

Primljen / Received: 4.7.2015.

Ispravljen / Corrected: 2.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 15.5.2016.

Dostupno online / Available online: 10.8.2016.

Testiranje heurističkih metoda optimizacije za detekciju oštećenja na bazi vibracija

Autori:



¹Ahmed Alalikhhan, MCE
ahmed.alikan@gmail.com



¹Saad Al-Wazni, MCE
al_wazni@yahoo.com



²Izv.prof.dr.sc. Zoran Mišković
mzoran@imk.grf.bg.ac.rs



²Izv.prof.dr.sc. Ratko Salatić
ratko@grf.bg.ac.rs



³Ljiljana Mišković, dipl.ing.građ.
miskoviclj@sicp.co.rs

¹ Sveučilište Kufa, Irak
Građevinski fakultet

² Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet

³ Institut za promet – CIP, Beograd
Zavod za konstrukcije

Prethodno priopćenje

Ahmed Alalikhhan, Saad Al-Wazni, Zoran Mišković, Ratko Salatić, Ljiljana Mišković

Testiranje heurističkih metoda optimizacije za detekciju oštećenja na bazi vibracija

Proteklih je godina značajan napor usmjeren na razvoj nedestruktivnih tehnika detekcije oštećenja u konstrukcijama na osnovi promjena njihovih dinamičkih parametara. Istraživanja su provedena na modelu proste slobodno oslonjene grede s preputima. Predložene procedure za detekciju lokacije i nivoa oštećenja primjenjuju dvije heurističke tehnike optimizacije: tabu pretraživanje i simulirano kaljenje. Rezultati pokazuju da su obje predložene procedure, s odgovarajućim funkcijama cilja i težinskim faktorima, vrlo efikasne u detekciji lokacije i ozbiljnosti oštećenja.

Ključne riječi:

detekcija oštećenja, tabu pretraživanje, simulirano kaljenje, modalni parametri, heuristička optimizacija

Preliminary report

Ahmed Alalikhhan, Saad Al-Wazni, Zoran Mišković, Ratko Salatić, Ljiljana Mišković

Testing heuristic optimisation methods for vibration-based detection of damage

Considerable efforts have been made in recent years for the development of non-destructive techniques for detection of structural damage based on changes of dynamic parameters of structures. The tests are made on a model of a simple beam with cantilevers. Two heuristic optimisation techniques are used in the proposed procedure for detecting the location and level of damage: taboo search and simulated annealing. The results show that both proposed procedures, with appropriate target functions and weight factors, are highly efficient for detecting the location and level of damage.

Key words:

damage detection, taboo search, simulated annealing, modal parameters, heuristic optimisation

Vorherige Mitteilung

Ahmed Alalikhhan, Saad Al-Wazni, Zoran Mišković, Ratko Salatić, Ljiljana Mišković

Prüfung heuristischer Optimierungsmethoden zur Schadensdetektion aufgrund von Vibrationen

In den letzten Jahren wurde eine starke Entwicklung nichtdestruktiver Techniken zur Schadensdetektion bei Konstruktionen aufgrund der Veränderung ihrer dynamischen Parameter angestrebt. Die Untersuchungen wurden am Model eines einfachen Balkens mit Überhängen durchgeführt. Die vorgeschlagenen Verfahren zur Detektion der Lokalität und des Ausmasses des Schadens stützen sich auf zwei heuristische Optimisationsverfahren: die Tabusuche und die simultane Verhärtung. Die Resultate zeigen, dass beide vorgeschlagenen Verfahren mit den entsprechenden Zielfunktionen und Wichtungsfaktoren bei der Schadensdetektion ausgesprochen wirksam sind.

Schlüsselwörter:

Detektion von Schäden, Tabusuche, simulierte Verhärtung, Modalparameter, heuristische Optimierung

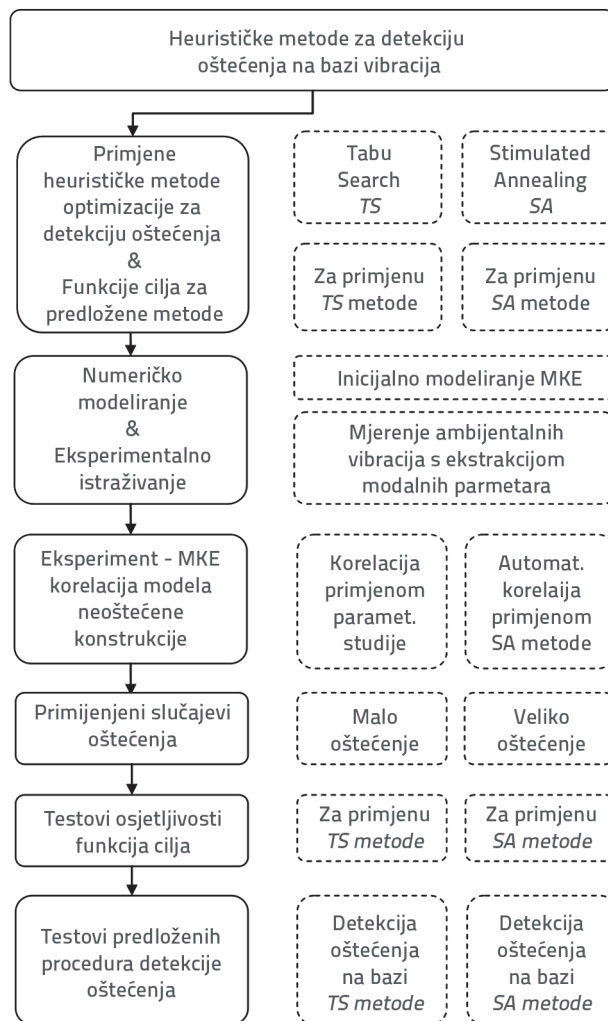
1. Uvod

Prisutnost oštećenja u konstrukciji može reducirati njene karakteristike skraćivanjem vijeka upotrebe ili može se razviti i prouzrokovati katastrofalni otkaz konstrukcije [1]. Nedestruktivne metode ispitivanja općenito se primjenjuju za ispitivanje promjena u konstrukcijskim parametrima kako bi se spriječio neočekivani otkaz nosivosti konstrukcije.

Ove tehnike su uključene u procedure tzv. monitoringa stanja konstrukcija - (MSK), što je način izdvajanja informacija o prisutnosti, lokaciji i stupnju oštećenja u konstrukciji primjenom nedestruktivnih metoda, [2-5]. Jedan od mogućih pristupa je praćenje i interpretacija promjene u dinamičkim parametrima konstrukcija izdvojenih na osnovi mjerenja tijekom eksperimentalne modalne analize ili mjerenja ambijentalnih vibracija i odgovarajućih tehnika procesiranja izmjerenih signala [6]. Prisutnost oštećenja u konstrukciji uzrokuje promjene njenih vlastitih frekvencija i modalnih oblika. Međutim, vrlo je teško locirati poziciju oštećenja koristeći samo vlastite frekvencije, zato što su vlastite frekvencije globalne karakteristike konstrukcije, i ne mogu reflektirati informacije o prostornoj promijeni konstrukcijskih modalnih parametara. Dakle, informacije o modalnim oblicima nužne su za identifikaciju lokacije oštećenja. U literaturi se mogu naći primjene različitih metoda za detekciju oštećenja, kao što su mjerenje promjena vlastitih frekvencija, ocjena promjena matrice fleksibilnosti konstrukcije, promjene u dinamički mjerenoj matrici krutosti i krutosti na savijanje konstrukcije [7, 8]. Promjene modalnih parametara, vlastitih frekvencija i modalnih oblika, uspoređene su s modalnim parametrima određenim na temelju eksperimentalne analize uslijed redukcije krutosti na savijanje.

Većina metoda detekcije oštećenja uključuje metode optimizacije za otkrivanje prisutnosti i ozbiljnosti konstrukcijskog oštećenja, što predstavlja osnovni dio cijelog procesa. Prostor pretraživanja (projektirani) može biti vrlo velik, tako da se globalni optimum ne može naći u okviru prihvatljivog vremena. Direktno metode linearne i nelinearne optimizacije uglavnom nisu efikasne u računskom smislu, ili će biti računski preskupe za pronalaženje rješenja ovakvih problema [9]. Heurističke optimizacijske metode, koje su u stanju otkriti globalni minimum ili približni globalni minimum, prilagođene su za takve složene i teške optimizacijske probleme: genetski algoritmi (eng. *Genetic Algorithms* - GA), optimizacija roja čestica (eng. *Particle Swarm Optimization* - PSO), umjetne neuronske mreže (eng. *Artificial Neural Network* - ANN), Tabu Search (TS) i simulirano kaljenje (eng. *Simulated Annealing* - SA). TS je metaheuristička iterativna procedura koja kreće od nekog inicijalnog dopuštenog rješenja i teži boljem pronalasku rješenja. TS procedura inicijalno kreće od nekoliko susjednih hipertočaka (lokacija) i tijekom selektiranja nove točke (pomicanjem) daje najbolje rješenje između svih točaka kandidata (pomicanja) tijekom aktualne iteracije. Proces selektiranja najboljeg pomicanja (koji može, ili ne, unaprijediti najbolje dostignuto rješenje) bazira se na pretpostavci kako je vrlo vjerojatno da dobra pomicanja dostignu optimalno ili

blisko optimalno rješenje [10]. SA je imitacija principa topljenja metala iz metalurških znanosti. Procedura se temelji na činjenici da metalna legura ima više stabilnih stanja s različitim molekularnom konfiguracijom i energetske nivoom. Tijekom procesa kaljenja legura se inicijalno zagrijava do temperature s molekulama slučajno raspoređenim u tekućem stanju. Nakon toga temperatura se postupno smanjuje dok materijal ne očvrstne. Ako se temperatura snižava dovoljno sporo, kaljenje uvijek osigurava da će legura dostići globalni minimum unutrašnjeg energetske stanja [4, 11].



Slika 1. Dijagram toka provedenog istraživanja: primijenjenih metoda heurističke optimizacije, prilagođenih težinskih faktora u funkcijama cilja, korelaciju modela konačnih elemenata i procedura detekcije oštećenja

Prikazano istraživanje uspoređuje TS i SA metode s obzirom na njihovu brzu konvergenciju [10, 11] i dokazanu sposobnost da izbjegnju postojeće lokalne minimume u prostoru pretraživanja te varijacije funkcije cilja kao glavnog dijela svake optimizacijske metode. Dvije različite funkcije cilja su primijenjene tijekom

testova za primjenu TS i SA metoda optimizacije. Metode primijenjene u istraživanju prikazane su shematski na slici 1. Slika prikazuje potrebne postupke za detekciju oštećenja u konstrukcijama.

2. Primijenjene heurističke metode detekcije oštećenja

Cilj svake metode optimizacije je otkrivanje optimalnog ili približno optimalnog rješenja tijekom prihvatljivog broja iteracija, što se može smatrati provjerom mogućih rješenja u intervalu 5 % do 20 % od ukupnog broja mogućih rješenja (točaka) u prostoru pretraživanja. Stoga primijenjena metoda optimizacije treba biti u mogućnosti pronaći optimalno ili približno optimalno rješenje pretraživanjem samo dijela domena (prostora pretraživanja) tijekom minimalnog mogućeg broja iteracija. Heurističke metode, kao jedan od najpouzdanijih alata za teške nelinearne optimizacije, iskazale su vrlo dobre performanse za ovakav tip problema.

