

Primljen / Received: 12.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 6.2.2015.

Prihvaćen / Accepted: 24.4.2015.

Dostupno online / Available online: 10.10.2015.

Utjecaj razmaka spona u betonskom stupu na njegova dinamička svojstva

Autor:



Doc.dr.sc. **Hakan Başaran**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar
Građevinski fakultet
hakan.basaran@cbu.edu.tr

Prethodno priopćenje

Hakan Başaran

Utjecaj razmaka spona u betonskom stupu na njegova dinamička svojstva

U radu je provedena analiza promjene vlastitih frekvencija, modalnih oblika te koeficijenata prigušenja armiranobetonske dvokatne jednorasponske konstrukcije s različitim razmakom spona u stupovima. Za potrebe ispitivanja izgrađena su dva modela zgrada dimenzija 150 x 150 x 135 cm. Dinamička svojstva građevina eksperimentalno su određena primjenom operacionalne modalne analize. Za numeričko određivanje dinamičkih svojstava građevina, upotrijebljen je računalni program ABAQUS. Utjecaj progušćenja spona u stupovima na dinamička svojstva građevine određen je pomoću usporedbe rezultata dobivenih eksperimentalnom i numeričkom analizom.

Ključne riječi:

dinamička svojstva, operacionalna modalna analiza, ABAQUS, razmak spona u stupovima

Preliminary report

Hakan Başaran

Influence of stirrup spacing in concrete column on its dynamic characteristics

Changes in natural frequencies, modal shapes, and damping ratios of a two story single span reinforced concrete building having different stirrup spacing in columns are analysed in the paper. Two building models measuring 150 x 150 x 135 cm were manufactured for the testing. Dynamic properties of both buildings were experimentally determined using the operational modal analysis. The ABAQUS finite element software was used to numerically determine dynamic properties of the buildings. The effect of stirrup densification in columns on dynamic properties of the building was defined by comparing experimental and numerical analysis results.

Key words:

Dynamic properties, operational modal analysis, ABAQUS, column stirrup spacing

Vorherige Mitteilung

Hakan Başaran

Einfluss von Bügelabständen bei Stützen auf dynamische Eigenschaften

In dieser Arbeit wurden Unterschiede in Eigenfrequenzen, Modalformen und Dämpfungskoeffizienten einer zweistöckigen einspännigen Stahlbetonkonstruktion für verschiedene Bügelabstände in den Stützen analysiert. Dafür sind zwei 150x150x135 cm große Modelle des Gebäudes erstellt worden. Die dynamischen Gebäudeeigenschaften wurden durch experimentelle Versuche mittels der operationellen Modalanalyse ermittelt. Um dynamische Eigenschaften numerisch zu erfassen, wurde das Finite-Elemente-Programm ABAQUS angewandt. Der Einfluss verdichteter Bewehrung der Stützen auf dynamische Eigenschaften wurde durch den Vergleich von Resultaten numerischer und experimenteller Analysen ermittelt.

Schlüsselwörter:

dynamische Eigenschaften, operationelle Modalanalyse, ABAQUS, Bügelabstand bei Stützen

