Metodologije za identifikaciju oštećenja konstrukcije na osnovu dinamičkih mjerenja

Zovkić, Jurko; Sigmund, Vladimir; Sigmund, Zvonko

Source / Izvornik: **Tehnički vjesnik, 2008, 15, 29 - 34**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:260183

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

ISSN 1330-3651
UDC/UDK 624.042.8

METODOLOGIJE ZA IDENTIFIKACIJU OŠTEĆENJA KONSTRUKCIJE NA OSNOVU DINAMIČKIH MJERENJA

Jurko Zovkić, Vladimir Sigmund, Zvonko Sigmund

Pregledni članak

Modeliranje ponašanja stvarnih konstrukcija je složeno i sadrži mnoge nepoznate veličine: način gradnje, ugrađeni materijal, raspodjela mase i krutosti, stanje konstrukcije, itd. koje je nužno pretpostaviti. Ove nepoznanice čine nerazumnima primjenu složenih matematičkih modela, jer loši ulazni rezultati vode ka lošim izlaznim rezultatima, bez obzira na točnost primijenjenih matematičkih modela. Pojednostavnjeni modeli koji se baziraju na primjeni eksperimentalnih rezultata daju bolje uvide u stanje materijala i konstrukcija. Kvantitativno određivanje stvarnog stanja konstrukcije moguće je mjerenjem dinamičkog odgovora na ograničenom broju mjernih mjesta. Dinamičkim ispitivanjem dobivaju se: vlastite frekvencije, forme i koeficijenti prigušenja koji predstavljaju osobnu iskaznicu konstrukcije i sadrže u sebi sve bitne podatke o konstrukciji. Poznato je da se praćenjem stanja dinamičkih karakteristika dobiva dobra informacija o trenutnom stanju konstrukcije u eksploataciji. Moguće je na temelju razlike stanja dinamičkih karakteristika između dvaju razdoblja odrediti promjene krutosti konstrukcije odnosno ocijeniti mjesto i intenzitet oštećenja koja su u međuvremenu nastala. U radu su prikazane metodologije za identifikaciju i kvanitifikaciju intenziteta oštećenja na stvarnoj konstrukciji, a koja su bazirane na provedenim dinamičkim mjerenjima ambijentalnim vibracijama. Metodologije su kalibrirane i provjeravane na jednostavnim matematičkim i eksperimentalnim modelima s jednim i s tri stupnja slobode.

Ključne riječi: *Metodologija, stanje konstrukcije, identifikacija stanja, dinamička svojstva konstrukcije, procjena oštećenja*

Methodologies for structural damage identification by means of dynamical testing

Subject review

Dynamic characteristics of the structure represent its personal card. By monitoring them it is possible to get relevant information about the structural state and its degradation. The differences in measured dynamic characteristics at two stages in the life of structure reveal change in the stiffness/mass of the structure, location of the change and it is possible to conclude about the size of change in regard to the initial state. Outlined are two methodologies for structural damage identification by means of dynamical testing. They have been calibrated on the simple models and have proven its applicability to the real building structure for which only a limited amount of measured data is available. Methodology 1 requires knowledge of the measured dynamical characteristics of a structure at its initial state and after the damaging event. By means of the structural identification from the measured dynamical characteristics and comparing the change of relative shear stiffness between the neighboring stories the location and amount of structural change/damage is estimated. Methodology 2 is used when there are no data about the initial structural dynamic characteristics. A structural model with the use of finite element is made for the structure in its undamaged state. Measured dynamic properties such as frequencies and mode shapes of the structure in its damaged state are also needed. Using system identification techniques on both data sets and using the method of relative shear stiffness or the method of residual forces the location and amount of the structural damage could be estimated. It is applicable for the structures that could be described by the FEM.

Key words: *Methodology, buildings, identification, structural damage, location, amount*

1
Uvod
Introduction

Kvalitativno i kvantitativno određenje stvarnog stanja konstrukcije moguće je mjerenjem dinamičkog odgovora na ograničenom broju mjernih mjesta tijekom uporabnog vijeka građevine. Dinamičkim ispitivanjem dobivaju se: vlastite frekvencije, forme i koeficijenti prigušenja koji predstavljaju osobnu iskaznicu konstrukcije i sadrže u sebi sve bitne podatke o konstrukciji. Poznavanjem dinamičkih svojstava moguće je iznaći inženjerski odgovor kako najbolje sanirati nosive strukture u današnjem vremenu i s današnjim vrijednosnim sustavom (troškovi, rokovi, kvaliteta, nenarušavanje ambijenta). Eventualne mjere sanacije objekata moraju biti takove da ni u čemu ne remete značajke objekta, a da daju dovoljnu sigurnost za uporabno i opterećenje od eventualnih katastrofalnih događaja.

