

Primljen / Received: 8.6.2015.

Ispravljen / Corrected: 15.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 18.3.2016.

Dostupno online / Available online: 10.6.2016.

Otkrivanje oštećenja armiranobetonskih konstrukcija primjenom piezoelektričnih pametnih agregata

Autori:



¹ Prof. dr. sc. **Dragoslav Stojić**
dragoslav.stojic@gmail.com



² Prof. dr. sc. **Tamara Nestorović**
tamara.nestorovic@rub.de



¹ **Nemanja Marković**, dipl. ing. građ.
nemanja.markovic@gaf.ni.ac.rs



¹ Mr. sc. **Radovan Cvetković**
radovancvetkovic@yahoo.com



³ **Nikola Stojić**, dipl. ing. građ.
n_stojic@yahoo.com

¹ Sveučilište u Nišu
Građevinski i arhitektonski fakultet

² Sveučilište Ruhr u Bochumu
Fakultet za građevinarstvo i zaštitu okoliša

³ Institut za ceste, Srbija

Izvorni znanstveni rad

Dragoslav Stojić, Tamara Nestorović, Nemanja Marković, Radovan Cvetković, Nikola Stojić

Otkrivanje oštećenja armiranobetonskih konstrukcija primjenom piezoelektričnih pametnih agregata

Primjena aktivnih sustava monitoringa kod otkrivanja oštećenja armiranobetonskih konstrukcija pomoću piezoelektričnih pametnih agregata, kao i na temelju širenja valova, trenutačno su najsvremenija istraživanja u svijetu. U radu su predstavljeni originalni modeli s parametarskom analizom problema promjene indeksa oštećenja konstrukcija u ovisnosti o veličini, položaju i orijentaciji pukotina. Numeričko modeliranje širenja valova u armiranom betonu izvedeno je eksplicitnom metodom konačnih elemenata koja je veoma učinkovita za ovu uporabu.

Ključne riječi:

piezoelektričnost, monitoring konstrukcija, metoda konačnih elemenata, armirani beton

Original scientific paper

Dragoslav Stojić, Tamara Nestorović, Nemanja Marković, Radovan Cvetković, Nikola Stojić

Detection of damage to reinforced-concrete structures using piezoelectric smart aggregates

The implementation of active monitoring systems to diagnose damage to reinforced concrete structures using piezoelectric smart aggregates, and based on wave propagation, ranks among the world's most advanced research activities. Original models, with parametric analysis of the damage index variation problem, depending on the size, position and orientation of cracks, are presented in the paper. Numerical modelling of wave propagation in reinforced concrete is conducted using the explicit finite element method, which is highly effective for this purpose.

Key words:

piezoelectricity, structural health monitoring, finite element method, reinforced concrete

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Dragoslav Stojić, Tamara Nestorović, Nemanja Marković, Radovan Cvetković, Nikola Stojić

Schadensermittlung bei Stahlbetonkonstruktionen mittels intelligenter piezoelektrischer Aggregate

Die Anwendung aktiver Überwachungssysteme für die Schadensermittlung bei Stahlbetonkonstruktionen mittels intelligenter piezoelektrischer Aggregate, sowie basierend auf der Wellenausbreitung, wird derzeit in den fortschrittlichsten Untersuchungen weltweit erforscht. In dieser Arbeit werden originale Modelle einschließlich Parameteranalysen zur Veränderung des Schadensindex für Konstruktionen in Funktion der Größe, Position und Orientierung von Rissen dargestellt. Die numerische Modellierung der Wellenausbreitung im Stahlbeton wurde mittels der expliziten Finite-Elemente-Methode realisiert, die sich für diese Anwendung als sehr effizient zeigt.

Schlüsselwörter:

Piezoelektrizität, Bauwerksüberwachung, Finite-Elemente-Methode, Stahlbeton

1. Uvod

Monitoring konstrukcija je multidisciplinarno inženjersko područje koje se bavi inovativnim metodama za praćenje sigurnosti i pouzdanosti konstrukcija, cjelovitosti i karakteristika bez utjecaja na konstrukciju kao i bez sprečavanja njenog slobodnog funkcioniranja [1]. Monitoring konstrukcija može biti pasivan ili aktivan. U radu je prikazan jedan aktivni sustav monitoringa konstrukcija pomoću piezoelektričnih aktuatora/senzora i na bazi širenja valova. Aktivni sustav monitoringa konstrukcija koristi piezoelektrične senzore ubačene ili zalijepljene na površinu konstrukcije kako bi pratio nastanak oštećenja, njegovo daljnje širenje, lokaciju oštećenja, veličinu i važnost, kao i posljedicu koju oštećenje može imati na pouzdanost i sigurnost konstrukcije.

Općenito, oštećenje se može shvatiti kao promjena nastala u sustavu koja negativno utječe na njegovo trenutačno ili buduće funkcioniranje [2]. Na ovaj način oštećenje razdvaja dva stanja konstrukcije: početno stanje koje se često smatra neoštećenim i stanje s nastalim oštećenjem. Aktivni sustav monitoringa konstrukcija pomoću piezoelektričnih senzora otkriva nastanak oštećenja ako postoji pretpostavka dva stanja konstrukcije - početno neoštećeno i oštećeno stanje. Uzroci nastanka oštećenja kod armiranobetonskih konstrukcija mogu biti brojni. Oni su posljedica mehaničkih utjecaja vanjskog opterećenja, kemijskih procesa prilikom očvršćivanja betona, utjecaja vanjskih atmosferilija, kao posljedica zamora materijala ili razornog opterećenja kao što je potres. Aktivni sustav monitoringa armiranobetonskih konstrukcija mora biti sposoban odrediti oštećenje bez obzira na uzrok nastanka, položaj, veličinu i orijentaciju oštećenja.

Posljednjih godina uporaba piezoelektričnih pločica za potrebe aktivnog praćenja stanja armiranobetonskih konstrukcija doživljava veliki uspon i zauzima znatno mjesto u suvremenim metodama čija se praktična primjena očekuje u budućnosti. U tom kontekstu, provedena su eksperimentalna istraživanja navedenog aktivnog sustava monitoringa armiranobetonskih konstrukcija pomoću piezoelektričnog pametnog agregata na različitim vrstama konstrukcijskih elemenata i potvrđena je njihova primjenjivost i multifunkcionalnost u otkrivanju oštećenja. Piezoelektrični pametni agregati korišteni su za određivanje ranih čvrstoća betona na gradilištu, određivanje udarne sile prilikom udara vozila u AB konstrukciju kao i aktivno otkrivanje oštećenja i praćenje stanja konstrukcije [3, 4]. Otkrivanje i lokalizacija nedostataka i oštećenja prilikom lijepljenja karbonskih traka za armiranobetonske gredne nosače prikazani su u radu [5]. Također, prikazana je metoda za otkrivanje nepravilnosti u prijanjanju armature za beton pomoću ubačenih piezoelektričnih senzora u AB konstrukciju [6]. Otkrivanje oštećenja kod AB okvirnih konstrukcija nastalih uslijed dinamičkog djelovanja, mostovskih grednih nosača, AB zidova kao i stupova eksperimentalno je analizirano i prikazano u radovima [7-10].

