4 \text{ mm}$, $4-8 \text{ mm}$ i $8-16 \text{ mm}$, u sledećim odnosima: pesak 685 kg/m^3 , šljunak 1135 kg/m^3 , cement 405 kg/m^3 i voda 182 kg/m^3 . Sveža betonska masa je napravljena u laboratorijskim uslovima na temperaturi $22 \pm 2^\circ \text{C}$ i nalivena je u precizno pripremljenoj oplati. Unutrašnja strana oplata je nauljena zbog lakšeg odvajanja svežeg betona. Unutar oplata postavljeni su na unapred definisanim mestima prazne plastične lopte poluprečnika $r=2 \text{ cm}$ koje simuliraju oštećenje. One su pomoću tankih zica fiksirane za oplatu u tri ortogonalna pravca zbog osiguranja da će veštački formirano oštećenje zadržati položaj tokom izlivanja betona i očvršćavanja. Nakon 24h betonska masa uzorka je dovoljno očvrsla i uklanja se od oplata, nakon čega je uzorak postavljen u komoru sa vodom i vršena je nega betona 28 dana. Nakon 28 dana uzorci su izvađeni iz komore i ostavljeni da se suše prirodnim putem. Merenja su urađena nakon sušenja betona. Obzirom da su sva četiri uzorka istih geometrijskih karakteristika, samo je oštećenje unutar uzorka različito, postavljeni su markeri na osnovu kojih je moguće prepoznavanje uzoraka. Belim markerom je obeležen model M2, žutim model M3 i zelenim model M4, dok neoštećeni model M1 nema marker. Pomoću markera, osim raspoznavanja uzoraka, moguće je i geometrijsko orjentisanje položaja oštećenja, obzirom da je oštećenje nesimetrično u odnosu na glavne ose tela. Zapreminska težina uzoraka je određena merenjem težine sa tačnošću od $\pm 2 \text{ grama}$ i dobijene vrednosti prikazane su u Tabeli 5.6.

Tabela 21. Zapreminska težina eksperimentalnih uzoraka za 3D lokalizaciju

Naziv uzorka - SM_i	Težina - W_i (kg)	Zapreminska težina - ρ_i (kg/m^3)	Srednja vred. - ρ_{mean} (kg/m^3)	Odstupanje $\left \frac{\rho_i - \rho_{mean}}{\rho_i} \right \cdot 100(\%)$
Uzorak SM1	22.708	2365.428	2355.1	0.437
Uzorak SM2 – jedno oštećenje	22.637	2358.026		0.124
Uzorak SM3 – dva oštećenja	22.586	2352.674		0.099
Uzorak SM4 – tri oštećenja	22.505	2344.272		0.462

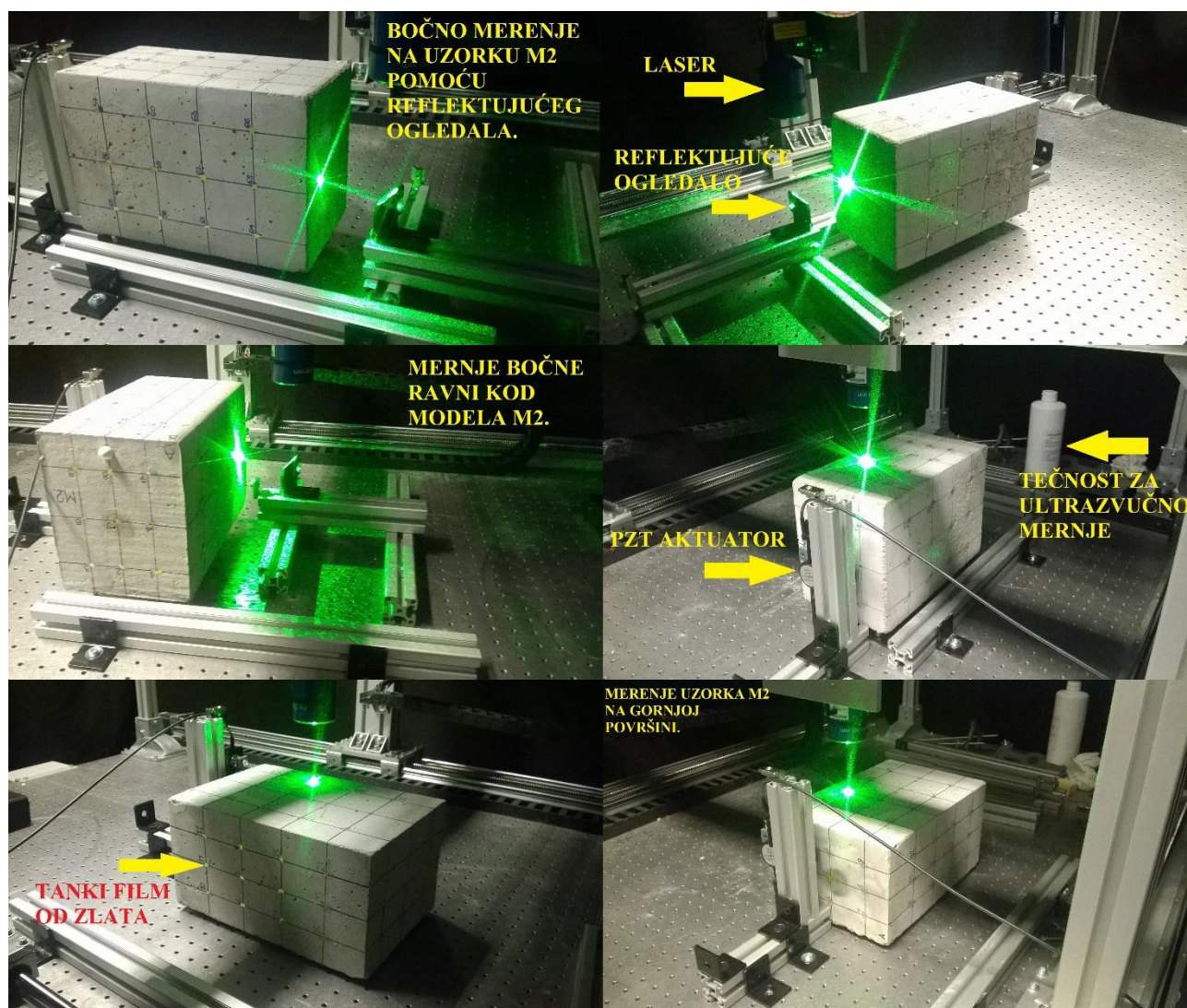
Eksperiment je urađen u laboratorijskim uslovima u Laboratoriji za Mehaniku Adaptivnih sistema, Ruhr Univerziteta u Bochumu, Nemačka. Primenjen je sličan koncept kao kod merenja pločastih betonskih uzoraka, korišćenjem lasera za skeniranje pomeranja i PZT aktuatora. Za pobudu prostiranja talasa po površini i unutar betonskog uzorka korišćen je piezoelektrični transducer S24 HB® (proizveden od Karl Deutsch) sa centralnom frekvencom od 100kHz. Input signal aktuatora je korišćen 3.5-cycle Hanning windowed tone burst. Talasna dužina $\lambda_w=3.58cm$ je tako izabrana da je manja od oštećenja (prečnik $R=4cm$) a veća od najvećeg agregata (prečnik $D=1.6cm$).



Slika 95. Priprema eksperimentalnog uzorka za merenje i merenje laserom

Za formiranje boljeg kontakta između aktuatora i betonskog uzorka naneta je tečnost za ultrazvučno merenje pre samog fiksiranja aktuatora za uzorak. Predviđeno je ukupno 66 različitih položaja

aktuatora i 66 položaja senzora. Fiksiranje PZT S24 HB aktuatora za betonski uzorak urađeno je korišćenjem pomoćne metalne konstrukcije kreirane u laboratoriji. Kao senzor korišćen je ultrazvučni laser BNT Quartet 500®, proizveden od Bossa Nova Technologies. Fino pozicioniranje ultrazvučnog lasera je omogućeno pomoću sistema za pozicioniranje razvijenog od strane osoblja laboratorije za Adaptivnu Mehaniku Univerziteta u Bohumu, Nemačka. Celokupna merna oprema sa uzorcima postavljena je na sto za izolovanje spoljašnjih vibracija - Newport M-RS200-46-8®. Betonski uzorak je izdignut od optičkog stola u tri tačke korišćenjem čeličnih zavrtnjeva.



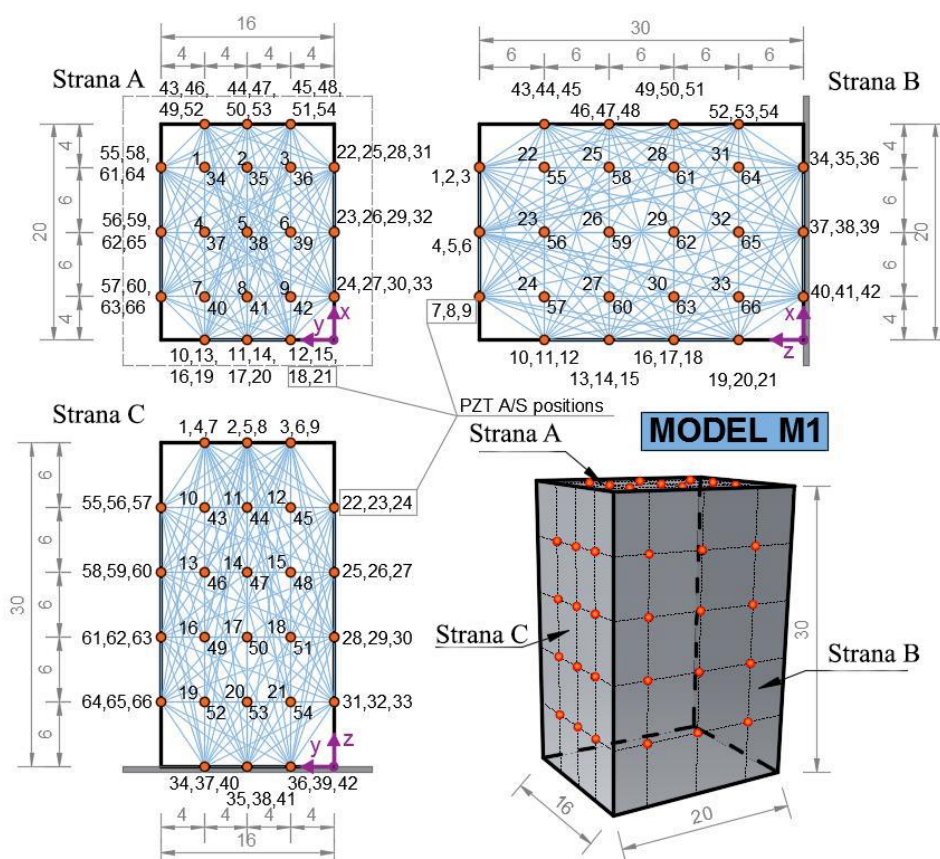
Slika 96. Eksperimentalna merenje na uzorku M2

Kako bi se merila pomeranja u horizontalnom pravcu korišćeno je visokoreflektujuće ogledalo. Položaj merenja je pokriven ultra tankim slojem zlata zbog veće osetljivosti lasera i konačno dobijanja izlaznog signala sa manje šumova. Za svaki položaj senzora izmereno je ukupno 100 izlaznih signala. Konačno, osrednjeni signal od svih merenih signala je korišćen kao izlazni signal

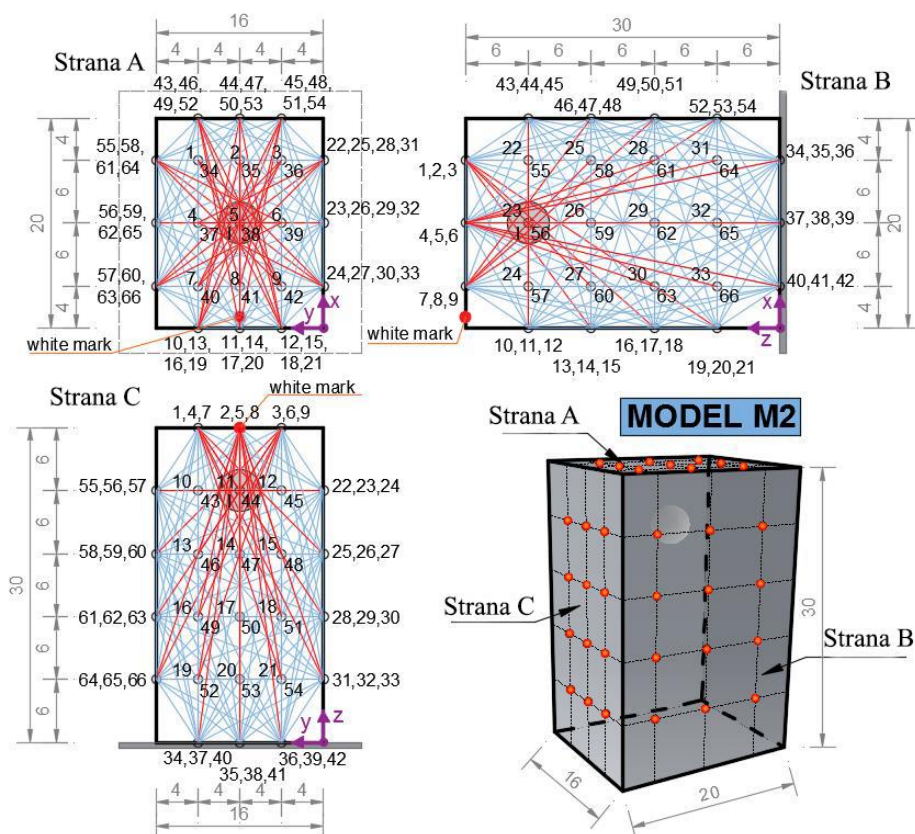
senzora, na taj način izbegnuti su slučajni pikovi izazvani spoljašnjim uticajem, greškom pri merenju ili drugim potencijalnim efektima.

