

Otkrivanje oštećenja greda s pomoću utjecajnih linija progiba

Ivana Štimac, Ivica Kožar, Ante Mihanović

Ključne riječi

utjecajne linije progiba, greda, oštećenje, ispitivanje, mjerna mjesta, pouzdanost rezultata

Key words

deflection influence lines, beam, damage, testing, measuring point, reliability of results

Mots clés

lignes d'influence de la déflexion, poutre, endommagement, essai, point de mesure, fiabilité des résultats

Ключевые слова

линии влияния прогиба, балка, повреждение, испытание, места измерений, надёжность результатов

Schlüsselworte

Durchbiegungseinflusslinien, Balken, Beschädigung, Untersuchung, Messungsstellen, Zuverlässigkeit der Ergebnisse

I. Štimac, I. Kožar, A. Mihanović

Izvorni znanstveni rad

Otkrivanje oštećenja greda s pomoću utjecajnih linija progiba

Prikazana je kreirana metoda analize utjecajnih linija progiba pogodna za otkrivanje oštećenja na gredama. Metoda se zasniva na razlici zakrivljenosti utjecajnih linija progiba za neoštećeno i oštećeno stanje konstrukcije. Jednostavnost metode posebno je istaknuta činjenicom da rabi mali broj mjernih mjesta. Jedno mjerno mjesto u sredini svakog raspona dovoljno je za pouzdano lociranje konačnog broja oštećenja. Provedeno terensko ispitivanje potvrdilo je teorijske pretpostavke.

I. Štimac, I. Kožar, A. Mihanović

Original scientific paper

Beam damage detection by deflection influence lines

The beam damage detection method relying on the analysis of deflection influence lines is presented. The method is based on the difference in curvature of deflection influence lines for the undamaged and damaged states of the structure. The simplicity of the method is mostly evidenced by the fact that a small number of measuring points is required. Thus one measuring point in the centre of each span is sufficient for reliable determination of the final number of damage points. Theoretical assumptions have been confirmed by on-site investigations.

I. Štimac, I. Kožar, A. Mihanović

Ouvrage scientifique original

Détection d'endommagement des poutres par les lignes d'influence de la déflexion

La méthode de détection d'endommagement des poutres, s'appuyant sur l'analyse des lignes d'influence de la déflexion, est présentée. La méthode est basée sur la différence de courbure des lignes d'influence de la déflexion pour l'état avec et sans endommagement de la structure. La simplicité de la méthode est manifestée par le nombre très réduit des points de mesure nécessaires. En fait, un seul point de mesure dans le centre de chaque portée suffit pour une détermination fiable du nombre final des points d'endommagement. Les suppositions théoriques ont été confirmées par les investigations sur le terrain.

И. Штимац, И. Кожар, А. Миханович

Оригинальная научная работа

Открытие повреждения балок с помощью линий влияния прогибов

В работе показан метод анализа влиятельных линий прогиба, подходящий для открытия повреждений на балках. Метод основывается на разнице закрученности влиятельных линий прогибов для неповреждённого и повреждённого состояния конструкции. Простота метода особенно подчеркнута фактом, что употребляется малое число измерительных мест. Одно измерительное место в середине каждого пролёта достаточно для надёжного лоцирования конечного числа повреждений. Проведённое испытание подтвердило теоретические предпосылки.

I. Štimac, I. Kožar, A. Mihanović

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Entdeckung von Balkenbeschädigungen mit Hilfe der Durchbiegungseinflusslinien

Dargestellt ist eine kreirte Methode der Analyse von Durchbiegungseinflusslinien passend für die Entdeckung von Schäden an Balken. Die Methode beruht auf dem Unterschied der Krümmung der Einflusslinien für den intakten und beschädigten Zustand der Konstruktion. Die Einfachheit dieser Methode ist besonders hervorgehoben durch die Tatsache dass nur eine kleine Anzahl der Messungsstellen genutzt werden muss. Eine Messungsstelle in Mitte jeder Spannweite genügt für das zuverlässige Lozieren der gesamten Anzahl der Beschädigungen. Die durchgeführte Untersuchung am Gelände bestätigte die theoretischen Voraussetzungen.

Autori: Dr. sc. **Ivana Štimac**; prof. dr. sc. **Ivica Kožar**, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V. Cara Emina 5, Rijeka; prof. dr. sc. **Ante Mihanović**, Građevinko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu

1 Uvod

Nerazorne su metode ispitivanja veoma važno područje procjene oštećenja i tvore osnovu za donošenje odluka o popravku, obnovi ili zamjeni konstrukcijskog elementa ili sklopa. Ako postojeća šteta na konstrukciji nije utvrđena i popravljena, tijekom vremena oštećenja mogu postati takva da se više ne mogu sanirati, a može doći i do gubitka stabilnosti konstrukcije. Stoga je bitno što prije otkriti postojanje oštećenja i popravkom konstrukciju vratiti u prvobitno (neoštećeno) stanje.

Oštećenje u konstrukciji mijenja karakteristike presjeka ili karakteristike materijala što dovodi do promjene u statičkom ili dinamičkom ponašanju konstrukcije. Identifikacija parametara konstrukcije postala je veoma važna istraživačima radi pronalazjenja veze između izmjerenih podataka i parametara materijala odnosno konstrukcije. Ova se metoda vrlo često rabi za utvrđivanje postojanja oštećenja konstrukcija. Koristeći se parametarskom identifikacijom moguće je odrediti promjenu karakteristika poprečnog presjeka različitih konstrukcija (npr. zrakoplova, svemirskih stanica, platforma za bušenje nafte, zgrada ili mostova).

U osnovi, postojeće metode identifikacije možemo podijeliti u dvije glavne skupine: metode dinamičke identifikacije koje se koriste podacima dinamičkih ispitivanja i metode statičke identifikacije koje se koriste podacima statičkih ispitivanja. Obje tehnike osnivaju se na usporedbi izmjerenih podataka za dva stanja konstrukcije ili usporedbi numeričkih modela s izmjerenim podacima na konstrukciji.

Metode dinamičke identifikacije, odnosno dinamička ispitivanja i tehnike mnogo su učestalije od statičkih ispitivanja i metoda.

Iako su dinamička ispitivanja najučestalija metoda za određivanje oštećenja, postoji nekoliko ograničenja ove metode. Prvo, dinamički proračun zahtijeva uvođenje mase i karakteristika krutosti i prigušenja u proračun, dok statički proračun zahtijeva samo karakteristike krutosti. Drugo, adekvatna je kontrola modalne uzbude (uzbuđivača) osnovna pretpostavka za točno određivanje osnovnih oblika osciliranja, odnosno modalnih parametara, što je teško postići terenskim ispitivanjima [1]. Visoke osnovne oblike osciliranja teško je uzbuditi i izmjeriti [2]. Uvjeti oslanjanja također uvelike utječu na izmjerene frekvencije i osnovne oblike osciliranja [1]. Premda su metoda zakrivljenosti osnovnih oblika osciliranja i metoda zakrivljenosti frekventnih funkcija odziva konstrukcije [3] mnogo osjetljivije na lokalna oštećenja od statičkih pomaka, nedostatak im je potreba za gustom mrežom mjernih mjesta na konstrukciji ili velikim brojem izmjerenih vlastitih frekvencija da bi se mogla osigurati pouzdanost metode [4].

Izmjereni odziv konstrukcije nastao kao posljedica statičkih ispitivanja mnogo je točniji nego izmjereni odziv koji nastaje kao posljedica modalne uzbude [1].

Statički progibi, u mnogo slučajeva, pokazuju veću osjetljivost na lokalna oštećenja nego vlastite frekvencije. Usporedba utjecaja pogrešaka koje nastaju tijekom mjerenja pokazala je da statičke metode ispitivanja daju pouzdanije rezultate detekcije oštećenja nego metode koje primjenjuju dinamička ispitivanja (pogreške kod statičkih ispitivanja imaju manji utjecaj na točnost obrađenih podataka nego pogreške kod dinamičkih ispitivanja) [5]. Nužno je da se konstrukcija tijekom ispitivanja nalazi u elastičnom području.

U radu je prikazana jednostavna i pouzdana metoda za utvrđivanje smanjenja krutosti na savijanje na grednim nosačima primjenom statičkih ispitivanja. Metoda povezuje jednostavnost provedbe terenskih ispitivanja i jednostavnu obradu izmjerenih podataka sa svrhom identifikacije oštećenja. Također je utvrđen najmanji potrebn broj mjernih uređaja i njihov položaj na konstrukciji da bi se s velikom pouzdanošću mogla ustanoviti prisutnost oštećenja te odrediti položaj i veličina oštećenja.

Prednost izložene metode za otkrivanje oštećenja pred metodama dostupnim u literaturi jest u sljedećem: utjecajnu liniju progiba moguće je odrediti mjerenjima u bilo kojoj točki na konstrukciji za proizvoljan broj položaja opterećenja na konstrukciji. Na taj način iz malog broja mjernih mjesta možemo dobiti velik broj podataka o progibima konstrukcije.

2 Opis metode za otkrivanje oštećenja uporabom utjecajnih linija progiba

Deformabilnost konstrukcije pri savijanju obrnuto je proporcionalna njezinoj krutosti na savijanje. Smanjenje krutosti konstrukcije na savijanje odražava se na veličinu i oblik utjecajne linije progiba. Utjecajna linija progiba oštećene gredne konstrukcije razlikuje se veličinom i oblikom od one na neoštećenoj konstrukciji.

Utjecajne linije progiba određuju se mjerenjima iz samo jednog mjesta na konstrukciji. Stoga je metoda za otkrivanje oštećenja uporabom utjecajnih linija jednostavna za provođenje terenskih ispitivanja.