Piezoelektrični pametni agregati mogu se upotrebljavati za nove objekte tako što se ugrađuju u elemente pričvršćivanjem za armaturu ili oplatu na unaprijed predviđenom mjestu i s utvrđenom orijentacijom. Međutim, moguća je upotreba ovih senzora i za postojeće objekte, pri čemu se oni mogu ugraditi u otvore koji se posebno pripremaju za njihovo postavljanje. Zatim se ti otvori s postavljenim piezoelektričnim pametnim agregatom zapune cementnim mlijekom. Osim ugrađivanja pametnih agregata u elemente postojećih objekata, moguće je i njihovo lijepljenje na površini elemenata. Dimenzije piezoelektričnih pločica koje se koriste za ove potrebe najčešće su od 1 cm do 2 cm i njihov oblik je kružni ili kvadratni. One se ugrađuju u mali betonski blok oblika valjka ili kvadra, ovisno o primijenjenom obliku piezoelektrične pločice, promjera ili stranice od 4 cm do 8 cm, koji se kasnije pričvršćuje za armaturu ili oplatu elementa u koji se ugrađuje.

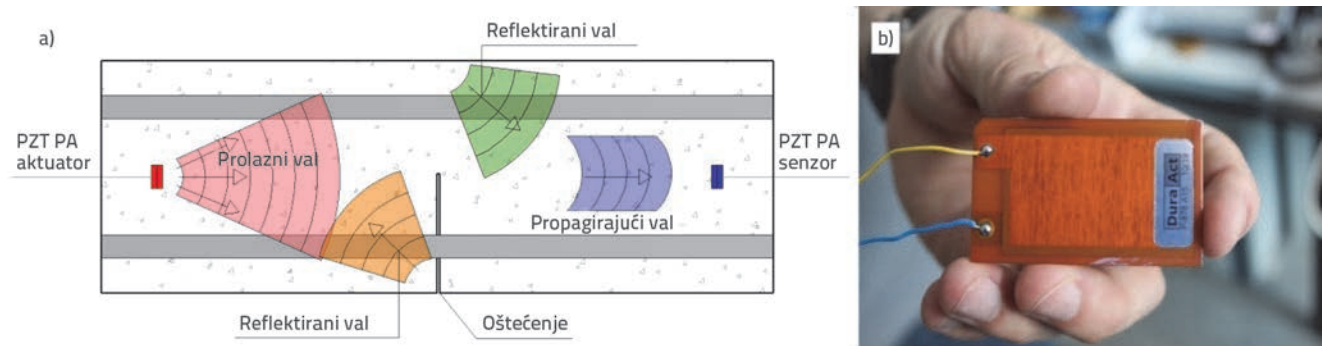
Razvoj numeričkih modela piezoelektričnih pametnih agregata i širenja valova kroz armirani beton može biti veoma značajan za razvoj metode i njenu praktičnu implementaciju radi otkrivanja, lokaliziranja i određivanja veličine oštećenja. U radu [11] prikazani su numerički modeli piezoelektričnih pametnih agregata, kao i modeli širenja valova kroz betonske gredne nosače u oštećenom i neoštećenom stanju primjenom eksplicitne metode konačnih elemenata (EMKE). Numerički model piezoelektričnog pametnog agregata za monitoring posmičnih seizmičkih naprezanja u konstrukciji korištenjem d_{15} piezoelektričnog moda prikazan je u radu [12], dok je za praćenje normalnih seizmičkih naprezanja razvijen model te je prikazan u radu [13]. Modeliranje piezoelektričnih pločica i širenje valova kroz betonske gredne elemente u programskom paketu ANSYS radi detekcije oštećenja prikazano je u radovima [14, 15]. Provedena su određena istraživanja s ciljem razvoja numeričkih modela, međutim, u dostupnoj relevantnoj literaturi može se vidjeti da je veoma mala zastupljenost ovakvih vrsta analiza što je i motiv za pisanje ovog rada.

U radu su prikazani veoma učinkoviti numerički modeli koji primjenjuju eksplicitnu metodu konačnih elemenata za modeliranje širenja valova kroz AB konstrukciju, kao i parametarska analiza promjene indeksa oštećenja ovisno o položaju pukotine, veličini pukotine i njenoj orijentaciji radi boljšeg razumijevanja odnosa indeksa oštećenja s navedenim variranim parametrima.

2. Otkrivanje oštećenja

2.1. Piezoelektrični pametni agregati (PZT PA)

Da bi se piezoelektrične pločice mogle primijeniti u armiranobetonskim konstrukcijama, razvijeni su piezoelektrični pametni agregati. Piezoelektrični pametni agregati izrađuju se tako da se piezoelektrična pločica zaštići određenim hidroizolacijskim sredstvima od utjecaja vlage, poveže žicama i ugradi u mali betonski blok. Na taj je način veoma krta i osjetljiva piezoelektrična pločica zaštićena od utjecaja vlage i



Slika 1. a) Princip postupka za određivanje oštećenja; b) Piezoelektrična pločica DuraAct - PI Ceramics (PZT - piezoelektrični aktuator/senzor)

mehaničkih udara koji se mogu dogoditi prilikom izvođenja AB konstrukcije i tijekom njezine uporabe. Piezoelektrični pametni agregat ugrađuje se u AB element na točno određenoj poziciji s unaprijed utvrđenom orijentacijom, što se najčešće ostvaruje povezivanjem za armaturu. Piezoelektrične pločice imaju određene prednosti kao što su: jednostavnost primjene, niska cijena, brz odziv, velik frekvencijski opseg, visoka pouzdanost, multifunkcionalnost, otpornost na kemijski agresivne supstancije, otpornost na radioaktivnost i UV zrake. Međutim te pločice imaju i neke nedostatke: izlazni napon je veoma nizak što zahtijeva korištenje pojačala, karakterizira ih velik otpor, osjetljivost na vlagu i udare (što se neutralizira izradom piezoelektričnih pametnih agregata zaštićenih od vlage i manjih udara), a osim toga treba ih biti više za praćenje stanja jedne konstrukcije.

Piezoelektričnost predstavlja fenomen stvaranja električnog napona kada je materijal izložen mehaničkom naprezanju (direktni učinak), ili suprotno, stvaranje mehaničkih deformacija kao odgovor kada je materijal izložen električnom naponu (suprotni učinak). Za linearne piezoelektrične materijale, konstitutivne jednadžbe odnosa između mehaničkih i električnih varijabli dane su u matricnom obliku [16]

$$\{S\} = [s]\{T\} + [d]^t \{E\} + \{\alpha\} \theta \quad (1)$$

$$\{E\} = [g]\{T\} + [\beta]\{D\} + \{\tilde{E}\} \theta \quad (2)$$

gdje su:

$\{S\}, \{T\}$ - vektor mehaničkih dilatacija i naprezanja

$\{E\}, \{D\}$ - vektor električnog polja i električnog polja pomaka

θ - temperatura

$\{\alpha\}, \{\tilde{E}\}$ - koeficijent toplinskog širenja i koeficijent piezoelektričnog naprezanja

$[d]^t, [g]$ - matrice piezoelektričnih konstanti dilatacija i naprezanja

$[\beta]$ - matrica dielektričnih konstanti

$[s]$ - matrica proporcionalnosti.