5.5.2. Numerička simulacija

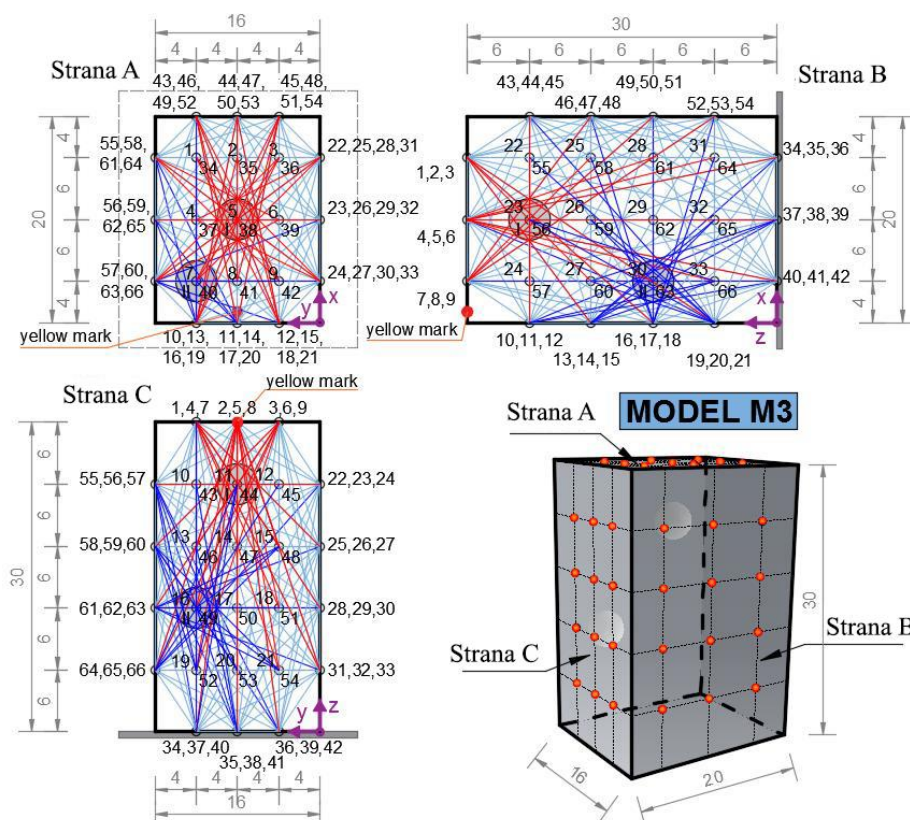
Urađena je numerička simulacija prostiranja talasa za modele prikazane na Slikama 97-100. Numeričko modeliranje je urađeno u potpunosti na identičan način kao kod 2D detekcije i lokalizacije oštećenja. Na Slikama 97-100 može se videti geometrija modela, položaj i broj PZT A/S. Na Slici 97 svetlo plavim linijama prikazani su svi mogući pravci A/S, dok su crvenim linijama izdvojeni samo oni pravci kod kojih je zadovoljen kriterijum ToF. Slično tome, na Slikama 99 i 100 crvenim, tamno plavim i zelenim linijama prikazani su pravci koji zadovoljavaju ToF kriterijum. Za pomenute pravce urađeni su numerički modeli i očitani su izlazni signali senzora u vremenskom domenu. Na osnovu izlaznih signala sračunati su 1D RMSD indeksi oštećenja koji služe kao ulazni parametri za formiranje prostornih slika oštećenja.



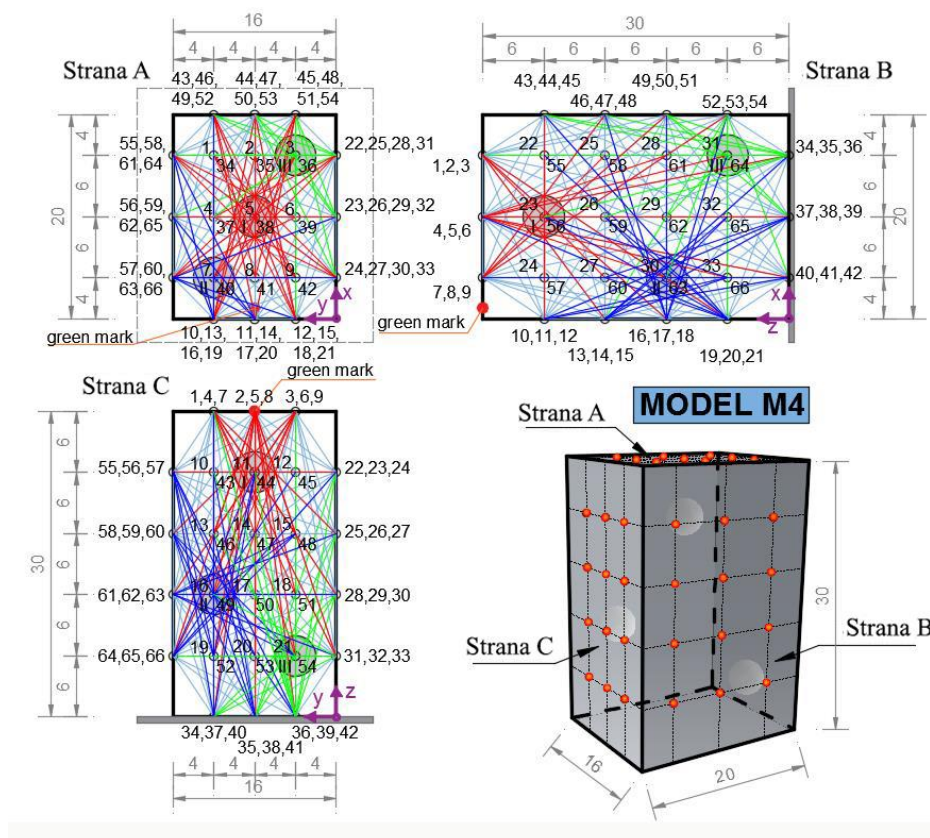
Slika 97. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M1



Slika 98. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M2



Slika 99. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M3



Slika 100. Geometrija, položaj i pravac A/S za model M4

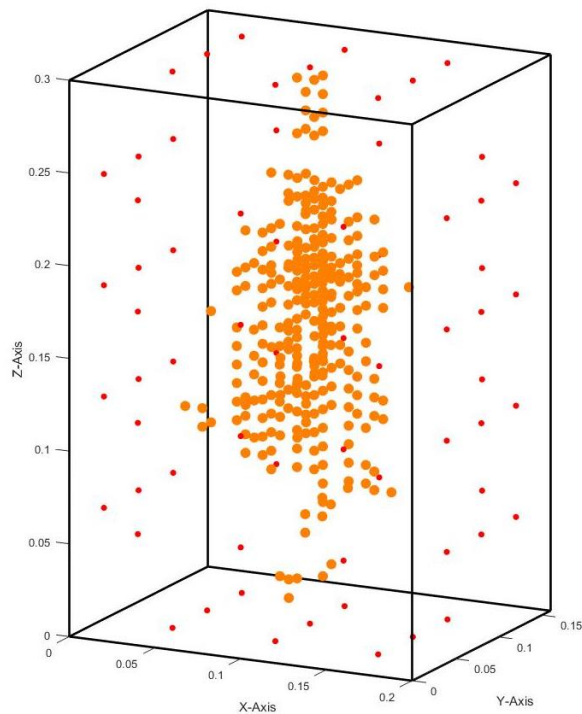
5.5.3. Rezultati i diskusija

Na Slici 101 prikazan je rezultat lokalizacije oštećenja za model M2. Crvene tačke označavaju položaj PZT A/S dok su naranđaste tačke prikazane u težištima konačnih elemenata kod kojih su maksimalne vrednosti osrednjenih indeksa oštećenja za opseg prikaza koji se posebno definiše pri štampi. Može se videti da grupisanje naranđastih tačaka zauzima centralni deo betonskog tela dok je položaj oštećenja u gornjoj trećini. Takođe, naranđaste tačke su dosta razučene po zapremini betonskog tela i teško je oceniti lokaciju oštećenja na osnovu dobijene slike. Za modele M3 i M4 dobijaju se slični rezultati.

Problem dobijanja preciznijih slika je u tome da je metoda izuzetno kompjuterski zahtevna, tako da proračunski na trenutno dostupnim kompjuterima može se proračun uspešno završiti samo za relativno grupu raspodelu prostornih trouglova. Ovo je jedan od problema prikazane metode koji se mora u budućim istraživanjima dodatno unaprediti. Može se zaključiti da na osnovu dobijenih analiza i slike metoda u trenutnoj fazi ne daje zadovoljavajuće rezultate na osnovu kojih je moguće lokalizovati oštećenje unutar prostornog betonskog tela, ali sa druge strane, metoda ima potencijal i



uz dodatno optimizovanje numeričkog rešenja može se doći do uspešnijih rezultata lokalizacije oštećenja.



Slika 101. 3D lokalizacija za model M2



6. ZAKLJUČAK

Rezime

Ova disertacija obuhvata istraživanja iz oblasti MK i NDI&P betonskih konstrukcija, posebno fokusirana na detekciju, lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja različitih tipova betonskih elemenata. U uvodnom delu istraživanja detaljno je prikazano trenutno stanje u nauci i motivacija za izradu ove disertacije. Istraživanja urađena od strane drugih, izložena su i podeljena u različite kategorije, kao što su: i) vrste MK metoda za detekciju oštećenja, ii) primena PZT PA u betonskim konstrukcijama, iii) detekcija linijskih betonskih konstrukcija, iv) metode za detekciju i lokalizaciju površinskih betonskih konstrukcija, v) metode za detekciju i lokalizaciju prostornih (masivnih) betonskih konstrukcija. Teorijska pozadina disertacije podeljena je u četiri dela: 1) piezoelektričnost i PZT aktuatori/senzori; 2) prostorna propagacija talasa kod krutog tela; 3) Eksplicitna metoda konačnih elemenata i 4) vejllet dekompozicija signala. Prikazane su osnovne osobine i konstitutivne jednačine PZT materijala od kojih se proizvode PZT aktuatori/senzori. Jednačine 3D propagacije talasa kod krutih tela prikazuju se u kratkom pregledu uvodnog dela. Prostorni talas se posmatra kroz njegove tri komponente: a) longitudinalna, b) transverzalno-horizontalna, i c) transverzalno-vertikalna komponenta. Kao poseban slučaj izvojena je Z-invarijanta 3D propagacije talasa, koja je specifična za primenu u monitoringu prostornih (masivnih) konstrukcija. Za modeliranje prostiranja talasa primenjena je eksplicitna MKE i osnovne jednačine su elaborirane u uvodnom delu. Takođe, ukratko se opisuje postupak brze diskretne vejllet dekompozicije signala i diskretne vejllet paket dekompozicije signala.

Piezoelektrični pametni agregati imaju široku primenu u monitoringu i detekciji oštećenja betonskih konstrukcija. Oni su multifunkcionalni aktuatori/senzori koji se primenjuju za različite namene u praćenju fizičko-mehaničkih osobina betonskih konstrukcija, detekciji oštećenja, praćenju nivoa vlažnosti betonskih elemenata, monitoringu ranih čvrstoća betona, merenju udarnih sila, monitoringu normalnih i smičućih napona usled seizmičkog dejstva, i monitoringu brzine prostiranja talasa kod ranih čvrstoća betona. U ovom istraživanju prikazan je detaljan pregled istraživanja upotrebe PZT PA u praćenju stanja betonskih konstrukcija.

Detekcija linijskih betonskih elemenata (greda) urađeno je putem 1D RMSD indeksa oštećenja. Numerička simulacija podeljena je u dva dela: 1) model PZT PA i 2) model propagacije talasa. Rezultati dobijeni eksperimentalnim merenjima korišćenjem PZT PA iskorišćeni su za verifikaciju primenjenih numeričkih modela. Analiza je sprovedena za različite modele sa različitim tipovima



oštećenja i dobijena su dobra poklapanja između numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Na osnovu toga, dalje je numeričkim putem urađena parametarska analiza propačuna 1D DI u zavisnosti od položaja i veličine oštećenja i položaja PZT A/S.

Novi hibridni metod razvijen je za potpuno nepravilni oblik betonskog elementa i proizvoljan broj i položaj PZT A/S. Putem numeričkih simulacija i eksperimentalnih analiza urađena su testiranja hibridnog pristupa na kvadratnim betonskih pločama sa različitim brojem i tipovima oštećenja. Dobijeni rezultati ukazuju na mogućnost primene hibridnog pristupa za lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja primenom hibridnog pristupa, posebno za oštećenja kružnog ili približno kružnog oblika. Pomenuti pristup primenjen je osim za kvadratne ploče sa kružnim oštećenjem i zarezima, i na materijalne defekte kao i nepravilni oblik betonskog elementa.

U posebnom Poglavlju obrađena je tema detekcije i lokalizacije oštećenja kod prostornih betonskih elemenata. Za detekciju oštećenja razvijen je novi 3D indeks oštećenja baziran na 1D RMSD indeksu oštećenja. Novi indeks oštećenja sračunat je korišćenjem numeričkih simulacija na modelima sa jednim ili više oštećenja. Na osnovu ovih istraživanja dobijeni su rezultati koji ukazuju na određeni potencijal primene ovog indeksa oštećenja u praćenju stanja betonskih masivnih konstrukcija. Ovaj indeks oštećenja pogodan je za praćenje razvoja oštećenja kroz vreme. Pored toga, novi hibridni metod lokalizacije oštećenja u prostoru baziran na dvodimenzionalnom hibridnom pristupu prikazanom u ovoj disertaciji upotrebljen je za lokalizaciju oštećenja. 3D hibridni metod lokalizacije oštećenja koristi ista tri kriterijuma kao i metod u 2D. Trenutno opisana metoda nije u stanju da lokalizuje oštećenje u preciznijoj meri i neophodno je dodatno razvijati metodu kako bi bila sposobna da odgovori na praktične zahteve lokalizacije oštećenja unutar prostornih betonskih elemenata.

Konačno, u zaključku se prvo sumira sadržaj doktorata, a zatim detaljno izlažu glavni zaključci izvedeni iz numeričkih i eksperimentalnih rezultata dobijenih ovim istraživanjem. Zaključci su podeljeni po glavnim oblastima: 1) Detekcija linijskih betonskih elemenata, 2) Detekcija i lokalizacija 2D betonskih elemenata, 3) Detekcija i lokalizacija 3D elemenata.

Nakon zaključka, priloženi su prilozi.



Zaključak

Monitoring betonskih konstrukcija na osnovu ultrazvučnog prostiranja talasa izazvanih piezoelektričnim aktuatorima ima veliki potencijal u praćenju stanja betonskih konstrukcija. U daljem tekstu sumiraju se glavni zaključci dobijeni na osnovu ovog istraživanja.