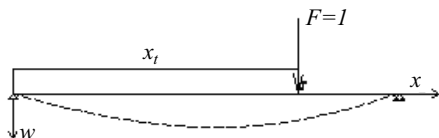
U radu su proračunate utjecajne linije progiba oštećene i neoštećene konstrukcije te provedena analiza zakrivljenosti utjecajnih linija progiba oštećene i neoštećene konstrukcije za gredne nosače.

2.1 Definiranje pojma utjecajnih linija progiba

2.1.1 Analitička definicija

Utjecajnu liniju progiba $\eta p(x)$ predstavlja funkcija $p(x)$ čije ordinate pokazuju veličinu progiba na danom mjestu za proizvoljni položaj jediničnog djelovanja (slika 1.).

Ovako definiranu funkciju $p(x)$ jednostavno se može konstruirati iz načela uzajamnosti pomaka, uz pretpostavku da je promatrani sustav materijalno i geometrijski linearno elastičan.



Slika 1. Progibna linija od jedinične sile na mjestu T

U tom slučaju zakon uzajamnosti pomaka (Maxwellov teorem) daje:

Pomak na mjestu i u smjeru prve jedinične sile F_1 uzrokovan drugom jediničnom silom F_2 jednak je pomaku na mjestu i u smjeru druge jedinične sile F_2 izazvan prvom jediničnom silom F_1 (slika 2.).



Slika 2. Uzajamnost pomaka

$$F_1 \cdot w_{21}(x) = F_2 \cdot w_{12}(x) \quad (1)$$

w_{ij} je progib na mjestu j zbog djelovanja sile na mjestu i .

Uz $F_1 = F_2 = 1$ slijedi:

$$w_{12}(x) = w_{21}(x). \quad (2)$$

Sukladno prethodnom izrazu dolazi se do zaključka da je utjecajna linija progiba na konkretnom mjestu identična progibnoj liniji konstrukcije nastaloj od djelovanja jedinične sile na tom istome mjestu.

Iz toga slijedi:

$$\eta p_{x_i}(x) = p_{x_i}(x). \quad (3)$$

Za opći slučaj opterećenja $f(x)$, koristeći se konvolucijom, utjecajna se linija progiba može predstaviti funkcijom koja je dobivena prema izrazu:

$$\eta w_{x_i}(x) = f(x) \times p_{x_i}(x) = \int_L f(x) \cdot p_{x_i}(x) dx \quad (4)$$

$f(x)$ zadano uporabno opterećenje

$p_{x_i}(x)$ progibna linija za jediničnu silu.

Iz jednadžbe (4) vidi se da utjecajna linija progiba ovisi o položaju i veličini opterećenja na gredi te deformacijskim svojstvima grede.

Sama funkcija predstavlja ordinate utjecajne linije progiba na danome mjestu na gredi koje nastaju kao posljedica uporabnog opterećenja.

2.1.2 Određivanje pokusom

Utjecajna linija progiba na danome mjestu za konkretno uporabno opterećenje može se konstruirati iz izmjerenih podataka. Linija je nužno diskretna, a diskretne točke uvjetovane su mjestima na kojima je postavljeno "uprabno opterećenje", no vrijednosti između izmjerenih možemo lako interpolirati. Izmjereni podaci moraju biti dobiveni s određenom točnošću, o čemu će biti riječi u nastavku ovoga rada.

2.2 Prikaz predložene metode za otkrivanje oštećenja

Pretpostavimo da imamo dva skupa podataka o utjecajnim linijama na konstrukciji. Jedan je skup za konstrukciju u prethodnom stanju, koje može biti utvrđeno mjerenjem ili analitičkim postupcima na temelju vjerodostojne projektne dokumentacije, najbolje neposredno nakon izvođenja. Ovaj skup u nastavku imenujemo početnim ili neoštećenim stanjem. Drugi se skup podataka odnosi za konstrukciju u trenutku ispitivanja koje nazivamo trenutačnim stanjem ili oštećenim stanjem.

Analitičke oznake stanja jesu:

$\eta_w(x) = w(x)$ utjecajna linija progiba za početno stanje

$\overline{\eta_w}(x) = \overline{w}(x)$ utjecajna linija progiba za trenutačno stanje

Usporedbom utjecajnih linija progiba za početno i trenutačno stanje moguće je doći do podataka o mogućim promjenama u krutostima konstrukcije.

Neka je razlika stanja progiba dana kao reziduum:

$$R(x) = \overline{w}(x) - w(x). \quad (5)$$

Dva su promatrana stanja identična samo kada je reziduum jednak nuli, $R(x) \equiv 0$. Tada se može konstatirati da nije došlo do promjene onih krutosti koje su sadržane u progibnoj liniji.

Kada je $R(x) \neq 0$, to upućuje na činjenicu da je u konstrukciji sigurno došlo do promjene nekih krutosti koje su sadržane u progibnoj liniji.

Među ostalim, nastale se promjene mogu analizirati na razini: razlika progiba, razlika kutova zaokreta, razlika zakrivljenosti. Nastale razlike progiba i kutova zaokreta pokazuju da je došlo do promjene krutosti konstrukcije, ali je mjesto i veličinu promjene vrlo teško utvrditi. Praktičniji put za otkrivanje mjesta i veličine promjena (odnosno oštećenja) jest analiza zakrivljenosti progibnih linija, odnosno utjecajnih linija progiba.

Promatrani je sustav materijalno i geometrijski linearno elastičan pa se zakrivljenost progibne linije može proračunati prema sljedećim izrazima:

$$\rho(x) = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (6)$$

$$\bar{\rho}(x) = \frac{d^2 \bar{w}(x)}{dx^2} \quad (7)$$

Reziduum zakrivljenosti ima oblik:

$$R_{xx}(x) = \bar{\rho}(x) - \rho(x) \quad (8)$$

Kada reziduum zakrivljenosti utjecajnih linija progiba za početno i trenutačno stanje nije jednak nuli, znači da je došlo do promjene zakrivljenosti utjecajnih linija progiba, što navodi na zaključak da je došlo do promjene omjera momenta savijanja i krutosti na savijanje presjeka grede.

Opća veza deformiranja i momenata savijanja glasi:

$$\rho = \frac{M}{K}, \quad (9)$$

gdje je ρ zakrivljenost, M moment savijanja, K krutost presjeka na savijanje

Pretpostavimo li da je oštećenje lokalno i takvog tipa da ne mijenja rubne uvjete iz jednadžbe (9) razvidno je da promjena zakrivljenosti utjecajnih linija progiba kod greda može biti protumačena na sljedeće načine:

1. Kod statički određenih sustava promjena zakrivljenosti utjecajnih linija progiba uzrokovana je isključivo promjenom krutosti na savijanje presjeka, jer momenti savijanja ne ovise o krutostima konstrukcije, stoga su isti za oba stanja.
2. Kod statički neodređenih sustava promjenom krutosti mijenjaju se i momenti savijanja. Promjena momenata savijanja uzrokovana lokalnom promjenom krutosti kontinuirana je funkcija koja zahvaća cijelo područje promatrane konstrukcije. Nasuprot tome, na mjestu oštećenja koje se očituje lokalnom promjenom krutosti događa se diskontinuitet (nagli skok) u funkciji promjene zakrivljenosti utjecajnih linija progiba. Analizom je ustanovljeno da su promjene zakrivljenosti utjecanje linije progiba uzrokovane promjenom momenata savijanja relativno male veličine u odnosu na promjenu uzrokovanu degradacijom krutosti na savijanje presjeka.

Stoga se može zaključiti da znatna promjena razlike zakrivljenosti utjecajnih linija progiba za trenutačno i početno stanje upućuje na mjesto promjene krutosti gredne konstrukcije na savijanje.

3 Oštećenja prouzročena savijanjem i analiza osjetljivosti mjerenja na grednim konstrukcijama

Mogućnost primjene predložene metode utvrđivanja oštećenja prouzročenih savijanjem analizirana je numeričkim simulacijama. Simulacije su uključivale pretpostavke o postojanju oštećenja, zatim efikasnost položaja i

broja mjernih mjesta, kao i preciznost mjernih uređaja. Simulacije su pretpostavljale diskretizaciju sustava koja je ovdje realizirana konačnim elementima za potrebe određivanja odziva sustava.

Oštećenje je simulirano smanjenjem krutosti na savijanje poprečnog presjeka na nivou konačnog elementa kao postotak početne veličine.

Analize su provedene za slobodno oslonjenu gredu s jednim rasponom i kontinuirane grede preko 2, 3 i 4 raspona.

Utjecajne linije progiba diskretne su funkcije, proračunane numeričkim putem ili izmjerene na konstrukciji. Vrijednosti utjecajne linije progiba postoje samo na mjestima na kojima je djelovala vanjska sila. Vrijednosti između tih mjesta mogu se lako interpolirati.

Zakrivljenost utjecajne linije progiba, odnosno drugu derivaciju funkcije utjecajne linije progiba, potrebno je aproksimirati nekom od numeričkih metoda. Odabrana je aproksimacija središnjom metodom konačnih razlika.

Druga derivacija neke funkcije $y = f(x)$ središnjom metodom konačnih razlika dana je sljedećim izrazom:

$$\left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_i \approx \frac{y_{i-1} - 2 \cdot y_i + y_{i+1}}{\Delta x^2} \quad (10)$$

Utjecajne su linije progiba za oba stanja proračunane za različite položaje mjernih mjesta, s točnošću na četiri značajne znamenke.