Jednadžba (1) naziva se još i jednadžba aktuatora i ona se upotrebljava da se predvidi kolika će se dilatacija ostvariti uslijed nanesenog naprezanja, električnog polja i temperature.

Suprotno tome, jednadžba (2) predstavlja jednadžbu senzora koja se upotrebljava da se predvidi koliki će se električni napon dobiti uslijed nanesenog naprezanja, električnog polja pomaka i temperature.

2.2. Princip metode na bazi širenja valova

Suprotni piezoelektrični efekt koristi se za aktuator, odnosno da bi se izazvalo širenje valova kroz armiranobetonski element. Nanošenjem električnog napona u veoma kratkom vremenskom signalu (eng. *tone burst hanning windowed signal*) ili kontinuiranom kroz vrijeme (eng. *sweep sine signal*) dolazi do narušavanja stanja mirovanja i do širenja valova. Suprotno tome, direktni piezoelektrični efekt koristi se za senzore, tj. da prihvatiti dolazeći val pretvarajući mehanički val u električni napon koji se očitava kao izlazni signal senzora. Ako se u konstrukciji razvije oštećenje, ono će utjecati na promjenu rasprostiranja valova u AB elementu, odnosno val koji dođe do senzora imat će manju energiju od usporednog vala za neoštećenu konstrukciju (slika 1.a). Praćenjem promjene energije izlaznog signala piezoelektričnog pametnog agregata senzora može se odrediti nastanak oštećenja kao i njegovo daljnje širenje. Zbog svojih piezoelektričnih svojstava (direktni i suprotni piezoelektrični efekti), može se isti piezoelektrični pametni agregat koristiti kao aktuator i kao senzor, što može znatno smanjiti broj piezoelektričnih pločica za praćenje stanja jedne AB konstrukcije.

3. Numeričko modeliranje širenja valova

Modeliranje širenja valova primjenom standardne metode konačnih elemenata nije učinkovito za numerički zahtjevne modele. Stoga je potrebno pri numeričkoj analizi primjenjivati metode koje su učinkovite, pouzdane i dovoljno točne. Jedna je od njih eksplicitna metoda konačnih elemenata (EMKE). Ona uzima u obzir glavne razlike za računanje pomaka, brzina i ubrzanja u obliku prikazanom jednadžbama (3) i (4):

$$\ddot{U}^{(t)} = \frac{1}{\Delta t^2} (U^{(t-\Delta t)} - 2U^{(t)} + U^{(t+\Delta t)}) \quad (3)$$

$$\dot{U}^{(t)} = \frac{1}{2\Delta t} (-U^{(t-\Delta t)} + U^{(t+\Delta t)}) \quad (4)$$

gdje je:

Δt - vremenski interval

U - pomak

\dot{U} - brzina

\ddot{U} - ubrzanje.

Rješenje u trenutku $t + \Delta t$ uspostavlja ravnotežu u vremenu t i $t - \Delta t$ zbog čega se ova metoda ubraja u eksplicitne integracijske metode. Ta integracijska metoda ne zahtijeva faktorizaciju matrice krutosti u svakom vremenskom koraku kao što je slučaj s implicitnom metodom, već se to obavlja samo u početku računanja, što znatno smanjuje vrijeme računanja simulacije. Numerička učinkovitost eksplicitne metode konačnih elemenata nije samo u primjeni eksplicitne integracijske procedure, već i u korištenju dijagonalne matrice masa, čija se inverzna matrica vrlo brzo određuje. Za isti vremenski interval implicitna MKE daje točnije rješenje u odnosu na eksplicitnu MKE. Međutim, eksplicitna MKE zbog svoje vrlo velike učinkovitosti može koristiti veliki broj malih vremenskih koraka i doći do željene točnosti rješenja znatno brže od implicitne. Eksplicitnom procedurom obavlja se integracija kroz vrijeme primjenjujući metodu glavnih razlika i određeni broj malih vremenskih intervala koji moraju zadovoljiti stabilno rješenje, tj. vremenski odsječak primijenjen u modelu mora biti manji od kritičnog:

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \frac{2}{\omega_{max}} \tag{5}$$

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \frac{\Delta L}{c_L} \tag{6}$$

gdje je:

ω_{max} - maksimalna frekvencija

ΔL - najmanja karakteristična dužina konačnog elementa

c_L - brzina širenja vala.

Broj konačnih elemenata po jednoj valnoj dužini (n) vrlo je bitna karakteristika modela i znatno utječe na točnost dobivenih rješenja. Preporuka je da n ne bude manje od 7 za modeliranje širenja valova nižih frekvencija, dok za veoma kratka impulsna opterećenja treba uzeti vrijednosti od 10 do 20. U slučaju modeliranja valova visokih frekvencija koji ulaze u zonu ultrazvučnih valova javlja se problem vrlo velikog broja konačnih elemenata modela koji se, s građevinskog stajališta ubrajaju u veoma male modele što zahtijeva izuzetno jaka računala s velikim kapacitetima memorije. Ovaj problem može se riješiti modeliranjem potrebnog dijela modela koji bi bio omeđen zonom koja ima znatno veće prigušenje (eng. Absorbing layer using increasing damping - ALID) [17]. Koristeći ovu metodu eliminiše se odbijanje valova od graničnih rubova modela koji u realnim većim nosačima ne postoje.

4. Wavelet analiza signala i formiranje indeksa oštećenja

Izlazni signal senzora S može se rastaviti u 2^n signala obilježenih sa $\{X_1, X_2, \dots, X_{2^n}\}$, pri čemu se svaki signal može predstaviti na sljedeći način:

$$X_j = [x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,m}] \tag{7}$$

gdje je:

m - broj snimljenih (mjerenih) podataka vremenskog signala,

n - nivo wavelet dekompozicije signala, pri čemu je u radu usvojeno $n=3$.