Poznato je da se praćenjem dinamičkih karakteristika tijekom uporabnog vijeka građevine dobiva dobra informacija o trenutnom stanju konstrukcije. Sve eventualne promjene dinamičkih karakteristika nakon nekog zahvata ili katastrofalnog događaja ukazuju na promjene u krutosti/masi i skrivena oštećenja u konstrukciji. Na temelju razlike stanja dinamičkih karakteristika između dvaju razdoblja mogu se odrediti promjene krutosti konstrukcije odnosno ocijeniti lokacija i nivo oštećenja koja su u međuvremenu nastala.

Identifikacija sistema na bazi dinamičkih mjerenja s ciljem utvrđivanja stanja inženjerskih konstrukcija privlači mnogo pažnje posljednjih godina. Uobičajeni se pristup sastoji od:

a) Mjerenja dinamičkih svojstava, analize snimljenih podataka te određivanja modalnih parametara;
b) Identifikacije sustava (definiranje matrice krutosti i matrice masa) na osnovi izmjerenih dinamičkih svojstava;
c) Procjene stanja konstrukcije na osnovi izmjerenih i procijenjenih veličina.

U radu su prikazane osnove dviju metodologija za identifikaciju i kvantifikaciju intenziteta oštećenja građevinskih konstrukcija zgrada. One su razvijene na podlozi modela s jednim i tri stupnja slobode u okviru [1], a provjerene su na stvarnoj zgradi tijekom njene sanacije.

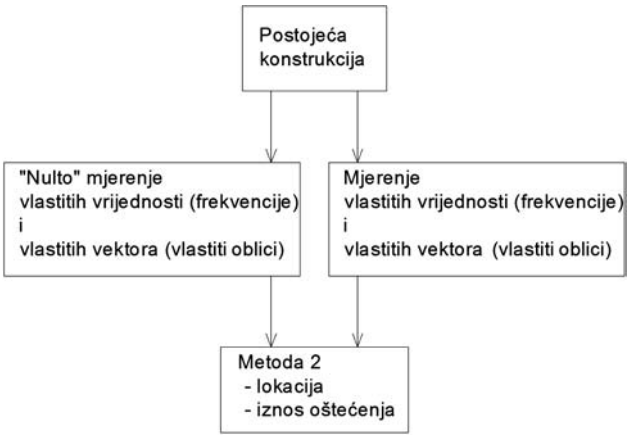
2
Metodologije za identifikaciju oštećenja
Methodologies for structural damage identification

U praksi su moguća dva slučaja:

1) da za dotičnu građevinu postoji "nulto" mjerenje dinamičkih svojstava te se nakon nekog događaja koristi novo mjerenje za utvrđivanje položaja i intenziteta oštećenja;
2) da za dotičnu građevinu ne postoji "nulto" mjerenje te se za nju pravi matematički model u odnosu na kojeg se vrši usporedba između izmjerenih dinamičkih

svojstava nakon nekog događaja i izračunatih svojstava prije.

Na osnovu istraživanja upotrebljivosti metoda za identifikaciju parametara konstrukcije provedenih u [1] radi utvrđivanje stanja građevinskih konstrukcija, definirane su dvije metodologije za identifikaciju oštećenja konstrukcije. Obje su bazirane na primjeni mjerenja dinamičkih svojstava građevina, a mogućnost njihove primjene pojašnjena je na primjeru.



Slika 1 *Metodologija 1 - identifikacija oštećenja konstrukcije na osnovu razlika u izmjerenim parametrima konstrukcije*
Figure 1 *Methodology 1-structural damage identification based on differences in measured dynamic characteristics*