DEO I: Detekcija linijskih betonskih konstrukcija:

- i) Numerička simulacija detekcije oštećenja podeljena je u dva dela: 1) model PZT PA urađenog na osnovu standardne MKE primenom ABAQUS/STANDARD softvera, i 2) modeli propagacije ultrazvučnih talasa na osnovu eksplicitne MKE primenom ABAQUS/EXPLICIT softvera. Originalni način modeliranja primenjen u ovoj disertaciji verifikovan je na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih merenjem na betonskim gredama sa i bez oštećenja.
- ii) Na osnovu modela PZT PA dobijena je jasna linearna zavisnost između električnog napona i pomeranja upravno na PZT pločicu. Pomeranja su praćena u 5 kontrolnih tačaka, dok je električni napon nanošen u vrednosti od 10V do 100V sa korakom 10V. Za sve kontrolne tačke dobijena je linearna zavisnost.
- iii) Numeričkom simulacijom PZT PA dobijena je nelinearna promena deformacije po visini PA upravno na PZT pločicu. Pri ovoj analizi usvojena je pretpostavka da je deformacija PZT PA na njegovom kraju jednaka nuli.
- iv) Prilikom modeliranja propagacije talasa, umesto PZT PA aktuatora, urađeno je njegovo modeliranje primenom graničnog uslova pomeranja na površini približnoj površini PZT pločice. Umesto nelinearnog pomeranja dobijenog na osnovu PZT PA modela, primenjena je aproksimacija sa konstantnim intenzitetom pomeranja po celoj površini. PZT PA senzor je zamenjen praćenjem pomeranja u pravcu pružanja grede u čvoru na mestu PZT PA senzora.
- v) Modeliranje propagacije talasa urađeno je na osnovu eksplicitne MKE na modelima bez oštećenja, sa zarezom, rupom i materijalnim defektima (ispuna od gline i gipsa). Za sve modele očitani su izlazni signali senzora. Izlazni signali dobijeni numeričkim putem upoređeni su sa eksperimentalnim signalima. Na osnovu vizuelnog pregleda može se zaključiti da postoji veoma velika sličnost dobijenih signala. Takođe, upoređene su i



normalizovane amplitude za različite modele i dobijene vrednosti na osnovu numeričkih simulacija ne odstupaju u većoj meri od eksperimentalnih vrednosti.

- vi) Jednodimenzionalni RMSD indeks oštećenja do sada je primenjen u detekciji oštećenja kod različitih tipova betonskih konstrukcija, kao što su AB grede, stubovi, šipovi, prednapregnute betonske grede mostova, spregnute betonske grede i stubovi sa čeličnim elementima itd. Njegova upotreba je dokazana eksperimentalnim putem i korišćenjem numeričkih simulacija. Može se koristiti za detekciju nastanka oštećenja, ali i za dalju propagaciju oštećenja. Baziran je na praćenju promene energije izlaznog signala senzora, dobijene na osnovu vejevlet dekompozicije signala.
- vii) Vrednosti 1D RMSD DI dobijene na osnovu numeričkih modela upoređene su sa eksperimentalnim vrednostima. Kod modela MB i eksperimentalnih uzoraka SB1 i SB2 postoji gotovo potpuno poklapanje rezultata osim za veličinu zarez 25.4mm. Generalno kod ovog modela dobijene vrednosti u najvećoj meri prate eksperimentalne veličine dobijene na osnovu uzoraka SB2. Vrednosti indeksa oštećenja za model MC sa kružnim oštećenjem nalazi se između dveju eksperimentalnih vrednosti osim za vrednost prečnika 25.4mm i vrednosti prečnika rupe 63.5mm gde vrednost malo odstupa. Za modele sa materijalnim defektima, takođe, postoji dobro poklapanje rezultata. Generalno se može zaključiti na osnovu dobijenih vrednosti DI da primenjeni numerički pristup može simulirati jednodimenzionalnu detekciju oštećenja kod betonskih grednih elemenata.
- viii) Urađena je parametarska analiza promene 1D RMSD DI u zavisnosti od promene sledećih parametara: a) položaj oštećenja, b) veličina oštećenja, c) inklinacija oštećenja i d) položaj PZT PA aktuatora/senzora. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da promena položaja oštećenja između PZT PA A/S nema veliki uticaj na promenu vrednosti DI, kao i inklinacija oštećenja. Sa povećanjem oštećenja dolazi do očekivanog i jasnog povećanja vrednosti DI. Veoma zanimljiv podatak dobijen ovom parametarskom analizom je taj, da sa promenom položaja PZT SA A/S za istu veličinu oštećenja dolazi do značajnih promena u vrednosti DI.

DEO II: Detekcija i lokalizacija 2D betonskih konstrukcija:



- i) Pločasti betonski elementi analizirani su kroz numeričke simulacije i eksperimentalna merenja. Detekcija oštećenja urađena je na osnovu postojećeg 2D DI baziranog na energiji izlaznih signala senzora i vejevlet dekompoziciji signala. Za lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja razvijen je 2D hibridni metod koji koristi tri kriterijuma: 1) vreme prostiranja talasa, 2) vejevlet dekompoziciju signala, i 3) energije izlaznih signala senzora.
- ii) 2D DI sračunat je numeričkim putem za kvadratne ploče dimenzija 40x40cm za modele sa jednim ili dva oštećenja (oblika zereza i kružne rupe) i za 12, 16, i 20 položaja PZT aktuatora/senzora.
- iii) Rezultati 2D DI dobijeni na analiziranim modelima dovode do sledećih zaključaka. Za modele (M4, M5 i M6) sa jednim kružnim oštećenjem 2D DI je uz manja odstupanja detektovao oštećenje u pod-domenu gde se ono nalazi. Međutim, za modele (M7, M8 i M9) sa dva kružna oštećenja dolazi nešto većeg rasipanja rezultata. Pojedini pod-domeni imaju vrednosti koje nisu beznačajne i mogu dovesti do tumačenja da oštećenje kod njih postoji, što u realnosti nije slučaj. Obzirom da sa povećanjem broja oštećenja dolazi do većeg rasipanja rezultata očekivano je da sa daljim povećanjem broja oštećenja dolazi do još većeg rasipanja rezultata. Što se tiče modela (M10, M11 i M12) sa jednim zarezom, rezultati su nešto bolji od modela sa jednim kružnim oštećenjem, jer dominantne vrednosti se nalaze isključivo u pod-domenima gde postoji oštećenje. Ali ponovo za modele (M13, M14 i M15) sa dva zereza dolazi do većeg rasipanja rezultata. Uočeno je da za pravce PZT A/S kroz koje oštećenje prolazi ili je u neposrednoj blizini da za njih postoji najveća vrednost 1D DI i postaju „dominantni“ pravci. Zbog toga, za pod-domene u presečnim tačkama „dominantnih“ pravaca dolazi do grupisanja rezultata bez obzira da li u njima ima oštećenja. Ova osobina 2D DI je nepovoljna za detekciju oštećenja i neophodno je da se na neki način unapredi, što se može uraditi u budućim istraživanjima.
- iv) Za pomenute modele (M4-M15) sračunati su ukupni indeksi oštećenja. Na osnovu njihovih vrednosti moguće je generalno oceniti stanje oštećenosti betonske konstrukcije. Uočeno je da sa variranjem broja PZT A/S za isto stanje oštećenosti betonske konstrukcije dolazi do promene vrednosti ukupnog indeksa oštećenja. Uglavnom, sa povećanjem broja PZT A/S dolazi do smanjenja vrednosti ukupnog indeksa oštećenja.



Za modele sa jednim oštećenjem dobija se manji ukupni indeks oštećenja u odnosu na modele sa dva oštećenja što je očekivani rezultat i ukazuje da je moguće praćenje generalnog stanja oštećenosti nekog pločastog betonskog elementa.

- v) Dvodimenzionalna lokalizacija oštećenja urađena je na osnovu rezultata dobijenih numeričkim i eksperimentalnim putem. Hibridni pristup je razvijen za opšti oblik betonskog elementa i proizvoljni broj i raspored PZT A/S. Ovaj pristup zahteva nešto veći broj PZT A/S (za analizirane modele najmanje 6-8 PZT A/S) i sa povećanjem njihovog broja dobijaju se preciznije slike oštećenja.
- vi) Numerička simulacija propagacije talasa za 2D betonske modele urađena je na osnovu eksplicitne MKE u programu ABAQUS/EXPLICIT. Eksperimentalna merenja urađena su primenom piezoelektričnih aktuatora za pobudu konstrukcije i ultrazvučnog lasera kao senzora. Primena lasera pokazala se kao veoma uspešna u poređenju sa piezoelektričnim sensorima. Dobijeni izlazni signali imaju manje šumove i ujednačeniji odgovor. Rezultati slika oštećenja dobijeni numeričkim i eksperimentalnim putem gotovo da su identične što ukazuje na dobar numerički pristup.
- vii) Na osnovu dobijenih rezultata 2D lokalizacije oštećenja mogu se izneti sledeći zaključci. Za modele (M4-M6) i eksperimentalne uzorke (SP4-SP6) dobijene su slike oštećenja na osnovu hibridnog pristupa za 12, 16 i 20 PZT A/S. Modeli/Uzorci (M/SP) sa 12 PZT A/S uspešno su detektovali o lokalizovali oštećenje, ali oblik oštećenja u odnosu na realni oblik ima izvesna odstupanja. Kod istih M/SP sa povećanjem PZT A/S na 16 dolazi do gotovo potpunog poklapanja u obliku i veličini oštećenja sa realnim. Slični rezultati dobijaju se i za M/SP (M7-M9 i SP7-SP9) sa dva kružna oštećenja. Kod M/SP sa jednim zarezom slike oštećenja su dovoljno dobre u smislu detekcije i lokalizacije, međutim, kvantifikacija oštećenja je značajno lošija. Zona oštećenja je značajno veća u odnosu na realni oblik i dimenzije zareza. Sa povećanjem broja PZT A/S smanjuje se zona oštećenja ali ne dovoljno dobro da se može prići realnom obliku oštećenja. Kod M/SP sa dva zareza dobijaju se slični rezultati uz nešto veće rasipanje rezultata.
- viii) Hibridni pristup primenjen je i na M/SP sa materijalnim defektima. Dobijeni rezultati na osnovu numeričkih simulacija su gotovo identični sa eksperimentalnim rezultatima. Lokalizacija i kvantifikacija oštećenja je veoma dobra u odnosu na realni oblik i položaj oštećenja.



- ix) 2D lokalizacija oštećenja urađena je i za nepravilni oblik betonskog elementa. Dobijeni rezultati su nešto lošiji u odnosu na kvadratne ploče ali dovoljno dobri da se može zaključiti položaj oštećenja. Kvantifikacija oštećenja u ovim situacijama sa primenjenom metodom nije uspešno urađena.
- x) Konačno, može se zaključiti da prikazani hibridni pristup u ovoj disertaciji može veoma uspešno da lokalizuje i kvantifikuje oštećenja kružnog oblika dok ima poteškoća sa kvantifikovanjem oštećenja oblika zareza. Ovom metodom moguće je lokalizovati i kvantifikovati veći broj oštećenja i sa povećanjem broja PZT A/S unapređuje se slika oštećenja i postaje bliža realnoj slici.

DEO III: Detekcija i lokalizacija 3D betonskih konstrukcija:

- i) 3D detekcija i lokalizacija oštećenja urađena je na osnovu 3D DI baziranog na energiji izlaznih signala senzora i hibridnom metodom koja predstavlja proširenu hibridnu 2D metodu za lokalizovanje oštećenja.
- ii) 3D DI je razvijen za opšti oblik betonskog elementa i proizvoljni broj PZT A/S. Definisana je putem trodimenzionalnih matrica. Osim, njega za generalnu ocenu oštećenosti masivnog betonskog elementa razvijen je i ukupni indeks oštećenja.
- iii) Na osnovu numeričkih simulacija sračunati su 3D DI za dva različita betonska tela, sa jednim ili dva oštećenja i različitim položajem oštećenja. Kod modela sa jednim loptastim oštećenjem (MP1, MP2 i MP3) detekcija oštećenja na nivou 3D pod-domena je gotovo idealna, odnosno, dominantna vrednost komponente DI je u pod-domenu gde se nalazi oštećenje. Međutim, kod modela MP4, sa dva loptasta oštećenja, dolazi do izvesnog rasipanja rezultata, slično 2D DI. Obzirom, da je 3D DI u suštini prošireni 2D DI na tri dimenzije, očekivano je da ima slične probleme u detekciji oštećenja kao i izvorni indeks oštećenja. Ukupni indeks oštećenja ima očekivane vrednosti i raste sa povećanjem oštećenosti konstrukcije.
- iv) 3D DI se može koristiti za praćenje stanja konstrukcije kroz vreme. Za te potrebe urađene su numeričke simulacije na modelima dimenzija 16x20x30cm. Urađena su ukupno četiri modela: 1) model bez oštećenja, 2) model sa jednim loptastim oštećenjem, 3) model sa dva loptasta oštećenja i 4) model sa tri loptasta oštećenja. Modeli predstavljaju simulaciju pojave i daljeg nastanka oštećenja kroz vreme. Dobijeni



rezultati pokazuju da je moguće pratiti stanje konstrukcije kroz vreme, jer za sve modele dominantna vrednost komponenata 3D DI nalazi se u pod-domenu gde se nalazi oštećenje. Osim toga, ukupni indeks oštećenja sa povećanjem oštećenja konstrukcije raste i njegove vrednosti su sledeće: $U_o=0.12\%$ za model sa jednim oštećenjem, $U_o=0.853\%$ za model sa dva i $U_o=1.408\%$ za model sa tri oštećenja.

- v) Lokalizacija oštećenja u 3D urađena je na osnovu proširene hibridne metode i moguća je za opšti oblik betonskog elementa i proizvoljni broj PZT A/S.
- vi) Metoda koja je prikazana u ovoj disertaciji je kompjuterski izuzetno zahtevna i može se sračunati samo za grubu podelu prostornih trouglova. Zbog toga rezultati koji se dobijaju su sa velikim rasipanjem. Neophodno je dodatno raditi na optimizaciji i razvoju ove metode kako bi bila efikasnija i kompjuterski manje zahtevna.

Glavni doprinosi ovog istraživanja su metode za detekciju, lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja kod pločastih i prostornih betonskih konstrukcija. Metoda za detekciju, lokalizaciju i kvantifikaciju oštećenja kod pločastih betonskih elemenata a koja je originalno razvijena tokom ovog istraživanja može poslužiti kako u praktičnoj primeni za praćenje i monitoring realnih konstrukcija tako i za širu naučnu zajednicu u daljem razvoju i unapređenju metoda monitoringa betonskih konstrukcija. Pored toga, originalni numerički modeli i postupci modeliranja koji su prvi put primenjeni u ovom istraživanju a koji su rešili određene praktične probleme mogu se dalje koristiti u sličnim istraživanjima. Metode prikazane u ovom istraživanju imaju potencijal praktične primene u monitoringu realnih betonskih konstrukcija.

Buduća istraživanja svakako treba da budu u skladu sa aktuelnim trendovima iz oblasti MK i da pokušaju da daju odgovore na otvorena pitanja kako iz naučne oblasti iz koje je ova disertacija tako i za praktične potrebe.

Iz Dela I doktorske disertacije nema puno prostora za buduća istraživanja. Ona se mogu kretati u kreiranju detaljnijih i realističnijih modela PZT PA, modeliranju propagacije talasa i oštećenja u odnosu na modele prikazane u ovoj disertaciji. Do sada, iz oblasti detekcije linijskih betonskih elemenata urađena su opsežna pre svega eksperimentalna istraživanja i dokazana je realna praktična primena PZT PA u detekciji oštećenja kod različitih linijskih betonskih elemenata. Međutim, numeričke simulacije su manje zastupljene i tu postoji prostor za buduća istraživanja. Implementacija piezoelektričnog konačnog elementa u eksplicitnoj metodi konačnih elemenata



može biti od velikog značaja u numeričkom modeliranju PZT PA aktuatora/senzora. Kreiranjem ovakvog konačnog elementa izbegla bi se primena standardne i ekspliktine MKE koja je rađena u ovoj disertaciji i kreirali bi se realističniji numerički modeli.