2.1. Primijenjena metoda *tabu pretraživanja*

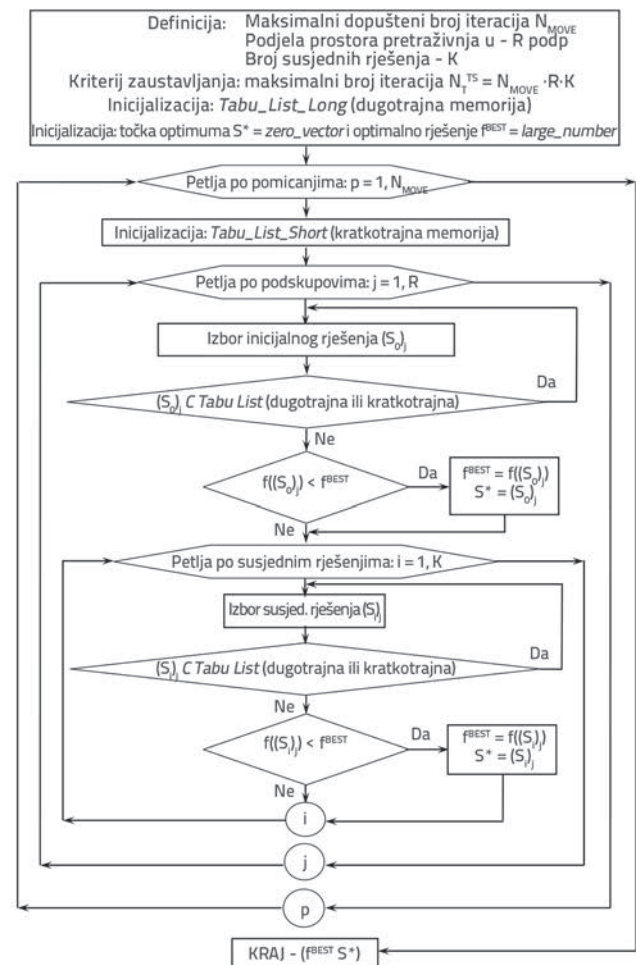
Tabu pretraživanje (eng. *Tabu Search* - TS) jest metastrategija za kombinatorne probleme optimizacije [17], koja dopušta slučajna moguća rješenja tijekom iterativne procedure. Ona se klasificira kao alat za rješavanje teških nelinearnih problema optimizacije i može se tretirati kao unaprjeđenje metoda koje se baziraju na gradientu funkcije cilja. S ciljem da se izbjegnu ponovljena rješenja, prethodna rješenja se memoriraju u tzv. kratkotrajnoj memoriji.

Unaprjeđenje algoritma se može postići uvođenjem dugotrajne memorije za istu svrhu, koja poboljšava performanse tijekom iteracija [10]. Oba tipa memorije (kratkotrajna i dugotrajna) sadrže liste nedpuštenih (provjerenih) rješenja koja su memorirana u tzv. tabu-listama. U istraživanju je primijenjena TS procedura s primjenom napredne tehnike i dugotrajne memorije, koja je prikazana na slici 2.

Algoritam počinje definiranjem kriterija zaustavljanja iteracija. Taj kriterij treba biti u skladu s prirodom problema, kao maksimalan broj iteracija prema dostupnim proračunima, kao i prema zadovoljavajućem nivou unaprjeđenja funkcije cilja tijekom određenog broja uzastopnih iteracija. U istraživanju je usvojeno za kriterij zaustavljanja iteracija dio od ukupnog broja mogućih rješenja u prostoru pretraživanja, a kako je uobičajeno u iznosu od 5 % - 20 %. Maksimalan broj iteracija, za slučaj primjene TS metode usvojen je $N_T^{TS} = 120$, što predstavlja 14,3 % od ukupnog broja mogućih rješenja.

Radi istraživanja cjelokupnog prostora pretraživanja (prostora svih mogućih rješenja), svrhovito je inicijalno podijeliti taj prostor u određen broj podskupova R, pri čemu je u istraživanju usvojena podjela na 10 podskupova. Dugotrajna memorija za skladištenje svih provjerenih rješenja tijekom iteracija treba biti inicijalizirana prije samog procesa. Također, za inicijalnu vrijednost najbolje aproksimacije funkcije cilja f^{BEST} treba biti usvojena neka velika

vrijednost za slučaj minimizacije funkcije cilja, kao i rješenje koje odgovara optimalnoj vrijednosti funkcije cilja za inicijalno rješenje S^* .



Slika 2. Dijagram toka primijenjene metode *tabu pretraživanja* za detekciju oštećenja

Proces iteracija se provodi u tri glavne petlje: glavna petlja, petlja po podskupovima prostora pretraživanja i petlja po generiranim rješenjima u okviru podskupova. Glavna petlja (vanjska) tijekom iteracija odgovara ukupnom broju dopuštenih pomicanja N_{MOVE} u okviru svakog kreiranog podskupa. Kratkotrajna memorija bilježi (skladišti) samo provjerene točke tijekom aktualnog pomicanja i treba biti inicijalizirana kao nulti vektor tijekom svakog pomicanja. Proces pretraživanja u aktualnom pomicanju počinje slučajnim izborom inicijalnog rješenja za sve podskupove (S_{0j}), $j = 1, 2, 3, \dots, R$. Također, određen broj K susjednih rješenja (članova), $N(S_{ij})$, $i = 1, 2, 3, \dots, K$, treba biti na isti način slučajno generiran u okolini inicijalnog rješenja svakog podskupa. Biraju se tri susjedna rješenja (točke), čime formiraju tzv. listu kandidata $N(S_{ij})$ svakog od podskupova $j = 1, 2, 3, \dots, R$. Za sva slučajno generirana rješenja od svakog podskupa, kako za probna tako i za susjedna, nužno je provjeriti njihovu prisutnost

u kratkotrajnoj i dugotrajnoj memoriji. Ako bolja aproksimacija optimalnog rješenja funkcije cilja bude registrirana u nekoj točki, najbolja aproksimacija f^{BEST} , kao i optimalno rješenje S^* , trebaju biti korigirani. Proces iteracija se prekida kada se dostigne maksimalan broj dopuštenih iteracija, koji je određen brojem provjerenih rješenja $N_T^{TS} = R \cdot K \cdot N_{MOVE}$ u skladu s primijenjenom verzijom TS metode optimizacije.

2.2. Primijenjena metoda *simuliranog kaljenja*

Simulirano kaljenje (eng. *Simulated Annealing* – SA) heuristička optimizacijska procedura pretraživanja započinje inicijalizacijom funkcije cilja $F(x_{initial})$ koja odgovara slučajno izabranoj početnoj točki u prostoru pretraživanja, $x_{initial}$. Inicijalno rješenje ovisi o jednom ili više inicijalnih vrijednosti promjenjivih ili parametara problema, koje također trebaju biti slučajno izabrane. Ukupan broj iteracija N_T^{SA} usvaja se na temelju broja svih mogućih rješenja u prostoru pretraživanja. Stoga početno rješenje $x_{initial}$ slučajno generirano, usvaja se za aktualno rješenje $x_{current}$. Proces pretraživanja za boljim rješenjem nastavlja se u okolini aktualnog rješenja tijekom usvojenog rasporeda hlađenja. Skup novih promjenjivih x_{new} također se slučajno generira u prostoru pretraživanja u j^{th} iteraciji, pri čemu se definiraju tzv. nova rješenja $x_{new} = x_j$. Nove vrijednosti funkcije cilja $F_j(x_{new})$ određuju se na temelju vektora novih vrijednosti parametara, x_{new} u j^{th} iteraciji. Novo rješenje x_{new} može se prihvatiti ili odbaciti, ovisno o vjerojatnosti prihvatanja p definirane jednakšom (1), [11]:

$$p = \begin{cases} 1, & \text{za } \Delta F \leq 0 \dots \text{ minimum funkcije } (\Delta E \leq 0 \dots E - \text{energija}) \\ e^{-\frac{\Delta E}{T}}, & \text{za } \Delta F > 0 \dots \text{ minimum funkcije } (\Delta E > 0 \dots E - \text{energija}) \end{cases} \quad (1)$$

Vjerojatnost prihvatanja ovisi o razlici nivoa unutrašnje energije, što je predstavljeno funkcijom cilja, $\Delta F = (x_{new}) - F(x_{current}) = \Delta E$. Ako $F(x_{new})$ rezultira s $\Delta E \leq 0$, novo stanje, koje odgovara vektoru promjenjivih x_{new} , bit će uvijek prihvaćeno, i aktualno (tekuće) rješenje se ažurira, $x_{current} = x_{new}$. Međutim, ako $F(x_{new})$ rezultira s $\Delta E > 0$, prihvaćanje novog stanja x_{new} ovisi o tzv. vjerojatnosti prihvatanja koja je definirana izrazom $p = e^{-\Delta E/T}$ na aktualnoj temperaturi kaljenja T i uspoređuje se s parametrom r slučajno generiranim u opsegu $[0,1]$. Ako je $p > r$, novo rješenje $x_{current} = x_{new}$ prihvaća se, a u suprotnom slučaju novo rješenje, definirano s x_{new} , bit će odbačeno. U skladu s izrazom za vjerojatnost prihvatanja, evidentno je kako postoji velika vjerojatnost da se promjena prihvati ukoliko je temperatura kaljenja T visoka, i obrnuto. Prema tome, SA algoritam prihvaća promjene stanja i bez unapređenja rješenja, sa svrhom da izbjegne zaostajanje u nekom od lokalnih minimuma. U slučaju da je novo stanje prihvaćeno, x_{new} postaje $x_{current}$ u sljedećoj iteraciji, i $F(x_{current}) = F(x_{new})$. U sljedećoj iteraciji temperatura kaljenja T se snižava, kao osnovni parametar prema usvojenom rasporedu hlađenja tijekom iteracija, a novo rješenje se prihvaća prema vjerojatnosti prihvatanja p .

Jedan od vrlo važnih elemenata SA algoritma je početna temperatura T_0 , što je jedan od inicijalnih parametara algoritma i rasporeda hlađenja tijekom iteracija, čime je određen način snižavanja temperature i smanjenja vjerojatnosti prihvatanja. U literaturi [12] se mogu naći različiti pristupi za određivanje početne temperature i rasporeda hlađenja. Tim pristupima su definirane linearne, eksponencijalne ili logaritamske relacije za smanjenje temperature. U prikazanom istraživanju primijenjena je linearna relacija smanjenja temperature s faktorom 0,8 između uzastopnih iteracija i parametar početne temperature $T_0 = 20$. Na ovaj način se pretraživanje zaustavlja kada funkcija cilja dostigne propisani nivo konvergencije, usvojeno 0,1, između uzastopnih iteracija. Također, za dodatni kriterij zaustavljanja potrebno je definirati i dio ukupnih mogućih rješenja u prostoru pretraživanja. U primijenjenoj verziji SA procedure usvojen je maksimalan broj iteracija od $N_T^{SA} = 200$.