2.1
Metodologija 1
Methodology 1

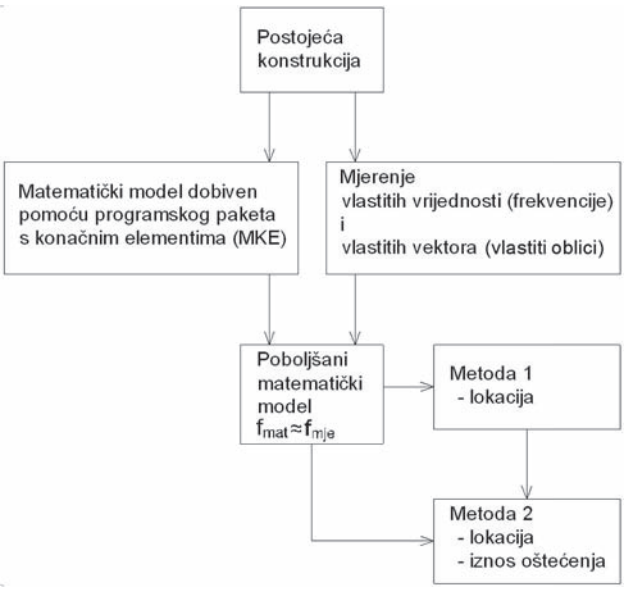
Metodologija 1 primjenjiva je na konstrukcijama kod kojih znamo početno stanje ("nulto mjerenje") na neoštećenoj konstrukciji. Ona traži poznavanje izmjerenih dinamičkih svojstava (svojstvene frekvencije i forme) neoštećene i oštećene građevine. Za određivanje lokacije i intenziteta oštećenja koristi se Metoda relativne posmične krutosti (Metoda 2).

2.2
Metodolgija 2
Methodology 2

Metodologija 2 primjenjuje se kada ne postoji podatak o početnom stanju konstrukcije te mjerenje dinamičkog odziva vršimo nakon nekog događaja. Ona traži uporabu numeričkih metoda za modeliranje konstrukcije u neoštećenom stanju te izmjerenih dinamičkih svojstva konstrukcije u oštećenom stanju. Za određivanje lokacije oštećenja koristimo Metodu rezidualnih sila (Metoda 1), a za lokaciju i intenzitet oštećenja koristi se Metoda relativne posmične krutosti (Metoda 2).

3
Identifikacija svojstava konstrukcije
Structural identification

U cilju identifikacije svojstava konstrukcija (masa i krutost), na osnovi istraživanja provedenih u okviru rada [1], u građevinarstvu su primjenjive dvije dalje navedene metode.



Slika 2 *Metodologija 2 – identifikacija oštećenja na osnovu razlika u izmjerenim i izračunatim parametrima konstrukcije*
Figure 2 *Methodology 2- structural damage identification based on differences between the calculated and measured dynamical characteristics*

3.1
Metoda 1 - Metoda rezidualne sile
Method 1 – Residual force method

Metoda rezidualne sile je pobliže pojašnjena u [3], gdje se koristi vektor pseudo sila konstrukcije izveden s ciljem lociranja oštećenja na konstrukciji.

Oštećenje konstrukcije se matematički manifestira kroz promjene u matrici krutosti i matrici masa, a fizikalno u dinamičkim svojstvima (svojstvene frekvencije i oblici).

Jednadžba gibanja neprigušenih oscilacija za sustav s n-stupnjeva slobode u matričnoj formi je:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f(t)}\,, \tag{1}$$

gdje su $\mathbf{M}$ i $\mathbf{K}$ $n \times n$ matrice mase i krutosti neopterećene konstrukcije, a $\mathbf{u}$ i $\ddot{\mathbf{u}}$ su $n \times 1$ vektori pomaka i ubrzanja, odnosno $\mathbf{f(t)}$ je $n \times 1$ vektor sile uzbude.

U slučaju slobodnih vibracija ($\mathbf{f(t)=0}$) iz jednadžbe (1) izvodi se karakteristična jednadžba svojstvenog oblika:

$$\left(\mathbf{K} - \lambda_i \cdot \mathbf{M}\right) \cdot \varphi_{\mathrm{i}} = 0\,, \tag{2}$$

gdje je λ_i i-ta vlastita vrijednost konstrukcije (koja je jednaka kvadratu prirodne frekvencije, $\lambda_i = \lambda_i^2$), a φ_{i} je prirodni oblika koji odgovara ω_i.

Uvodimo oznaku d kao oznaku oštećene konstrukcije, te definiramo vektor rezidualne sile u obliku:

$$\mathbf{R_i} = \left(-\mathbf{K_u} + \lambda_{di} \cdot \mathbf{M_u}\right) \cdot \varphi_{\mathbf{di}}\,. \tag{3}$$

Ako nam je dostupan skup izmjerenih svojstvenih frekvencija i oblika, modalni vektor rezidualne sile $\mathbf{R}_{\mathrm{i}}$ može se izračunati iz jednadžbe (3).