Deo II se sastoji iz detekcije i lokalizacije 2D betonskih elemenata. 2D lokalizacija oštećenja je u velikoj meri već iscrpljena različitim metodama testiranim na čeličnim ili kompozitnim pločama. Metode zadnjih godina unapređuju se u smislu sofisticiranosti, pouzdanosti, tačnosti i primenjuju različite pristupe kao što su: 1) Veštačka inteligencija, 2) Genetski algoritmi, 3) Fazi logika (Fuzzy logic). Dalja istraživanja mogu se kretati u primeni novih pristupa u lokalizaciji oštećenja kod betonskih pločastih konstrukcija. Kreiranje metoda koje mogu detektovati oštećenje bez početnog čitanja, tako da mogu biti primenjene i na postojećim konstrukcijama. Obzirom da 2D DI ima jasne nedostatke u detekciji većeg broja oštećenja, što je prikazano u Poglavlju 5, buduća istraživanja mogu podrazumevati i modifikaciju ovog indeksa. Modifikacija se može uraditi kombinovanjem 2D DI sa hibridnim pristupom za lokalizaciju oštećenja. Na osnovu hibridnog pristupa moguće je definisati težinske koeficijente sa kojima se mogu modifikovati vrednosti 2D DI za pod-domena i na taj način izbeći grupisanje vrednosti u pod-domenima gde nema oštećenja.

Deo III se sastoji iz 3D detekcije i lokalizacije oštećenja. 3D DI definisan u ovoj doktorskoj disertaciji pruža mogućnost detekcije oštećenja kod masivnih betonskih elemenata. Međutim, slično pločastim betonskim elementima, 3D DI ima nedostatak grupisanja značajnih vrednosti njegovih komponenta u pod-domenima gde ne postoji oštećenje. Posebno to dolazi do izražaja kada element ima veći broj značajnih oštećenja. Ovakvi rezultati mogu ukazati na postojanje oštećenja pri tumačenju rezultata što nije pogodno. Zbog toga, buduća istraživanja mogu se kretati u kombinaciji 3D DI sa hibridnim pristupom za 3D lokalizaciju oštećenja po sličnom principu kao za 2D betonske elemente.

3D lokalizacija oštećenja ima najviše prostora za buduća istraživanja. Trenutno, gotovo da ne postoje metode koje mogu da kreiraju realne slike oštećenja u tri dimenzije. Buduća istraživanja svakako mogu se kretati u unapređenju prikazane hibridne metode novim kriterijumima na osnovu kojih se mogu dobiti verodostojnije slike oštećenja. Osim toga, unapređenje prikazane metode za dobijanje preciznijih slika oštećenja je svakako jedan od budućih istraživanja.

Trenutno u disertaciji korišćeni su MATLAB kodovi i numerički modeli koji su nezavisni. Budućim istraživanjima može se napraviti direktna veza između MATLAB kodova i numeričkih modela napravljenih u ABAQUS-u, čime će se značajno automatizovati ceo proces koji se sastoji od kreiranja numeričkih modela, izbacivanja rezultata, analizi izlaznih signala, unosu ulaznih podataka



u matlab kodove i kreiranju izlaznih slika. Takođe, buduća istraživanja moraju se kretati ka kreiranju MK metoda koje mogu detektovati, lokalizovati i kvantifikovati oštećenje u realnom vremenu, pratiti njegova dalja kretanja kroz vreme, komunicirati sa centralnom bazom podataka, skupljati dovoljno pouzdane i jasne podatke na osnovu kojih se mogu donositi dalje odluke. Rezultati dobijeni MK metodama moraju biti od koristi za procenu stanja konstrukcije, analizu pouzdanosti, analizu nosivosti i upotrebljivosti. Bez toga, MK je koristan ali nije dovoljan, i buduća istraživanja trebalo bi da se kreću u tom smeru.



REFERENCE

- [1] Boller C., Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Edited by Christian Boller, Fu-Kuo Chang and Yozo Fujino, Wiley, 2009, ISBN: 978-0-470-05822-0.
- [2] Adams D., Health Monitoring of Structural Materials and Components, Wiley, 2007, ISBN 9780470033135.
- [3] Balageas D., Fritzen C.P., Guemes A., Structural Health Monitoring, Wiley, 2006, ISBN: 978-1-905-20901-9.
- [4] Zhao X., Gao H., Zhang G., Ayhan B., Yan F., Kwan C., and Rose J.L., Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring, Smart Materials and Structures, 2007, vol. 16, pp. 1208-1217.
- [5] Giurgiutiu V., Zagrai A., and Bao J.J. Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring, Structural Health Monitoring, 2002, vol. 1(1), pp. 41-61.
- [6] Ihn J.B. and Chang F.K., Pitch-catch Active Sensing Methods in Structural Health Monitoring for Aircraft Structures, 2008, vol. 7(1), pp. 5-15.
- [7] Paget C.A., Active Health Monitoring of Aerospace Composite Structures by Embedded Piezoceramic Transducers, PhD thesis, Department of Aeronautics Royal Institute of Technology, 2001 Stockholm, Sweden.
- [8] Chang P.C., Flatau A., and Liu S.C., Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure, Structural Health Monitoring, 2003, vol. 2(3), pp. 257-267.
- [9] Hunt V., Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Highway Bridges, PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering and Computer Science of the College of Engineering, University of Cincinnati, 2000, Cincinnati, USA.
- [10] Ansari F., Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, Springer, 2005, ISBN 1-4020-3660-4.



- [11] Qin L., Development and Application of Cement-based Piezoelectric Composite in Concrete Behavior Monitoring, PhD thesis, Hong Kong University of Science and Technology, 2008, Hong Kong, China.
- [12] Sun M., Staszewski W.J., and Swamy R.N., Smart Sensing Technologies for Structural Health Monitoring of Civil Engineering Structures, *Advances in Civil engineering*, Hindawi, 2010, vol. 2010, ID 724962, 13 pp.
- [13] Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., and Shevitz D.W., Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, *The Shock and Vibration Digest*, 1996, United States, doi:10.2172/249299.
- [14] Sinou J.J., A Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in the Measurement of Linear and Non-linear Vibrations, *Mechanical vibrations: Measurement, Effects and Control*, Editor Sapri R.C., 2009, pp. 643-702.
- [15] Perez I., DiUlio M., Maley S., and Phan N., Structural Health Management in the NAVY, *Structural Health Monitoring*, 2010, vol. 9(3), pp. 199-207.
- [16] Nugroho W.H., Purnomo N.J.H., and Soedarto T., An experimental work on wireless structural health monitoring system applying on a submarine model scale, 8th International Conference on Physics and its Applications (ICOPIA), *Journal of Physics: Conference Series* 776, 2016, doi:10.1088/1742-6596/776/1/012094.
- [17] Farrar C., Park G., Angel M., Bement M., and Salvino L., Structural Health Monitoring for Ship Structures, 7th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, 2009.
- [18] Stepinski T., Uhl T., Staszewski W., *Advanced Structural Damage Detection – From Theory to Engineering Applications*, Wiley, West Sussex, United Kingdom, 2013, ISBN 978-1-118-42298-4.
- [19] Farrar C.R., Worden K., *An Introduction to Structural Health Monitoring, New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring*, Editors: Deraemaeker A., Worden K., Springer, New York, 2010, ISBN 978-3-7091-0398-2.
- [20] Hassoun M.N., Al-Manaseer A., *Structural Concrete – Theory and Design*, Wiley, New Jersey, USA, 2008, ISBN: 978-0-470-17094-6.



- [21] Yao Y., Tung S.T.E., Glišić B., Crack detection and characterization techniques – An overview, *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, vol. 21, pp.1387-1413, DOI: 10.1002/stc.1655.
- [22] Sabnavis G., Kirk R.G., Kasarda M., Quinn D., Cracked shaft detection and diagnostics: a literature review, *The Shock and Vibration Digest*, 2004, vol. 36(4), pp.287-296.
- [23] Mal A., Ricci F., Banerjee S., and Shih F., A Conceptual Structural Health Monitoring System based on Vibration and Wave Propagation, *Structural Health Monitoring*, 2005, vol. 4(3), 0283-11.
- [24] Esmaeel R., Briand J., and Taheri F., Computational simulation and experimental verification of a new vibration-based structural health monitoring approach using piezoelectric sensors, *Structural Health Monitoring*, 2011, vol. 0(0), pp. 1-14.
- [25] Deng F., Liu Y., Zhuge X., and Huang J., Progress on the Research of Ultrasonic Guided Wave Structural Health Monitoring in the Changing Ambient, *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, vol. 52(18), pp. 1-7.
- [26] Giurgiutiu, Predictive simulation of guided-wave structural health monitoring, *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 2017, Portland, Oregon, United States.
- [27] Shiveley S., Douglass A., Posch B., and Harley J., Guided wave structural health monitoring with large data sets, *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, September 2016, Tours, France, doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728712.
- [28] Filho J.V., Baptista F.G., and Inman D.J., Time-domain analysis of piezoelectric impedance-based structural health monitoring using multilevel wavelet decomposition, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, vol. 25, pp. 1550-1558.
- [29] An K.Y., and Sohn H., Integrated impedance and guided wave based damage detection, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 28, pp. 50-62.
- [30] Lavrentyev A.I., Stucky P.A., and Veronesi W.A., Feasibility of ultrasonic and eddy current methods for measurement of residual stress in shot peened metals, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, American Institute of Physics, 2000, doi:10.1063/1.1306227.



- [31] Azari H., Nazarian S., and Yuan D., Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 71, pp. 384-391.
- [32] Kee S.H., and Zhu J., Using air-coupled sensors to determine the depth of a surface-breaking crack in concrete, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, vol. 123(3), 1279-87.
- [33] Liu Z., and Ziehl P.H., Evaluation of Reinforced Concrete Beam Specimens with Acoustic Emission and Cyclic Load Test Methods, *ACI Structural Journal*, 2009, vol. 106(3), pp. 12.
- [34] Milovanović B., and Pečur I.B., Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete, *Journal of Imaging*, vol. 2(11), doi:10.3390/jimaging2020011.
- [35] Chen ZQ., and Hutchinson T.C., Image-Based Framework for Concrete Surface Crack Monitoring and Quantification, *Advances in Civil Engineering*, 2010, vol. 2010, pp.18, doi:10.1155/2010/215295.
- [36] Costa D.D., Valenca J., Julio E., and Araujo H., Crack propagation monitoring using an image deformation approach, *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, e1973, doi:10.1002/stc.1973.
- [37] Reagan D., Sabato A., and Niezrecki C., Feasibility of using Digital Image Correlation for Unmanned Aerial Vehicle Structural Health Monitoring of Bridges, *Structural Health Monitoring*, 2017, vol. 17(5), pp. 1056-1072.
- [38] Abidin I.Z., Tian G.Y., Wilson J., Yang S., and Almond D., Quantitative evaluation of angular defects by pulsed eddy current thermography, *NDT&E International*, 2010, vol. 43, pp. 537-546.
- [39] Carino N.J., Impact Echo: The Fundamentals, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, 15-17 September, 2015, Berlin, Germany.
- [40] Aggelis D., Shiotani T., Momoki S., and Hiramasa A., Acoustic Emission and Ultrasonic for Damage Characterization of Concrete Elements, *ACI Materials Journal*, 2009, vol. 106(6), pp. 6.
- [41] Sirca G.F., and Adeli H., Infrared Thermography for Detection Defects in Concrete Structures, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2018, vol. 24(7), pp. 508-515.



- [42] Mitra M., and Gopalakrishnan S., Guided wave based structural health monitoring: A review, *Smart Materials and Structures*, 2016, vol. 25, 053001, 27pp.
- [43] Ming N.G., and Sharif K.Z., Guided Wave Based Damage Detection in a Composite Plate with an Opening, *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 774, pp 638-643.
- [44] Ochoa P., Groves R.M., and Benedictus R., Systematic multiparameter design methodology for an ultrasonic health monitoring system for full-scale composite aircraft primary structures, *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, vol. e2340, pp. 1-23, doi:10.1002/stc.2340.
- [45] Mei H., Heider M.F., Joseph R., Migot A., and Giurgiutiu V., Recent Advances in Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring Applications, *Sensors*, 2019, vol. 19, pp383, doi:10.3390/s19020383.
- [46] Qiu J., Li F., Abbas S., and Zhu Y., A baseline-free damage detection approach based on distance compensation of guided waves, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 0(0), pp. 1-17, doi:10.1177/1461348418813699.
- [47] Park C.Y., Palazotto A.N., Hale C.S., and Jung H.K., Internal longitudinal damage detection in steel beam using Lamb waves: Simulation and test study, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, 2017, vol. 0(0), pp. 1-12, doi:10.1177/1045389X17708046.
- [48] Du C., Zou D., Liu T., and Lv H., An exploratory experimental and 3D numerical investigation on the effect of porosity on wave propagation in cement paste, *Measurement*, 2018, vol. 122, pp. 611-619.
- [49] Shen W., Li D., and Ou J., Numerical simulation of guided wave propagation in reinforced concrete structures with debond damage, *Proc. SPIE 10599, Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure and Transportation XII*, March 2019, doi:10.1117/12.2296766.
- [50] Zima B., Guided Wave Propagation in Detection of Partial Circumferential Debonding in Concrete Structures, *Sensors*, 2019, vol. 19, pp. 2199, doi:10.3390/s19092199.
- [51] Balamonica K., Saravanan T.J., Priya C.B., and Gopalakrishnan N., Piezoelectric sensor-based damage progression in concrete through serial/parallel multi-sensing technique, *Structural Health Monitoring*, 2019, pp. 1-18, doi:10.1177/1475921719845153.