1. Uvod

Ponašanje konstrukcija uslijed dinamičkih opterećenja određeno je pomoću vlastitih frekvencija, modalnih oblika i koeficijenata prigušenja, odnosno osnovnim dinamičkim parametrima građevine. Ta svojstva određena su ovisno o postojećim svojstvima konstrukcije i svojstvima materijala od kojih su izgrađene te o rubnim uvjetima. Dinamička svojstva zatim su korištena da bi se odredila učinkovitost analitičkih modela i seizmičke sile koje djeluju na građevinu. Uz pomoć integralnih pristupa provedena je i dinamička analiza u ovisnosti o vrijednosti prvog perioda [1]. Čak se i raspodjela krutosti i torzijske nepravilnosti mogu utvrditi tijekom procjene ponašanja konstrukcije pri dinamičkom opterećenju. Dakle, dinamička svojstva moraju se odrediti realno. Dinamička svojstva konstrukcije određena su analitičkim modelima ili aproksimativnim metodama [2]. Prema tome, mogu se odrediti vlastite frekvencije i modalni oblici te se može približno utvrditi dinamičko ponašanje konstrukcije. Postoji više računalnih programa za analitičko modeliranje. Aproksimativna rješenja za određivanje vrijednosti prvih frekvencija postoje u mnogim tehničkim standardima. Vrijednost prvog perioda za građevine izgrađene prema tehničkim standardima mogu se odrediti prema dimenzijama građevine. Modalno ponašanje građevine pravilne geometrije, izgrađene prema tehničkim standardima, očituje se kroz translacijske pomake u uzdužnim i poprečnim smjerovima u prvim i drugim modalnim oblicima te kao torzija u trećem modalnom obliku [3]. Ponašanje konstrukcija uslijed dinamičkog opterećenja obilježavaju brojne nepravilnosti. Osim nepravilnosti tijekom dinamičkog opterećenja, pojavljuju se i nepravilnosti u parametrima koji određuju dinamičko ponašanje, a sprječavaju realistično određivanje parametara.

Zbog toga se primjenjuju eksperimentalne metode za određivanje realnog ponašanja konstrukcija pri dinamičkom djelovanju. Spone su elementi koji se postavljaju u stupove i grede kao poprečna armatura koja omogućuje otpornost na poprečne sile i povećava otpornost elemenata na savijanje. Primjenjuju se da bi se povećala žilavost pri proguščenju i spriječilo izvijanje u uzdužnoj armaturi, a postoje mnoga eksperimentalna istraživanja o njihovoj upotrebi i rasporedu [4]. Prema rezultatima tih ispitivanja, raspored spona utječe na ponašanje elementa uslijed bočnih djelovanja; pravilnim rasporedom spona poboljšavaju se dopušteni horizontalnih pomaci, žilavost, kapacitet energetske potrošnje i otpornost sustava na bočna opterećenja. S proguščenjem spona, duljina izvijanja u gredama i stupovima se povećava te se sprječava krti lom. Savijanjem spona pod kutom od 135° (slika 3.) povećava se njihova učinkovitost, odnosno značajno se povećava nosivost elemenata pod aksijalnim opterećenjem.

Zahvaljujući sponama, plan pomaka konstrukcije se mijenja te postaje funkcija dinamičkih sila. Utjecaj spona na ponašanje građevina od velike je važnosti. Danas se dinamička svojstva određuju primjenom projektnih podataka, mjerenjem na licu mjesta u realnom vremenu ili analitički primjenom metode

konačnih elemenata, koja koristi dimenzije elemenata, materijalna svojstva i rubne uvjete. Dinamička svojstva određuju se numerički ili eksperimentalno. U numeričkim analizama konstruira se model konačnih elemenata s prikladnim svojstvima materijala i rubnim uvjetima, te se procjenjuju vlastite frekvencija i modalni oblici. Međutim, nekoliko istraživača došlo je do zaključka da dinamička svojstva dobivena numeričkim analizama ne predstavljaju nužno stvarno stanje građevine [5-6]. Stoga primjena numeričkih podataka u određivanju seizmičkog ponašanja građevine može rezultirati netočnom analizom. Dakle, potrebno je provesti eksperimentalna ispitivanja koja bi potvrdila numerička ispitivanja za određivanje dinamičkih svojstava. Eksperimentalne metode izravno se primjenjuju na konstrukcije, a rezultirajuća dinamička svojstva predstavljaju stvarno stanje građevine. Jedna od najprimjenjivijih metoda za određivanje dinamičkih svojstava je operacionalna modalna analiza (eng. *Operational Modal Analysis* – OMA). U modalnoj analizi bilježe se vibracije nastale zbog okolišnih utjecaja pomoću akcelerometra, a dinamički parametri određuju se preko dobivenih rezultata [7-14]. Operacionalna modalna analiza je gotovo univerzalna metoda za određivanje dinamičkog ponašanja svake inženjerske građevine jer je lako primjenjiva, isplativa i ima minimalna odstupanja tijekom mjerenja. U literaturi se navodi nekoliko istraživanja u kojima je primijenjena operacionalna modalna analiza, a ispitivana su dinamička svojstva betonskih i metalnih konstrukcija, mostova, brana, silosa, stadiona, povijesnih građevina i nuklearnih elektrana [15-26]. Cilj ovog istraživanja bio je odrediti svojstva betonske konstrukcije, uključujući vlastite frekvencije, modalne oblike i koeficijente prigušenja, uslijed dinamičkih djelovanja. Izgrađene su dvije umanjene dvokatne jednorasponske konstrukcije, dimenzija 150 x 150 x 135 cm. Razmaci spona u elementima prve građevine (B1) iznose 8 cm u središnjoj zoni i 4 cm u krajnjim zonama stupa. Svi stupovi na prvom katu u drugoj građevini (B2) imaju razmak spona 4 cm. Utjecaj progušćivanja spona na dinamička svojstva konstrukcije određen je eksperimentalno pomoću operacionalne modalne analize. Numerička analiza provedena je u programu konačnih elemenata ABAQUS. Uspoređeni su eksperimentalni i numerički rezultati.