Za svaki primjer oštećenja provedena je usporedba zakrivljenosti utjecajnih linija progiba na neoštećenoj i oštećenoj konstrukciji. Kao posljedica uporabe diferencijskog postupka javljaju se numeričke pogreške. Zbog operiranja s razlikama podjednakih brojeva i prethodne numeričke pogreške ulazni podaci o progibima moraju biti točni na četiri značajne znamenke.

Zbog boljeg razlikovanja i preglednosti rezultata svrshodno je kvadriranje razlike zakrivljenosti utjecajnih linija progiba.

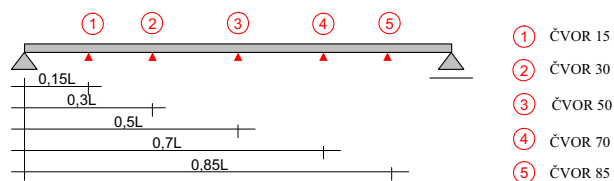
Rezultati analize prikazani su dijagramima koji predstavljaju razliku zakrivljenosti utjecajnih linija progiba na neoštećenoj i oštećenoj konstrukciji te kvadrat razlike zakrivljenosti utjecajnih linija progiba na neoštećenoj i oštećenoj konstrukciji.

3.1 Greda preko jednog raspona

Analizirana je slobodno oslonjena greda duljine $L = 25$ m (slika 3.). Numerički model izrađen je programskim paketom "DARK" [7], a sastoji se od $n = 100$ konačnih elemenata duljine $\Delta l = 0,25$ m. Početni element je 1, a završni 100. Čvorovi konačnih elemenata nalaze se na početku i kraju svakog konačnog elementa. Ukupni je

broj čvorova $N = 101$. Početni je čvor 0, a završni 100. Ploština poprečnog presjeka je $A = 0,8567 \text{ m}^2$, moment tromosti $I = 1,4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^4$, a modul elastičnosti materijala $E = 3,5 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$.

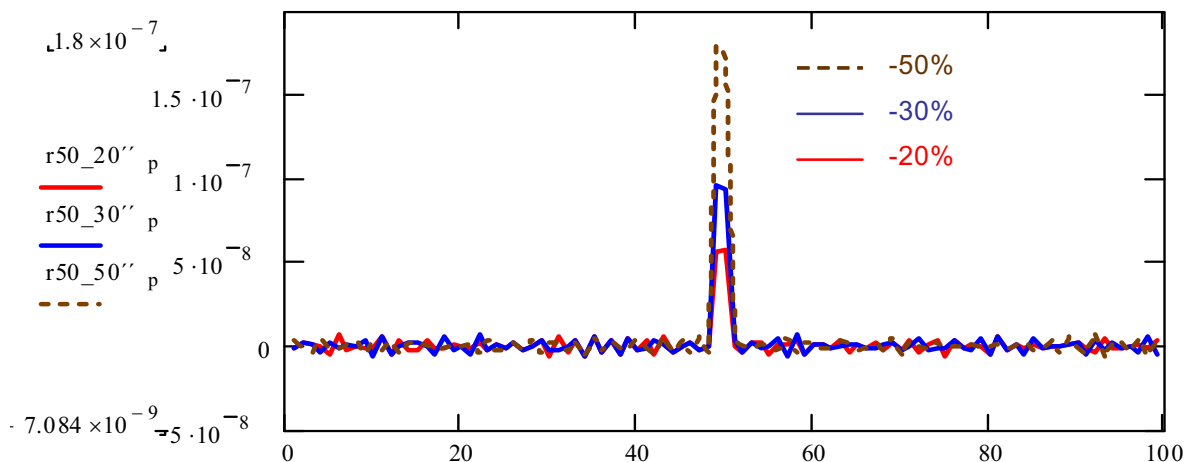
Utjecajne linije progiba za razne položaje mjernih mjesta određene su za gredu koja ima jednaku krutost presjeka svih konačnih elemenata. Položaji mjernih mjesta prikazani su na slici 3. i označeni brojevima od 1 do 5. Sila za koju se proračunavaju utjecajne linije progiba iznosi 100 kN i primijenjena je u svakom čvoru konačnih elemenata. Na taj su način dobivene utjecajne linije progiba za neoštećeno stanje konstrukcije za svako mjerno mjesto.



Slika 3. Položaj mjernih mjesta na gredi

Prva je analiza provedena da bi se utvrdio utjecaj veličine oštećenja na pouzdanost metode. Analizirana su oštećenja krutosti na savijanje presjeka konačnog elementa 50. Oštećenja su simulirana smanjenjem krutosti na savijanje presjeka konačnog elementa za 20 %, 30 % i 50 %.

Za svaki pojedini slučaj oštećenja proračunane su utjecajne linije progiba za mjerno mjesto 3, u sredini raspona. Utjecajne linije progiba za svaki oštećeni slučaj uspoređene su s utjecajnom linijom progiba za neoštećeno stanje konstrukcije prema izrađenoj metodi opisanoj u poglavlju 2. Razlike zakrivljenosti utjecajnih linija progiba za oštećenu i neoštećenu konstrukciju prikazane su na skupnom dijagramu na slici 4.



Slika 4. Oštećenje krutosti na savijanje presjeka 50 za 20 %, 30 % i 50 %

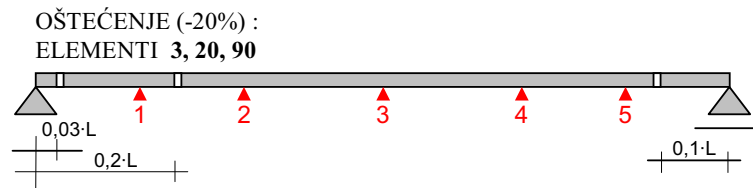
Iz provedene analize razvidno je da je razlika zakrivljenosti utjecajnih linija progiba oštećene i neoštećene konstrukcije najveća za oštećenje od 50 %, a najmanja za oštećenje 20 %. Stoga se može zaključiti da će oštećenja većeg intenziteta biti lakše otkriti nego oštećenja manjeg intenziteta.

U svim daljnjim analizama koje su provedene na grednim konstrukcijama oštećenja krutosti na savijanje presjeka iznose 20 %.

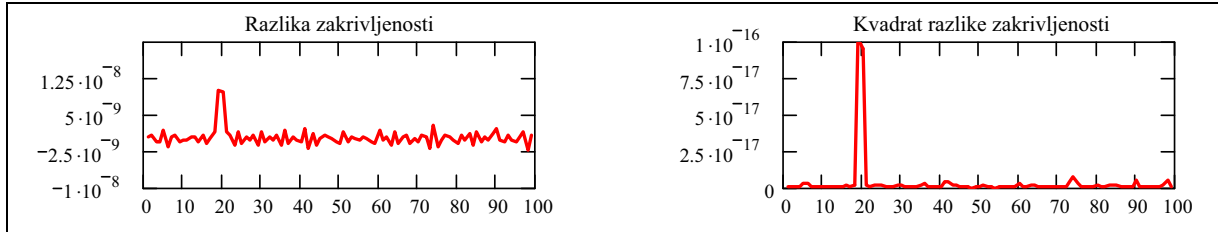
Daljnja analiza provedena je za jedno, dva ili tri oštećenja krutosti na savijanje presjeka konačnih elemenata [6]. U ovome je radu prikazano samo nekoliko reprezentativnih analiza greda sa 3 oštećenja (slike 5. do 22.).

Iz analize provedene za slobodno oslonjenu gredu koja ima oštećenje prouzročeno savijanjem na nekom od konačnih elementa zaključuje se:

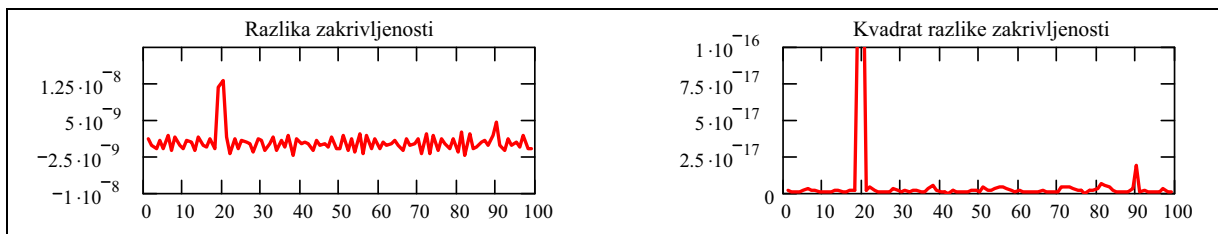
- pouzdaniji su određeni položaji oštećenja koja su bliže mjernom mjestu,
- otkrivanje postojanja oštećenja neposredno uz oslonac ($0 - 0,1 L$) nije moguće odrediti predloženom metodom,
- mjerno mjesto 3, koje se nalazi u polovici raspona, omogućuje određivanje položaja svih oštećenja koje se nalaze između $0,1 L$ i $0,9 L$ velikom pouzdanošću, a koje su provedene u prethodnoj analizi,
- kombinacijom mjernih mjesta 2 i 4 omogućeno je određivanje mjesta svih oštećenja koje su nalaze između $0,1 L$ i $0,9 L$ s velikom pouzdanošću,
- postojanje i mjesto oštećenja može se odrediti samo iz jednoga mjernog mjesta na gredi koje mora biti blizu sredine raspona (preporučljivo između $0,4 L$ i $0,6 L$).