2.3. Funkcije cilja u predloženim procedurama detekcije oštećenja

Funkcija cilja je jedan od izuzetno važnih elemenata svake optimizacijske procedure jer treba biti u mogućnosti osigurati globalno optimalno rješenje problema. Ona treba uključiti najvažnije parametre u skladu s prirodom problema. Općenito, u zadatku detekcije oštećenja na osnovi promjene dinamičkih parametara, funkcija cilja treba prezentirati razlike između eksperimentalno određenih i numerički izračunanih modalnih parametara. U ovim primjenama funkcija cilja za detekciju oštećenja uzima u obzir različite parametre za mjeru kompatibilnosti ovih rezultata, kao što su: modalne frekvencije, kriterij modalne kompatibilnosti (eng. *Modal Assurance Criterion* - MAC), razlike energije deformacije (eng. *strain energy residuals*) i matrice fleksibilnosti [14]. U različitim istraživanjima korištene su različite kombinacije tih osnovnih parametara. U istraživanju su primijenjena dva oblika funkcije cilja za predložene procedure detekcije oštećenja.

2.3.1. Primijenjene funkcije cilja

Prvi oblik funkcije cilja, primijenjen u dijelu istraživanja s primjenom TS optimizacije za detekciju oštećenja, uključuje tri parametra: relativne razlike modalnih frekvencija, razlike normaliziranih modalnih vektora i dijagonalne elemente matrice modalne kompatibilnosti – MAC vrijednosti. Ti su parametri izabrani s obzirom na njihovu visoku relevantnost za istraživanu primjenu [5]. Razlike eksperimentalno i numerički određenih modalnih frekvencija uključene su prema jednakšom (2):

$$F = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^E - f_i^N}{f_i^E} \right)^2 \quad (2)$$

Oznake f_i^E i f_i^N predstavljaju vlastite frekvencije određene tijekom eksperimentalnog istraživanja i numeričkog proračuna, respektivno, dok n označava broj modova konstrukcije uključenih u razmatranje.

Razlike modalnih oblika uključene su primjenom dvaju parametara. Prvi označava razlike apsolutnih translatorskih komponenti pomaka svih uključenih modalnih vektora, jednadžba (3), uz pretpostavku da su te razlike vrlo male:

$$D = \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\left| \Phi_{ij}^E \right| - \left| \Phi_{ij}^N \right| \right)^2} \right] \quad (3)$$

Oznake Φ_{ij}^E i Φ_{ij}^N u jednadžbi (3) predstavljaju normalizirane reducirane modalne vektore u smislu da su uključene samo transverzalne komponente pomaka u vertikalnom smjeru točaka na kojima su provedena mjerenja, a koji odgovaraju eksperimentalno i numerički određenim vrijednostima, respektivno. Način proračuna razlika između modalnih vektora usvojen je s obzirom na pretpostavku da su te razlike male, a komponente su istog predznaka (smjera pomicanja). Oznaka m označava ukupan broj mjernih mjesta (odnosno odgovarajućih točaka modela konačnih elemenata) na kojima su bili postavljeni uređaji za mjerenje ubrzanja tijekom eksperimentalnog dijela istraživanja na modelu.

Drugi parametar koji uključuje razlike modalnih oblika, uključuje ortogonalnost modalnih oblika i izražava se matricom njihove kompatibilnosti, MAC matricom [14]. Dijagonalni elementi MAC matrice, MAC_{ii} vrijednosti, vrlo su značajan indikator kompatibilnosti modalnih oblika i mogu se uključiti u razmatranje prema jednadžbi (4), a što je uključeno kao dodatni parametar usporedbe modalnih oblika:

$$M = \sum_{i=1}^n (1 - MAC_{ii}) = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\left(\left| \Phi_i^N \right|^T \cdot \left| \Phi_i^E \right| \right)^2}{\left(\Phi_i^N \right)^T \cdot \Phi_i^N \left(\Phi_i^E \right)^T \cdot \Phi_i^E} \right) \quad (4)$$

Konačno, prvi oblik funkcije cilja, za primjenu u TS metodi optimizacije, definiran je jednadžbom (5):

$$Obj_fun_{TS} = W_F \times F + W_D \times D + W_M \times M \quad (5)$$

Veličine označene sa W_F , W_D i W_M u jednadžbi (5) su tzv. težinski faktori za svaki prethodno definirani dio funkcije cilja prema jednadžbama (2), (3) i (4).

Drugi predloženi oblik funkcije cilja za primjenu SA metode optimizacije uključuje u određenom smislu modificirane parametre i težinske faktore, slično kao što je prikazano u [5], a prema izrazu (6):

$$Obj_fun_{SA} = W_F \times F + W_D \times N \quad (6)$$

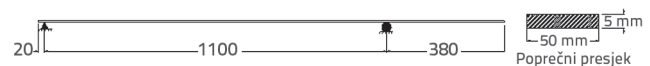
U skladu s ciljevima procedura detekcije oštećenja za određivanje nivoa i lokacije oštećenja primijenjena je strogo matematički definirana norma kao mjera razlike između modalnih vektora.

Norma N razlika u reduciranim modalnim vektorima definirana je prema izrazu (7), a uključuje prethodno definirane komponente prema izrazu (3). Prednost uvođenja ovakvog tipa mjere jest to što ona uključuje i potencijalno moguće razlike u predznaku između komponentnih pomaka u modalnom vektoru:

$$N = \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\Phi_{ij}^E - \Phi_{ij}^N \right)^2} \right] \quad (7)$$

3. Eksperimentalno istraživani model konstrukcije

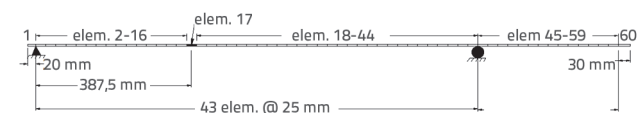
Istraživanje je provedeno na modelu čelične slobodno oslonjene grede s prepustima radi testiranja predloženih procedura detekcije oštećenja. Ukupna dužina grede iznosila je 1500 mm i bila je pravokutnog poprečnog presjeka dimenzija 5 x 50 mm. Prepust s lijeve strane bio je dužine 20 mm, dok je prepust s desne strane bio dužine 380 mm, čime je postignuta asimetrična konstrukcija. Unutrašnji raspon, između oslonaca, bio je dužine 1100 mm, slika 3. Početno usvojene vrijednosti karakteristika materijala iznosile su: modul elastičnosti $E_{initial} = 2 \cdot 10^5$ N/mm², Poissonov koeficijent $\nu = 0,3$ i specifična masa $m_{initial} = 7,860 \cdot 10^3$ kg/m³.



Slika 3. Model čelične grede s prepustima

3.1. Inicijalna numerička analiza

Numerički model konačnih elemenata istraživanog modela konstrukcije sastojao se od 60 elemenata, s dužinama u rasponu od 20 do 30 mm (slika 4.).

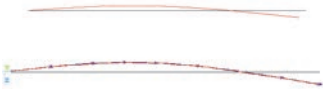
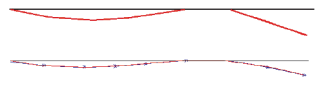
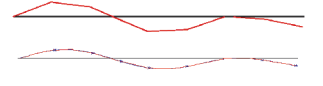
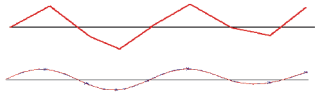


Slika 4. Model konačnih elemenata modela konstrukcije za testiranje procedura detekcije oštećenja

Dužina konačnih elemenata modela usvojena je kako bi se ostvarila mogućnost za preciznu identifikaciju lokacije za slučajevne simuliranih oštećenja.

Numeričke analize su provedene primjenom ANSYS računalnog programa za proračun konstrukcija i primjenom ugrađenog elementa tipa *Beam4* za slučaj izotropnog linearno

Tablica 1. Eksperimentalno i numerički određeni modovi u neoštećenom stanju s inicijalno usvojenim vrijednostima parametara materijala

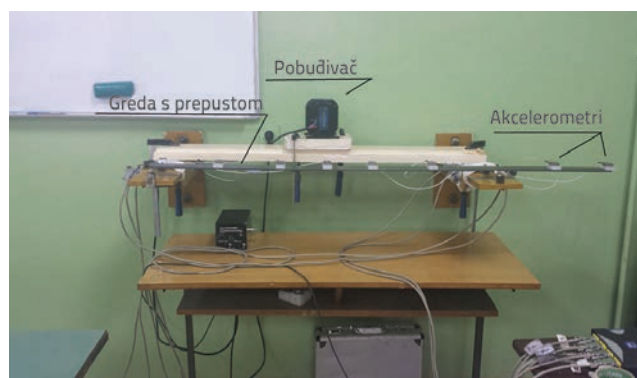
Br. modela	Frekvencije [Hz]		Razlika / Greška		Modalni oblik	Napomena
	Eksperiment /ARTEMIS/	Numerički INICIJALNO /ANSYS/	[Hz]	[%]		
1	7,91	7,724	+0,186	+2,35		I mod savijanja
2	18,75	18,379	+0,371	+1,98		II mod savijanja
3	42,48	42,511	-0,031	-0,07		III mod savijanja
4	90,82	86,223	+4,597	+5,06		IV mod savijanja

elastičnog materijala. Zbog male mase modela, masa uređaja i odgovarajućih podmetača uključena je u masu modela konačnih elemenata. Mase sedam uređaja korištenih tijekom eksperimentalnog istraživanja dodane su kao dodatne mase na modelu konačnih elemenata primjenom odgovarajućeg tipa elementa sa srednjom masom od $34,525 \times 10^{-3}$ kg i odgovarajućim momentom inercije mase od $5,3945 \times 10^{-6}$ kgm². Prva četiri moda, za slučaj modela u neoštećenom stanju i inicijalne vrijednosti materijalnih parametara, određena su inicijalnim modelom konačnih elemenata, tablica 1. Odgovarajuće vlastite frekvencije i modalni oblici određeni eksperimentalnim istraživanjem prikazani su također u tablici 1.

3.2. Inicijalna eksperimentalna modalna analiza pod utjecajem ambijentalnih vibracija

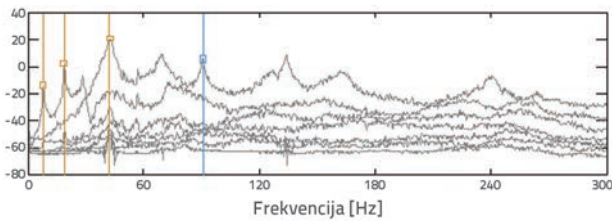
Eksperimentalno istraživanje je provedeno s ciljem određivanja modalnih karakteristika modela grede s prepustima pod utjecajem ambijentalnih vibracija. Model konstrukcije, s geometrijskim karakteristikama kako je prikazano na slici 3., pripremljen je i ispitan u Laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Beogradu.