2. Materijali i metode

2.1. Teoretska i eksperimentalna modalna analiza

Frekvencije i periodi određeni su primjenom jednadžbe slobodnih neprigušenih vibracija za rješavanje problema svojstvenih zadaća:

$$[K - \omega^2 M] = 0 \quad (1)$$

gdje je

M - matrica masa

K - matrica krutosti.

Rješavanjem te jednadžbe dobivene su neprigušene prirodne kutne frekvencije ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$), čiji broj odgovara stupnju slobode. Za svaku vrijednost frekvencije, određuje se modalni oblik koji građevina poprima, pomoću sljedeće jednadžbe:

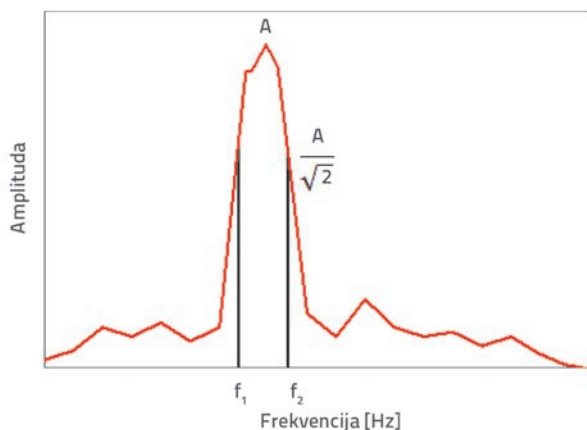
$$[K - \omega^2 M] \Phi = 0 \quad (2)$$

gdje je

Φ - vektor čiji su članovi modalni pomaci točaka za pojedini oblik osciliranja.

Vlastite frekvencije poredane su od najmanje prema najvećoj, a minimalna frekvencija je postavljena kao osnovna frekvencija, dok se modalni oblik koji odgovara toj frekvenciji naziva prvi modalni oblik [27]. Drugo dinamičko svojstvo konstrukcije je njezin koeficijent prigušenja. U turskim normama za potres, prihvatljivi koeficijent trenja u projektiranju konstrukcija za idealni elastični spektar ubrzanja iznosi 5 %. Koeficijent prigušenja u našem istraživanju određen je pomoću Fourierovog spektra koji je dobiven iz zapisa ubrzanja tla tijekom potresa. U tom proračunu, vlastita frekvencija titranja je ona frekvencija u kojoj amplituda spektra postiže svoj maksimum. Kao što je prikazano na slici 1, amplituda pri toj frekvenciji označena je sa "A", a koeficijent prigušenja izračunan je iz prikazane jednadžbe (3). Izrazi f_1 i f_2 odnose se na frekvencije pri kojima je amplituda smanjena na:

$$\gamma = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (3)$$



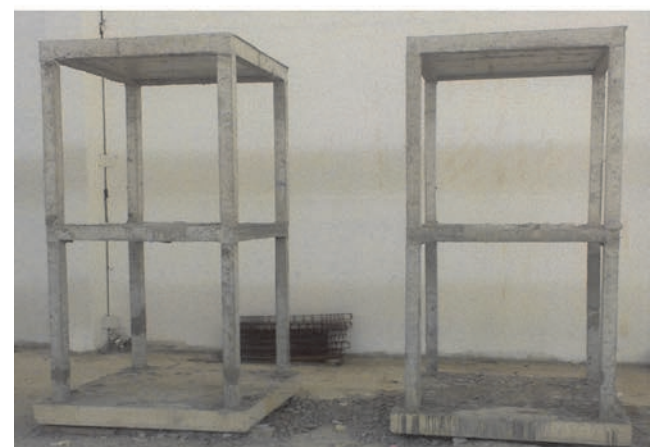
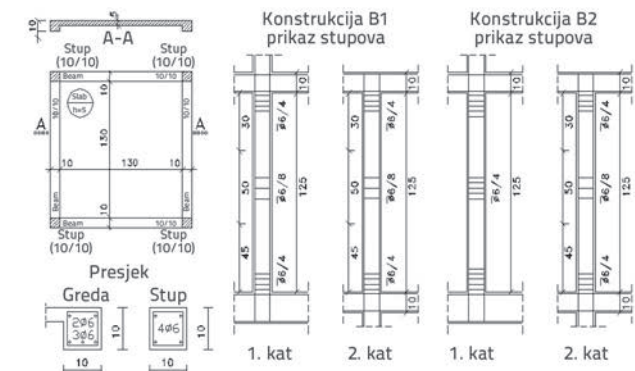
Slika 1. Vrijednosti amplituda i frekvencija primijenjenih za koeficijent prigušenja u Fourierovoj transformaciji

Ekperimentalna modalna analiza (eng. *Experimental Modal Analysis - EMA*) i operacionalna modalna analiza (eng. *Operational Modal Analysis - OMA*) najčešće su primjenjivane za određivanje dinamičkih svojstava konstrukcija. Ekperimentalna modalna analiza može se upotrijebiti za utvrđivanje dinamičkih parametara dobivenih numeričkom analizom. Međutim, vrijednosti određene tom metodom moraju se dobiti pomoću vanjskih utjecaja, stoga se ova metoda ne može koristiti

za realne konstrukcije. Stoga se preporučuje primjena operacionalne modalne analize za stvarne situacije. Princip operativne modalne analize sastoji se u tome da se odrede podaci u realnom vremenu upotrebom vrijednosti ubrzanja građevine zabilježenih uslijed utjecaja iz okoliša. Pomoću računala određuju se dinamički modalni parametri. Stimulirajući utjecaji koji su potrebni u operacionalnoj modalnoj analizi su okolišni utjecaji poput prometnog opterećenja, vjetrova i vibracija strojeva. Budući da okolišni utjecaji nisu sasvim poznati, modalni parametri u operativnoj modalnoj analizi definirani su primjenom različitih algoritama. U ovom istraživanju primijenjena je često citirana vremenski ovisna metoda stohastičke identifikacije potprostora (eng. *Stochastic Subspace Identification (SSI) technique*). Ta metoda omogućuje procesiranje podataka bez transformacija poput korelacije ili spektralne transformacije. Detaljniji opis primijenjenih jednadžbi i formula može se pronaći u literaturi [28]. Ta se metoda preporučuje jer koristi podatke u realnom vremenu, a transformacije nisu potrebne niti u jednom koraku postupka.

2.2. Opis građevina

Slika 2. prikazuje model jednorasponske dvokatne zgrade u mjerilu. Za svaku zgradu, dimenzije greda i stupova, stropova i armature su jednake. Jedina razlika dviju građevina je progušćenje spona na stupovima prvog kata zgrade B.