Rezidualne sile nastaju na mjestima na kojima postoji oštećenje na konstrukciji. Analizom vektora $\mathbf{R}_{\mathrm{i}}$ možemo ustanoviti da za izmjerene svojstvene frekvencije i oblike (koji nisu poremećeni utjecajem šumova), j-ti član vektora $\mathbf{R}_{\mathrm{i}}$ koji odgovara j-tom stupnju slobode iščezava za slučaj

da niti jedan element pridružen promatranom stupnju slobode nije oštećen; međutim, poprima vrijednost različitu od nule ako je bilo koji element pridružen promatranom stupnju slobode oštećen.

3.2
Metoda 2 - Metoda relativne posmične krutosti
Method 2 - Relative shear stiffness method

Metoda relativne posmične krutosti je pobliže opisana u [4], a ovdje je kratko izložena. Temeljna jednadžba osciliranja konstrukcije u *j*-tom obliku poprečnih vibracija, uz zanemarivanje prigušenja, može se napisati u obliku:

$$\left(\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M}\right)\mathbf{\Phi}j=0\,, \tag{4}$$

gdje je **K** matrica posmične krutosti, **M** je matrica masa, ω_j je prirodna frekvencija *j*-tog oblika, a $\mathbf{\Phi}_j$ je vektor oblika. Svi elementi matrice eksperimentalno su utvrđeni tijekom dva sukcesivna mjerenja (prije i nakon oštećenja).

Veza između modalnih karakteristika ω_j i $\mathbf{\Phi}_j$ i konstrukcijskih parametara $R_{i,i+1}$ (za pojednostavnjeno prikazanu posmičnu zgradu) je:

$$R_{i,i+1}=\frac{\omega_j^{\,2}}{\mathbf{\Phi}_{i,j}-\mathbf{\Phi}_{i+1,j}}\sum_{i=1}^{i}\mathrm{m}_i\,\mathbf{\Phi}_{i,j}\,, \tag{5}$$

Poznavanjem konstrukcijski parametara $R_{i,i+1}$ za svaki kat građevine, prije i nakon oštećenja, indeks oštećenja pojedinog kata se računa na sljedeći način:

$$\eta_{i,i+1}=\frac{R^*_{i,i+1}-R_{i,i+1}}{R^*_{i,i+1}}\cdot 100\,, \tag{6}$$

gdje je $R^*_{i,i+1}$ relativna posmična krutost kata osnovne neoštećene konstrukcije, a $R_{i,i+1}$ je relativna krutost kata oštećene konstrukcije.

4
Primjena metodologija na stvarnu zgradu
Aplication of methodologies on buildings

4.1
Opis objekta
Measured building

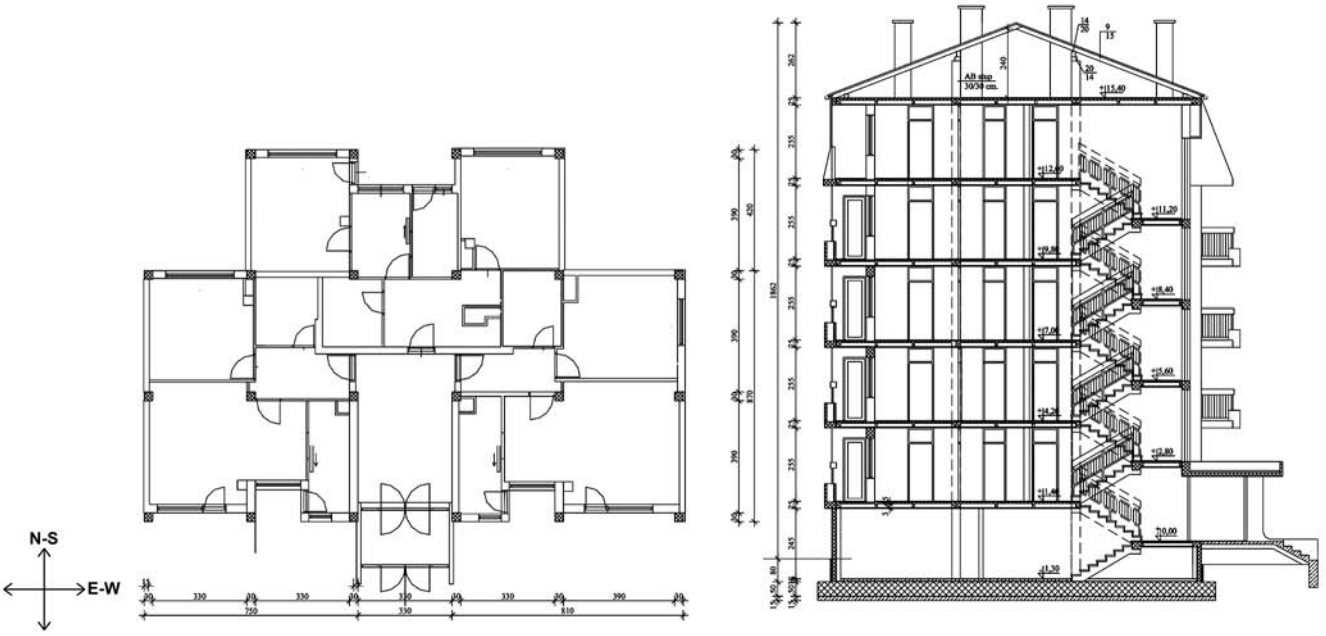
Građevina je izgrađena 1986. godine kao montažna armirano-betonska konstrukcija u sustavu "IMS"-Žeželj (slika 3). Tijekom domovinskog rata građevina je oštećena ratnim i djelovanjem požara te je bila neophodna njena sanacija. Prije, tijekom i nakon izvedbe sanacije vršena su mjerenja dinamičkih svojstava metodom ambijentalnih vibracija.