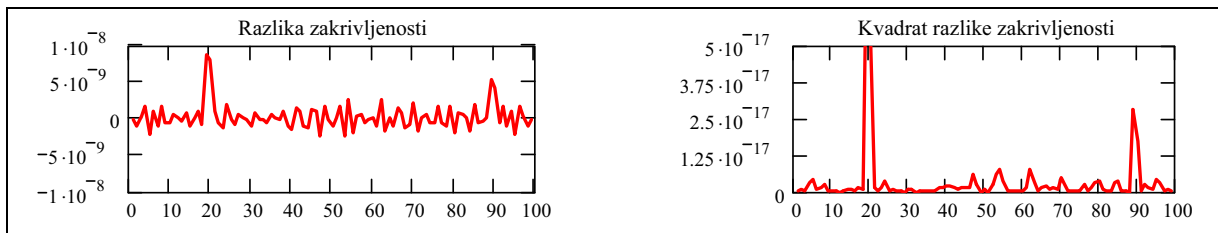
Slika 5. Oštećeni model 1



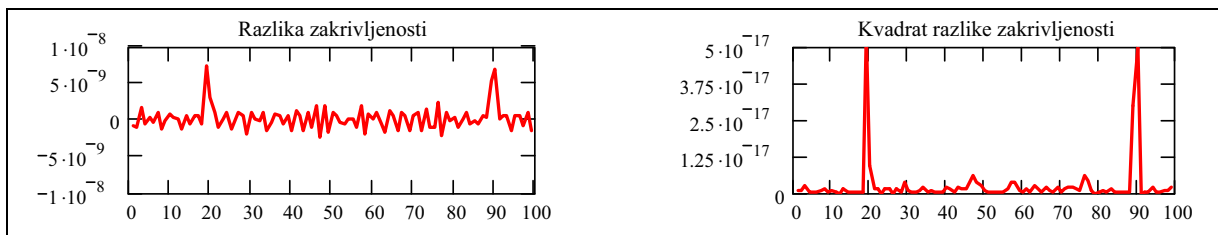
Slika 6. Mjerno mjesto 1, oštećeni model 1



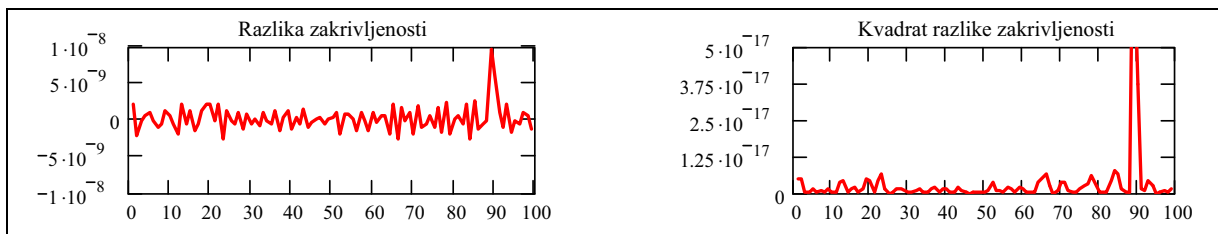
Slika 7. Mjerno mjesto 2, oštećeni model 1



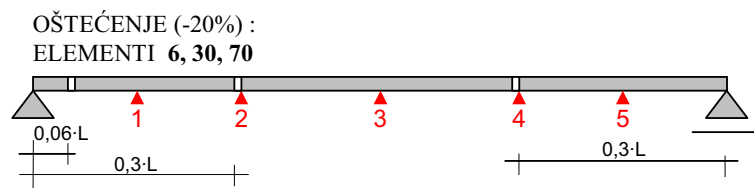
Slika 8. Mjerno mjesto 3, oštećeni model 1



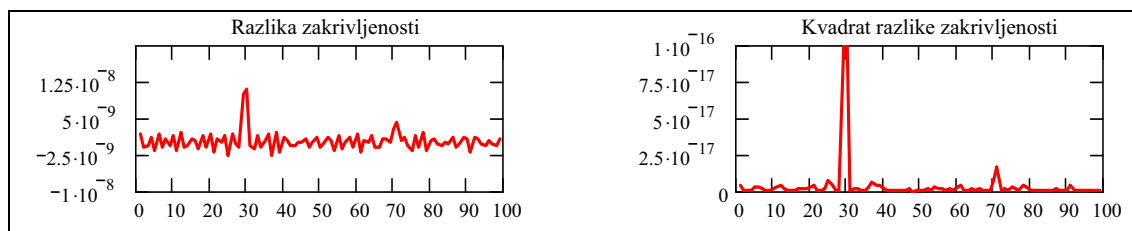
Slika 9. Mjerno mjesto 4, oštećeni model 1



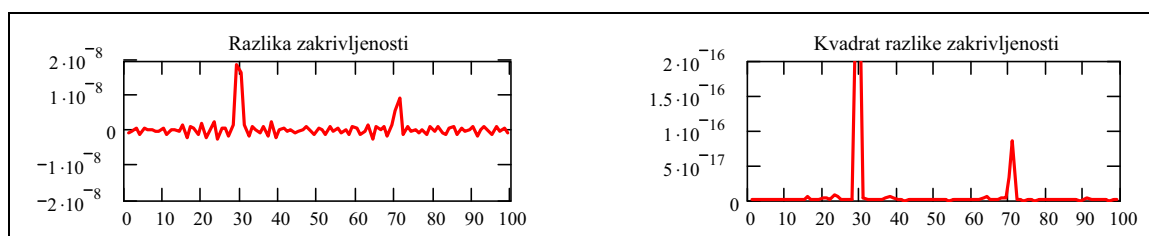
Slika 10. Mjerno mjesto 5, oštećeni model 1



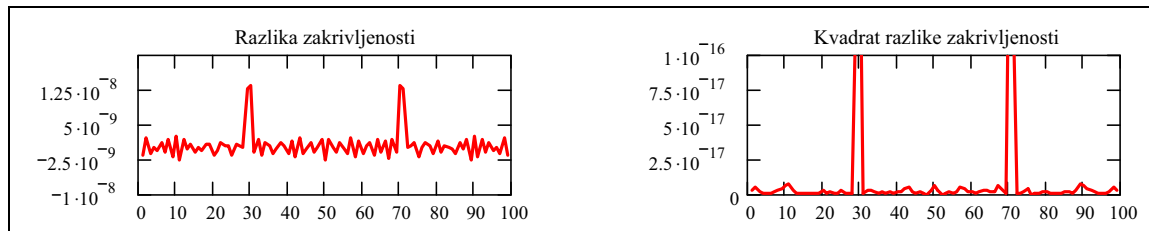
Slika 11. Oštećeni model 2



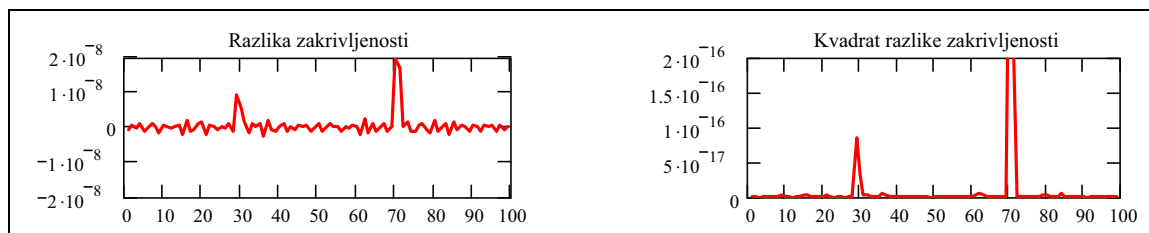
Slika 12. Mjerno mjesto 1, oštećeni model 2



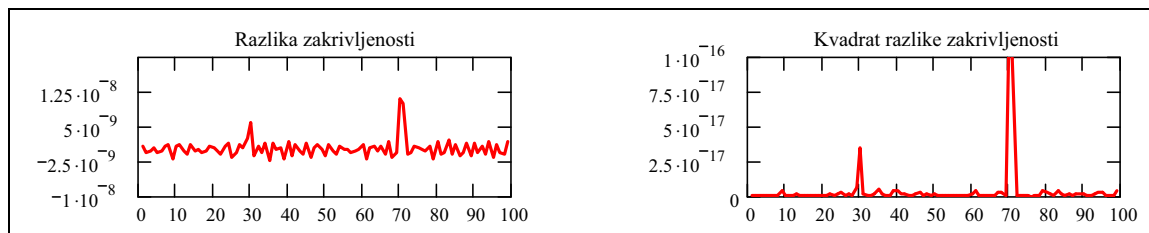
Slika 13. Mjerno mjesto 2, oštećeni model 2



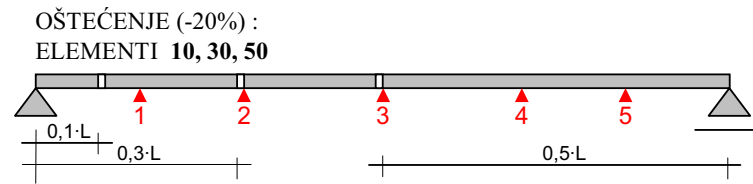
Slika 14. Mjerno mjesto 3, oštećeni model 2



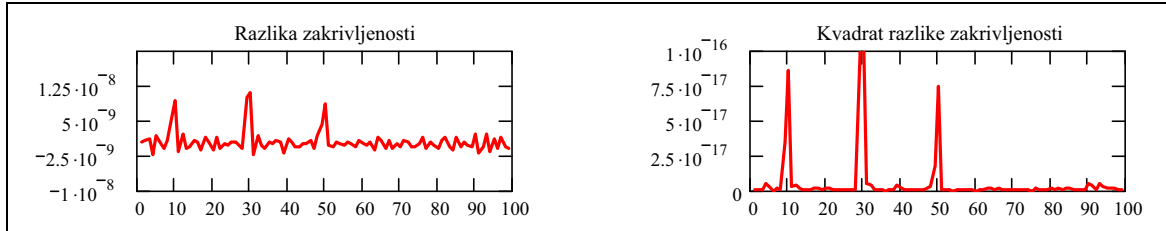
Slika 15. Mjerno mjesto 4, oštećeni model 2