Slika 2. Betonske konstrukcije izrađene u određenom mjerilu



Slika 3. Detaljniji prikaz spona

Visine katova su 135 cm, a ostale dvije dimenzije su 150 x 150 cm. Dimenzije stupova i greda su 10 x 10 cm, debljina stropa je 5 cm. Pločasti temelj je debljine 15 cm u obje građevine, a stupovi u prizemlju usidreni su u temelj. Uzdužna armatura u stupovima je 4 \varnothing 6, prema dnu je 3 \varnothing 6, a prema vrhu građevine 2 \varnothing 6. U gredama se nalazi armatura \varnothing 6/8-4. Spone \varnothing 6/4 postavljene su u stupovima prvog kata zgrade B1, a \varnothing 6/8-4 u ostalim stupovima. U donjoj i gornjoj ploči u oba smjera su postavljene spone \varnothing 6/10, za armaturu je upotrijebljen čelik S420. Uzorci uzeti tijekom ugradnje betona imali su tlačnu čvrstoću od 30 MPa. Pri izradi spona korišten je zaštitni betonski sloj debljine 1 cm. Krajevi spona savijeni su pod kutom od 135° (slika 3.).

2.3. Eksperimentalne postavke za operacionalnu modalnu analizu

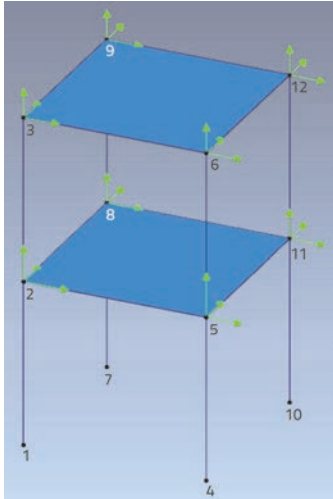
Operacionalna modalna analiza primijenjena je za određivanje svojstava zgrade pri dinamičkom djelovanju. Mjerenja su provedena pomoću akceleratora SENSEBOX-7021. Signali su prikupljeni pomoću TESTBOX-6501 data loggera, a potom su uneseni u računalo (slika 4.). Nakon obrade podataka, operacionalnom modalnom analizom određena su dinamička svojstva.

Kako bi se precizno izmjerili modalni oblici titranja zgrada, akcelometri su postavljeni u 8 čvornih točaka. Tri akcelometra korištena su u čvorovima za svaki smjer. Proces



Slika 4. Akcelometri (lijevo) i data logger (desno)

mjerenja sastojao se od dva koraka. U prvom koraku, 12 akceleratora postavljeno je na četiri različite lokacije na prvom katu. U drugom koraku, postavljeni su na 4 lokacije na drugom katu. Da bi se obuhvatila temperatura okoliša i drugi okolišni utjecaji na građevinu, provedena su dva ispitivanja na dva različita datuma. Aproksimativni model zgrade napravljen je u računalnom programu ARTEMIS Modal Pro (AMP), a podaci iz akcelometra pridruženi su odabranim točkama (slika 5).



Slika 5. Položaj i smjerovi akceleratora

2.4. Numerički model

Model zgrade napravljen metodom konačnih elemenata izrađen je u programu ABAQUS. U razvijanju modela korišten je "solid" (volumni) element tetraedra (C3D4) sa 3264105 čvorova. Model

dobiven metodom konačnih elemenata i element C3D4 koji je u modelu upotrijebljen prikazani su na slici 6.

Zgrada je oslonjena i pričvršćena na dnu stupova. U ovom istraživanju korišten je modul linearne perturbacije frekvencije, kojim se može odrediti svojstvena vrijednost i analiza svojstvenog vektora prirodnih frekvencija. Svojstva materijala primijenjenih u modeliranju prikazana su u tablici 1.