Tablica 1 *Pregled ispitivanja sa opisom sanacije*
Table 1 *Dynamic measurements and strengthening progress*

MODEL	MJERENJE	OPIS SANACIJE
M 10-1	11.08.2003.	Postojeća građevina
M 10-2	13.07.2005.	Sanacija izvedena do 2. kata
M 10-3	04.05.2006.	Sanirana (ojačana) građevina

4.1.1
Eksperimentalni rezultati
Measured dynamic characteristics

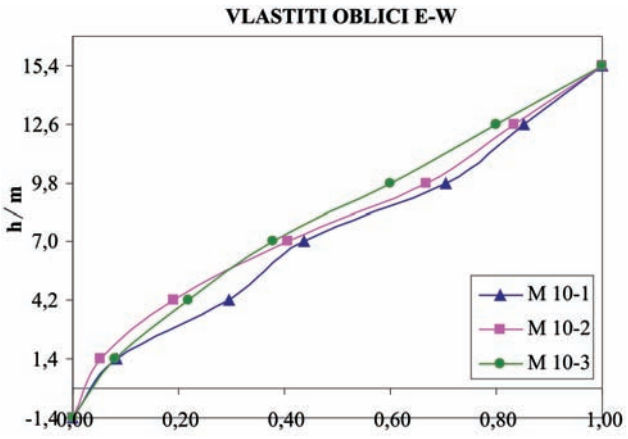
Ispitivanjem objekata metodom ambijentalnih vibracija dobivene su dinamičke karakteristike konstrukcije objekta za smjer N-S (slika 4) te E-W (slika 5), te forme osciliranja po vertikali (poprečni smjer osciliranja) i koeficijenti prigušenja.



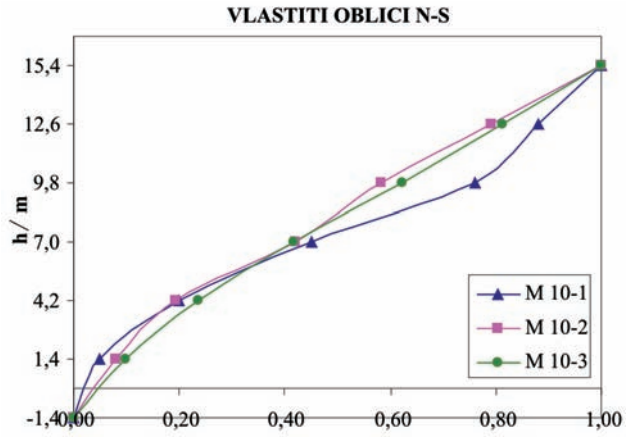
Slika 3 *Karakteristični tlocrt etaže i presjek građevine*
Figure 3 *Characteristic floor and cross section*

Tablica 2 *Izmjerene vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja*
Table 2 *Measured natural frequencies and damping coefficients*

MODEL	MJERENJE U SMJERU N-S		MJERENJE U SMJERU E-W	
	f_1/Hz	prigušenje/%	f_1/Hz	prigušenje/%
M 10-1	**3,710**	3,00	**3,125**	2,00
M 10-2	**4,030**	-	**3,540**	-
M 10-3	**4,350**	2,00	**3,910**	2,00



Slika 4 *Vertikalne forme osciliranja za smjer E-W*
Figure 4 *Measured natural forms for E-W direction*



Slika 5 *Vertikalne forme osciliranja za smjer N-S*
Figure 5 *Measured natural forms for N-S direction*

4.1.2
Matematički rezultati
Calculated characteristics

Za dobivanje matematičkog modela (matematički rezultat) korišten je programski paket Tower5.2 koji koristi metodu konačnih elemenata (MKE). Početni model građevine dobiven je na osnovu snimljenih geometrijskih svojstava elemenata i na bazi podataka o mehaničkim svojstvima materijala. Početni je model iterativno poboljšavan kroz promjenu krutosti pojedinih elemenata i uzimanjem u obzir interakcije između konstrukcije i tla sve dok se numerički model svojim svojstvima nije približio onima izmjerenima na samom objektu. Takav poboljšani model predstavlja stvarni model realne konstrukcije na kojem se mogu provoditi daljnje simulacije.