Wavelet dekompozicijom signala dobivamo dva signala koji se nazivaju aproksimacija i detalj. Aproksimacija pruža informacije o nižim frekvencijama signala, a detalj o višim frekvencijama. Energije aproksimacija izlaznih signala za modele prikazane u ovom radu višestruko su veće od energija detalja. Kako je indeks oštećenja baziran na praćenju promjene energije izlaznih signala, aproksimacije su u ovoj analizi bile važnije u odnosu na detalje. Energija dekomponiranih signala može se predstaviti izrazom:

$$E_{i,j} = \|X_j\|_2^2 = x_{j,1}^2 + x_{j,2}^2 + \dots + x_{j,m}^2 \tag{8}$$

pri čemu je i vremenski indeks, a j frekvencijski opseg ($j=1,2,\dots,2^n$). Računanjem energija svih dekomponiranih signala može se formirati vektor energije za AB element u neoštećenom stanju E_h i element u oštećenom stanju E_o :

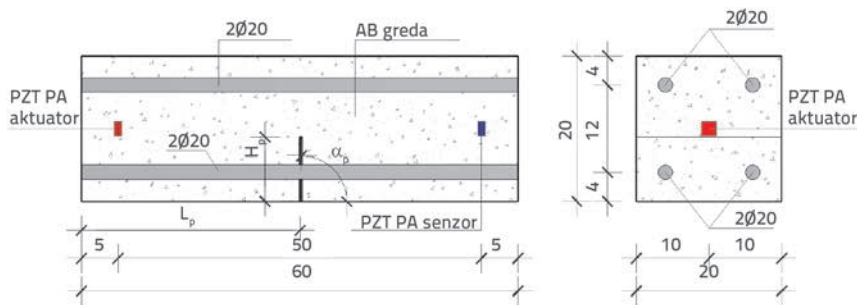
$$E_h = [E_{h,1}, E_{h,2}, \dots, E_{h,2^n}] \tag{9}$$

$$E_o = [E_{o,1}, E_{o,2}, \dots, E_{o,2^n}] \tag{10}$$

Indeks oštećenja na bazi promjene energije izlaznih signala formira se kao korijen srednjih kvadratnih odstupanja:

$$DI = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{2^n} (E_{o,j} - E_{h,j})^2}{\sum_{j=1}^{2^n} E_{h,j}^2}} \tag{11}$$

Indeks oštećenja (DI) može imati vrijednost od 0 za neoštećenu konstrukciju do 1 za potpuno oštećenu konstrukciju gdje val nije bio u stanju doprijeti do senzora. Također, iz jednadžbe (11) može se zaključiti da će indeks oštećenja biti veći što je veća razlika između energija izlaznog signala stanja oštećene i neoštećene AB konstrukcije. Na osnovi te činjenice moguće je pratiti stanje oštećenja AB građevine dugotrajno ako se prati promjena vrijednosti indeksa oštećenja.



Slika 2. Geometrijske karakteristike modela AB elementa

5. Modeli

5.1. Geometrijske karakteristike

Armiranobetonski element dimenzija 0,6 x 0,2 x 0,2 m s armaturom 4Ø20 i dva piezoelektrična pametna agregata predstavlja analizirani model (slika 2.). Parametarska analiza promjene indeksa oštećenja provedena je ovisno o položaju (L_p), veličini (H_p) i orijentaciji (α_p) pukotine u navedenom AB elementu. Ukupno je analizirano 80 modela te su njihove karakteristike i oznake prikazane u tablicama 1. i 2.

Položaj pukotine variran je od vrijednosti 0,15 m do 0,45 m s korakom od 0,05 m. Analizirane su dužine pukotina 0,05, 0,08, 0,11 i 0,14 m, kao i kutovi nagiba pukotina od 60° do 120° s korakom od 10° u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu.

Tablica 1. Oznake i karakteristike modela s vertikalnim pukotinama

Parametri	Naziv modela					Parametri	Naziv modela				
	Model 1						Model 2				
	M 1-1	M 1-2	M 1-3	M 1-4	M 1-5		M 2-1	M 2-2	M 2-3	M 2-4	M 2-5
L_p [m]	0,15					L_p [m]	0,20				
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14
α_p [°]	90					α_p [°]	90				
	Model 3						Model 4				
	M 3-1	M 3-2	M 3-3	M 3-4	M 3-5		M 4-1	M 4-2	M 4-3	M 4-4	M 4-5
L_p [m]	0,25					L_p [m]	0,30				
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14
α_p [°]	90					α_p [°]	90				
	Model 5						Model 6				
	M 5-1	M 5-2	M 5-3	M 5-4	M 5-5		M 6-1	M 6-2	M 6-3	M 6-4	M 6-5
L_p [m]	0,35					L_p [m]	0,40				
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14
α_p [°]	90					α_p [°]	90				
	Model 7						Model 8 - neoštećena greda				
	M 7-1	M 7-2	M 7-3	M 7-4	M 7-5		M 8-1	M 8-2	M 8-3	M 8-4	M 8-5
L_p [m]	0,45					L_p [m]	0				
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0				
α_p [°]	90					α_p [°]	0				

5.2. MKE princip modeliranja

Piezoelektrični pametni agregat s lijeve strane greda upotrebljavan je kao aktuator kako bi izvršio širenje valova, dok je s druge strane desni piezoelektrični pametni agregat korišten kao senzor. Model piezoelektričnog pametnog agregata izveden je u softverskom paketu ABAQUS/STANDARD uzimajući u obzir elektromehaničke karakteristike piezoelektričnih materijala, koristeći

kombinaciju mehaničke ravnoteže i jednadžbe ravnoteže električnog toka. Mehanička ravnoteža dana je jednadžbom (12)

$$\int_V \sigma : \delta \varepsilon dV = \int_s t \cdot \delta u ds + \int_V f \cdot \delta u dV \quad (12)$$

gdje je:

σ - Cauchyjevo naprezanje

t - proklizavanje točke na ravnini

f - sila po jedinici volumena,

dok je ravnoteža električnog toka dana jednadžbom (13):

$$\int_V q : \delta E dV = \int_s q_s \cdot \delta \varphi ds + \int_V q_v \cdot \delta \varphi dV \quad (13)$$

gdje je:

q - električni tok

q_s - električni tok po jedinici površine unutar tijela
 q_v - električni tok po jedinici volumena.

Pomaci dobiveni kao posljedica nanošenja električnog napona na piezoelektričnu pločicu upotrijebljeni su kao ulazni parametar za modeliranje širenja valova koje je izvedeno u programskom paketu ABAQUS/EXPLICIT. Funkcija promjene pomaka upotrijebljena u analizi je *3.5-cycle Hanning windowed tone burst* signal u trajanju od $3.5 \cdot 10^{-5}$ sekunde s glavnom frekvencijom od 100 kHz. Način modeliranja uz upotrebu standardne i eksplicitne MKE predstavlja postupak modeliranja koji je upotrijebljen u radu [11] i koji je verificiran ispitivanjem na betonskim gredama. Beton i armatura modelirani su kao linearno elastični materijali s karakteristikama prikazanim u tablici 3. Kontakt između betona i armature utvrđen je pomoću *Tie Constraint* površinskog kontakta dostupnog u ABAQUS/EXPLICIT analizi s mogućnošću rotacijskih stupnjeva slobode. Pukotina je modelirana kao otvor u modelu debljine jednog konačnog elementa s dužinom i

orijentacijom definiranom za svaki pojedinačni model posebno. Mreža konačnih elemenata oko kosih pukotina zahtijevala je upotrebu nepravilnih oblika konačnih elemenata. Ukupno trajanje simulacije je $T_{sim} = 0,001$ s, a usvojen je vremenski interval $\Delta t = 2 \cdot 10^{-7}$ s, što zadovoljava kritični vremenski korak. Primijenjeni konačni elementi su C3D8R, osmočvorni prizmatični konačni elementi s reduciranom integracijom i Hourglass kontrolom. Usvojeno je 12 konačnih elemenata po jednoj valnoj dužini. Približna veličina konačnog elementa korištenog u prikazanim modelima je 0,0025 m, zbog čega je trebalo oko 1.700.000 konačnih elemenata za modeliranje analiziranih AB elemenata.