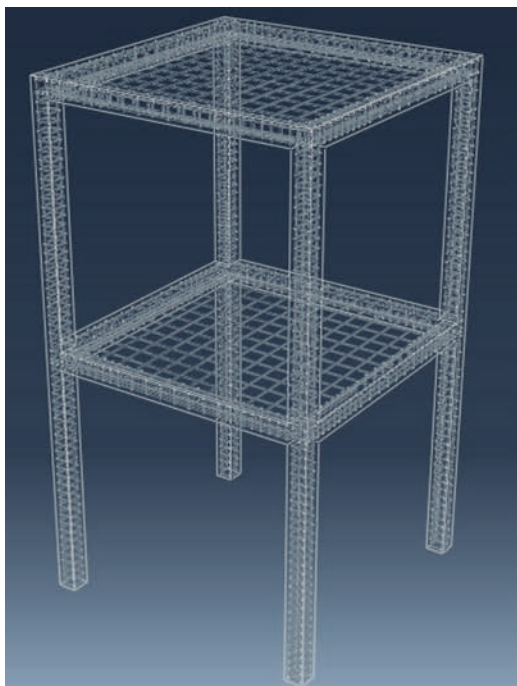
Tablica 1. Svojstva materijala

Svojstvo Materijal	Modul elastičnosti [MPa]	Poissonov koeficijent	Gustoća [N/m ³]
Beton	31000	0,2	25000
Čelik	200000	0,3	78000

Analizom konvergencije određena je optimalna gustoća mreže za građevinu. Gustoća mreže (udaljenost čvorova) od 0,009 do 0,1 m korištena je u analizi konvergencije. Utvrđeno je da optimalni razmak mreže iznosi 0,009 m. Frekvencije prvih 6 modalnih oblika prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti frekvencija određene numeričkom analizom

Mod	Frekvencije [Hz]	Mod	Frekvencije [Hz]
1	6,586	4	19,935
2	6,586	5	19,935
3	11,795	6	30,366



Slika 6. Modeliranje pomoću metode konačnih elemenata i volumni element tetraedar (C3D4)

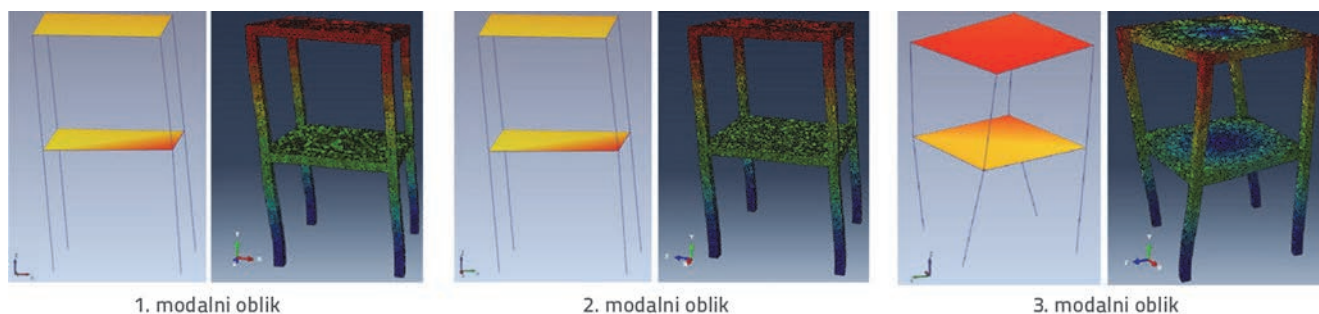
3. Rezultati

Primjenom eksperimentalnih podataka određeni su modalni parametri oštećene i obnovljene zgrade uz pomoć SSI metode u računalnom programu AMP. Dijagrami stabilizacije također su dobiveni primjenom SSI metode. Eksperimentalni i numerički modalni oblici prikazani su na slici 7.