Sedam akcelometara, postavljenih na plastične podmetače, postavljeni su lijepljenjem na model grede. Ambijentalne vibracije simulirane su primjenom zvučnika, bas-pobuđivača, koji proizvodi nisko frekventijske vibracije u opsegu od 5 Hz do 200 Hz. Zvučnik je bio postavljen na nezavisnu drvenu gredu povezanu s oba oslonca modela konstrukcije. Mjerenje je provedeno akcelometrima visoke osjetljivosti s vrlo malim šumom Silicon Designs Model 2400, s mogućnošću mjerenja u opsegu od 0-600 Hz. Prikupljanje podataka provedeno je 24-bitnim 8-kanalnim mjernim pojačalom QuantumX proizvođača HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik.



Slika 5. Model grede s prepustom tijekom ispitivanja mjerenjem pod utjecajem ambijentalnih vibracija

Modalni oblici i frekvencije, na osnovi izmjerenog odgovora uslijed ambijentalnih vibracija, određeni su primjenom računalnog programa za analizu ambijentalnih vibracija ARTEMIS – ekstraktora [15], koji je aktualni alat za analizu ambijentalnih vibracija. Među više implementiranih procedura za analizu u dostupnom softveru primijenjena je tzv. dekompozicija frekvencijskog područja (eng. *Frequency Domain Decomposition* - FDD) tehnika s odgovarajuće postavljenim parametrima (frekvencija uzorkovanja od 600 Hz, broj frekvencijskih linija u iznosu od 1024, broj mjernih kanala 7). Provedeno je više mjerenja s ciljem da se osigura pouzdanost rezultata mjerenja (5 mjerenja za slučaj modela u neoštećenom stanju) s odgovarajućim procedurama određivanja modalnih parametara prema određenim matricama spektralne gustoće (eng. *spectral density matrices*) iz izmjerenih ambijentalnih vibracija modela na mjernim mjestima. U svim slučajevima oblici titranja su određeni primjenom *peak-picking* metode, prema FDD proceduri [13] (slika 6.).



Slika 6. Matrice spektralne gustoće s odabranim modovima primjenom FDD procedure u ARTeMIS računalnm programu

3.3. Kalibracija modela konačnih elemenata

Da bi se dobilo bolje poklapanje između numeričkih i eksperimentalno određenih modalnih frekvencija, provedena je kalibracija modela konačnih elemenata podešavanjem karakteristika modela: mase, modula elastičnosti, geometrije i dr. [16], koji utječu na modalne parametre. Također, razlike između eksperimentalnih i numeričkih parametara su posljedica šuma koji je uvijek prisutan u zabilježenim podacima, kao i imperfekcija između realne konstrukcije i modela konačnih elemenata. Kalibracija se može provesti bilo ručno primjenom parametarske studije ili automatski primjenom SA metode optimizacije. Oba primijenjena pristupa, manualna kalibracija primjenom parametarske studije i kalibracija primjenom SA metode optimizacije, rezultirale su gotovo istim rezultatima variranih parametara.

3.3.1. Kalibracija inicijalnog modela konačnih elemenata primjenom parametarske studije

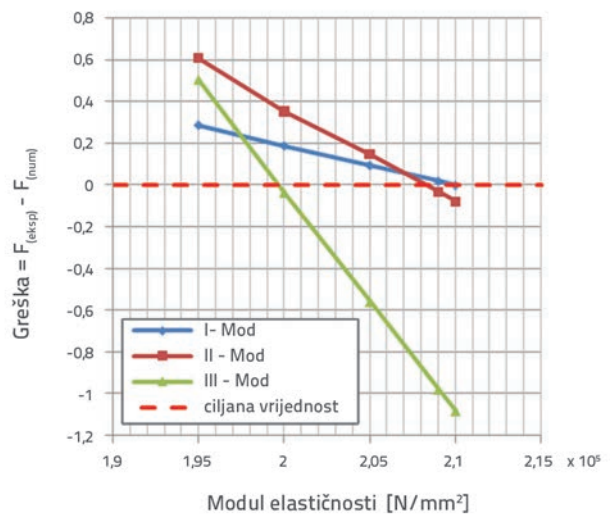
U parametarskoj studiji je usvojeno da prva tri moda mogu prikazati dovoljno indikacija za potrebe detekcije oštećenja. Dakle, prve tri modalne frekvencije su usvojene, na osnovi ekstrakcije iz eksperimentalnih podataka primjenom FDD procedure, kao odgovarajuće (referentne) vrijednosti za promatrane modove modela konstrukcije. Numerički određene inicijalne vrijednosti, prikazane u tablici 1., treba prilagoditi primjenom parametarske studije kako bi se dobile vrijednosti koje su bliže eksperimentalno određenima. S obzirom na visoku osjetljivost modalnih frekvencija u odnosu na promjenu modula elastičnosti, promatrana je promjena ovog parametra u opsegu

od 5 % od početno usvojene vrijednosti. Tablica 2. prikazuje prve tri numerički određene modalne frekvencije za varirane vrijednosti modula elastičnosti u usvojenom opsegu.

Također, u istoj tablici su prikazane razlike između računskih i eksperimentalno određenih frekvencija za prva dva moda. Najbolje slaganje između računskih i eksperimentalno određenih vrijednosti postignuto je za vrijednost modula elastičnosti od $E_{\text{optTS}} = 2,09 \cdot 10^5$ N/mm², prema sumi apsolutnih vrijednosti razlika, jednačba (8), za prve dvije najbolje podešene modalne frekvencije:

$$\text{Greška} = \sum_{i=1}^n \left| f_i^E - f_i^N \right| \quad (8)$$

Treća modalna frekvencija nije uzeta u obzir zbog toga što se pri varijaciji modula elastičnosti ponaša divergentno u odnosu na prve dvije, a što je vidljivo na slici 7. koja prikazuje ovisnost modalnih frekvencija o vrijednosti modula elastičnosti. Primjenom usvojene optimalne vrijednosti modula elastičnosti, formiran je model konačnih elemenata koji je primijenjen u daljnjim proračunima i simulacijama primjenom TS metode optimizacije za detekciju oštećenja.



Slika 7. Razlike računskih i eksperimentalno određenih modalnih frekvencija prva tri moda za različite vrijednosti modula elastičnosti E

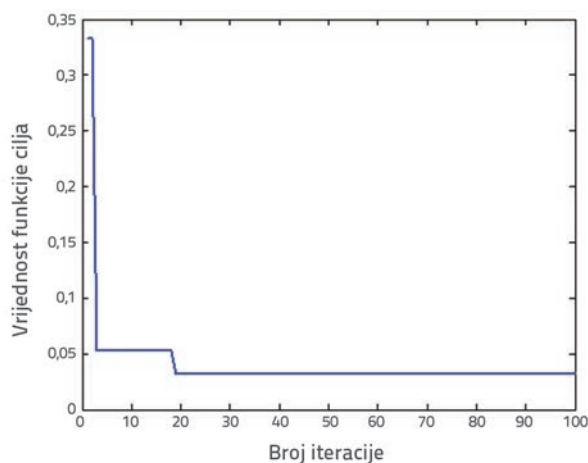
Tablica 2. Računske modalne frekvencije za različite vrijednosti modula elastičnosti

Broj moda	Vrijednost modula elastičnosti E [N/mm ²]							
	E = 2,00 · 10 ⁵		E = 2,05 · 10 ⁵		E = 2,09 · 10 ⁵		E = 2,10 · 10 ⁵	
	f [Hz]	Razlika	f [Hz]	Razlika	f [Hz]	Razlika	f [Hz]	Razlika
1	7,724	0,186	7,818	0,092	7,894	0,016	7,913	-0,003
2	18,379	0,371	18,604	0,146	18,784	-0,034	18,829	-0,079
Greška u odnosu na eksperimentalne vrijednosti prema (8) s uključene prve dvije modalne frekvencije								
Greška		0,557		0,238		0,050		0,082
3	42,511	-0,031	43,042	-0,562	43,46	-0,980	43,564	-1,084

3.3.2. Kalibracija modela konačnih elemenata primjenom SA metode optimizacije

Na inicijalnom modelu konačnih elemenata, prikazanom na slici 4., provedena je usporedba računskih i eksperimentalno određenih modalnih frekvencija u svrhu primjene SA metode optimizacije za detekciju oštećenja. Optimizacijom je obuhvaćena varijacija dvaju parametara, modula elastičnosti i visine poprečnog presjeka grede, oba u opsegu od 5 %. Izbor parametara koji su varirani napravljen je na temelju promatranja nivoa njihove nepouzdanosti i visoke osjetljivosti modalnih frekvencija u odnosu na njihovu promjenu. Ukupna masa grede, kao i dodatne mase, precizno su izmjerene i tijekom istraživanja nisu varirane. Širina poprečnog presjeka grede ne utječe značajno, odnosno promjene vrijednosti modalnih frekvencija su zanemarive pri promjeni ovog parametra.

Usvojena funkcija cilja za kalibraciju modela konačnih elemenata predstavlja sumu apsolutnih razlika između eksperimentalno i numerički određenih modalnih frekvencija, izraz (8), i uključuje samo prva dva moda u razmatranje. Unaprjeđenje korelacije tijekom automatske usporedbe primjenom SA optimizacije, prema usvojenom obliku mjere razlika predstavljenom usvojenom funkcijom cilja, prikazano je na slici 8.



Slika 8. Unaprjeđenje usporedbe MKE s obzirom na razlike prve dvije modalne frekvencije primjenom SA metode optimizacije

Tablica 3. Računske vrijednosti modalnih frekvencija za kalibrirani model konačnih elemenata (MKE) za optimalne vrijednosti izabranih parametara određene SA metodom optimizacije i odgovarajuće eksperimentalno određene vrijednosti

Br. modela	Modalne frekvencije			Promjena frekvencije (Kalibrirani MKE - Inicijalni MKE)		Greška frekvencija (Eksperiment - Kalibrirani MKE)	
	Eksperiment [Hz]	Inicijalni MKE [Hz]	Kalibrirani MKE [Hz]	[Hz]	[%]	[Hz]	[%]
1	7,91	7,724	7,879	+0,155	2,00	-0,031	0,39
2	18,75	18,379	18,748	+0,369	2,00	-0,002	0,01
Greška prema (8) s uključene prve dvije modalne frekvencije						0,033	
3	42,48	42,511	43,366	+0,855	2,01	+0,886	2,09
4	90,82	86,223	87,956	+1,733	2,01	-2,864	3,15

Rezultati koji se najbolje podudaraju odgovaraju optimalno određenoj vrijednosti modula elastičnosti od $E_{opt-SA} = 2,09 \times 10^5$ N/mm² i visini poprečnog presjeka od $t_{opt-SA} = 4,99$ mm. Za te optimalno određene vrijednosti, prve četiri modalne frekvencije porasle su za približno 2 % u odnosu na odgovarajuće računске vrijednosti dobivene inicijalnim modelom konačnih elemenata, tablica 3. Evidentno je da je primjenom SA metode optimizacije postignuto unaprjeđenje korelacije s eksperimentalnim rezultatima, pri čemu su greške prve dvije računске frekvencije određene kalibriranim modelom konačnih elemenata svedene na nivo ispod 0,5 %.