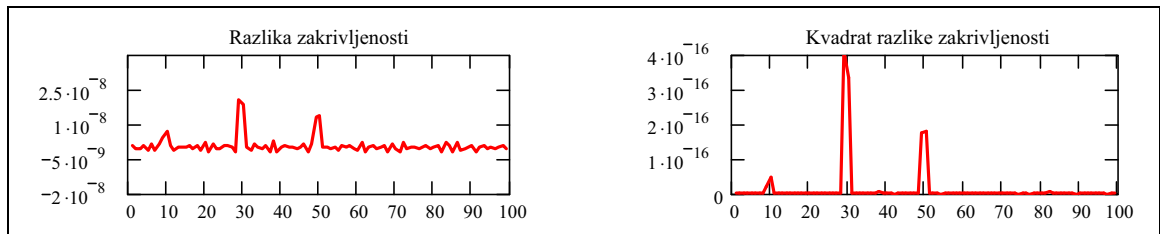
Slika 16. Mjerno mjesto 5, oštećeni model 2



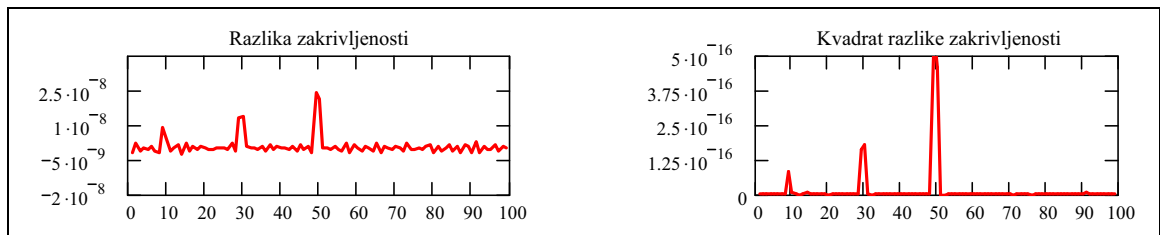
Slika 17. Oštećeni model 3



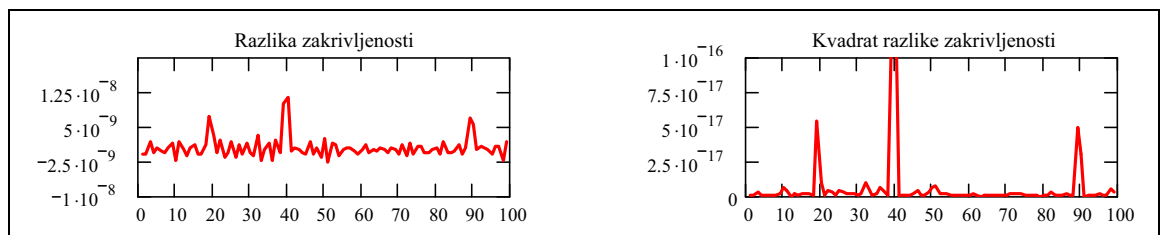
Slika 18. Mjerno mjesto 1, oštećeni model 3



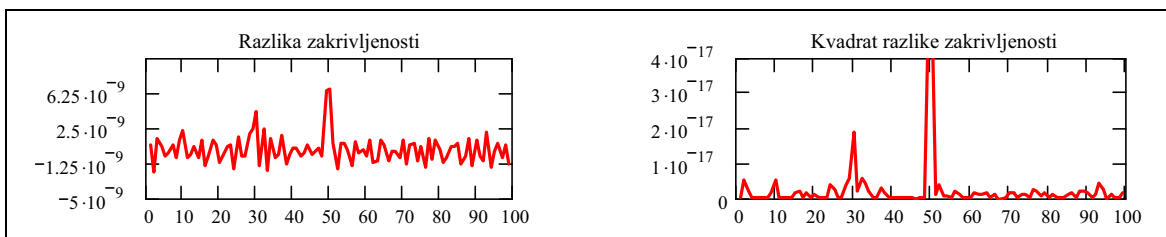
Slika 19. Mjerno mjesto 2, oštećeni model 3



Slika 20. Mjerno mjesto 3, oštećeni model 3



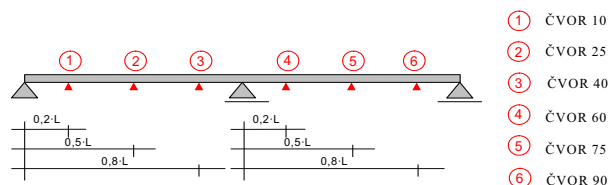
Slika 21. Mjerno mjesto 4, oštećeni model 3



Slika 22. Mjerno mjesto 5, oštećeni model 3

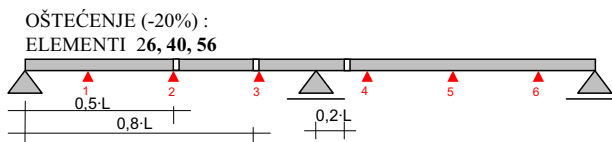
3.2 Greda s dva raspona

Analizirana je greda s dva raspona, svaki raspon je dužine $L = 25$ m (slika 23.). Numerički model sastoji se od $n = 100$ konačnih elemenata dužine $\Delta l = 0,5$ m. Ostali podaci isti su kao kod analize grede s jednim rasponom (točka 3.1). Oštećenje koje se nalazi neposredno uz krajnje oslonce ovom se metodom ne može utvrditi

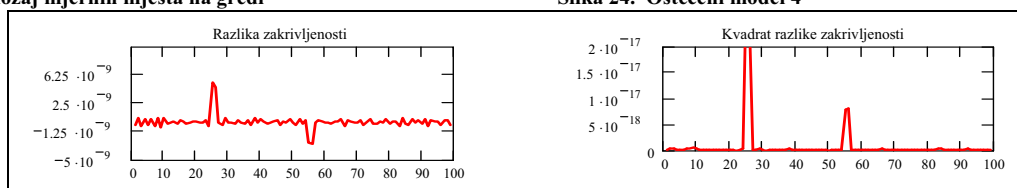


Slika 23 Položaj mjernih mjesta na gredi

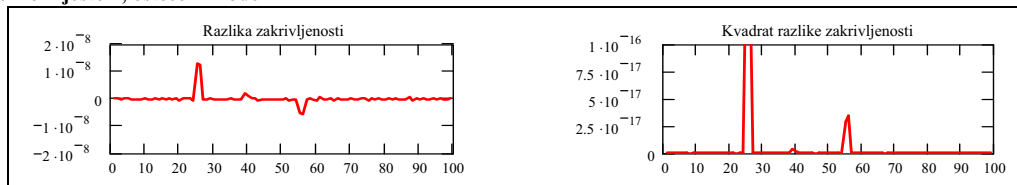
pa takva oštećenja nisu simulirana u ovom poglavlju. U radu [6] provedene su analize s različitim brojem i rasporedom oštećenja za greda s dva raspona. U ovome su radu prikazane dvije reprezentativne analize grede s dva raspona s tri oštećenja (slike 24. do 36.). Iz analize provedene za kontinuiranu greda s dva raspona koja ima oštećenje prouzročeno savijanjem na nekom od konačnih elemenata zaključuje se:



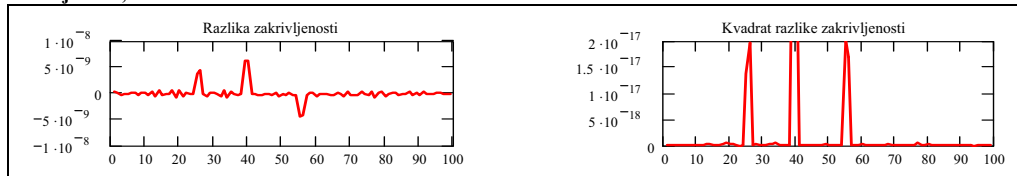
Slika 24. Oštećeni model 4



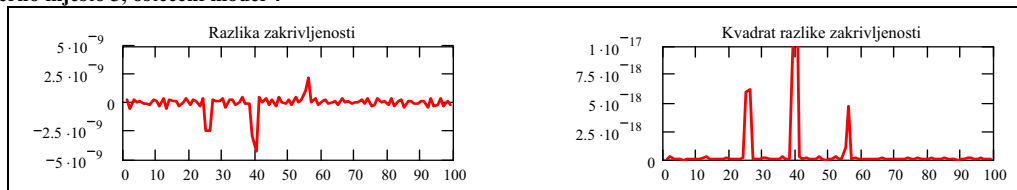
Slika 25. Mjerno mjesto 1, oštećeni model 4



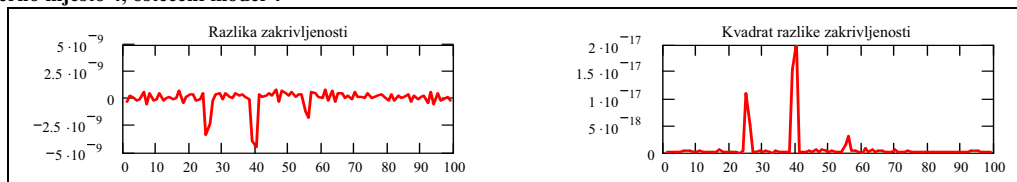
Slika 26. Mjerno mjesto 2, oštećeni model 4