Tablica 3 *Dobivene frekvencije i vlastiti oblici pomoću matematičkog modela*
Table 3 *Calculated natural frequencies and forms by mathematical model*

Vlastiti oblici za smjer E-W		Izračunati	Normalizirani
Model / Frekvencija/ Hz		**TOWER**	**TOWER**
Kat	H/ m	3,054	3,054
potkrovlje	15,40	0,897	1,000
4	12,60	0,730	0,814
3	9,80	0,505	0,564
2	7,00	0,372	0,414
1	4,20	0,206	0,229
prizemlje	1,40	0,069	0,076
pod	-1,40	0,000	0,000

Vlastiti oblici za smjer N-S		Izračunati	Normalizirani
Model / Frekvencija/ Hz		**TOWER**	**TOWER**
Kat	H/ m	3,694	3,694
potkrovlje	15,40	0,993	1,000
4	12,60	0,812	0,818
3	9,80	0,627	0,632
2	7,00	0,444	0,447
1	4,20	0,270	0,271
prizemlje	1,40	0,112	0,113
pod	-1,40	0,000	0,000

Tablica 4 *Prikaz indeksa oštećenja za oba smjera osciliranja*
Table 4 *Calculated structural damage index*

Model		**M 10-1**	**M 10-2**	**M 10-3**
Indeks oštećenja E-W/ %		η	η	η
Kat	H/ m			
potkrovlje	15,40	0,00	-14,20	-16,10
4	12,60	0,00	-12,81	-12,12
3	9,80	0,00	-27,23	-75,75
2	7,00	0,00	17,82	-27,47
1	4,20	0,00	-85,69	-114,91
prizemlje	1,40	0,00	-81,03	-44,88
pod	-1,40	-	-	-

Model		**M 10-1**	**M 10-2**	**M 10-3**
Indeks oštećenja N-S/ %		η	η	η
Kat	H/ m			
potkrovlje	15,40	0,00	32,08	12,37
4	12,60	0,00	36,00	16,26
3	9,80	0,00	-98,27	-86,63
2	7,00	0,00	-16,07	-76,51
1	4,20	0,00	-39,82	-39,47
prizemlje	1,40	0,00	34,03	35,97
pod	-1,40	-	-	-

4.2
Primjena metodologije 1
Application of the Methodology 1

Indeks intenziteta i lokacija oštećenja dobiveni su ovom metodologijom za svaki promatrani kat i smjer osciliranja prikazani su u Tablici 4. Pri tom je kao referentni

model ("nulto stanje") korišteno prvo izvršeno mjerenje dinamičkih svojstava, predznak minus označava podizanje krutosti po pojedinim etažama.

Za smjer E-W vidimo da imamo povećanje krutosti svih stupnjeva slobode u odnosu na početno stanje ("nulto stanje"). Također, vidimo da se iznos indeksa oštećenja za većinu stupnjeva slobode (katova) nakon mjerenja povećava u odnosu na prethodno mjerenje, jedino je smanjen na prizemlju nakon trećeg mjerenja (pozitivan indeks oštećenja nam govori da imamo smanjenu krutost, a negativni da imamo povećanu krutost).

Za smjer N-S vidimo da imamo povećanje i smanjenje krutosti u odnosu na početno stanje. Povećanje krutosti odnosi se na 1., 2. i 3. kat, a smanjenje na prizemlje, 4. kat i potkrovlje. Također, vidimo i razliku povećanja odnosno smanjenja iznosa indeksa oštećenja u odnosu na prethodno mjerenje.

Uzimanjem u obzir detekcije mjesta i iznosa promjene u krutostima po etažama, već se tijekom izvedbe sanacije moglo utjecati na povoljan konačan ishod sanacije nosive konstrukcije građevine.