4. Realizirana oštećenja modela

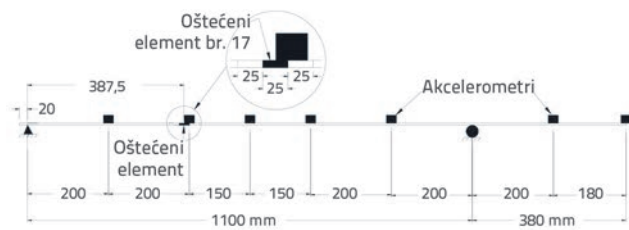
Za potrebu istraživanja predloženih procedura detekcije oštećenja na modelu su realizirana dva slučaja oštećenja, različitog nivoa, oblika zarez (reducirane visine poprečnog presjeka) na određenoj duljini. Za potrebe određivanja položaja oštećenja provedeno je razmatranje više pozicija na kalibriranom modelu konačnih elemenata s ciljem da se odredi položaj koji ima značajan utjecaj na promjene modalnih frekvencija. S obzirom na ova razmatranja, za reprezentativan položaj oštećenja usvojen je položaj na udaljenosti približno 400 mm od lijevog kraja grede, vrlo blizu jednog od mjernih mjesta, a realizirana su dva nivoa oštećenja na tom istom mjestu. Dva nivoa oštećenja realizirana su ručnom električnom brusilicom s donje strane poprečnog presjeka grede. Najprije je realizirano manje oštećenje, a njegovim produblivanjem realizirano je drugo, veće oštećenje.

4.1. Slučajevi oštećenja

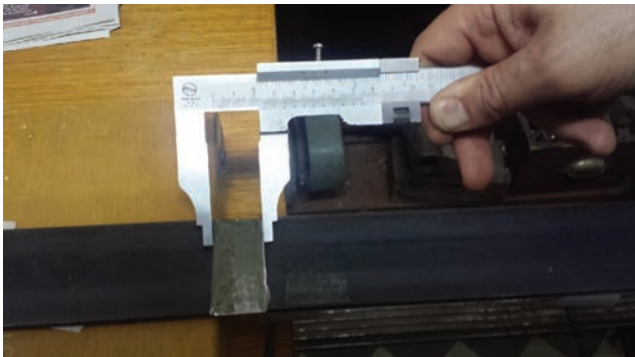
Prvi slučaj oštećenja, DC-1, realiziran je zarezom dubine 1,9 mm i duljine 25 mm na modelu konstrukcije na osnovom razmaku od 387,5 mm od lijevog oslonca (slika 9).

Pozicija oštećenja poklapala se s elementom br. 17 u modelu konačnih elemenata, pri čemu su elementi numerirani počevši od lijevog kraja grede (slika 4.).

Na istoj poziciji (slika 9.) prvobitno realiziranog oštećenja realiziran je drugi slučaj oštećenja, DC-2 povećanjem dubine zarez s 1,9 mm na 2,75 mm iste duljine od 25 mm (slika 10.).



Slika 9. Ispitivani model čelične grede s prikazanim položajem oštećenja i mjernih uređaja



Slika 10. Oštećenje u slučaju primijenjenog oštećenja DC-2

4.2. Eksperimentalna analiza oštećene grede pod utjecajem ambijentalnih vibracija

Za svaki od realiziranih oštećenja, kako bi se osigurala pouzdanost određenih vlastitih modova osciliranja, mjerenje ambijentalnih vibracija izvedeno je po tri puta. Određene modalne frekvencije prva četiri tona, za oba slučaja oštećenja, prikazane su u tablici 4.

Na osnovi provedenih mjerenja ubrzanja na sedam mjesta na gredi, u prisutnosti simuliranih ambijentalnih vibracija, u slučaju oštećenja DC-1 određene su različite modalne frekvencije u odnosu na neoštećeno stanje drugog, trećeg i četvrtog moda. U slučaju oštećenja DC-2 te su razlike zabilježene u svakom od prvih četiri moda i značajno su veće nego za slučaj oštećenja DC-1., tablica 4. Prema tome, može se očekivati teže otkrivanje pozicije i nivoa oštećenja za slučaj oštećenja DC-1 nego u slučaju DC-2.

Tablica 4. Eksperimentalno određene modalne frekvencije u neoštećenom stanju i stanjima s realiziranim oštećenjima

Broj moda	Neoštećeno stanje Frekvencija [Hz]	DC-1 (1,9 x 25) mm		DC-2 (2,75 x 25) mm	
		Frekvencija [Hz]	Redukcija [%]	Frekvencija [Hz]	Redukcija [%]
1	7,91	7,91	0,00	7,03	11,11
2	18,75	18,16	3,15	17,58	6,24
3	42,48	41,31	2,75	39,84	6,21
4	90,82	90,53	0,32	90,53	0,32

5. Testovi osjetljivosti funkcije cilja za realizirane slučajeve oštećenja

Prije primjene predloženih postupaka detekcije oštećenja provedeni su testovi efikasnosti funkcije cilja na realizirana oštećenja. Analizirane su oba predložena oblika funkcije cilja, definirana izrazima (5) i (6), kako bi se odredile najprikladnije vrijednosti težinskih faktora za različite nivoe oštećenja.

U istraživanju je usvojeno da se nivo oštećenja predstavi odnosom *dubina_zareza / ukupna_visina*, R_D - parametar nivoa oštećenja, prema izrazu (9):

$$R_D = \alpha \frac{d}{t} \quad (9)$$

U izrazu (9) d predstavlja dubinu zarezova s donje strane poprečnog presjeka, a t ukupnu visinu poprečnog presjeka. Pri numeričkim simulacijama oštećenja provodi se redukcija krutosti odgovarajućih elemenata modela konačnih elemenata. Iz tog razloga, kako bi se dobila odgovarajuća krutost za slučaj kada je duljina zarezova manja od duljine elementa, potrebno je uvesti parametar α radi dobivanja (baždarenja) krutosti cijelog elementa (izraz 9). Očigledno, ovaj parametar treba uzimati u opsegu $0 < \alpha \leq 1$.

U promatranim slučajevima oštećenja, zbog iste duljine konačnih elemenata modela i dužine zarezova od 25 mm, usvojeno je $\alpha = 1$ i izračunani su odgovarajući parametri nivoa oštećenja prema izrazu (9), tablica 5.

Tablica 5. Parametri nivoa oštećenja za ostvarene slučajeve oštećenja prema izrazu (9)

$\alpha = 1$	Ostvareni slučaj oštećenja	
	DC-1	DC-2
Parametar nivoa oštećenja, R_D	0,38	0,55

Navedene vrijednosti su korištene za izračunavanje efektivne krutosti oštećenog elementa tijekom provedenih numeričkih simulacija.

5.1. Testovi funkcije cilja za primjenu TS metode optimizacije za detekciju oštećenja

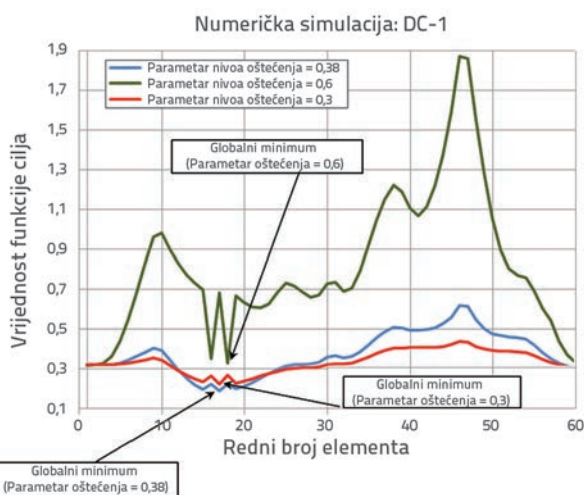
Radi potvrde da će primijenjeni oblik funkcije cilja definiran izrazom (5) biti dovoljno osjetljiv na male promjene modalnih parametara za slučaj prisutnosti oštećenja, provedeno je parametarsko istraživanje kako bi se utvrdio utjecaj odgovarajućih težinskih faktora. Istraživanje je provedeno primjenom modela konačnih elemenata (slika 4.) s kalibriranim parametrima. Razmatrana su prva tri moda modela konstrukcije, prema pretpostavci da oni sadrže dovoljno informacija o promjeni modalnog odgovora za slučaj prisutnosti oštećenja. U tablici 6. prikazane su varirane vrijednosti težinskih faktora za prvi slučaj realiziranog oštećenja DC-1.

Tablica 6. Varirane vrijednosti težinskih faktora u funkciji cilja za primjenu TS metode optimizacije prema izrazu (5)

	W_F	W_D	W_M
Vrijednosti težinskih faktora	0 / 2 / 4 / 6 / 8 / 10	0 / 1	0 / 1

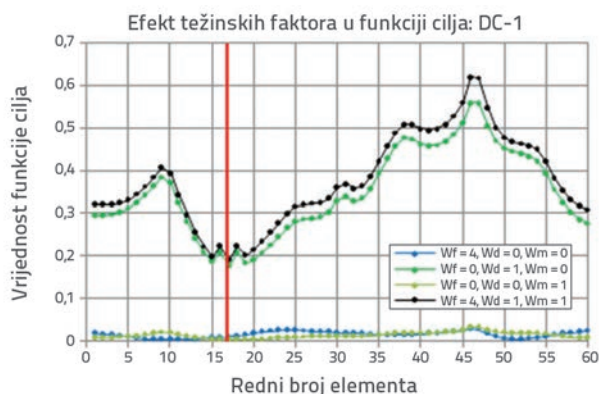
Kao najprikladnije, u smislu efikasnosti funkcije cilja, određene su vrijednosti težinskih faktora $W_F = 1$, $W_D = 1$ i $W_M = 1$, za razlike u frekvencijama, normaliziranim modalnim oblicima i dijagonalnim MAC vrijednostima, respektivno.

Primjenom tih vrijednosti, egzaktno ili vrlo približno, minimum funkcije cilja predstavlja položaj oštećenja za slučaj nivoa oštećenja u opsegu 0,3 - 0,6 (slika 11.). Za istraživani slučaj oštećenja s nivoom oštećenja od $R_D = 0,38$ realiziranom u slučaju DC-1, minimalna vrijednost funkcije cilja s predloženim vrijednostima težinskih faktora poklapa se s položajem oštećenja, elementom br. 17. U slučaju drugih razmatranih vrijednosti nivoa oštećenja, globalni minimum je vrlo blizu točnom položaju na element br. 17 (slika 11.).