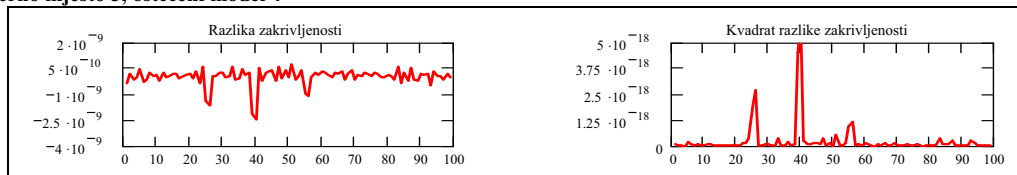
Slika 27. Mjerno mjesto 3, oštećeni model 4



Slika 28. Mjerno mjesto 4, oštećeni model 4

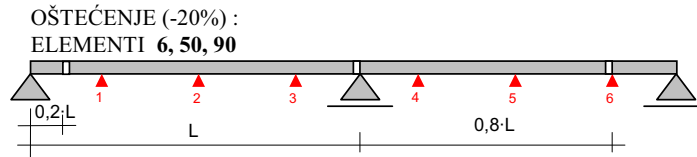


Slika 29. Mjerno mjesto 5, oštećeni model 4

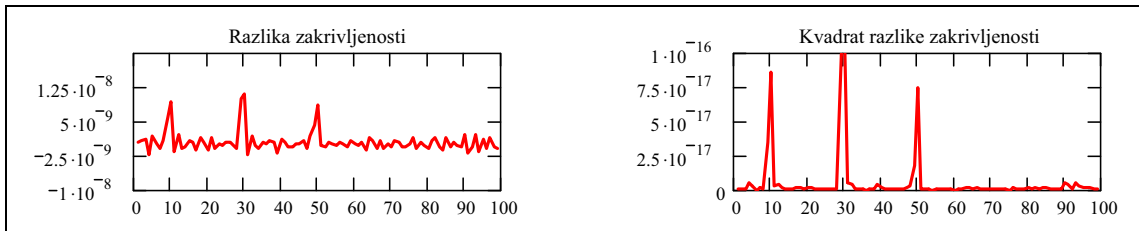


Slika 30. Mjerno mjesto 6, oštećeni model 4

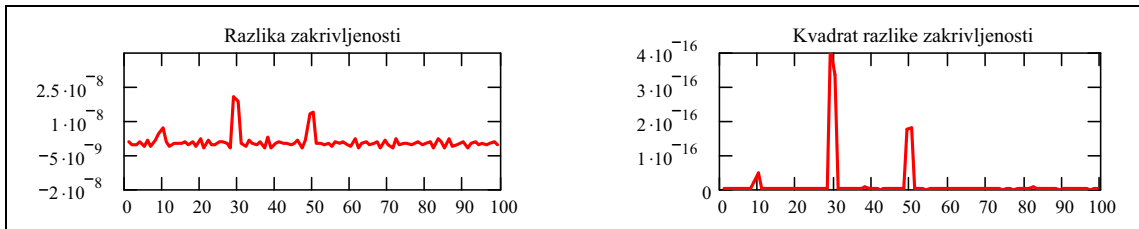
- a. pouzdaniji su određeni položaji oštećenja koja su bliže mjernome mjestu,
- b. mjerno mjesto u polovini raspona s velikom pouzdanošću omogućuje određivanje položaja oštećenja elementa koji se nalazi u istom rasponu kao i mjerno mjesto,
- c. potrebno je imati po jedno mjerno mjesto u svakom rasponu da bi se s velikom pouzdanošću odredio položaj oštećenja, preporučljivo što bliže sredini raspona.



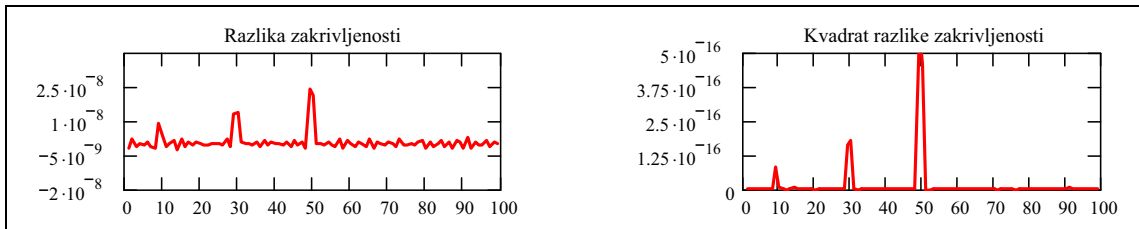
Slika 31 Oštećeni model 5



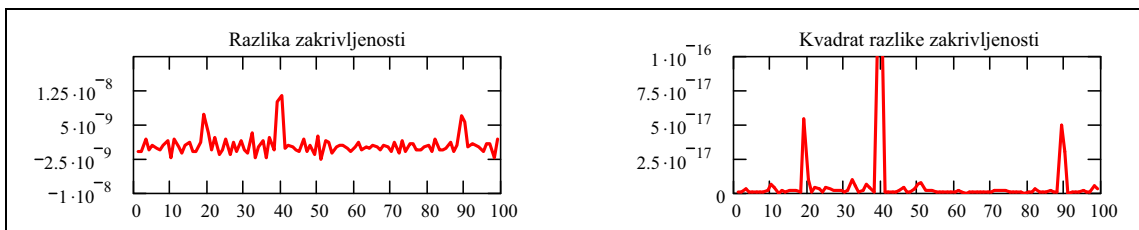
Slika 32. Mjerno mjesto 1, oštećeni model 5



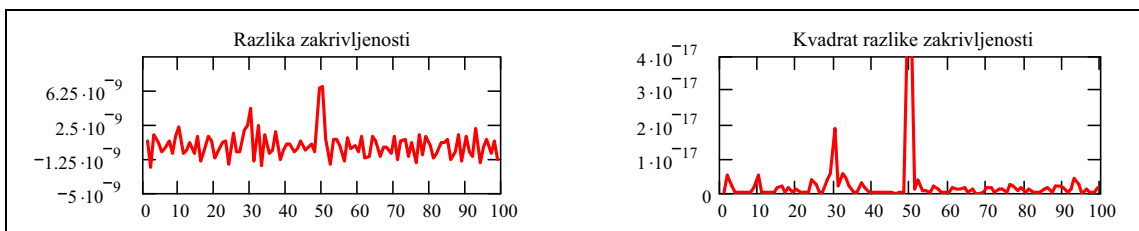
Slika 33. Mjerno mjesto 2, oštećeni model 5



Slika 34. Mjerno mjesto 3, oštećeni model 5



Slika 35. Mjerno mjesto 4, oštećeni model 5

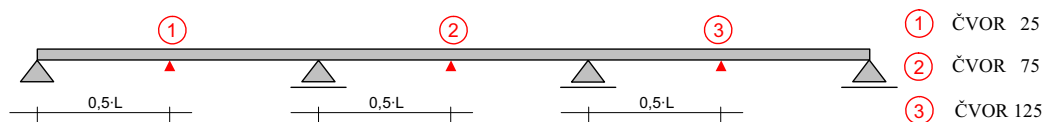


Slika 36. Mjerno mjesto 5, oštećeni model 5

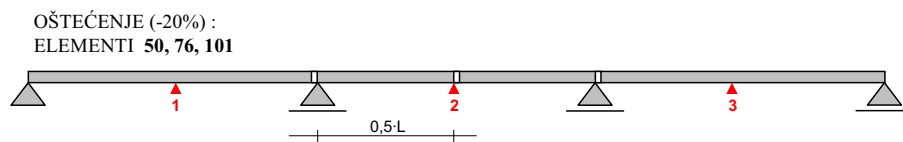
3.3 Greda s tri raspona

Analizirana je greda s tri raspona, svaki je raspon duljine $L = 25$ m. Numerički se model sastoji od $n = 150$ konačnih elemenata duljine $\Delta l = 0,5$ m. Početni element je 1, a za-

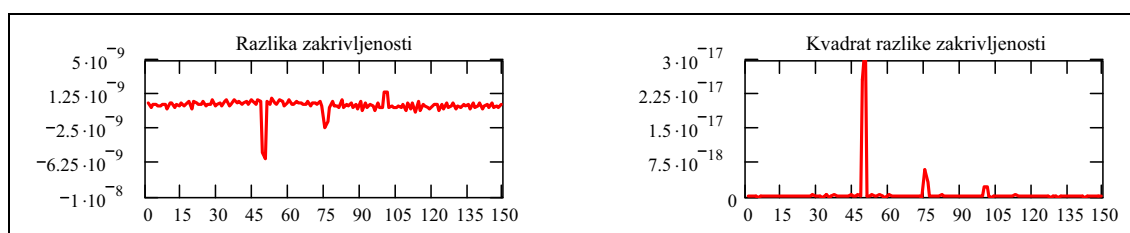
U radu [6] provedene su analize s različitim brojem i rasporedom oštećenja analogno onima u poglavlju 3.2 za gredu s dva raspona. Ovdje je prikazan rezultat analize jednog oštećenog modela (slike 38. do 41.).