- [52] Saravanan T.J., Balamonica K., Priya C.B., Gopalakrichnan N., and Murthy S.G.N., Piezoelectric EMI-Based Monitoring of Early Strength Gain in Concrete and Damage Detection in Structural Components, *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, vol. 23(4), 04017029-1.
- [53] Zhang H., Hou S., and Ou J., SA-based concrete seismic monitoring: The influence of non-uniform stress fields, *Engineering Structures*, 2019, vol. 190, pp. 66-75.
- [54] Kong Q., Robert R.H., Silva P., and Mo Y.L., Cyclic Crack Monitoring of a Reinforced Concrete Column under Simulated Pseudo-Dynamic Loading Using Piezoelectric-Based Smart Aggregates, *Applied Science*, 2016, vol. 6, 341, doi:10.3390/app6110341.
- [55] Zhang J., Li Y., Du G., and Song G., Damage Detection of L-Shaped Concrete Filled Steel Tube (L-CFST) Columns under Cyclic Loading Using Embedded Piezoelectric Transducers, *Sensors*, 2018, vol. 18, 2171, doi:10.3390/s18072171.
- [56] Hou S., Zhang H., Han X., and Ou J., Damage monitoring of the RC frame shaking table test and comparison with FEM results, *Procedia Engineering*, 2017, vol. 210, pp. 393-400.
- [57] Xu K., Deng Q., Cai L., Ho S., and Song G., Damage Detection of a Concrete Column Subjected to Blast Loads Using Embedded Piezoelectric Transducers, *Sensors*, 2018, vol. 18, 1377, doi:10.3390/s18051377.
- [58] Jing T., Hong Y., Zheng J., Weng L., and Gu H., Crack Detection of FRP-Reinforced Concrete Beam Using Embedded Piezoelectric Smart Aggregates, *Sensors*, 2019, vol. 19, 1979, doi:10.3390/s19091979.
- [59] Zhou L., Zheng Y., Song G., Chen D., and Ye Y., Identification of the structural damage mechanism of BFRP bars reinforced concrete beams using smart transducers based on time reversal method, *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 220, pp. 615-627.
- [60] Wang Z., Wei L., and Cao M., Damage Quantification with Embedded Piezoelectric Aggregates Based on Wavelet Packet Energy Analysis, *Sensors*, 2019, vol. 19, 425, doi:10.3390/s19020425.
- [61] Providakis C.P., Tsitrakis S.E., and Evangelos V.L., 2-D Statistical Damage Detection of Concrete Structures Combining Smart Piezoelectric Materials and Scanning Laser Doppler Vibrometry, *SDHM – Structural Durability and Health Monitoring*, 2018, vol. 12 (4), pp. 257-279.



- [62] Negi P., Chhabra R., Kaur N., and Bhalla S., Health monitoring of reinforced concrete structures under impact using multiple piezo-based configurations, *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 222, pp. 371-389.
- [63] Gao W., Li H., and Ho S.C.M., A Novel Embeddable Tubular Piezoceramics-Based Smart Aggregate for Damage Detection in Two-Dimensional Concrete Structures, *Sensors*, 2019, vol. 19, 1501, doi:10.3390/s19071501.
- [64] Muller A., Soutis C., and Gresil M., Image reconstruction and characterisation of defects in a carbon fibre/epoxy composite monitored with guided waves, *Smart Materials and Structures*, 2019, vol. 28, 065001, doi:10.1088/1361-665X/ab1359.
- [65] Gao W., Huo L., Li H., and Song G., An embedded tubular PZT transducers based damage imaging method for two-dimensional concrete structures, *IEEE*, 2018, vol. 6, pp. 30100-30109, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843788.
- [66] Kijanka P., and Urban M.W., Local Phase Velocity Based Imaging: A New Technique Used for Ultrasonic Shear Wave Elastography, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2019, vol. 38 (4), pp. 894-908.
- [67] Ren Y., Qiu L., Yuan S., and Bao Q., On-line Multi-Damage Scanning Spatial-Wavenumber Filter Based Imaging Method for Aircraft Composite Structure, *Materials*, 2017, vol. 10, 519, doi: 10.3390/ma10050519.
- [68] Liu B., Liu T., Lin Y., and Zhao J., An Aircraft Pallet Damage Monitoring Method Based on Damage Subarea Identification and Probability-Based Diagnostic Imaging, *Journal of Advanced Transportation*, 2019, vol. 2019, ID 2568736, 12 pp., doi:10.1155/2019/2568736.
- [69] Wang W., Bao Y., Zhou W., and Li H., Sparse representation for Lamb-wave-based damage detection using a dictionary algorithm, *Ultrasonics*, 2018, vol. 87, pp. 48-58.
- [70] Moll J., Marchi L.D., Kexel C., and Marzani A., High Resolution Defect Imaging in Guided Waves Inspections by Dispersion Compensation and Nonlinear Data Fusion, *Acta Acustica*, 2017, vol. 103, pp. 941-949, doi: 10.3813/AAA.919123.



- [71] Azuara G., Barrera E., Ruiz M., and Bekas D., Damage Detection and Characterisation in Composite using a Geometric Modification of the RAPID Algorithm, *IEEE Sensors Journal*, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.29050748.
- [72] Ebrahimkhanlou A., Dubuc B., and Salamone S., A generalizable deep learning framework for localization and characterizing acoustic emission sources in riveted metallic, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 130, pp. 248-272.
- [73] Huang L., Zeng L., and Lin J., Baseline-free damage detection in composite plates based on the reciprocity principle, *Smart Materials and Structures*, 2018, vol. 27, 015026, 11pp., doi: 10.1088/1361-665X/aa9cc1.
- [74] Park B., Sohn H., and Liu P., Accelerated noncontact laser ultrasonic scanning for damage detection using combined binary search and compressed sensing, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 92, pp. 315-333.
- [75] Zhang Y., Larose E., Moreau L., and Ozouville G., Three-dimensional in-situ imaging of cracks in concrete using diffuse ultrasonic, *Structural Health Monitoring*, 2017, vol. 17(2), pp. 279-284, doi: 10.177/1475921717690938.
- [76] Narayanan A., Kocherla A., and Subramaniam K.V.L., PZT sensor array for local and distributed measurements of localized cracking in concrete, *Smart Materials and Structures*, 2018, vol. 27, 075049, doi: 10.1088/1361-665X/aaca4d.
- [77] Zhou X.P., Zhang X.Q., The 3D numerical simulation of damage localization of rocks using General Particle Dynamics, *Engineering Geology*, 2017, vo. 224, pp. 29-42.
- [78] Ballas R.G. 2007 *Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators – Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensors Integration*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg.
- [79] Bathe K. J. 1996 *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [80] Achenbach J.D. 1984 *Wave propagation in elastic solids*, North Holland, ISBN 9780720403251.
- [81] Rose J. L. 2004 *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press.



- [82] Watanabe K. and Murakami H. 2013 Waves in a rotating elastic solid, *Acta Mechanica*, vol. 224, issue 12, pp 3021-3036.
- [83] Giurgiutiu V. 2014 *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, Academic Press, pp. 199-292.
- [84] Joo D.J. 2012 *Damage Detection and System Identification using a Wavelet Energy Based Approach*, PhD dissertation, Columbia University, USA.
- [85] Mallat S. 1999 *A Wavelet Tour of Signal Processing – second edition*, Academic Press, ISBN: 9780124666061.
- [86] Mulkern M., Choi C. (2007) *Smart Aggregates Containing Piezoceramics: Fabrication and Applications, NSF-REU Program Smart Aggregates Report – August 2, 2007.*
- [87] Lu Y., Li Z. and Liao W.I. (2011) Damage monitoring of reinforced concrete frames under seismic loading using cement-based piezoelectric sensor, *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 1273-1285.
- [88] Hou S., Zhang H.B. and Ou J.P. (2013) A PZT-based smart aggregate for seismic shear stress monitoring, *Smart Materials and Structures*, vol. 22, 065012 (9pp).
- [89] Liu T., Zou D., Du C. And Wang Y. (2017) Influence of axial loads on the health monitoring of concrete structures using embedded piezoelectric transducers, *Structural Health Monitoring*, vol. 16(2), pp. 202-214.
- [90] Chalioris C., Karayannis C.G. Angeli G.M., Papadopoulos A., Favvata M.J. and Providakis C.P. (2016) Applications of smart piezoelectric materials in a wireless admittance monitoring system (WiAMS) to Structures – Tests in RC elements, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 5, pp.1-18.
- [91] Mo Y.L., Song G., Moslehy Y., Gu H., Sanders D.H. and Belarbi D.J. (2011) Damage Detection of Reinforced Concrete Columns Subjected to Combined Actions, *NEESR Payload, Annual Report 2010-2011*, University of Houston.
- [92] Dumoulin C., Karaiskos G. and Deraemaeker A. (2013) Monitoring of crack propagation in reinforced concrete beams using embedded piezoelectric transducers, *VIII International Conference*



on *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – FraMCoS-8*, 10-14 March 2013, Toledo, Spain.

[93] Jinsong Z., Change G. and Likun H. (2012) Piezoelectric-based Crack Detection Techniques of Concrete Structures: Experimental Study, *Wuhan Univ. Technol. – Mat. Sci. Edit.*, vol. 27:346, <https://doi.org/10.1007/s11595-012-0464-9>

[94] Zhao X., Li H., Du D. And Wang J., (2008) Concrete Structure Monitoring Based on Built-in Piezoelectric ceramics Transducers, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems – Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 6932*, March 2008.

[95] Song G., Gu H., Mo Y.L., Hsu T.T.C. and Dhonde H. (2007) Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramics transducers, *Smart Materials and Structures*, vol. 16(4), pp. 959-968, doi:10.1088/0964-1726/16/4/003

[96] Yan S., Sun W., Song G., Gu H., Huo L.S., Liu B. and Zhang Y.G. (2009) Health monitoring of reinforced concrete shear walls using smart aggregates, *Smart Materials and Structures*, vol. 18, 047001 (6pp), doi:10.1088/0964-1726/18/4/047001

[97] Laskar A., Gu H., Mo Y.L. and Song G. (2009) Progressive collapse of a two-story reinforced concrete frame with embedded smart aggregates, *Smart Materials and Structures*, vol. 18, 075001 (10pp) doi:10.1088/0964-1726/18/7/075001

[98] Howser R., Moslehy Y., Gu H., Dhonde H., Mo Y.L., Ayoub A. And Song G. (2011) Smart-aggregate-based damage detection of fiber-reinforced-polymer-strengthened columns under reversed cyclic loading, *Smart Materials and Structures*, vol.20, 075014, (9pp), doi:10.1088/0964-1726/20/7/075014

[99] Moslehy Y., Gu H., Belarbi A., Mo Y.L. and Song G. (2010) Smart aggregates based damage detection of circular RC columns under cyclic combined loading, *Smart Materials and Structures*, vol. 19, 065021, (12pp), doi:10.1088/0964-1726/19/6/065021

[100] Gu H., Moslehy Y., Sanders D., Song G. And Mo Y.L. (2010) Multi-functional smart aggregate-based structural health monitoring of circular reinforced concrete columns subjected to



seismic excitations, *Smart Materials and Structures*, vol. 19, 065026, (7pp), doi:10.1088/0964-1726/19/6/065026

[101] Liao W.I., Wang J.X., Song G., Gu H., Olmi C., Mo Y.L., Chang K.C. and Loh C.H. (2011) Structural health monitoring of concrete columns subjected to seismic excitations using piezoceramic-based sensors, *Smart Materials and Structures*, vol. 20, 125015, (10pp), doi:10.1088/0964-1726/20/12/125015

[102] Wang R.L., Gu H., Mo Y.L. and Song G. (2013) Proof-of-concept experimental study of damage detection of concrete piles using embedded piezoceramic transducers, *Smart Materials and Structures*, vol.22, 042001, (4pp), doi:10.1088/0964-1726/22/4/042001

[103] Song G., Gu H. and Mo Y.L. (2008) Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures – a tutorial and a review, *Smart Materials and Structures*, vol. 17, 033001, (17pp), doi:10.1088/0964-1726/17/3/033001

[104] Liu T., Huang Y., Zou D., Teng J. And Li B. (2013) Exploratory study on water seepage monitoring of concrete structures using piezoelectric based smart aggregates, *Smart Materials and Structures*, vol.22, 065002, (8pp) doi:10.1088/0964-1726/22/6/065002

[105] Dumoulin C., Karaiskos G., Carette J., Staquet S. And Deraemaeker A., (2012) Monitoring of the ultrasonic P-wave velocity in early-age concrete with embedded piezoelectric transducers, *Smart Materials and Structures*, vol. 21, 047001, (4pp), doi:10.1088/0964-1726/21/4/047001

[106] Xu B., Zhang T., Song G. And Gu H., (2013) Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol 36(1), pp.7-17, doi:10.1016/j.ymssp.2011.07.029

[107] Hou S., Zhang H.B. and Ou J.P. (2012) A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring, *Smart Materials and Structures*, vol. 21, 105035, (9pp), doi:10.1088/0964-1726/21/1/105035

[108] Okafor A. C., Chandrashekhara K. and Jiang Y. P. (1996) Delamination prediction in composite beams with built-in piezoelectric devices using modal analysis and neural network, *Smart Materials and Structures*, vol. 5(3), 338,



- [109] Koo K. Y., Park S., Lee J. J. and Yun C. B. (2009) Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 367-377.
- [110] Providakis C.P., Liarakos E.V. and Kampianakis E. (2013) Nondestructive Wireless Monitoring of Early-Age Concrete Strength Gain Using an Innovative Electromechanical Impedance Sensing System, *Smart Materials Research*, vol. 2013, 932568, 10 pp.
- [111] Bhalla S. and Soh C.K. (2004) High frequency piezoelectric signatures for diagnosis of seismic/blast induced structural damages, *NDT&E International*, vol. 37 (1), pp. 23-33.
- [112] Park S., Ahmad S., Yun C.B. and Roh Y. (2006) Multiple Crack Detection of Concrete Structures Using Impedance-based Structural Health Monitoring Techniques, *Experimental Mechanics*, vol. 46, pp. 609-618.
- [113] Yang Y., Hu Y. and Lu Y. (2008) Sensitivity of PZT Impedance Sensors for Damage Detection of Concrete Structures, vol. 8, pp. 327-346.
- [114] Yang Y. and Divsholi B.S. (2010) Sub-Frequency Interval Approach in Electromechanical Impedance Technique for Concrete Structure Health Monitoring, *Sensors*, vol. 10, pp.11644-11661.
- [115] Ihn J.B. and Chang F.K. (2008) Pitch-catch Active Sensing Methods in Structural Health Monitoring for Aircraft Structures, *Structural Health Monitoring*, vol. 7(1), pp.5-19.
- [116] Giurgiutiu V. (2010) Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors – predictive modeling and simulation, *INCAS Bulletin*, vol. 2(3), pp. 31-44.
- [117] Park H.W., Kim S.B. and Sohn H. (2009) Understanding a time reversal process in Lamb wave propagation, *Wave motion*, vol. 46(7), pp. 451-467.
- [118] Hu B., Kundu T., Grill W., Liu B. and Toufigh V. (2013) Embedded Piezoelectric Sensors for Health Monitoring of Concrete Structures, *ACI Materials Journal*, vol. 110(2), pp. 149-158.
- [119] Tian Z, Huo L, Gao W, Li H, Song G. Modeling of the attenuation of stress waves in concrete based on the Rayleigh damping model using time-reversal and PZT transducers. *Smart Mater Struct.* 2017;26(10):105030.
- [120] Clough RW, Penzien J, Griffin DS. *Dynamics of Structures*. New York: McGraw-Hill; 1975.