4.3
Primjena metodologije 2
Application of the Methodology 2

Matrica krutosti "neoštećenog" objekta dobivena je na osnovu matrice popustljivosti matematičkog modela i ona daje "nulto stanje" neoštećenog objekta. Dinamička mjerenja provedena na građevini indiciraju stanje građevine. Vektor rezidualnih sila sačinjen je za svako naknadno mjerenje u odnosu na izračunato "nulto stanje".

Tablica 5 *Prikaz vektora rezidualnih sila za smjer E-W za svako mjerenje*
Table 5 *Calculated residual force vector for E-W direction*

Ri (mat. model)	Ri (M 10-1)	Ri (M 10-2)	Ri (M 10-3)
0,000	5,45E+04	2,85E+04	7,22E+04
0,000	2,12E+05	3,13E+03	8,92E+04
0,000	7,43E+04	3,15E+04	5,07E+04
0,000	1,13E+05	9,07E+04	2,32E+04
0,000	5,20E+04	6,56E+04	8,05E+04
0,030	5,27E+04	5,58E+04	3,07E+04

Tablica 6 *Prikaz vektora rezidualnih sila za smjer N-S za svako mjerenje*
Table 6 *Calculated residual force vector for N-S direction*

Ri (mat. model)	Ri (M 10-1)	Ri (M 10-2)	Ri (M 10-3)
0,000	1,86E+04	3,51E+04	5,10E+04
0,000	3,44E+04	4,78E+03	5,04E+04
0,000	1,38E+04	4,03E+04	9,04E+03
0,000	1,29E+05	4,25E+04	2,83E+04
0,000	1,13E+04	6,17E+04	7,65E+04
0,000	9,51E+04	9,51E+03	4,74E+04

Iz prikazanih tablica i intenziteta vektora rezidualne sile za smjer E-W i N-S vidimo da imamo promjene u krutosti/masi na svakom katu u odnosu na "neoštećenu" konstrukciju, što ukazuje na oštećenja na tom katu (odnosi se na Ri (M 10-1)). Također, vidimo da se vrijednosti tih promjena sa svakim naknadnim mjerenjem ustaljuju (napredovanjem sanacije), što ukazuje na približno jednake promjene na tim katovima, odnosno stupnjevima slobode.

Indeks intenziteta i lokacija oštećenja na konstrukciji dobiveni su pomoću Metodologije 2 i navedeni su u Tablici 7, a "nulto stanje" simulirano je s modificiranim matematičkim modelom.

Tablica 7 *Prikaz indeksa oštećenja za oba smjera kada je referentni model (neoštećena konstrukcija), matematički model*
Table 7 *Calculated structural damage index*

Model		**M 10-1**	**M 10-2**	**M 10-3**
Indeks oštećenja E-W/ %		η	η	η
Kat	H/ m			
potkrovlje	15,40	-31,55	-50,23	-52,73
4	12,60	-81,15	-104,35	-103,10
3	9,80	36,05	18,64	-12,40
2	7,00	-48,09	-21,69	-88,77
1	4,20	17,39	-53,39	-77,53
prizemlje	1,40	-7,41	-94,45	-55,62
pod	-1,40	-	-	-
Model		**M 10-1**	**M 10-2**	**M 10-3**
Indeks oštećenja N-S/ %		η	η	η
Kat	H/ m			
potkrovlje	15,40	-53,46	-4,22	-34,48
4	12,60	-62,89	-4,25	-36,40
3	9,80	34,56	-29,76	-22,14
2	7,00	23,82	11,58	-34,46
1	4,20	-10,48	-54,47	-54,08
prizemlje	1,40	-138,62	-57,42	-52,78
pod	-1,40	-	-	-

Za smjer E-W i smjer N-S vidimo da imamo povećanje krutosti svih stupnjeva slobode u odnosu na inicijalni matematički model za početno stanje (oštećena konstrukcija). Također, vidimo da se iznos indeksa oštećenja za većinu stupnjeva slobode (katova) nakon svakog mjerenja povećava u odnosu na prethodno mjerenje, što ukazuje na povećanje krutosti u odnosu na inicijalno oštećeno stanje konstrukcije.

5
Zaključak
Conclusion

Izložene su dvije metodologije za utvrđivanje položaja i intenziteta oštećenja primjenjive na sanacijama građevinskih konstrukcija zgrada. Utvrđivanje lokacije i intenziteta oštećenja uzrokuju promjenu u svojstvima krutosti/mase konstrukcije.