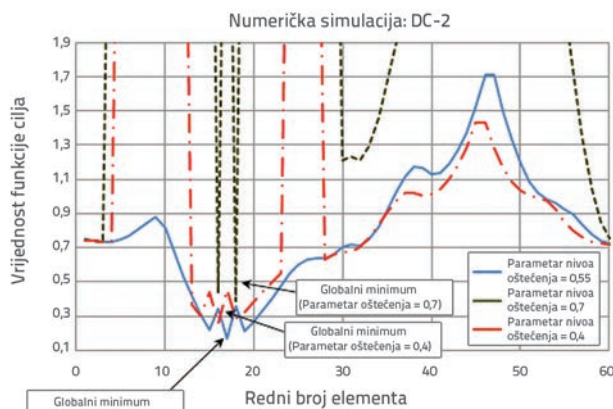
Slika 11. Dijagrami funkcije cilja sa simuliranim oštećenjem po dužini grede i različite nivoe oštećenja – primjenom kalibriranog modela konačnih elemenata za slučaj DC-1

Doprinos pojedinačnih elemenata funkcije cilja, za primijenjene težinske faktore i razmatrani slučaj oštećenja, prikazan je na slici 12., pri čemu je izuzetno veliki doprinos modalnih vektora.



Slika 12. Utjecaj pojedinih elemenata i težinskih faktora funkcije cilja za primjenu TS optimizacije prema izrazu (5), za istraživani slučaj oštećenja DC-1: $R_D = 0,38$ pri varijaciji lokacije oštećenja

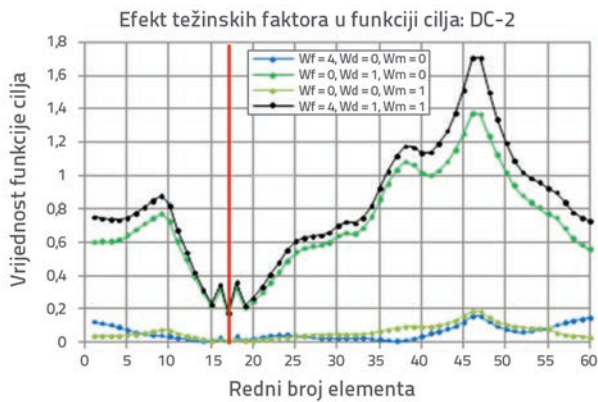
Adekvatno istraživanje je provedeno za ozbiljni slučaj oštećenja realiziran u DC-2. Parametar nivoa oštećenja variran je u opsegu 0,4 - 0,7, pri čemu je realizirani parametar nivoa oštećenja u slučaju DC-2 iznosio 0,55. I u ovom slučaju funkcija cilja s usvojenim vrijednostima težinskih faktora imala je slično ponašanje (slika 13.). Za aktualnu vrijednost parametra oštećenja od 0,55 i lokaciju na elementu br. 17, minimalna vrijednost funkcije cilja se dostiže točno na aktualnoj poziciji, elementu br. 17. Napominje se da i za ostale istraživane nivoe oštećenja minimumi funkcije cilja dostižu vrlo blizu aktualne njegove pozicije (slika 13.).



Slika 13. Dijagrami funkcije cilja sa simuliranim oštećenjem po dužini grede i različite nivoe oštećenja – primjenom kalibriranog modela konačnih elemenata za slučaj DC-2

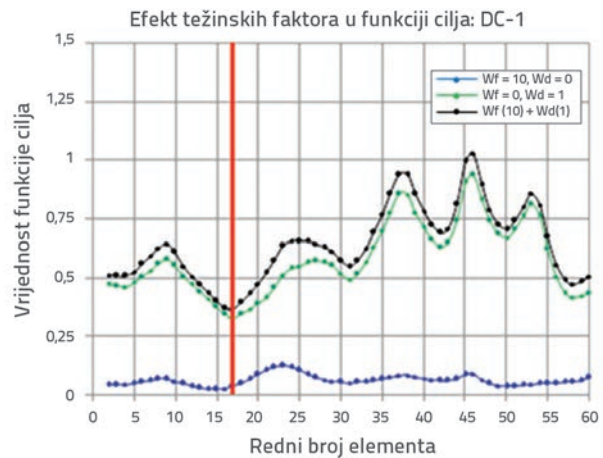
Doprinos pojedinačnih elemenata funkcije cilja, za primijenjene težinske faktore i razmatrani slučaj oštećenja, prikazan je na

slici 14., pri čemu je evidentan izuzetno veliki doprinos modalnih vektora, kao i u prethodnom slučaju.



Slika 14. Utjecaj pojedinih elemenata i težinskih faktora funkcije cilja za primjenu TS optimizacije prema jednadžbi (5), za istraživani slučaj oštećenja DC-2: $R_D = 0,55$ pri varijaciji lokacije oštećenja

cilja ostvarila na točnoj lokaciji oštećenja, element br. 17, kako je prikazano na slici 15.



Slika 15. Utjecaj pojedinih elemenata i težinskih faktora funkcije cilja za primjenu SA optimizacije prema izrazu (6), za istraživani slučaj oštećenja DC-1: $R_D = 0,38$ pri varijaciji pozicije oštećenja

5.2. Testovi funkcije cilja za primjenu SA metode optimizacije za detekciju oštećenja

Kao i u prethodnom slučaju, provedeno je parametarsko istraživanje kako bi se ispitao utjecaj odgovarajućih težinskih faktora i potvrdila osjetljivost funkcije cilja za primjenu SA metode optimizacije (jednadžba 6), za male promjene modalnih karakteristika u slučaju prisutnosti oštećenja, i odredile najpogodnije vrijednosti tih faktora. Vrijednosti težinskih faktora W_F i W_D za ponderiranje utjecaja razlika u frekvencijama i modalnim vektorima varirane su u opsezima prikazanim u tablici 7. U razmatranje su uključena prva četiri moda, prema rezultatima prikazanim u tablici 4.

Tablica 7. Varirane vrijednosti težinskih faktora u funkciji cilja za primjenu SA metode optimizacije prema jednadžbi (6)

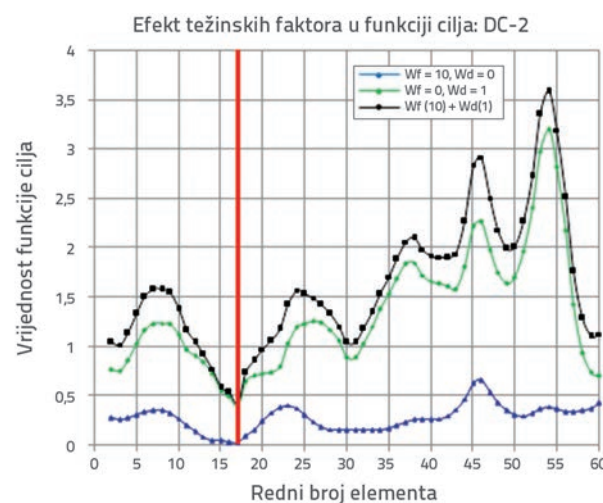
	W_F	W_D
Vrijednosti težinskih faktora	0 / 1 / 10 / 100	0 / 1

Za slučaj prvog scenarija oštećenja DC-1, s aktualnim parametrom nivoa oštećenja od $R_D = 0,38$, kao najpogodnije su određene vrijednosti težinskih faktora $W_F = 10$ i $W_D = 1$ za primjenu u modificiranoj funkciji cilja danoj izrazom (6), s egzaktnom pozicijom minimum funkcije cilja na trenutačnoj poziciji oštećenja (slika 15.).

U promatranom slučaju oštećenja DC-1 s malim razlikama u frekvencijama u opsegu od 3 %, razlike u modalnim oblicima s primijenjenim težinskim faktorima mnogo značajnije sudjeluju u funkciji cilja nego razlike u modalnim frekvencijama. Ova činjenica je zapravo i otkrila najpogodnije vrijednosti težinskih faktora kako bi se pojačao utjecaj malih razlika. Također, pomaci trebaju biti uključeni kako bi se minimalna vrijednost funkcije

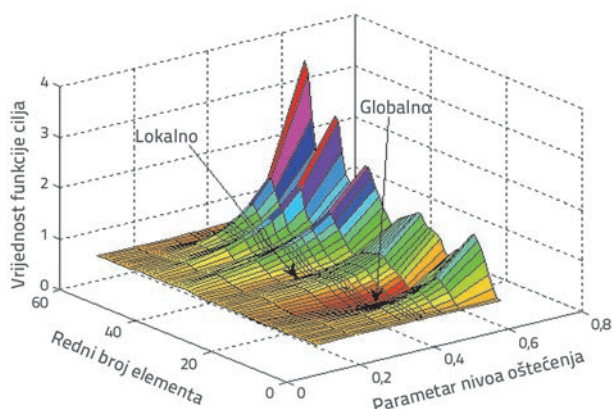
Odgovarajuća analiza provedena je i za mnogo značajniji slučaj oštećenja DC-2, s parametrom nivoa oštećenja $R_D = 0,55$ (tablica 5.) primjenom predloženih vrijednosti težinskih faktora $W_F = 10$ i $W_D = 1$. Ponašanje primijenjene modificirane funkcije cilja s primijenjenim težinskim faktorima upućuje na njenu pogodnost i mogućnost dostizanja globalnog minimuma na točnoj poziciji oštećenja, element br. 17 (slika 16.).

Predloženi težinski faktori primijenjeni su u svim sljedećim analizama kao najpogodnije vrijednosti u modificiranom obliku funkcije cilja, izraz (6), tijekom detekcije oštećenja primjenom SA optimizacije.



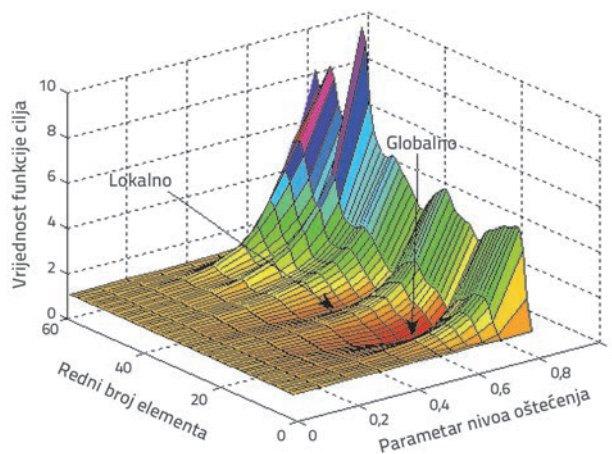
Slika 16. Utjecaj pojedinih elemenata i težinskih faktora funkcije cilja za primjenu SA optimizacije prema izrazu (6), za istraživani slučaj oštećenja DC-2: $R_D = 0,55$ pri varijaciji pozicije oštećenja

Daljnja istraživanja provedena su s ciljem da se istraži efikasnost predloženog modificiranog oblika funkcije cilja definiranog jednadžbom (6), uz primjenu prethodno definiranih najpogodnijih vrijednosti težinskih faktora, a za različite nivoe stupnja oštećenja. Prvo, istraživanje je provedeno za primijenjeni slučaj oštećenja DC-1 variranjem parametra oštećenja R_D u opsegu $[0,1, 0,6]$ i pozicije oštećenja duž grede. Na slici 17. prikazana je promjena funkcije cilja tijekom numeričkih simulacija prema eksperimentalnim rezultatima trenutačnog oštećenja slučaja DC-1. Globalni minimum funkcije cilja ostvaruje se za parametar nivoa oštećenja $R_D = 0,38$ i točnu poziciju oštećenja, element br. 17, pri čemu je evidentna prisutnost više lokalnih minimuma, kako je prikazano na slici 17.