- [121] Wang B, Wang X, Hua L, Li J, Xiang Q. Mean grain size detection of DP590 steel plate using a corrected method with electromechanical acoustic resonance. *Ultrasonics*. 2017;76:208-216.
- [122] Sun H, Zhu J. Monitoring early age properties of cementitious materials using ultrasonic guided waves in embedded rebar. *J Nondestruct Eval*. 2016;36:5.
- [123] Rose JL, Nagy PB. Ultrasonic waves in solid media. *J Acoust Soc Am*. 2000;107(4):1807 - 1808.
- [124] Moreno-Garcia P, Lopes H, Araujo dos Santos JV. Application of higher order finite differences to damage localization in laminated composite plates. *Compos Struct*. 2016;156:385-392.
- [125] Ende S, Lammering R. Modeling and simulation of Lamb wave generation with piezoelectric plates. *Mech Adv Mater Struct*. 2009;16(3):188-197.
- [126] Moll J, Golub MV, Glushkov E, Glushkova N, Fritzen CP. Non-axisymmetric Lamb wave excitation by piezoelectric wafer active sensors. *Sens Actuators A Phys*. 2012;174:173-180.
- [127] Barouni AK, Saravanos DA. A layerwise semi-analytical method for modeling guided wave propagation in laminated composite infinite plates with induced surface excitation. *Wave Motion*. 2017;68:56-77.
- [128] Jing J, Quek ST, Quan W. Wave boundary element to study Lamb wave propagation in plates. *J Sound Vib*. 2005;288:195-213.
- [129] Yamawaki H, Saito T. Numerical calculation of surface waves using new nodal equations. *Nondestruct Test Eval*. 1992;8-9(1-6):379-389.
- [130] Giurgiutiu V, Shen Y. Combined analytical FEM approach for efficient simulation of lamb wave damage detection. *Ultrasonics*. 2016;69:116-128.
- [131] Delsando PP, Scalerandi M. A spring model for the simulation of the propagation of ultrasonic pulses through imperfect contacts interfaces. *J Acoust Soc Am*. 1998;104(5):2584-2591.
- [132] Gao L, Liu KX, Liu Y. A meshless method for stress-wave propagation in anisotropic and cracked media. *Int J Eng Sci*. 2007;45(2-8):601-616.



-
- [133] Lee BC, Staszewski WJ. Lamb wave propagation modelling for damage detection: I. Two-dimensional analysis. *Smart Mater Struct.* 2007;16(2):249-259.
- [134] Shen Y, Cesnik CES. Hybrid local FEM/global LISA modeling of damped guided wave propagation in complex composite structures. *Smart Mater Struct.* 2016;25(9):095021.
- [135] Peng H, Meng G, Li F. Modeling of wave propagation in plate structures using three-dimensional spectral element method for damage detection. *J Sound Vib.* 2009;320(4-5):942-954.
- [136] Ham S, Bathe KJ. A finite element method enriched for wave propagation problems. *Comput Struct.* 2012;94-95:1-12.
- [137] Song F, Huang GL, Kim JH, Haran S. On the study of surface wave propagation in concrete structures using a piezoelectric actuator/sensor system. *Smart Mater Struct.* 2008;17(5):055024.
- [138] Marković N, Nestorović T, Stojić D. Numerical modeling of damage detection in concrete beams using piezoelectric patches. *Mech Res Commun.* 2015;64:15-22.
- [139] Stojić D, Nestorović T, Marković N, Cvetković R, Stojić N. Detection of damage to reinforced-concrete structures using piezoelectric smart aggregates. *Građevinar.* 2016;68- 5:371-380.
- [140] Noh G, Bathe KJ. An explicit time integration scheme for the analysis of wave propagation. *Comput Struct.* 2013;129:178-193.



PRILOG A

Izrazi koji su priloženi u ovom delu disertacije čine dopunu teorijske podloge ovog istraživanja. Za simbole i izraze kojima nedostaje značenje i za opširnije upoznavanje sa ovom oblašću potrebno je videti [83].

Efekat aktuatora d_{31} , d_{33} i d_{15} pri konstantnoj temperature opisan je sledećim jednačinama:

$$\begin{aligned} S_1 = S_x &= s_{11}^E \sigma_1 + d_{31} E \\ S_2 = S_y &= s_{11}^E \sigma_2 + d_{31} E \end{aligned} \quad \text{Transverzalni efekat aktuatora} \quad (122)$$

$$S_3 = S_z = s_{33}^E T_3 + d_{33} E \quad \text{Longitudinalni efekat aktuatora} \quad (123)$$

$$\begin{aligned} S_4 &= s_{44}^E T_4 + d_{15} E \\ S_5 &= s_{44}^E T_5 + d_{15} E \end{aligned} \quad \text{Smičući efekat aktuatora} \quad (124)$$

Koeficijent definisan kao kvadratni koren između odnosa dobijene mehaničke energije i nanešene električne energije na piezoelektričnu pločicu je elektromehanički koeficijent odnosa:

$$k = \sqrt{\frac{\text{Dobijena mehanička energija}}{\text{Nanešena električna energija}}} \quad (125)$$

Elektromehanički koeficijent odnosa može biti definisan za efekat aktuatora na sledeći način:

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^E \epsilon_{33}}}, \quad k_{31} = \frac{|d_{31}|}{\sqrt{s_{11}^E \epsilon_{33}}}, \quad k_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{s_{55}^E \epsilon_{11}}} \quad \text{Longitudinalni, transverzalni i smičući efekat} \quad (126)$$

Matrična notacija

Tabela 22. Voigtova notacija

Pravila za prevođenje indeksa sa tenzorskog na matričnu formu ($i, j, k, l=1, 2, 3$; $p, q=1, 2, 3, 4, 5, 6$)						
<i>ij ili kl</i>	11	22	33	23 ili 32	31 ili 13	12 ili 21
<i>p ili q</i>	1	2	3	4	5	6

Tabela 23. Pretvaranje tenzorskih indeksa u matrične

Promenljive napona i dilatacije		
$T_p = T_{ij}$	$p=1, 2, \dots, 6$	$i, j = 1, 2, 3$



$S_p = S_{ij}$	$i=j; p=1,2,3$	$i, j = 1, 2, 3$
$S_p = 2S_{ij}$	$i \neq j; p=4,5,6$	$i, j = 1, 2, 3$
Dielektrične promenljive		
$c_{pq}^E = c_{ijkl}^E; c_{pq}^D = c_{ijkl}^D$	$p=1, 2, \dots, 6$	
$s_{pq}^E = s_{ijkl}^E$	$i=j \text{ i } k=l$	$p, q = 1, 2, 3$
$s_{pq}^E = 2s_{ijkl}^E$	$i=j \text{ i } k \neq l$	$p=1, 2, 3; q=4, 5, 6$
$s_{pq}^E = 4s_{ijkl}^E$	$i \neq j \text{ i } k \neq l$	$p, q = 4, 5, 6$
Piezoelektrične promenljive		
$e_{ip} = e_{ikl}; q_{ip} = q_{ikl}$	$p=1, 2, \dots, 6$	$i, k, l = 1, 2, 3$
$d_{iq} = d_{ikl}$	$k=l$	$q = 1, 2, 3$
$d_{iq} = 2d_{ikl}$	$k \neq l$	$q = 4, 5, 6$
$g_{iq} = g_{ikl}$	$k=l$	$q = 1, 2, 3$
$g_{iq} = 2g_{ikl}$	$k \neq l$	$q = 4, 5, 6$

Tabela 24. Odnosi između konstanti

Odnosi između konstanti		
Odnos krutost-popustljivost	$c_{pr}^E s_{qr}^E = \delta_{pq}$	$c_{pr}^D s_{qr}^D = \delta_{pq}$
Odnos Permitivnost-nepermitivnost	$\varepsilon_{ik}^S \beta_{jk}^S = \delta_{ij}$	$\beta_{ik}^T \varepsilon_{jk}^T = \delta_{ij}$
Zatvoreni-otvoreni krug odnos elastičnih konstanti	$c_{pq}^D = c_{pq}^E + e_{kp} q_{kq}$	$s_{pq}^D = s_{pq}^E - d_{ip} g_{kq}$
Napon-dilatacija efekat kod dielastičnih konstanti	$\varepsilon_{ij}^T = \varepsilon_{ij}^S + d_{iq} e_{jq}$	$\beta_{ij}^T = \beta_{ij}^S - g_{iq} q_{jq}$
Odnos između piezoelektričnih koeficijenata	$e_{ip} = d_{iq} c_{qp}^E$	$d_{ij} = \varepsilon_{ik}^T g_{kp}$
Odnos između piezoelektričnih konstanti	$g_{ip} = \beta_{ik}^T d_{kq}$	$q_{ip} = g_{iq} \varepsilon_{qp}^D$



Definicije korišćenih simbola

Tabela 25. Definicija i opis simbola primenjenih u konstitutivnim piezoelektričnim jednačinama

Simbol	Tip	Veličina	Jedinica mere	Značenje
T	vektor	6×1	N/m ²	Vektor mehaničkog napona
S	vektor	6×1	m/m	Vektor mehaničkih dilatacija
E	vektor	3×1	N/C	Vektor električnog polja
D	vektor	3×1	C/m ²	Vektor električnog pomeranja
s	matrica	6×6	m ² /N	Matrica koeficijenata usaglašenosti
c	matrica	6×6	N/m ²	Matrica krutosti
ε	matrica	3×3	F/m	Dielektrična matrica
d	matrica	3×6	C/N	Matrica piezoelektričnih koeficijenata za Dilatacija-Naelektrisanje formu konstitutivnih jednačina
e	matrica	3×6	C/m ²	Matrica piezoelektričnih koeficijenata za Napon-Naelektrisanje formu konstitutivnih jednačina
g	matrica	3×6	m ² /C	Matrica piezoelektričnih koeficijenata za Dilatacija – Električni napon formu konstitutivnih jednačina
q	matrica	3×6	N/C	Matrica piezoelektričnih koeficijenata za Napon-Električni napon formu konstitutivnih jednačina

Opšta forma matrica za piezoelektrične materijale sa anizotropnim karakteristikama materijala bez centralne simetrije:

$$s_{pq}^E = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{pmatrix} \quad \text{matrica popustljivosti} \quad (127)$$



$$c_{pq}^E = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \quad \text{matrica krutosti} \quad (128)$$

$$d_{iq} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \quad \text{piezoelektrična matrica} \quad (129)$$

$$e_{ip} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} \end{pmatrix} \quad \text{matrica piezoelektričnih konstanti} \quad (130)$$

$$\varepsilon_{ik}^E = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad \text{matrica permitivnosti} \quad (131)$$

Jednačine za PZT feroelektrične keramičke materijale sa transverzalnom izotropijom:

$$s_{pq}^E = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix} \quad \text{matrica popustljivosti za PZT} \quad (132)$$

$$c_{pq}^E = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad \text{matrica krutosti za PZT} \quad (133)$$

$$d_{iq} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{piezoelektrična matrica za PZT} \quad (134)$$

$$e_{ip} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{matrica piezoelektričnih konstanti za PZT} \quad (135)$$



$$\varepsilon_{ik}^E = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}$$

matrica permitivnosti za PZT

(136)

PRILOG B

MATLAB CODE ZA 2D LOKALIZACIJU POMOĆU HIBRIDNOG PRISTUPA

%% Initialisation

clc;clear;

syms x y z

P = [x y z];

realdot = @(u, v) u*transpose(v);

%% INPUT

%Lengths of measurement configuration

Lx = 0.4;

Ly = 0.4; %[m]

%Coordinates of measurement points

PZTcoord = [0.04 0.4; 0.12 0.4; 0.20 0.4; 0.28 0.4; 0.36 0.4; 0 0.36; 0.4 0.36; 0 0.28; 0.4 0.28; 0 0.20;
0.4 0.20; 0 0.12; 0.4 0.12; 0 0.04; 0.4 0.04; 0.04 0; 0.12 0; 0.20 0; 0.28 0; 0.36 0];

%INDEX(i,j) = Values of DamageIndex along directions ij (i=Act j=Receive)

INDEX(1,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.4012 0 0 0 0 0 0];

INDEX(2,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.3915 0 0.2826 0 0 0 0 0];

INDEX(3,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.4056 0 0 0 0 0.2518];

INDEX(4,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.2518 0.2348];

INDEX(5,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.2822 0.2826 0];

INDEX(6,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.2729 0 0 0 0 0 0];

INDEX(7,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.2526 0.3802 0 0];

INDEX(8,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0.2601 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(9,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.2786 0 0.4226 0.3256 0 0 0];

INDEX(10,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0.4246 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(11,:) = [0 0 0 0 0 0 0.2623 0 0.4248 0 0.2678 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(12,:) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0.2612 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(13,:) = [0.4189 0.4038 0 0 0 0.2586 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(14,:) = [0 0 0 0 0 0 0.2597 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(15,:) = [0 0.2575 0.3852 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(16,:) = [0 0 0 0 0 0 0.4212 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(17,:) = [0 0 0 0 0 0.2846 0 0.3575 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(18,:) = [0 0 0 0 0.2426 0 0.2865 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(19,:) = [0 0 0 0.2568 0.2864 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

INDEX(20,:) = [0 0 0.2586 0.2659 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];