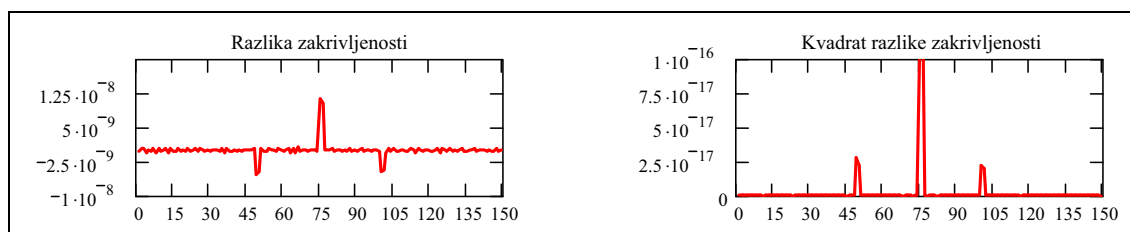
Slika 37. Položaj mjernih mjesta na gredi



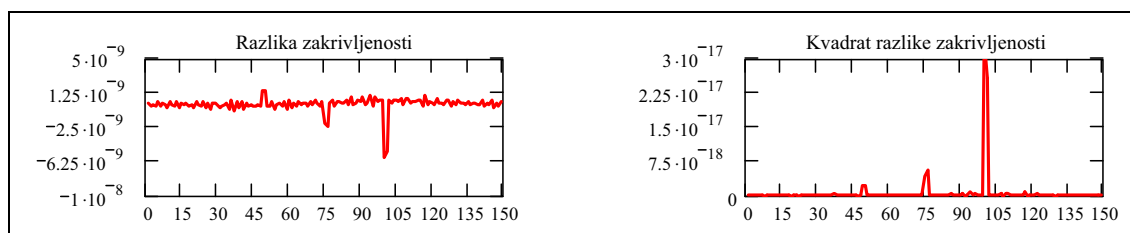
Slika 38. Oštećeni model 6



Slika 39. Mjerno mjesto 1, oštećeni model 6



Slika 40. Mjerno mjesto 2, oštećeni model 6



Slika 41. Mjerno mjesto 3, oštećeni model 6

vršni 150. Ukupni broj čvorova je $N = 151$. Početni čvor 0, a završni 150. Ostali su podaci isti kao kod analize grede s dva raspona.

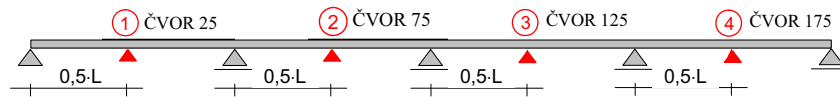
Analizom grede s dva raspona došlo se do zaključka da po jedno mjerno mjesto u polovini svakog raspona velikom pouzdanošću locira sva oštećenja na kontinuiranoj gredi s dva polja. Izuzetak su oštećenja koja su locirana neposredno uz početni ili krajnji oslonac kontinuirane grede koje nije moguće otkriti uporabom ove metode. Stoga je analiza oštećenja na kontinuiranoj gredi s tri raspona provedena sa po jednim mjernim mjestom u polovini svakog raspona.

Zključci su analogni onima utvrđenima za gredu preko dvaju raspona.

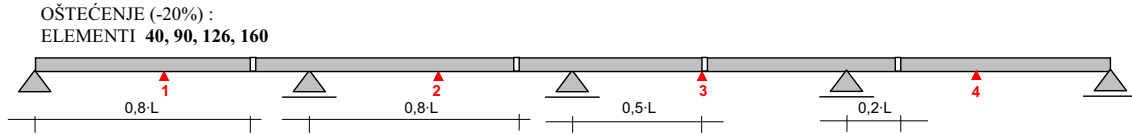
3.4 Greda s četiri raspona

Analizirana je greda s četiri raspona, svaki je raspon duljine $L = 25$ m. Numerički se model sastoji od $n = 200$ konačnih elemenata duljine $\Delta l = 0,5$ m. Početni element je 1, a završni 200. Ukupni broj čvorova je $N = 201$. Početni čvor je 0, a završni 200. Ostali podaci isti su kao kod analize grede s tri raspona.

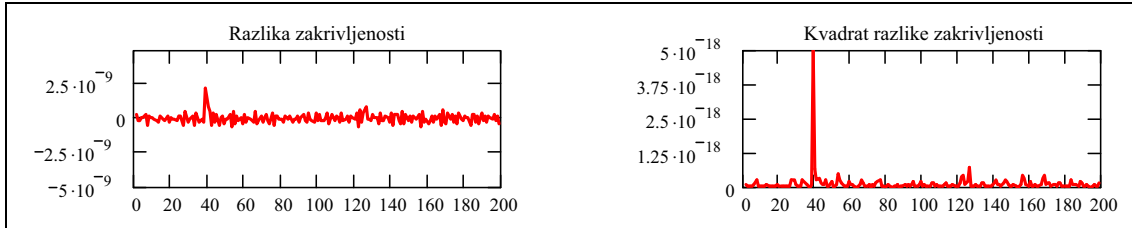
U radu [6] provedene su analize s različitim brojem i rasporedom oštećenja analogno onima u poglavlju 3.2



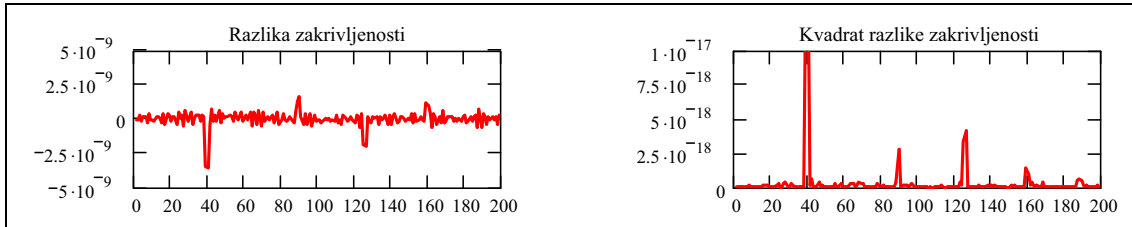
Slika 42. Položaj mjernih mjesta na gredi



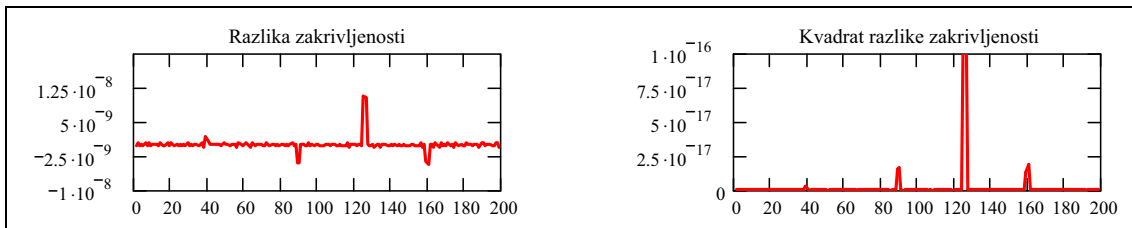
Slika 43. Oštećeni model 7



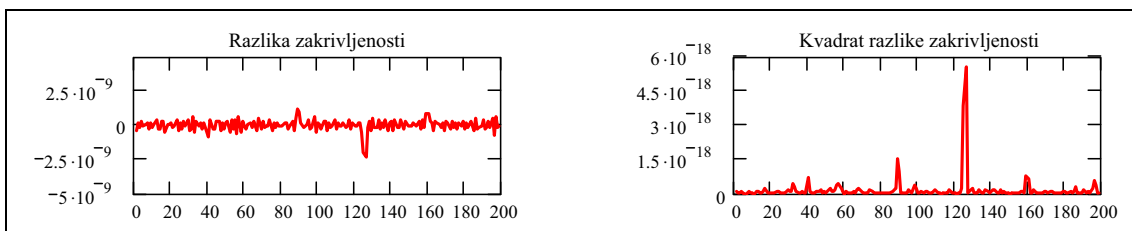
Slika 44. Mjerno mjesto 1, oštećeni model 7



Slika 45. Mjerno mjesto 2, oštećeni model 7



Slika 46. Mjerno mjesto 3, oštećeni model 7



Slika 47. Mjerno mjesto 4, oštećeni model 7

za greda s dva raspona. Ovdje je prikazan rezultat analize jednoga oštećenog modela (slike 43.- 47.)

Zaključci su analogni onima utvrđenima za greda s dva raspona.

4 Ispitivanje na stvarnoj konstrukciji

Ispitivanje je provedeno na čeličnoj rešetkastoj konstrukciji koja je prikazana na slikama 48. i 49. Donji se pojas sastoji od četiri profila Ø 7 mm i dva profila Ø 8 mm. Gornji pojas čine dva profila Ø 7 mm. Gornji i donji po-

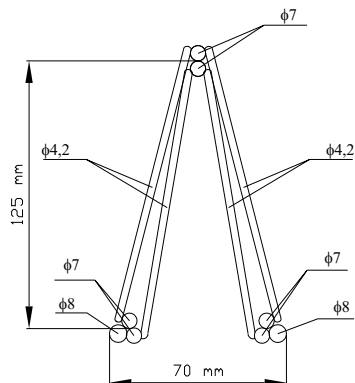
jas povezani su kosnicima profila Ø 4,2 mm. Oštećenje je izvedeno od 1,6 do 1,8 m od lijevog oslonca tako da su na tome mjestu prekinute obje šipke Ø 8 u donjem pojasu nosača.

Raspon grednog nosača jest $L = 6,0$ m.

U ispitivanju je upotrijebljen mjerni uređaj za određivanje progiba konstrukcije, mikroura MITUTOYO 543-464B.

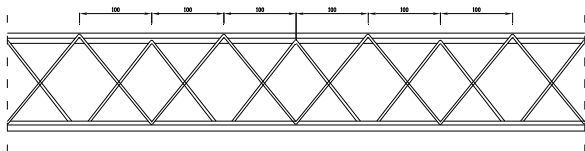
Mjerni je uređaj bio postavljen u sredini raspona na $l = 3,0$ m. Podaci o progibu mjereni su na gornjem dije-

lu nosača na koji je bila pričvršćena glatka metalna pločica da osigura ravnost podloge na koju naliježe mjerni instrument.