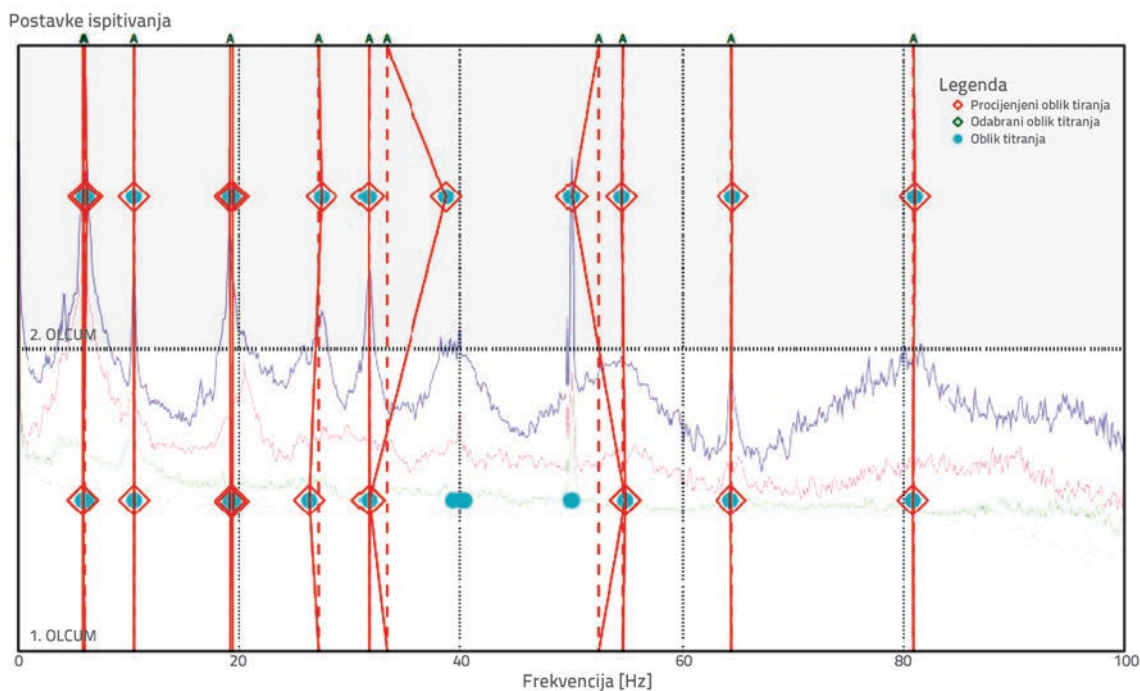
Vrste modalnih oblika dobivene numerički i eksperimentalno dobro se podudaraju. U obje metode, numeričkoj i eksperimentalnoj,

prvi modalni oblik je u x smjeru, drugi modalni oblik je u y smjeru, a treći modalni oblik je torzijski oblik. Preostala tri modalna oblika također su raspoređena prema tom uzorku. Slika 8. prikazuje dinamičke modalne parametre dobivene eksperimentalno i dijagrame stabilizacije za zgradu B1.

Budući da je zgrada simetrična, vrijednosti frekvencija za prvi i drugi modalni oblik, te za četvrti i peti modalni oblik gotovo su jednake. Slika 9. prikazuje dinamičke modalne parametre i dijagram stabilizacije za zgradu B2.