%Number of Triangles between adjacent directions within one measurement

```
NumTriangles = [15 16 16 16 15 15 15 16 16 16 16 16 15 15 15 16 16 16 15];
```

```
connectivity{1,1} = [1 6 8]; connectivity{1,2} = [1 8 10];  
connectivity{1,3} = [1 10 12]; connectivity{1,4} = [1 12 14];  
connectivity{1,5} = [1 14 16]; connectivity{1,6} = [1 16 17];  
connectivity{1,7} = [1 17 18]; connectivity{1,8} = [1 18 19];  
connectivity{1,9} = [1 19 20]; connectivity{1,10} = [1 20 15];  
connectivity{1,11} = [1 15 13]; connectivity{1,12} = [1 13 11];  
connectivity{1,13} = [1 11 9]; connectivity{1,14} = [1 9 7];  
connectivity{1,15} = [1 7 5];
```

```
.  
. .  
. . .
```

```
divisions = 55; %Number of divisions for PostProcess Mesh
```

```
Ncolors = 120; %Number of Colors in Contour Fill
```

```
%% POST PROCESS MESH
```

```
%MeshGrid
```

```
X = 0:Lx/divisions:Lx; Y = 0:Ly/divisions:Ly;
```

```
[XX,YY] = meshgrid(X,Y);
```

```
NEWMESH = zeros(divisions+1, divisions+1, size(PZTcoord,1));
```

```
NEWMESHcount = zeros(divisions+1, divisions+1, size(PZTcoord,1));
```

```
clear X Y Lx Ly
```

```
%% CALCULATION
```

```
for measure = 1:size(PZTcoord,1) %Loop Through Measurement Points
```

```
for i = 1:NumTriangles(measure) %Loop through triangles within 1 measure
```

```
RR1 = connectivity{measure,i}(2); %Receiver#1
```

```
RR2 = connectivity{measure,i}(3); %Receiver#2
```

```
%Points for surface definition
```

```
xn1 = PZTcoord(measure,1) + (PZTcoord(RR1,1) - PZTcoord(measure,1))/divisions;
```

```
yn1 = PZTcoord(measure,2) + (PZTcoord(RR1,2) - PZTcoord(measure,2))/divisions;
```

```
xn2 = PZTcoord(measure,1) + (PZTcoord(RR2,1) - PZTcoord(measure,1))/divisions;
```

```
yn2 = PZTcoord(measure,2) + (PZTcoord(RR2,2) - PZTcoord(measure,2))/divisions;
```

```
P1 = [ xn1 yn1 INDEX(measure,RR1) ]; %Point 1 is on direction 1, and has the same  
value of DI as calculated
```

```
P2 = [ xn2 yn2 INDEX(measure,RR2) ]; %Point 2 is on direction 2, and has the same  
value of DI as calculated
```

```
P3 = [ PZTcoord(RR1,1:2) INDEX(measure,RR1) ]; %The value in Receiver#1 is unique  
within current triangle
```

```
P4 = [ PZTcoord(RR2,1:2) INDEX(measure,RR2) ]; %The value in Receiver#2 is unique  
within current triangle
```



```
%Definition of 3D surface from 4 points
normal1 = cross(P1-P3, P1-P2);
normal2 = cross(P2-P3, P2-P4);
PLANE1 = solve(realdot(P - P1, normal1), z);
PLANE2 = solve(realdot(P - P2, normal2), z);

%Evaluate the ordinates for PostProcess Mesh
for ix = 1:size(NEWMESH,2)
    for iy = 1:size(NEWMESH,1)

        if isPointInTriangle([XX(iy,ix) YY(iy,ix)], PZTcoord(measure,1:2), P3(1:2), P2(1:2)) == 1
            NEWMESH(iy, ix, measure) = subs(PLANE1,[x y], [XX(iy,ix) YY(iy,ix)]);
            NEWMESHcount(iy, ix, measure) = NEWMESHcount(iy, ix, measure) + 1; %Count the
results for averaging
        elseif isPointInTriangle([XX(iy,ix) YY(iy,ix)], P2(1:2), P3(1:2), P4(1:2)) == 1
            NEWMESH(iy, ix, measure) = subs(PLANE2,[x y], [XX(iy,ix) YY(iy,ix)]);
            NEWMESHcount(iy, ix, measure) = NEWMESHcount(iy, ix, measure) + 1; %Count the
results for averaging
        end

    end
end

end %triangles

end %measurements

clear P P1 P2 P3 normal PLANE realdot

%% FINAL CALCULATION AND AVERAGING
RESULT = zeros(divisions+1, divisions+1);
COUNT = 0;
for measure = 1:size(NEWMESH,3)
    RESULT(:, :) = RESULT(:, :) + NEWMESH(:, :, measure);
    COUNT = COUNT + NEWMESHcount(:, :, measure);
end

%PLOT
RESULT = RESULT./COUNT;
clear COUNT NEWMESH NEWMESHcount

[~,h] = contourf(XX,YY,RESULT,Ncolors);
set(h,'LineColor','none');

function res = isCounterClockwise(p1, p2, p3, varargin)
%ISCOUNTERCLOCKWISE Compute relative orientation of 3 points

eps = 1e-12;
```



```
if ~isempty(varargin)
    eps = varargin{1};
end
```

```
% ensure all data have same size
```

```
np = max([size(p1, 1) size(p2, 1) size(p3,1)]);
```

```
if np > 1
```

```
    if size(p1,1) == 1
```

```
        p1 = repmat(p1, np, 1);
```

```
    end
```

```
    if size(p2,1) == 1
```

```
        p2 = repmat(p2, np, 1);
```

```
    end
```

```
    if size(p3,1) == 1
```

```
        p3 = repmat(p3, np, 1);
```

```
    end
```

```
end
```

```
% init with 0
```

```
res = zeros(np, 1);
```

```
% extract vector coordinates
```

```
x0 = p1(:, 1);
```

```
y0 = p1(:, 2);
```

```
dx1 = p2(:, 1) - x0;
```

```
dy1 = p2(:, 2) - y0;
```

```
dx2 = p3(:, 1) - x0;
```

```
dy2 = p3(:, 2) - y0;
```

```
% check non colinear cases
```

```
res(dx1 .* dy2 > dy1 .* dx2) = 1;
```

```
res(dx1 .* dy2 < dy1 .* dx2) = -1;
```

```
% case of colinear points
```

```
ind = abs(dx1 .* dy2 - dy1 .* dx2) < eps;
```

```
res(ind( (dx1(ind) .* dx2(ind) < 0) | (dy1(ind) .* dy2(ind) < 0) )) = -1;
```

```
res(ind( hypot(dx1(ind), dy1(ind)) < hypot(dx2(ind), dy2(ind)) )) = 1;
```

```
unction b = isPointInTriangle(point, p1, p2, p3)
```

```
%ISPOINTINTRIANGLE Test if a point is located inside a triangle
```

```
% if triangle vertices are given as a single array, extract vertices
```

```
if nargin == 2
```

```
    p2 = p1(2, :);
```

```
    p3 = p1(3, :);
```

```
    p1 = p1(1, :);
```

```
end
```



```
% check triangle orientation
isDirect = isCounterClockwise(p1, p2, p3);

% check location of point with respect to each side
if isDirect
    b12 = isCounterClockwise(p1, p2, point) >= 0;
    b23 = isCounterClockwise(p2, p3, point) >= 0;
    b31 = isCounterClockwise(p3, p1, point) >= 0;
else
    b12 = isCounterClockwise(p1, p2, point) <= 0;
    b23 = isCounterClockwise(p2, p3, point) <= 0;
    b31 = isCounterClockwise(p3, p1, point) <= 0;
end

% combines the 3 results
b = b12 & b23 & b31;
```

PRILOG C

MATLAB CODE ZA 3D LOKALIZACIJU POMOĆU HIBRIDNOG PRISTUPA

MAIN PROGRAM

```
%% INITIALIZATION
```

```
clc;clear;tic;parpool
```

```
%% INPUT PARAMETERS - GEOMETRY
```

```
INPUT_FILE;
```

```
PostProcessSize = 0.01;
```

```
%% MAIN CALCULATION
```

```
% Derivation of the Connectivity Matrix of the Considered Domain
```

```
% DAMAGESTATE Matrix stores the DAMAGE INDEX values for all brick elements
```

```
% ROWS = Current Brick Element
```

```
% COLUMNS = 1-Brick Element ID, 2-Summation of DamageIndex
```

```
connectivity = MakeConnectivity(Lx, Ly, Lz, PostProcessSize);
```

```
NumberOfPZT = size(PZTCoordinates,1);
```

```
DAMAGESTATE = cell(NumberOfPZT,1);
```

```
for i = 1:NumberOfPZT
```

```
    for j = 1:size(connectivity,1)
```

```
        DAMAGESTATE{i}(j) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
% Loop Through All Combinations of Sensors and Actuators
```

```
parfor i = 1:NumberOfPZT
```

```
    i
```



```
for j = setdiff(1:NumberOfPZT,i)
    % Skip Zero Combination of A-S1
    if INDEX(i,j) ~= 0
        for k = setdiff(1:NumberOfPZT,[i j])
            for l = setdiff(1:NumberOfPZT,[i j k])

                % FINAL POINTS is the POINT CLOUD MATRIX, storing the coordinates and DIs for all
                points interpolated within every [A-S1-S2a-S2b] body.
                % Current Coordinates of the Actuator, Sensors and Corresponding Damage Indices are the
                input values for the [InterpolateBody] function.
                FINALPOINTS = InterpolateBody(PZTCoordinates(i,:), PZTCoordinates(j,:),
                PZTCoordinates(k,:), PZTCoordinates(l,:), INDEX(i,j), INDEX(i,k), INDEX(i,l), PostProcessSize);

                % After the FINALPOINTS matrix is derived, all points in this matrix should be checked for
                the placement within
                % the 8-node brick element. The DI from the considered point is then placed in the 8-node
                brick.
                % Loop Through All Non-Zero PostProcessPoints of the Current [A-S1-S2a-S2b] Combination
                for pp_point = 1:size(FINALPOINTS,1)
                    if FINALPOINTS(pp_point,4) ~= 0
                        %Find 8-Node Element in Which the Current Point Is Located
                        elem = findElement(FINALPOINTS(pp_point, 1:3), PostProcessSize, Lx, Ly, Lz);
                        if elem>0
                            %Assign Value of Damage Index in Non-Zero Elements
                            DAMAGESTATE{i}(elem) = DAMAGESTATE{i}(elem) +
FINALPOINTS(pp_point,4);
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

FINALDAMAGESTATE = zeros(size(DAMAGESTATE{1},2), 2);
for i = 1:size(FINALDAMAGESTATE, 1)
    FINALDAMAGESTATE(i,1) = i;
end
for i = 1:NumberOfPZT
    FINALDAMAGESTATE(:,2) = FINALDAMAGESTATE(:,2) + DAMAGESTATE{i}';
end

%% PLOT
% Min and Max percent in [%] of Damage Index to be Plotted
MaxPercent = 100;
MinPercent = 20;
```




% Derivation of the Coordinates Matrix of the Considered Domain

```
coordinates = MakeCoordinates(Lx, Ly, Lz, PostProcessSize);
```

% Derivation of the Plot Points and Corresponding Values

```
[PC_X PC_Y PC_Z PC_V] = FindPlotPoints(MinPercent, MaxPercent, FINALDAMAGESTATE,  
coordinates, connectivity);
```

% Plotting of the Point Cloud

```
figure  
hold on  
colormap(flipud(autumn(MaxPercent-MinPercent+1)))  
scatter3(PC_X, PC_Y, PC_Z, 80, PC_V, 'filled')
```

% Plotting of Boundaries

```
plotBoundaries(Lx, Ly, Lz)
```

% Plotting of PZT Positions

```
for i = 1:size(PZTCoordinates,1)  
    plot3(PZTCoordinates(i,1),PZTCoordinates(i,2),PZTCoordinates(i,3) , 'r.', 'MarkerSize', 15)  
end
```

%% EXIT

```
parpool close  
toc;
```

```
%=====
```

% PART OF THE PROGRAM WHICH CONSIDER ONLY Nclose CLOSEST SENSORS - Removed

```
%=====
```

```
%% Min Nclose = 3, Max Nclose = NumberOfPZT - 2
```

```
% Nclose = 20;
```

```
% distances = zeros(NumberOfPZT);
```

```
% IND = zeros(NumberOfPZT);
```

```
% for i = 1:NumberOfPZT
```

```
%     for j = 1:NumberOfPZT
```

```
%         if i~=j
```

```
%             x1 = PZTCoordinates(i,1);
```

```
%             y1 = PZTCoordinates(i,2);
```

```
%             z1 = PZTCoordinates(i,3);
```

```
%             x2 = PZTCoordinates(j,1);
```

```
%             y2 = PZTCoordinates(j,2);
```

```
%             z2 = PZTCoordinates(j,3);
```

```
%             distances(i,j) = sqrt((x2-x1)^2+(y2-y1)^2+(z2-z1)^2);
```

```
%         end
```

```
%     end
```

```
%     [distances(i,:),IND(i,:)] = sort(distances(i,:));
```

```
% end
```

```
% distances = distances(:,2:Nclose+1);
```



```
% IND = IND(:,2:Nclose+1);  
%  
% for k = setdiff(IND(j,:),[i j])  
% for l = setdiff(IND(j,:),[i j k])  
% steps = NumberOfPZT*(NumberOfPZT-1)*Nclose*(Nclose-1);  
% =====  
==
```

INPUT FILE

```
% INPUT FILE for 3D Damage Localization
```

```
% Lengths of measurement configuration:
```

```
Lx = 0.20;
```

```
Ly = 0.16;
```

```
Lz = 0.30; %[m]
```

```
% Coordinates of Measurement Points [X,Y,Z] [m]:
```

```
PZTCoordinates = [0.16 0.12 0.30;
```

```
0.16 0.08 0.30;
```

```
0.16 0.04 0.30;
```

```
0.10 0.12 0.30;
```

```
0.10 0.08 0.30;
```

```
0.10 0.04 0.30;
```

```
0.04 0.12 0.30;
```

```
0.04 0.08 0.30;
```

```
0.04 0.04 0.30;
```

```
0.00 0.12 0.24;
```

```
.  
. .  
.
```

```
INDEX = zeros(size(PZTCoordinates,1));
```

```
% INDEX(i,j) = Values of Damage Index along directions ij (i=Actuator, j=Sensor)
```

```
INDEX( 1, 15) = 0.300;
```

```
INDEX( 1, 18) = 0.275;
```

```
INDEX( 1, 21) = 0.202;
```

```
INDEX( 1, 27) = 0.346;
```

```
INDEX( 1, 30) = 0.372;
```

```
INDEX( 2, 13) = 0.455;
```

```
INDEX( 2, 14) = 0.146;
```

```
.  
. .  
.
```

FUNCTION: DERIVE POINTS IN TRIANGLE

```
% This function first interpolates the points within a 3D triangle having the vertices [P1 P2 P3]. The interpolation is performed by making the
```



% triangular mesh with dimension = TriangleSize. Depending on the TriangleSize, the interpolated mesh may have 0 interpolated points, if
% the mesh size is larger then the side lengths of the triangle.

% After the points have been interpolated inside the triangle, the calculation of Damage Index in each point is performed from the values of Damage Index stored
% in triangle vertices [D1 D2 D3]. For the sake of simplicity, this is done in 2D by the simple elimination of z-coordinate, having in mind that the interpolated value
% will be the same.