6. Rezultati i rasprava

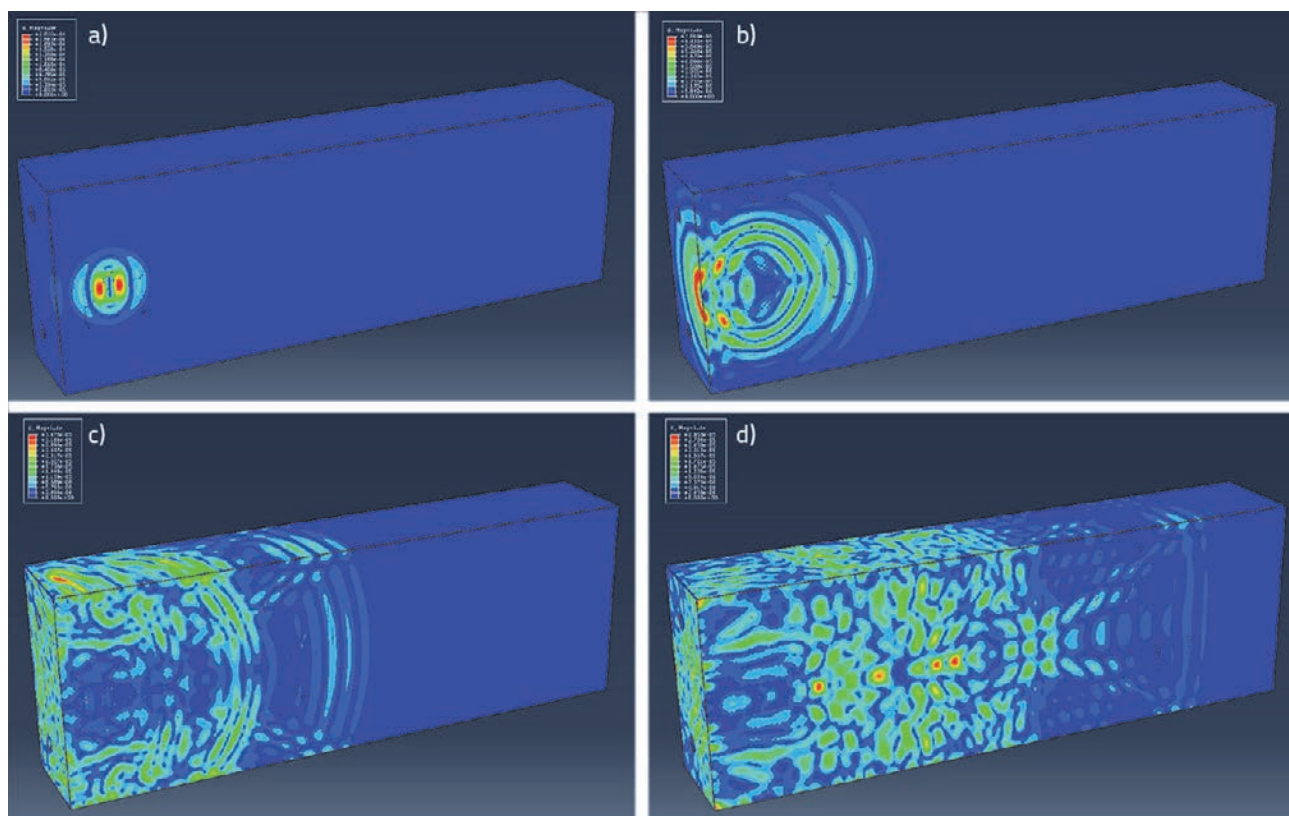
Na slikama 3. do 5. prikazano je širenje valova kroz armiranobetonske elemente s oštećenjem i elemente bez oštećenja. Napravljen je presjek elementa kroz srednju vertikalnu

Tablica 2. Oznake i karakteristike modela s kosim pukotinama

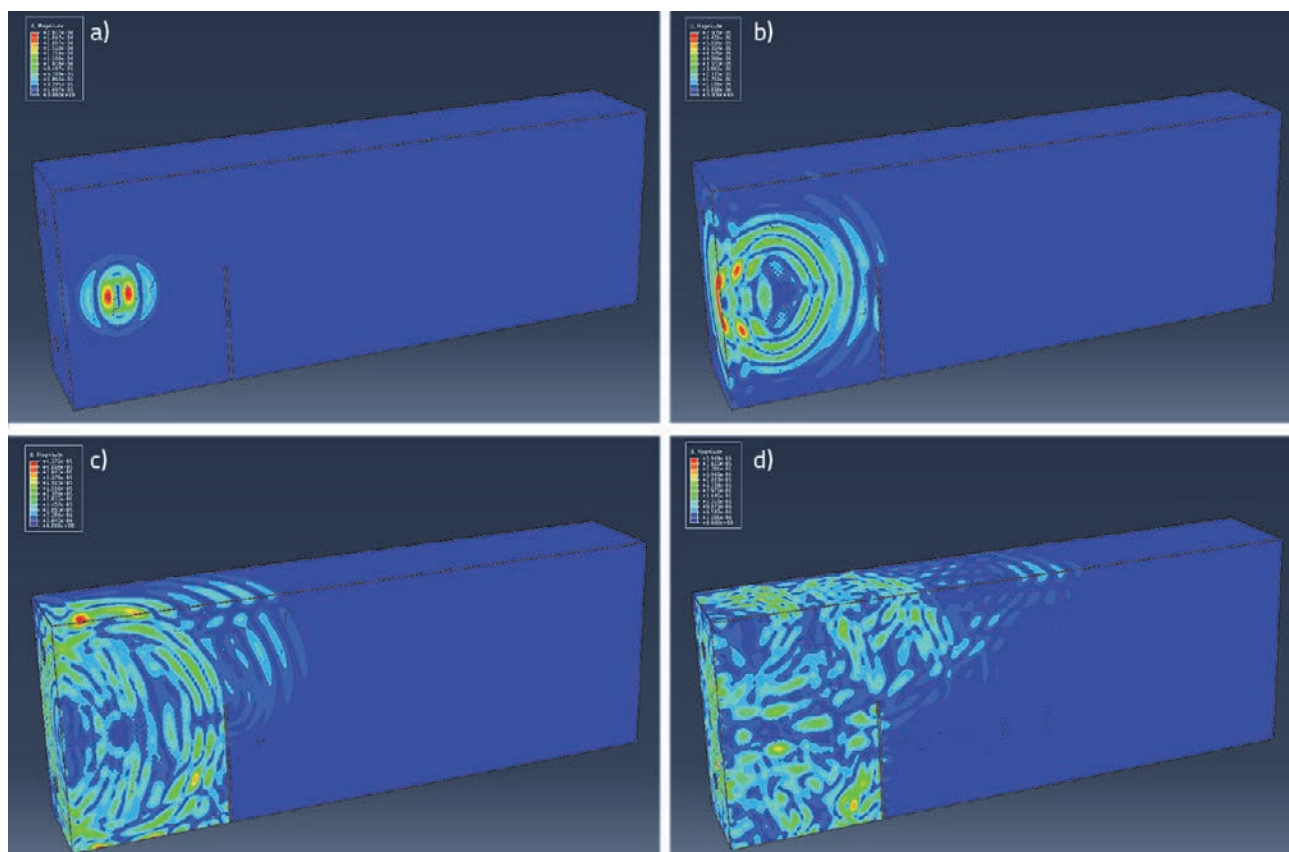
Parametri	Naziv modela					Parametri	Naziv modela				
	Model 9						Model 10				
	M 9-1	M 9-2	M 9-3	M 9-4	M 9-5		M 10-1	M 10-2	M 10-3	M 10-4	M 10-5
L_p [m]	0,30					L_p [m]	0,30				
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14
α_p [°]	120					α_p [°]	110				
	Model 11						Model 12				
	M 11-1	M 11-2	M 11-3	M 11-4	M 11-5		M 12-1	M 12-2	M 12-3	M 12-4	M 12-5
	L_p [m]	0,30					L_p [m]	0,30			
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14
α_p [°]	100					α_p [°]	90				
	Model 13						Model 14				
	M 13-1	M 13-2	M 13-3	M 13-4	M 13-5		M 14-1	M 14-2	M 14-3	M 14-4	M 14-5
	L_p [m]	0,30					L_p [m]	0,30			
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14
α_p [°]	80					α_p [°]	70				
	Model 15						Model 16 - neoštećena greda				
	M 15-1	M 15-2	M 15-3	M 15-4	M 15-5		M 16-1	M 16-2	M 16-3	M 16-4	M 16-5
	L_p [m]	0,30					L_p [m]	0			
H_p [m]	0	0,05	0,08	0,11	0,14	H_p [m]	0				
α_p [°]	60					α_p [°]	0				