Metodologija 1 zahtijeva poznavanje inicijalnih dinamičkih karakteristika konstrukcije kao i podatke o dinamičkim svojstvima konstrukcije nakon nekog događaja, a koji se dobivaju mjerenjem dinamičkih svojstava. Identifikacijom sustava i primjenom metode relativne posmične krutosti dobivaju se podaci o mjestu i intenzitetu oštećenja. Primjenjiva je za sve vrste konstrukcija na kojima je provedeno mjerenje.

Metodologija 2 zahtijeva uporabu matematičkog modela s metodom konačnih elemenata za neoštećeno stanje te podatke o dinamičkim svojstvima konstrukcije

dobivene mjerenjem u oštećenom stanju. Identifikacijom sustava i primjenom bilo metode relativne posmične krutosti ili metode rezidualnih sila dobivaju se podaci o mjestu i intenzitetu oštećenja. Primjenjiva je za konstrukcije koje se mogu dovoljno točno opisati metodom MKE.

Uporabljivost metoda na stvarnim građevinama prikazana je na primjeru zgrade koja je bila višekratno ispitivana tijekom provedbe mjera ojačanja i dokazana je njihova pouzdanost i u slučaju relativno malog broja podataka.

Iz provedene analize rezultata može se zaključiti sljedeće:

- iz vrijednosti rezidualne sile R_i prema Metodi 1 za oba smjera vidimo da imamo promjene na svakom katu u odnosu na "neoštećenu" konstrukciju, što ukazuje na prisutnost oštećenja na tom katu odnosno stupnju slobode
- vidimo da se vrijednosti tih promjena sa svakim mjerenjem ustaljuju, što ukazuje na približno jednake promjene na tim katovima odnosno stupnjevima slobode.
- primjena Metodologije 2 pokazala se relativno složena u odnosu na matematički model stvarnih zgrada (MKE)
- prisutnost odnosno iznos oštećenja (η) prema Metodologiji 1 može se sa sigurnošću utvrditi.

6 Literatura References

[1] Zovkić, J. Identifikacija parametara konstrukcije na osnovu dinamičkih mjerenja, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku, Osijek, 2007., 169 str.

[2] Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku: "Utvrđivanje stanja konstrukcije objekta u ulici A. Hebranga 10, 12 i 14 u Pakracu", 2003-2006.

[3] Ge, Ma; Lui, Eric M. Structural identification using system dynamic properties. // Computers and Structures 83 (2005), str. 2185-2196.

[4] Barasan, George-Mihail; Dinsoreanu, Mihaela. Modal System Identification Technique in Structural Damage Assessment, IABSE Colloquium Berlin, 4-5 June, 1998.

[5] Sigmund, V.; Herman, K. Dynamic characteristics as indicator of structural integrity. // IABSE Colloquium "Saving buildings in Central and Eastern Europe", Berlin, 4.-5.6.1998, IABSE Report Volume 77, tiskan kao Sažetak u knjizi na str. 42-44 i kao cijeli rad 2012 na CD-ROM-u IABSE-Berlin98;

[6] Sigmund, V.; Brana, P.; Guljaš, I.; Stanić, A.; Zovkić, J. Ambient vibration measurements. // 6. Symposium: Bauwerksdynamik und Erschuetterungsmessungen / Dr. Armien Ziegler (ur.)., Zürich, Švicarska : Ziegler Co. und SYSCOM Instruments SA, 2003. str. 25-37 (pozvano predavanje, pregledni rad).

[7] Sigmund, V.; Brana, P.; Zovkić, J.; Stanić, A. Evaluation of structural state by vibration measurements. // 1st Symposium celebrating 40th anniversary of computing at the Faculty of Civil Engineering, Zagreb, December 4th-6th, 2003, Zagreb, str. 67-75.

[8] Sigmund, V.; Brana, P.; Zovkić, J. Choice of the optimal strengthening technology. // XIII WCEE, Vancouver, Canada, 01.-06.08.2004., International association for earthquake engineering, DVD, Paper No. 3137, 10 str.

[9] Zovkić, J.; Sigmund, V.; Sigmund, Z. Metodologija za identifikaciju i kvantifikaciju intenziteta oštećenja konstrukcija. // Drugi internacionalni naučno-stručni skup: Građevinarstvo - Nauka i Praksa / Rutešić, Snežana (ur.), Podgorica, Crna Gora : Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2008. str. 1173-1179.

Adrese autora
Authors' Address

Mr. sc. Jurko Zovkić
Prof. dr. sc. Vladimir Sigmund
Zvonko Sigmund
Građevinski fakultet Osijek
Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Drinska 16a
31000 Osijek, R. Hrvatska
jzovkic@gfos.hr
sigmund@gfos.hr
z.sigmund@yahoo.com