Slika 17. 3D prikaz modificirane funkcije cilja za primjenu SA optimizacije – numerička simulacija za slučaj oštećenja DC-1 s globalnim i više lokalnih minimuma

Analogno tome, na bazi eksperimentalnih rezultata za slučaj oštećenja DC-2, simulacija oštećenja je provedena za parametar nivoa oštećenja u opsegu $[0,01, 0,8]$ i pozicije oštećenog elementa duž grede. Kao i u prethodnom slučaju, numeričkom simulacijom modificirane funkcije cilja dobiven je globalni minimum na točnoj poziciji elementa br. 17 (slika 18.).



Slika 18. 3D prikaz modificirane funkcije cilja za primjenu SA optimizacije – numerička simulacija za slučaj oštećenja DC-2 s globalnim i više lokalnih minimuma

Vidljivo je kako su rezultati prikazanih istraživanja potvrdili da modificirana funkcija cilja definirana jednadžbom (6) i usvojenim težinskim faktorima pokazuje položaj i nivo trenutačnog oštećenja svojim globalnim minimumom.

6. Predloženi postupci detekcije oštećenja

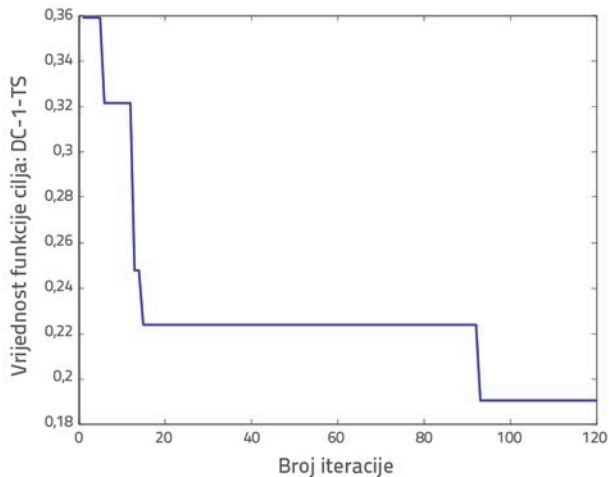
Na osnovi provedenih istraživanja predložene su procedure za detekciju oštećenja na bazi vibracija uz primjenu TS i SA metoda optimizacije, a odgovarajuće rutine razvijene su u MATLAB okruženju – jednom od osnovnih alata za istraživačke proračune. One uključuju numeričke simulacije pozicije i nivoa oštećenja kalibriranog numeričkog modela konačnih elemenata te automatski pozivaju ANSYS program za proračun modalnih parametara. Glavne rutine, tijekom procesa optimizacije, reduciraju krutost na savijanje modela selektiranjem rednog broja oštećenog elementa i parametra nivoa oštećenja u određenoj konfiguraciji tijekom iteracija, [8]. Osim toga, rutine izračunavaju vrijednost funkcije cilja na osnovi modalnih parametara korigiranog numeričkog modela određenih programom na bazi MKE za proračun. Predložene procedure za detekciju oštećenja primijenjene su na oba realizirana slučaja oštećenja, DC-1 i DC-2.

6.1. Detekcija oštećenja primjenom TS metode optimizacije

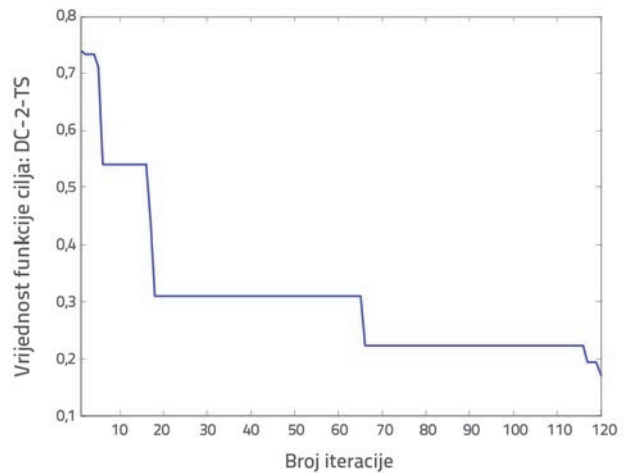
Predloženi oblik funkcije cilja jednadžbom (5) s odgovarajućim najprikladnijim težinskim faktorima korišten je za detekciju oštećenja za fizički ostvarene slučajeve oštećenja. Tijekom detekcije usvojena je domena pretraživanja parametra nivoa oštećenja $R_D = [0,55, 0,7]$, diskretizirana na inkremente s korakom $\Delta R_D = 0,05$, tj. razmatrano je 14 različitih diskretnih vrijednosti. Na osnovi toga, i za ukupan broj od 60 konačnih elemenata u modelu, ukupan broj mogućih rješenja u prostoru pretraživanja iznosio je 840. Maksimalan broj iteracija ograničen je na 120, što je u razumnim granicama od 20% od ukupnog broja točaka u prostoru pretraživanja. Predložena procedura uključila je prva tri modalna oblika, frekvencije i poprečne komponente pomicanja modalnih vektora.

Unaprijeđenije aproksimacije optimalne vrijednosti globalnog minimuma funkcije cilja, za slučaj ostvarenog oštećenja u slučaju DC-1, prikazan je na slici 19., i optimalno rješenje je određeno nakon iteracije. Optimalno rješenje odgovara točnoj poziciji oštećenog elementa br. 17 i parametru nivoa oštećenja $R_D^* = 0,4$, što je najbolja aproksimacija trenutačno primijenjenog oštećenja za slučaj DC-1 i usvojenu rezoluciju parametra nivoa oštećenja od $\Delta R_D = 0,05$.

Za slučaj oštećenja DC-2 optimalno rješenje dostignuto je nakon 120 iteracija (slika 20.). U tom slučaju optimalno rješenje odgovara poziciji oštećenja na elementu br. 17 i parametru nivoa oštećenja od $R_D^* = 0,55$, što se za usvojenu preciznost od $\Delta R_D = 0,05$ može smatrati vrlo dobrom lokacijom globalnog minimuma funkcije cilja.



Slika 19. Unaprjeđenije aproksimacije globalnog minimuma funkcije cilja tijekom predložene procedure detekcije oštećenja bazirane na TS metodi optimizacije i slučaj oštećenja DC-1



Slika 20. Unaprjeđenije aproksimacije globalnog minimuma funkcije cilja tijekom predložene procedure detekcije oštećenja bazirane na TS metodi optimizacije i slučaj oštećenja DC-2

Procedure detekcije oštećenja su ponovljene više puta, i u svim je postignut odgovarajući rezultat u propisanom ograničenom broju iteracija.

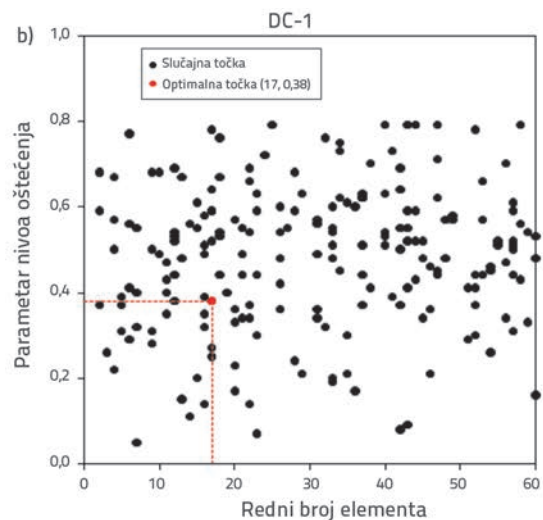
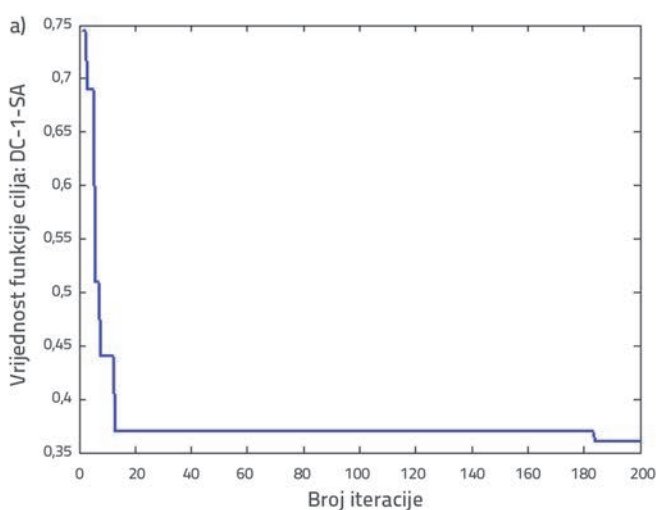
6.2. Detekcija oštećenja primjenom SA metode optimizacije

SA metoda optimizacije, primjenom predložene modificirane funkcije cilja prema jednadžbi (6) i najprikladnijih težinskih faktora, također je primijenjena za detekciju oštećenja za oba fizički ostvarena slučaja oštećenja. Parametar nivoa oštećenja razmatran je kao diskretna varijabla s rezolucijom od 0,01, a u opsegu $R_D = [0,01, 0,80]$.

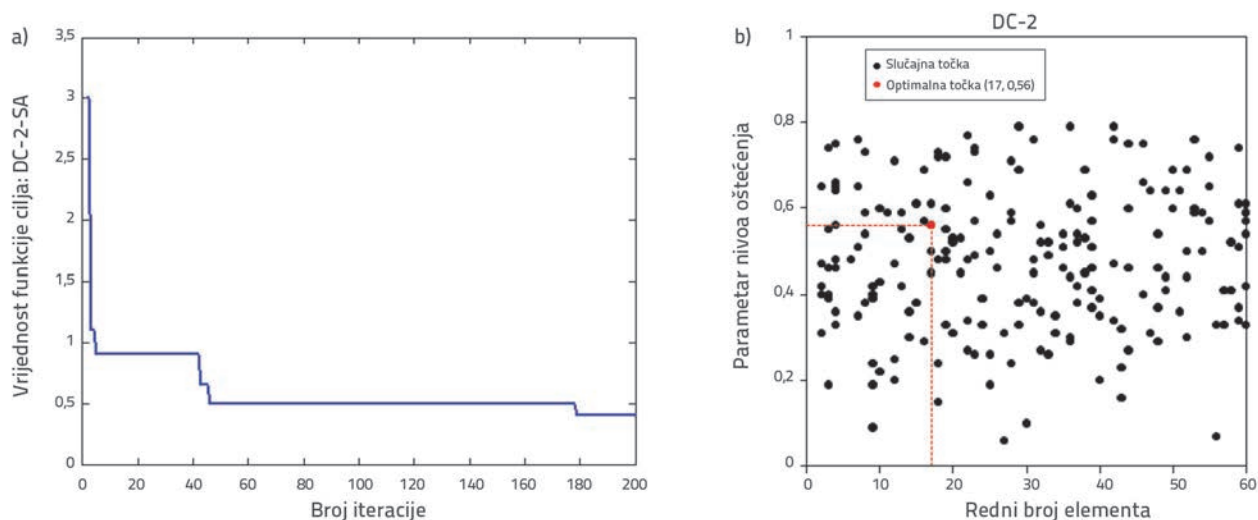
U skladu s brojem elemenata u modelu konačnih elemenata od 60 (slika 4.) ukupan broj mogućih rješenja u prostoru pretraživanja

iznosio je 4800. U ovom slučaju, prostor pretraživanja je značajno proširen s ciljem unaprjeđenja preciznosti određivanja nivoa oštećenja. S obzirom na veličinu prostora pretraživanja, maksimalan broj iteracija ograničen je na 200, tj. 4 % od ukupnog broja točaka u prostoru pretraživanja. Predložena procedura je uključila prva četiri moda modela konstrukcije, uključujući modalne frekvencije i transversalne komponente pomaka modalnih vektora.