Tablica 3. Karakteristike materijala betona i armature AB elemenata

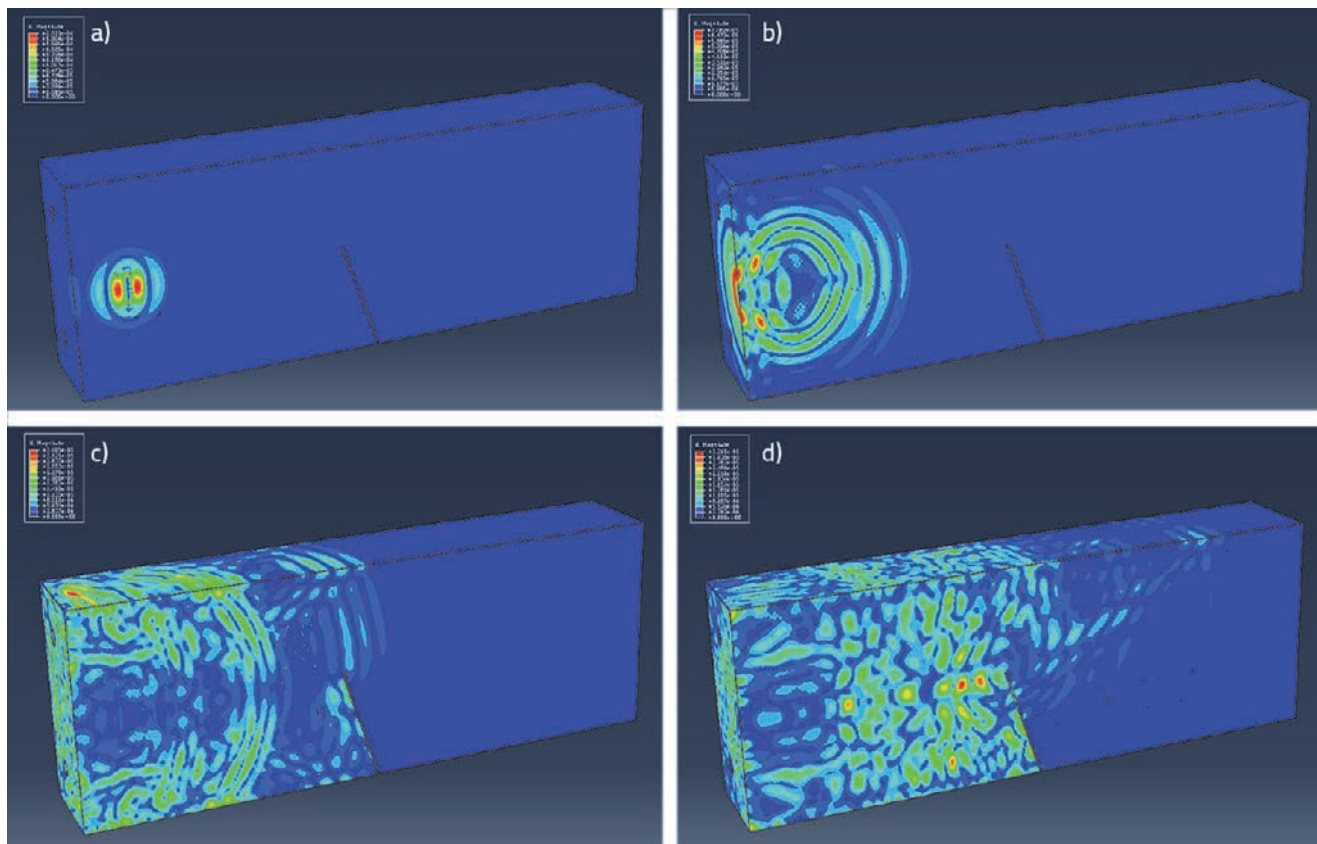
Beton			Armatura		
ρ [kg/m ³]	E [Pa]	ν	ρ [kg/m ³]	E [Pa]	ν
2400	$30 \cdot 10^9$	0,2	7800	$210 \cdot 10^9$	0,3



Slika 3. Širenje valova u neoštećenim modelima 8 i 16 izazvano pomoću PZT PA aktuatora u različitim vremenskim intervalima: a) $t=2,0172e^{-5}$ s; b) $t=4,0172e^{-5}$ s; c) $t=8,0172e^{-5}$ s; d) $t=1,4017e^{-4}$ s



Slika 4. Širenje valova u modelu 1 s vertikalnom pukotinom izazvano pomoću PZT PA aktuatora u različitim vremenskim intervalima: a) $t=2,0172e^{-5}$ s; b) $t=4,0172e^{-5}$ s; c) $t=6,0172e^{-5}$ s; d) $t=1,0017e^{-4}$ s