Slika 48. Presjek konstrukcije

Nosač je bio predopterećen teretom težine $G = 0,36$ kN da bi se aktivirali svi elementi.

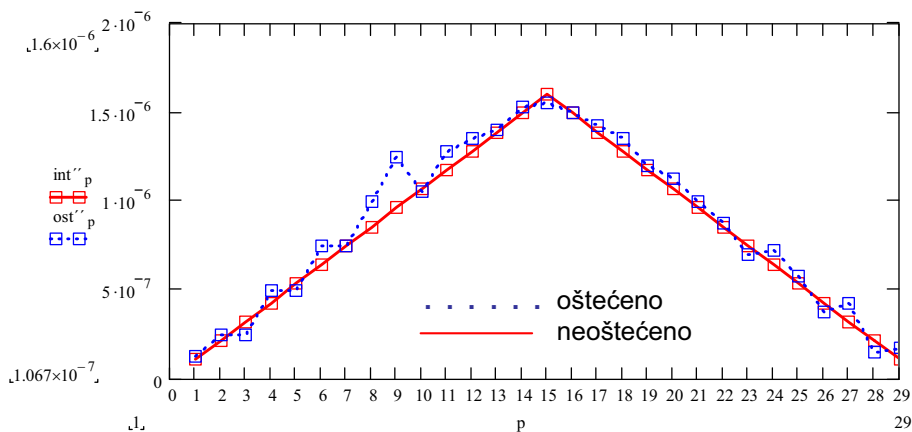


Slika 49. Uzdužni pogled - detalj

Nosač je opterećivan teretom težine $F = 0,13$ kN, svakih 20 cm počevši od lijevog oslonca. Na taj je način dobiveno 30 podataka o progibu u sredini nosača.

Izvedene su četiri serije mjerenja utjecajnih linija progiba u polovini raspona, a zatim su podaci uprosječeni. U analitičkom je postupku rešetkasta konstrukcija svedena na gredni nosač ekvivalentne krutosti.

Iz utjecajne linije progiba za oštećenu konstrukciju središnjom metodom konačnih razlika proračunana je zakrivljenost utjecajne linije progiba za oštećenu konstrukciju.

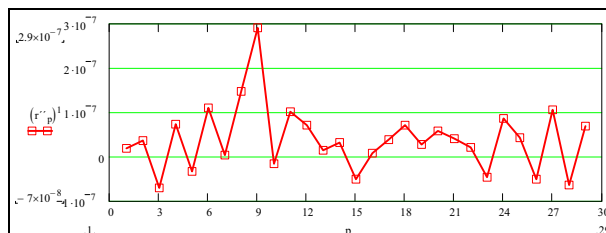


Slika 50. Zakrivljenost utjecajne linije progiba oštećene i neoštećene konstrukcije

Za neoštećenu konstrukciju proračunana je zakrivljenost iz odnosa $\rho(x) = \frac{M(x)}{EI}$.

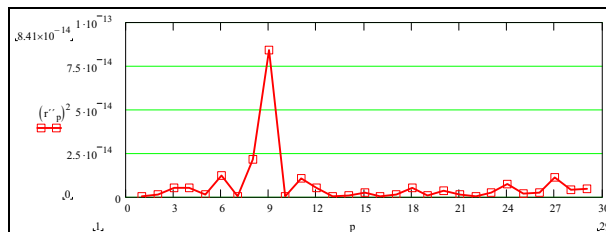
Objek zakrivljenosti prikazane su na slici 50.

Proračunana je razlika zakrivljenosti utjecajnih linija progiba oštećene i neoštećene konstrukcije, što je prikazano slikom 51.



Slika 51. Razlika zakrivljenosti utjecajnih linija progiba oštećene i neoštećene konstrukcije

Zbog netočnosti očitavanja (ograničena točnost mjernog uređaja) razlika utjecajnih linija pokazuje odstupanja zakrivljenosti od nule na svim mjestima, iako je najznačajnije odstupanje u točki 9., odnosno na 1,8 m od lijevog oslonca (slika 51.). Da bismo dobili bolji prikaz, razlika zakrivljenosti utjecajnih linija progiba je kvadrirana (slika 52.).



Slika 52. Kvadrat razlike zakrivljenosti utjecajnih linija progiba oštećene i neoštećene konstrukcije

Iz kvadrata razlike zakrivljenosti utjecajnih linija progiba vidi se da se mjesto oštećenja nalazi između točaka 8. i 9., odnosno između 1,6 i 1,8 m od lijevog oslonca, što odgovara mjestu na kojem se nalazi oštećenje.

Određivanje veličine oštećenja krutosti na savijanje presjeka provedeno je prema formuli (9). Modul elastičnosti materijala je isti u oba slučaja, stoga slijedi:

$$\frac{EI_{OST}}{EI} = \frac{I_{OST}}{I} = \frac{\rho}{\rho_{OST}} = 0,805 \quad (11)$$

Iz izraza (11) proizlazi da prosječno oštećenje presjeka od savijanja između točaka 8. i 9., dobiveno ispitivanjem na konstrukciji, iznosi 19,5 %.

Momenti tromosti za oštećeni i neoštećeni presjek proračunani su i analitički za gredni nosač ekvivalentne krutosti i iznose: $I = 107600 \text{ mm}^4$ i $I_{OST} = 87400 \text{ mm}^4$.

Omjer momenata tromosti za oštećeni i neoštećeni presjek proračunan na temelju stvarnog stanja jest

$$\frac{I_{OST}}{I} = 0,81, \text{ iz čega slijedi da je oštećenje proračunano}$$

na temelju stvarnog stanja 19 %.

Usporedba oštećenja izračunatog za ekvivalentni presjek grede i oštećenja dobivenog iz provedenoga terenskog ispitivanja pokazuje izvrsno poklapanje rezultata.

5 Zaključci

Ovim je radom predložena metoda utjecajnih linija progiba kao racionalna metoda za otkrivanje oštećenja koje se očituje kao smanjenje krutosti na savijanje na grednim i ekvivalentnim konstrukcijama. Primjena metode zasniva se na usporedbi izmjerena oštećenog i neoštećenog stanja koje može biti utvrđeno i analitičkim putem. Metoda je jednostavna za provedbu ispitivanja jer rabi mali broj mjernih mjesta. Bitne su odrednice metode:

1. Izložena metoda pouzdano otkriva položaj i veličinu promjene krutosti na savijanje, bez nužno velikog broja mjesta u kojima nanosimo silu.
2. Promjene krutosti na savijanje, na konačnom broju mjesta i konačne duljine, uzrokuje pad odnosa unutarnje sile i konstante krutosti presjeka na savijanje na oštećenom segmentu. Na mjestu znatne promjene odnosa unutarnje sile i konstante krutosti presjeka nalazi se oštećenje od prouzročnog savijanjem.

3. Kod grednih nosača sama usporedba utjecajnih linija progiba služi za načelno ustanovljivanje postojanja oštećenja. Usporedba zakrivljenosti utjecajnih linija progiba pouzdana je za određivanje položaja i veličine oštećenja u slučaju grednih nosača s jednim ili više raspona.
4. Kod grede s jednim rasponom, iako je analizom dokazano da je jedno mjerno mjesto u sredini raspona dovoljno za pouzdano određivanje položaja i veličine konačnog broja oštećenja, preporučuje se postavljanje dvaju mjernih mjesta na udaljenosti 0,3-0,4 L od svakog oslonca da bi se osigurala kontrola izmjerenih podataka.

Kod greda preko dvaju, triju i više raspona po jedno mjerno mjesto u sredini raspona dovoljno je za određivanje položaja i veličine konačnog broja oštećenja s velikom pouzdanošću.

5. Oštećenja koja se nalaze u području najmanjih momenata savijanja, na udaljenosti 0-0,1 L od početnog i krajnjeg oslonca slobodno oslonjenih greda, nije moguće odrediti analizom promjene zakrivljenosti utjecajnih linija progiba.
6. Provedena terenska ispitivanja potvrdila su primjenjivost metode. Analizom zakrivljenosti utjecajnih linija progiba određeni su položaj i veličina oštećenja konstrukcije. Također je dokazana analitička pretpostavka da mjereni podaci moraju imati četiri značajne znamenke, što kod uobičajenih građevinskih konstrukcija iznosi stotinku milimetra pri pomacima reda veličine centimetra.

LITERATURA

- [1] Oh, B. H., Jung, B. S.: *Structural Damage Assessment with Combined Data of Static and Modal Tests*, Journal of Structural Engineering, Vol 124, No 8, (1998), 956-965.
- [2] Samoio, R. P. C. i drugi: *Damage Detection Using the Frequency-response-function Curvature Method*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 226, No. 5, (1999), 1029-1042,
- [3] Sanayei, M., Nelson, R. B.: *Identification of structural element stiffness from incomplete static test data*, SAE Aerospace Technology Conference and Exposition, Long Beach, California, SAE-861793, (1986)
- [4] Owolabi, G. M., Swamidas, A. S. J.; Seshadri, R.: *Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response function*, Journal of Sound and vibration, Vol. 265, No 1, (2003), 1-22.
- [5] Bakhtijari-Nejad, F., Rahai, A., Esfandiari, A.: *A structural damage detection method using static noisy data*, Engineering structures, Vol. 27, No 12, (2005), 1784-1793.
- [6] Štimac, I.: *Uporaba utjecajnih linija progiba u otkrivanju oštećenja konstrukcija*, doktorski rad, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, (2006.)
- [7] Kožar, I.: *Dokumentacija za računalni program DARK*, (2003)