Na slici 21.a prikazano je unaprjeđenje optimalnog rješenja tijekom SA metode optimizacije s evidentnom vrlo brzom konvergencijom. Optimalno rješenje otkriveno je nakon 184 iteracije i egzaktno odgovara trenutnom oštećenju u slučaju DC-1, oštećenom elementu br. 17 sa parametrom nivoa oštećenja od $R_D^* = 0,38$. Skup pretraživanih točaka u prostoru pretraživanja (slika 21.b) prikazuje adekvatan slučajni raspored



Slika 21. a) Unaprjeđenije aproksimacije globalnog minimuma funkcije cilja tijekom predložene procedure detekcije oštećenja bazirane na SA za slučaj oštećenja DC-1; b) Distribucija provjerenih rješenja u prostoru pretraživanja tijekom primijenjene detekcije korištenjem SA metode optimizacija za slučaj oštećenja DC-1



Slika 22. a) Unaprjeđenje aproksimacije globalnog minimuma funkcije cilja tijekom predložene procedure detekcije oštećenja bazirane na SA za slučaj oštećenja DC-2; b) Distribucija provjerenih rješenja u prostoru pretraživanja tijekom primijenjene detekcije korištenjem SA metode optimizacija za slučaj oštećenja DC-2

točaka pretraživanja. Praktički, pokriven je cijeli prostor pretraživanja, što je nužno kako bi se mogao otkriti globalni ili približno globalni minimum u cijelom prostoru pretraživanja i izbjegli lokalni minimumi.

Predložena procedura detekcije oštećenja bazirana na SA metodi optimizacije, za slučaj ostvarenog oštećenja za slučaj oštećenja DC-2, rezultirala je vrlo brzom konvergencijom kako je prikazano na slici 22.a, s određenim optimalnim rješenjem određenim nakon 179 iteracija. U ovom slučaju, tzv. približno optimalno rješenje otkriveno je s parametrom $R_0^* = 0,56$, što je vrlo blisko trenutnom parametru nivoa oštećenja, a s točnom lokacijom na elementu br. 17. Provjerena rješenja tijekom SA pretraživanja, kao i u prethodnom slučaju, također su dobro slučajno raspoređena u prostoru pretraživanja (slika 22.b).

Na osnovi prikazanih rezultata evidentno je izuzetno dobro slaganje između fizički realiziranih i otkrivenih lokacija i nivoa oštećenja za realizirane slučajeve oštećenja, a što potvrđuje robusnost i brzu konvergenciju predložene procedure u okviru ograničenog broja iteracija.

7. Zaključak

Istraživanjem je provedena analiza mogućnosti i efikasnosti primjene dviju heurističkih metoda optimizacije, TS i SA, za potrebe primjene u detekciji oštećenja konstrukcija na bazi promjene njihovih modalnih parametara, a na osnovi mjerenja ambijentalnih vibracija. Na osnovi rezultata zabilježenih ambijentalnih vibracija provedeno je određivanje modalnih karakteristika primjenom FDD metode u slučaju analiziranog jednostavnog konstrukcijskog modela u skladu s trenutnom praksom procedura određivanja modalnih karakteristika velikih građevinskih konstrukcija.

Primjenom parametarskih istraživanja i automatskog unaprjeđenja primjenom postupaka optimizacije, model konačnih elemenata

je kalibriran prema modalnim parametrima određenim u okviru eksperimentalnog istraživanja modela konstrukcije u neoštećenom stanju. Ova istraživanja su rezultirala unaprjeđenjem numeričkog modela, s vrijednostima modalnih frekvencija vrlo bliskim eksperimentalno određenim vrijednostima, s razlikama u rasponu od 2 do 3 %, što predstavlja nivo razlika koje je moguće dostići kod realnih građevinskih konstrukcija. Prema dobivenim rezultatima može se sugerirati primjena više parametara u procesu kalibracije modela u automatskim procedurama unaprjeđenja baziranih na metodama heurističkih optimizacija. Primjena takvog pristupa može biti posebno korisna u slučaju složenih konstrukcija, gdje je u proces kalibracije moguće uključiti varijaciju značajno više parametara. Predložene vrijednosti težinskih faktora za oba primijenjena tipa funkcije cilja predstavljaju stanje konstrukcijskog modela koji je eksperimentalno istraživano.

Za proceduru detekcije oštećenja baziranu na TS optimizaciji, u skladu s mogućnosti da otkrije lokaciju i nivo oštećenja tijekom ograničenog broja iteracija, potvrđene su dobre performanse ove tehnike za primijenjeni nivo točnosti. U oba primijenjena slučaja oštećenja približno je točno ili točno otkriven nivo oštećenja za usvojenu točnost i točna lokacija tih oštećenja.

Predložena procedura detekcije oštećenja na bazi SA tehnike optimizacije pokazala je visok stupanj točnosti i brze konvergencije u vrlo velikom prostoru pretraživanja. Osim toga, oštećenje je točno ili približno točno otkriveno u oba realizirana slučaja s obzirom na primijenjenu preciznost.

Istraživanjem je ustanovljena nešto brža konvergencija procedure bazirane na SA metodi optimizacije u odnosu na proceduru baziranu na TS optimizaciji. Primjenom obiju procedura postignuto je izuzetno dobro slaganje s eksperimentalnim rezultatima. Ovi početni zaključci upućuju na mogućnost primjene predloženih procedura za slučaj realnih konstrukcija. Pritom su nužna dodatna ispitivanja na složenijim konstrukcijskim modelima kako bi se potvrdio visok potencijal primijenjenih tehnika optimizacija

detekcije oštećenja na bazi vibracija. Treba napomenuti da u predloženim procedurama nema ograničenja za uključivanje slučaja višestrukog oštećenja, pri čemu ovakva istraživanja treba započeti na jednostavnijim konstrukcijama.

Zahvala

Prikazano istraživanje je dio istraživačkog projekta TR-36048: *Istraživanje stanja i metoda unaprjeđenja građevinskih*

konstrukcija s gledišta upotrebljivosti, nosivosti, ekonomičnosti i održavanja. Autori izražavaju zahvalnost Ministarstvu obrazovanja, znanosti i tehnološkog razvoja Republike Srbije za djelomičnu financijsku potporu kroz projekt Tehnološkog razvoja TR-36048, a također zahvaljuju Ministarstvu visokog obrazovanja i znanstvenog istraživanja Republike Irak i Ministarstvu obrazovanja, znanosti i tehnološkog razvoja Republike Srbije za stipendiju na doktorskom studiju u okviru projekta "Svijet u Srbiji".

LITERATURA

- [1] Kang, F., Junjie, L., Sheng, L.: Combined Data with Particle Swarm Optimization Damage Detection, *Journal of mathematical problem in engineering*, article ID 416941, 10 pages, 2013.
- [2] Sahin, M., Sheno, R.: Quantification and Localization of Damage in Beam-Like Structures by Using Artificial Neural Networks with Experimental Validation, *Journal of engineering structures*, 25 (2003) 14, pp. 1785-1802.
- [3] Owolabi, G., Swamidass, A., Seshadri, R.: Crack Detection in Beam Using Changes in Frequencies and Amplitudes of Frequency Response Function, *Journal of sound and vibration*, 265 (2003) 1, pp. 1-22.
- [4] Ng, C., Veidt, M., Lam, H.: Guided Wave Damage Characterization in Beams Utilizing Probabilistic Optimization, *Journal of engineering structures*, 31 (2009) 12, pp. 2842-2850.
- [5] He, R., Hwang, S.: Identifying Damage in Spherical Laminate Shells by Using a Hybrid Real-Parameter Genetic Algorithm, *Journal of composite structures*, 80 (2007) 1, pp. 32-41.
- [6] He, R., Hwang, S.: Damage Detection by an Adaptive Real-Parameter Simulated Annealing Genetic Algorithm, *Journal of computers and structures*, 84 (2006) 31-32, pp. 2231-2243.
- [7] Hwang, H., Kim, C.: Damage Detection in Structures Using a Few Frequency Response Measurements, *Journal of sound and vibration*, 270 (2004) 1-2, pp. 1-14.
- [8] Mišković, Z., Al-Wazni, S., Alalikhani, A., Salatić, R.: Methods of Damage Detection of Structures Based on Changes of Dynamic Characteristics, *Construction calendar, The Union of Engineers and Technicians of Serbia, Belgrade*, 47 (2014), pp. 163-191
- [9] Au, F., Cheng, Y., Tham, L., Bai, Z.: Structural Damage Detection Based on a Micro-Genetic Algorithm Using Incomplete and Noisy Modal Test Data, *Journal of Sound and Vibration*, 259 (2003) 5, pp. 1081-1094.
- [10] Michel, G., Jean, P.: Chapter 9: Tabu Search, in *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*, 2nd ed., (eds.: Edmund K. Burke and Graham Kendall), Springer Science & Business Media, New York, USA, 2014.
- [11] Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M.: Optimization by Simulated Annealing, *Journal of science (Istor)*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [12] Ceranic, B., Fryer, C., Baines, R.: An Application of Simulated Annealing to the Optimum Design of Reinforced Concrete Retaining Structures, *Journal of computers and structures*, 79 (2001) 17, pp. 1569-1581.
- [13] Al-Wazni, S., Mišković, Z., Alalikhani, A., Salatić, R.: Comparison of FDD and SSI Modal Identification Methods from Ambient Vibration Data-Case Study, 5th International Conference of GNP, University of Montenegro, Žabljak, pp. 8-12, 2014.
- [14] Hui, L., Kegui, X., Quanquan, Q.: Study of Structural Damage Detection with Multi-objective Function Genetic Algorithms, *SREE Conference on Engineering Modeling and Simulation, Procedia Engineering*, 12 (2011), pp. 80-86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.014>
- [15] ARTeMIS Extractor Pro, Release 3.4.1, Structural Vibration Solution A/S, NOVI Science Park, Niles Jernes Vej 10, DK-9229 Aalborg East, Denmark, 2004.
- [16] Ruotolo, R., Suarce, C.: Damage Assessment of Multiple Cracked Beams: Numerical Results and Experimental Validation, *Journal of Sound and Vibration*, 206 (1997) 4, pp. 567-588.
- [17] Glover, F.: Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers & Operations Research*, 13 (1986) 5, pp. 533-549.
- [18] Habib, Y., Sadiq, M., Hakim, A.: Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14 (2001) 2, pp. 167-181.