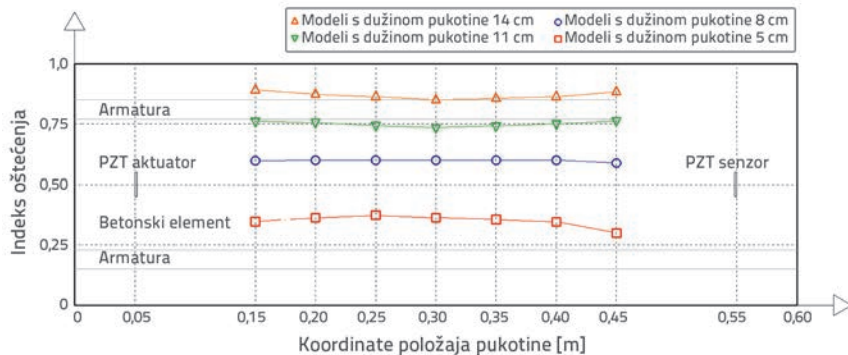
Slika 5. Širenje valova u modelu 10 s kosom pukotinom izazvanom pomoću PZT PA aktuatora u različitim vremenskim intervalima: a) $t=2,0172e^{-5}$ s; b) $t=4,0172e^{-5}$ s; c) $t=8,0172e^{-5}$ s; d) $t=1,4011e^{-4}$ s

ravninu u smjeru pružanja AB elementa radi boljeg prikazivanja širenja valova unutar armiranobetonskog elementa. Širenje valova odvija se nesmetano za neoštećeni AB element pružajući se kroz njega i odbijajući se samo od vanjskih rubova elementa, što se može jasno vidjeti na slikama 3.a do 3.d.

Na slikama 4.b, 4.c, 4.d može se vidjeti da se dio vala odbija od pukotine i vraća prema aktuatoru slabeći propagirajući val i smanjujući energiju izlaznog signala. Drugi dio vala prolazi pored pukotine prostirući se kroz AB element te dolazi do piezoelektričnog pametnog agregata - senzora. Kod modela s dužinama pukotina 0,11 i 0,14 m karakteristično je kašnjenje direktnog dolaznog vala u senzoru, što nije slučaj za modele s pukotinama od 0,05 i 0,08 m. Ova činjenica može se objasniti time da pukotine veće od 0,1 m prolaze kroz direktni pravac piezoelektrični pametni agregat aktuator-senzor.

Slike 6. i 7. prikazuju vrijednosti indeksa oštećenja za analizirane modele ovisno o položaju, dužini i orijentaciji pukotine. Vrijednosti su prikazane na geometriji numeričkih modela kako bi se lakše pratila promjena indeksa oštećenja za modele s vertikalnim (slika 6.) i s kosim pukotinama (slika 7.).

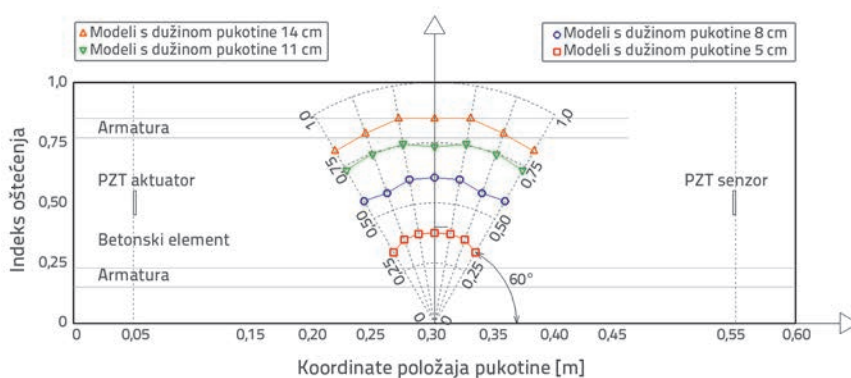
Sa slike 6. može se vidjeti da promjena vrijednosti indeksa oštećenja nije drastična s obzirom na položaj pukotine i da se vrijednosti najčešće razlikuju do nekoliko postotaka (tablica 4.). Također, za modele s dužinom pukotina od 0,05 m, oblik promjene indeksa oštećenja je konveksan, dok je za modele s dužinama 0,11 i 0,14 m oblik konkavan. Model s dužinom pukotine od 0,08 m ima približno iste vrijednosti indeksa oštećenja, ali s blagim trendom konveksnosti. Na osnovi ovako dobivenih rezultata može se zaključiti da će promjena indeksa oštećenja (DI) biti približno konveksna ako je pukotina manja od pravca piezoelektrični pametni agregat aktuator-senzor, a ako su vrijednosti pukotina veće od ovog položaja,



Slika 6. Indeksi oštećenja ovisno o položaju i veličini vertikalnih pukotina

Tablica 4. Odstupanja DI (indeksa oštećenja) u odnosu na usporedni model, u postocima

Usporedni model	Odstupanje u postocima						Usporedni model	Odstupanje u postocima					
	$P = \left \frac{DI_i - DI_u}{DI_u} \right [\%]$							$P = \left \frac{DI_i - DI_u}{DI_u} \right [\%]$					
M 4-2	M 1-2	M 2-2	M 3-2	M 5-2	M 6-2	M 7-2	M 12-2	M 9-2	M 10-2	M 11-2	M 13-2	M 14-2	M 15-2
DI = 0,3758	4,00	0,00	2,83	2,34	5,45	16,5	DI = 0,3758	9,35	1,74	0,15	0,01	2,34	9,35
M 4-3	M 1-3	M 2-3	M 3-3	M 5-3	M 6-3	M 7-3	M 12-3	M 9-3	M 10-3	M 11-3	M 13-3	M 14-3	M 15-3
DI = 0,6046	0,32	0,00	0,28	0,22	0,00	2,13	DI = 0,6046	3,29	4,97	0,17	0,14	4,98	3,30
M 4-4	M 1-4	M 2-4	M 3-4	M 5-4	M 6-4	M 7-4	M 12-4	M 9-4	M 10-4	M 11-4	M 13-4	M 14-4	M 15-4
DI = 0,7347	3,41	2,72	1,03	0,95	2,09	3,83	DI = 0,7347	0,08	2,44	3,09	3,07	2,44	0,12
M 4-5	M 1-5	M 2-5	M 3-5	M 5-5	M 6-5	M 7-5	M 12-5	M 9-5	M 10-5	M 11-5	M 13-5	M 14-5	M 15-5
DI = 0,8498	4,74	2,64	1,51	0,73	1,69	4,13	DI = 0,8498	2,95	1,45	1,52	1,49	1,47	2,84



Slika 7. Indeksi oštećenja ovisno o orijentaciji i veličini kosih pukotina

promjena će biti približno konkavna. Taj uočeni fenomen u direktnoj je vezi s položajem akuatora i senzora, geometrijom AB elementa, položajem armature u gredi kao i položajem i veličinom oštećenja. Zbog svih tih parametara koji utječu na promjenu indeksa oštećenja (DI), nije moguće dati zakonitost funkcije promjene indeksa oštećenja visno o položaju, dužini i orijentaciji pukotine.