% OUTPUT = (n x 4) Matrix, containing coordinates of the points within a triangle [X,Y,Z] and their corresponding damage indices [DI]

```
function points = derivePointsInTriangle(P1,P2,P3, TriangleSize, DI1,DI2,DI3)
```

```
%Initialization
```

```
count = 3;
```

```
conn = [1 2 3];
```

```
coord = [P1; P2; P3];
```

```
should_interpolate = 1;
```

```
while should_interpolate == 1
```

```
  for i = 1:size(conn,1)
```

```
    x1 = coord(conn(i,1),1);
```

```
    x2 = coord(conn(i,2),1);
```

```
    x3 = coord(conn(i,3),1);
```

```
    y1 = coord(conn(i,1),2);
```

```
    y2 = coord(conn(i,2),2);
```

```
    y3 = coord(conn(i,3),2);
```

```
    z1 = coord(conn(i,1),3);
```

```
    z2 = coord(conn(i,2),3);
```

```
    z3 = coord(conn(i,3),3);
```

```
    L1 = sqrt( (x1-x2)^2 + (y1-y2)^2 + (z1-z2)^2 );
```

```
    L2 = sqrt( (x2-x3)^2 + (y2-y3)^2 + (z2-z3)^2 );
```

```
    L3 = sqrt( (x1-x3)^2 + (y1-y3)^2 + (z1-z3)^2 );
```

```
    [MAX,index] = max([L1 L2 L3]);
```

```
  if MAX > TriangleSize
```

```
    count = count + 1;
```

```
    if index == 1
```

```
      coord = vertcat(coord, [(x1+x2)/2 (y1+y2)/2 (z1+z2)/2]);
```

```
      conn = vertcat(conn, [conn(i,1) count conn(i,3)], [conn(i,2) conn(i,3) count]);
```

```
    elseif index == 2
```

```
      coord = vertcat(coord, [(x2+x3)/2 (y2+y3)/2 (z2+z3)/2]);
```

```
      conn = vertcat(conn, [conn(i,1) conn(i,2) count], [conn(i,1) count conn(i,3)]);
```

```
    elseif index == 3
```

```
      coord = vertcat(coord, [(x1+x3)/2 (y1+y3)/2 (z1+z3)/2]);
```

```
      conn = vertcat(conn, [conn(i,1) conn(i,2) count], [conn(i,2) conn(i,3) count]);
```

```
    end
```

```
    conn(i,:) = [];
```



```
        break
    else
        should_interpolate = 0;
    end
end
end
end

points = zeros(size(coord,1), 4);
points(:, 1:3) = coord;
for i = 1:size(coord,1)
    points(i,4) = interpolateInTriangle(P1(1),P1(2),P2(1),P2(2),P3(1),P3(2), DI1,DI2,DI3,
    coord(i,1),coord(i,2));
    points(i,4) = abs(points(i,4));
end
end
```

FUNCTION: FIND ELEMENTS

% This function finds the element [elem] of the Quader Domain [Lx * Ly * Lz] in which the input [POINT] is located. The Domain is divided in qube elements having the dimension % QubeSize. For the overcoming of numerical instabilities, the tolerance of 0.05% is accounted.

```
function elem = findElement(POINT, QubeSize, Lx, Ly, Lz)
```

```
    if POINT(3) > 0.9995*Lz && POINT(3) < 1.0005*Lz
        if POINT(2) > 0.9995*Ly && POINT(2) < 1.0005*Ly
            if POINT(1) > 0.9995*Lx && POINT(1) < 1.0005*Lx
                elem = round ( (floor(POINT(3)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
                (floor(POINT(2)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize));
            else
                elem = round ( (floor(POINT(3)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
                (floor(POINT(2)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize) + 1);
            end
        else
            if POINT(1) > 0.9995*Lx && POINT(1) < 1.0005*Lx
                elem = round ( (floor(POINT(3)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
                floor(POINT(2)/QubeSize)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize));
            else
                elem = round ( (floor(POINT(3)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
                floor(POINT(2)/QubeSize)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize) + 1);
            end
        end
    else
        if POINT(2) > 0.9995*Ly && POINT(2) < 1.0005*Ly
            if POINT(1) > 0.9995*Lx && POINT(1) < 1.0005*Lx
                elem = round ( floor(POINT(3)/QubeSize)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
                (floor(POINT(2)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize));
            else
                elem = round ( floor(POINT(3)/QubeSize)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
                (floor(POINT(2)/QubeSize)-1)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize) + 1);
            end
        end
    end
```



```
end
else
    if POINT(1) > 0.9995*Lx && POINT(1) < 1.0005*Lx
        elem = round ( floor(POINT(3)/QubeSize)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
floor(POINT(2)/QubeSize)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize));
    else
        elem = round ( floor(POINT(3)/QubeSize)*(Lx/QubeSize)*(Ly/QubeSize) +
floor(POINT(2)/QubeSize)*(Lx/QubeSize) + floor(POINT(1)/QubeSize) + 1);
    end
end
end
end

end
```

FUNCTION: INTERPOLATE BODY

% This is the main function for the interpolation of Damage Index values within a [A-S1-S2a-S2b] body, based on the damage index values known for directions
% A-S1, A-S2a and A-S2b, which are stored in [DI1, DI2, DI3].

```
function FINALPOINTS = InterpolateBody(A, S1, S2a, S2b, DI1, DI2, DI3, PostProcessSize)
```

% Calculate Lengths A-S1, A-S2a and A-S2b

```
LAS1 = sqrt((S1(1) -A(1))^2 + (S1(2) -A(2))^2 + (S1(3) -A(3))^2);
LAS2a = sqrt((S2a(1)-A(1))^2 + (S2a(2)-A(2))^2 + (S2a(3)-A(3))^2);
LAS2b = sqrt((S2b(1)-A(1))^2 + (S2b(2)-A(2))^2 + (S2b(3)-A(3))^2);
```

% Calculate Number of Divisions along A-S1, A-S2a and A-S2b directions

```
Divisions = floor(max([LAS1,LAS2a,LAS2b])/PostProcessSize)+ 1;
```

% Calculate Coordinates of Points along A-S1, A-S2a and A-S2b directions

```
AS1_Divided = zeros(Divisions+1, 3);
AS2a_Divided = zeros(Divisions+1, 3);
AS2b_Divided = zeros(Divisions+1, 3);
for i = 1:Divisions+1
    AS1_Divided(i,1) = A(1)+(i-1)*(S1(1)-A(1)) / Divisions;
    AS1_Divided(i,2) = A(2)+(i-1)*(S1(2)-A(2)) / Divisions;
    AS1_Divided(i,3) = A(3)+(i-1)*(S1(3)-A(3)) / Divisions;
    AS2a_Divided(i,1) = A(1)+(i-1)*(S2a(1)-A(1)) / Divisions;
    AS2a_Divided(i,2) = A(2)+(i-1)*(S2a(2)-A(2)) / Divisions;
    AS2a_Divided(i,3) = A(3)+(i-1)*(S2a(3)-A(3)) / Divisions;
    AS2b_Divided(i,1) = A(1)+(i-1)*(S2b(1)-A(1)) / Divisions;
    AS2b_Divided(i,2) = A(2)+(i-1)*(S2b(2)-A(2)) / Divisions;
    AS2b_Divided(i,3) = A(3)+(i-1)*(S2b(3)-A(3)) / Divisions;
end
```

```
end
```

% Skip First Point along A-S1, A-S2a and A-S2b because the DI value is not the same along A-S1, A-S2a and A-S2b, to avoid the triple value in

%point A. The averaging in A is possible, but would not give accurate



```
%results.
AS1_Divided = AS1_Divided(2:end,:);
AS2a_Divided = AS2a_Divided(2:end,:);
AS2b_Divided = AS2b_Divided(2:end,:);

% Initialize the FINALPOINTS Matrix
FINALPOINTS = [];
% Loop along A-S1 direction (or A-S2a,A-S2b), and consider the triangle formed by [S1_div,
S2a_div, S2b_div]
% Having in mind that DI value is constant along any of the above
% directions, the values of DI are known in points [S1_div, S2a_div, S2b_div] ant they are used as
nodal values for the interpolation
for i = 1:Divisions
    POINT1 = AS1_Divided(i,:);
    POINT2 = AS2a_Divided(i,:);
    POINT3 = AS2b_Divided(i,:);

    % Interpolate the values in point within a triangle [S1_div, S2a_div, S2b_div]
    fp = derivePointsInTriangle(POINT1,POINT2,POINT3, PostProcessSize, DI1, DI2, DI3);
    FINALPOINTS = vertcat(FINALPOINTS,fp);
end
end
```

FUNCTION: INTERPOLATE IN TRIANGLE

```
% This function interpolates the value in the arbitrary point [X,Y] within a 2D triangle,
% based on the values [C1,C2,C3] in the vertices of the triangle [x1,y1] [x2,y2] [x3,y3].
% The output is the single interpolated value.
```

```
function y = interpolateInTriangle(x1,y1,x2,y2,x3,y3, C1,C2,C3, X,Y)
```

```
a1 = x2*y3-x3*y2;
a2 = x3*y1-x1*y3;
a3 = x1*y2-x2*y1;
```

```
b1 = y2-y3;
b2 = y3-y1;
b3 = y1-y2;
```

```
c1 = x3-x2;
c2 = x1-x3;
c3 = x2-x1;
```

```
A = abs( 1/2 * (x1*(y2-y3) + x2*(y3-y1) + x3*(y1-y2)) );
```

```
N1 = 1/2/A * (a1 + b1*X + c1*Y);
N2 = 1/2/A * (a2 + b2*X + c2*Y);
N3 = 1/2/A * (a3 + b3*X + c3*Y);
```

```
y = [C1 C2 C3]*[N1 N2 N3]';
```



```
if isnan(y) == 1
    y=0;
end
end
```

FUNCTION: MAKE CONNECTIVITE

% This function derives the connectivity matrix of the points in the 3D mesh of 8-Node Cube Elements, having the dimension QubeSize.

% The Domain is Quader having the dimensions Lx,Ly,Lz in three orthogonal directions X,Y,Z.

% The enumeration starts from the lower bottom qube. First all qubes in the x-directions are enumerated, then the next line in y-direction, and after

% the first plane is completed, the next plane in z-direction is enumerated in the same manner.

% connectivity: [ROWS = qube number

% COLUMNS = nodal connectivity, as for the 8-Node Solid FE)

```
function connectivity = MakeConnectivity(Lx, Ly, Lz, PostProcessSize)
```

```
Nx = round(Lx/PostProcessSize);
```

```
Ny = round(Ly/PostProcessSize);
```

```
Nz = round(Lz/PostProcessSize);
```

```
count=0;
```

```
connectivity = zeros(Nx*Ny*Nz, 8);
```

```
for kk = 1:Nz
```

```
    for jj = 1:Ny
```

```
        for ii = 1:Nx
```

```
            count = count+1;
```

```
            connectivity(count,1) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii;
```

```
            connectivity(count,2) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii+1;
```

```
            connectivity(count,3) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii+Nx+2;
```

```
            connectivity(count,4) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii+Nx+1;
```

```
            connectivity(count,5) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii+(Nx+1)*(Ny+1);
```

```
            connectivity(count,6) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii+(Nx+1)*(Ny+1)+1;
```

```
            connectivity(count,7) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii+(Nx+1)*(Ny+1)+Nx+2;
```

```
            connectivity(count,8) = (kk-1)*(Nx+1)*(Ny+1)+(jj-1)*(Nx+1)+ii+(Nx+1)*(Ny+1)+Nx+1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

FUNCTION: MAKE COORDINATES

% This function derives the coordinates of the points in the 3D mesh of 8-Node Cube Elements, having the dimension QubeSize.

% The Domain is Quader having the dimensions Lx,Ly,Lz in three orthogonal directions X,Y,Z.

% The enumeration starts from the point 0,0,0. First all nodes in the x-directions are enumerated, then the next line in y-direction, and after

% the first plane is completed, the next plane in z-direction is enumerated in the same manner.



```
% coordinates: [ROWS = node number  
%             COLUMNS = X,Y,Z coordinates)
```

```
function coordinates = MakeCoordinates(Lx, Ly, Lz, QubeSize)  
    Nx = round(Lx/QubeSize);  
    Ny = round(Ly/QubeSize);  
    Nz = round(Lz/QubeSize);  
  
    count=0;  
    coordinates = zeros((Nx+1)*(Ny+1)*(Nz+1), 3);  
    Z=0;  
    for kk = 1:Nz+1  
        Y=0;  
        for jj = 1:Ny+1  
            X=0;  
            for ii = 1:Nx+1  
                count = count+1;  
                coordinates(count,1) = X;  
                coordinates(count,2) = Y;  
                coordinates(count,3) = Z;  
                X=X+Lx/Nx;  
            end  
            Y=Y+Ly/Ny;  
        end  
        Z=Z+Lz/Nz;  
    end  
end
```

FUNCTION: PLOT BOUNDARIES

```
function plotBoundaries(Lx, Ly, Lz)  
    xx = [0 Lx Lx 0 0 Lx Lx 0];  
    yy = [0 0 Ly Ly 0 0 Ly Ly];  
    zz = [0 0 0 0 Lz Lz Lz Lz];  
    ccc = [1 2 3 4 5 6 7 8 1 2 3 4;  
          2 3 4 1 6 7 8 5 5 6 7 8];  
    for i = 1:12  
        plot3([xx(ccc(1,i)) xx(ccc(2,i))], [yy(ccc(1,i)) yy(ccc(2,i))], [zz(ccc(1,i)) zz(ccc(2,i))], 'LineWidth'  
,2, 'Color', 'k')  
    end  
    xlim([0 Lx]);ylim([0 Ly]);zlim([0 Lz])  
    xlabel('X-Axis');ylabel('Y-Axis');zlabel('Z-Axis')  
    daspect([1 1 1])  
end
```




Biografija

Nemanja Marković rođen je 18. Septembra 1985. godine u Kragujevcu gde je završio osnovnu i srednju školu. Studije na konstruktivnom smeru na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu upisao je školske 2004/05 godine i diplomirao novembra 2009 godine kao student generacije sa prosečnom ocenom 9.75. Tokom studija bio je stipendista Fonda za mlade talente i Fonda „Akademik Dragoslav Srejski“. Univerzitet u Nišu 2011 godine dodeljuje mu povelju za najboljeg diplomiranog studenta na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu. 2009 godine upisuje Doktorske studije na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Univerziteta u Nišu i polaže ispite sa prosečnom ocenom 9.91.

Septembra 2011 godine postaje član međunarodnog projekta SEEFORM (South Eastern European Graduate School for Master and PhD Formation in Engineering) finansiran od strane DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst German Academic Exchange Service) u okviru koga radi doktorsku disertaciju.

Autor je ili koautor više desetina naučnih radova objavljenih u naučnim časopisima ili na konferencijama. Od toga treba izdvojiti 10 radova na SCI listi od kojih su dva kategorije M21a i M21. Na osnovu Google Scholar citation ima ukupno 101 citat ili samocitat, h-indeks sa vrednošću 6. Na osnovu Research gate portala: RG indeks je 15.6, Research interest 177.5, 76 citata i 23640 čitanja.

Projektant je većeg broja stambenih, industrijskih ili javnih objekata. Član je Inženjerske komore Srbije i ima projektantsku licencu 310. Najznačajniji objekti na kojima je radio su: Rekonstrukcija i dogradnja Aerodroma Nikola Tesla u Beogradu, Rekonstrukcija Termoelektrane Obilić na Kosovu i Metohiji, Zapadna tribina stadiona Čair u Nišu, Rekonstrukcija i dogradnja Knjaževsko Srpskog teatra u Kragujevcu, učesnik projekta brze pruge Beograd-Budimpešta, Hotelskog kompleksa R.E.C. u Budvi kvadrature oko 25000m², različitih stambenih kompleksa većih kvadratura u Nišu kao i rekonstrukcije i adaptacije objekata pod zaštitom Zavoda za zaštitu spomenika.

Oženjen je i ima dvoje dece.