Kod modela s kosim pukotinama (slika 7.), promjena indeksa oštećenja ovisno o nagibu pukotine ne prelazi 5%, osim za modele M 9-2 i M 15-2. Također i modeli s vertikalnim pukotinama ne prelaze navedeni postotak, osim modeli M 7-2 i M 6-2. Mali postotak promjene DI ovisno o položaju i orijentaciji pukotine dovodi do zaključka da je DI u direktnoj vezi s veličinom pukotine, položajem PZT PA akuatora-senzora, kao i geometrijom AB nosača te ne ovisi znatno o položaju i orijentaciji oštećenja. Prikazana metoda otkrivanja oštećenja na bazi širenja valova i pomoću piezoelektričnog pametnog agregata ne daje mogućnosti

određivanja položaja oštećenja, njegove veličine i orijentacije, zbog čega je potrebno raditi na razvoju metoda koje će dati odgovor na ova otvorena pitanja i unaprijediti postojeću metodu.

7. Zaključak

U radu je prikazan postupak za aktivno praćenje stanja AB konstrukcija i otkrivanje oštećenja na temelju širenja valova, uz upotrebu piezoelektričnih pametnih agregata betoniranih unutar konstrukcije. Pametni agregati predstavljaju suvremene multifunkcionalne uređaje koje karakterizira niska cijena, veoma brz odziv, velik frekvencijski opseg, otpornost na atmosferilije, radioaktivnost, UV zrake i utjecaje kemijski agresivnih tvari, kao i veoma laka uporaba. Praćenje razvoja oštećenja provodi se pomoću jednodimenzionalnog indeksa oštećenja formiranog na osnovi "wavelet" analize signala. U radu su prikazani originalni numerički modeli širenja valova kroz AB grede s oštećenjem ili bez oštećenja, uz primjenu eksplicitne metode konačnih elemenata koja je iznimno učinkovita. Provedena je i parametarska analiza promjene indeksa oštećenja ovisno o dužini, položaju i orijentaciji pukotine u AB gredama. Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da promjena indeksa oštećenja ovisno o položaju i orijentaciji pukotina ne prelazi vrijednosti od nekoliko postotaka za najveći broj modela. Indeks oštećenja može imati vrijednost od 0 za neoštećenu do 1 za potpuno oštećenu konstrukciju i

u najvećoj mjeri ovisi o veličini oštećenja, bez obzira na položaj ili njegovu orijentaciju. Vrijednost indeksa oštećenja direktno ovisi o položaju piezoelektričnog pametnog agregata senzora-aktuatora, veličini, broju i lokaciji

oštećenja, geometriji AB grede te o položaju armature. Na osnovi parametarske analize izrađene u ovom radu, uočeno je da promjena indeksa oštećenja ovisi o položaju pukotine i njenom nagibu.

LITERATURA

- [1] Stepinski, T., Uhl, T., Staszewski, W.: *Advanced structural damage detection - From theory to engineering applications*, John Wiley and Sons, West Sussex, United Kingdom, pp. 1-17, 2013., <http://dx.doi.org/10.1002/9781118536148>
- [2] Deraemaeker, A., Worden, K.: *New trends in vibration based structural health monitoring*, Springer-Verlag, Wien and New York, pp. 1-19, 2010.
- [3] Song, G., Gu, H., Mo, Y.L.: *Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures - a tutorial and a review*, *Smart Materials and Structures*, 17 (2008) 3, pp. 1-17, <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/033001>
- [4] Song, G., Olmi, C., Gu, H.: *An overheight vehicle - bridge collision monitoring system using piezoelectric transducers*, *Smart Material and Structures*, 16 (2007) 2, pp. 462-468, <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/16/2/026>
- [5] Kim, J.W., Lee, C., Park, S.: *Damage localization for CFRP-debonding defects using piezoelectric SHM techniques*, *Research in Nondestructive Evaluation*, 23 (2012), pp. 183-196, <http://dx.doi.org/10.1080/09349847.2012.660244>
- [6] Wu, F., Chang, F.K.: *Debond Detection using Embedded Piezoelectric Elements for Reinforced Concrete Structures - Part II: Analysis and Algorithm*, *Structural Health Monitoring*, 17 (2006), pp. 17-28, <http://dx.doi.org/10.1177/1475921706057979>
- [7] Laskar, A., Gu, H., Mo, Y.L., Song, G.: *Progressive collapse of a two-story reinforced concrete frame with embedded smart aggregates*, *Smart Materials and Structures*, 18 (2009) 7, pp. 10, <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/18/7/075001>
- [8] Song, G., Gu, H., Mo, Y.L., Hsu, T.T.C., Dhonde, H.: *Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers*, *Smart Materials and Structures*, 16 (2007) 4, pp. 959-968, <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/16/4/003>
- [9] Yan, S., Sun, W., Song, G., Gu, H., Huo, L.S., Liu, B., Zhang, Y.G.: *Health monitoring of reinforced concrete shear walls using smart aggregates*, *Smart Materials and Structures*, vol. 18, 2009.
- [10] Wang, R.L., Gu, H., Mo, Y.L., Song, G.: *Proof-of-concept experimental study of damage detection of concrete piles using embedded piezoceramic transducers*, *Smart Materials and Structures*, vol. 22, 2013.
- [11] Markovic, N., Nestorovic, T., Stojic, D.: Numerical modeling of damage detection in concrete beams using piezoelectric patches, *Mechanics Research Communications*, 64 (2015), pp. 15-22, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.12.007>
- [12] Hou, S., Zhang, H.B., Ou, J.P.: A PZT-based smart aggregate for seismic shear stress monitoring, *Smart Materials and Structures*, 22 (2013) 6, pp. 9, <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/22/6/065012>
- [13] Hou, S., Zhang, H.B., Ou, J.P.: A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring, *Smart Materials and Structures*, 21 (2012) 10, 9pp., doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/21/10/105035>
- [14] Song, F., Huanf, G.L., Kim, J.H., Haran, S.: On the study of surface wave propagation in concrete structures using a piezoelectric actuators/sensors system, *Smart Materials and Structures*, 17 (2008) 5, pp. 8, <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/17/5/055024>
- [15] Park, S., Ahmad, S., Yun, C.B., Roh, Y.: Multiple Crack Detection of Concrete Structures Using Impedance-based Structural Health Monitoring Techniques, *Experimental Mechanics*, 46 (2006), pp. 609-618, <http://dx.doi.org/10.1007/s11340-006-8734-0>
- [16] Giurgiutiu, V.: *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors*, Elsevier, pp. 13-39, 2008.
- [17] Drozd, M.B.: *Efficient finite element modelling of ultrasonic waves in elastic media*, PhD thesis, Imperial college of science technology and medicine, London, 2008.