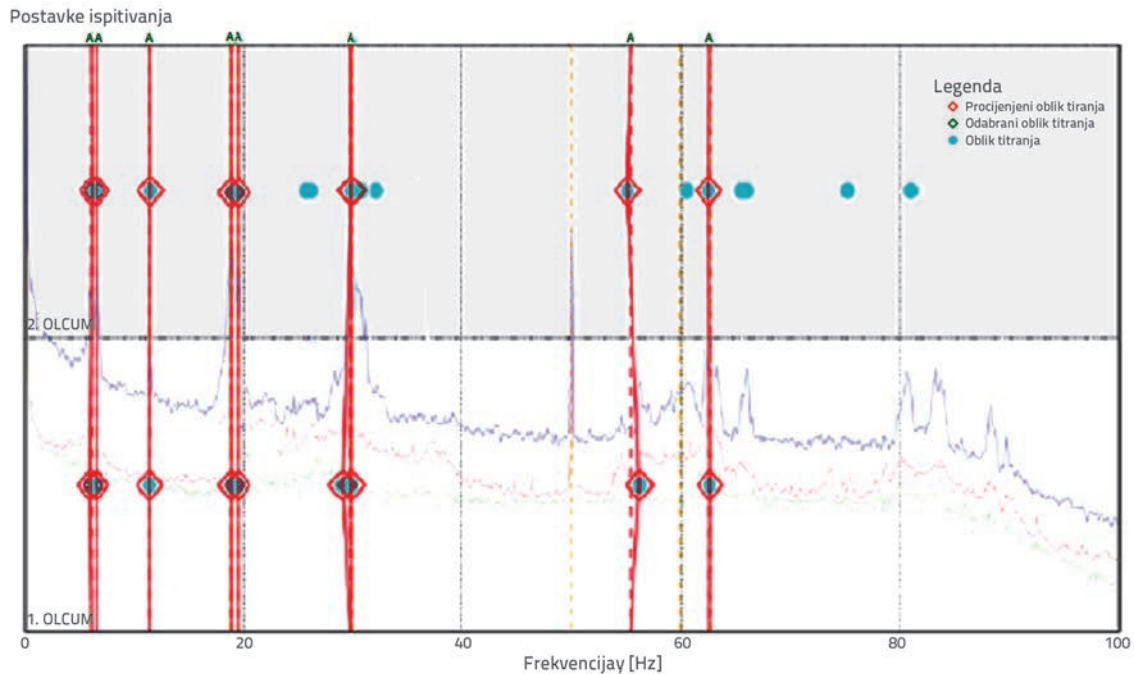


Slika 7. Eksperimentalni i numerički 1., 2. i 3. modalni oblik zgrade



Mod	Frekvencija [Hz]	Mod	Frekvencija [Hz]
1	6,528	4	19,096
2	6,581	5	19,485
3	11,549	6	30,525

Slika 8. Dinamički modalni parametri i dijagrami stabilizacije za zgradu B1 i vrijednosti frekvencija



Mod	Frekvencija [Hz]	Mod	Frekvencija [Hz]
1	5,806	4	18,206
2	5,830	5	18,710
3	10,536	6	27,144

Slika 9. Dinamički modalni parametri i dijagram stabilizacije za zgradu B2 i vrijednosti frekvencija

Može se uočiti da postoji simetrija između prvog i drugog modalnog oblika, kao i između trećeg i četvrtog modalnog oblika. Frekvencije dobivene numeričkim i eksperimentalnim ispitivanjem imaju slične vrijednosti.

4. Diskusija

Operacionalna modalna analiza primijenjena je za eksperimentalno izražavanje dinamičkih svojstava u zgradi sa standardnim razmakom spona te u zgradi s progušćenim rasporedom spona. Vlastite frekvencije određene su pomoću

akcelerometara koji su postavljeni na zgradu, a podaci su transformirani u dinamička svojstva pomoću računalnog programa AMP. Dobiveni podaci uspoređeni su i prikazani u tablici 3.

Iz tablice 3. može se vidjeti da su vrijednosti modalnih frekvencija za prvi i drugi modalni oblik u eksperimentalnoj i numeričkoj analizi jednake, zbog simetrije zgrade. Eksperimentalno dobiveni modalni oblici pomoću metode SSI, za zgradu B2, čiji su stupovi armirani gušćim rasporedom spona, razlikovali su se od eksperimentalno dobivenih za zgradu B1; za prvi modalni oblik 12,13 %, drugi oblik 12,88 % i za treći modalni oblik 9,61 %.

Tablica 3. Numerička i eksperimentalna svojstva zgrade

Modalni oblik	Frekvencija (metoda FEM) [Hz]			Frekvencija (metoda SSI) [Hz]			Koeficijenti prigušenja (metoda SSI) [%]	
	Zgrada B1	Zgrada B2	Razlika [%]	Zgrada B1	Zgrada B2	Razlika [%]	Zgrada B1	Zgrada B2
1	6,911	7,841	13,45	5,806	6,528	12,43	0,825	1,854
2	6,905	7,824	13,30	5,830	6,581	12,88	0,910	1,464
3	11,705	13,042	11,42	10,536	11,549	9,61	0,395	0,598

Budući da su mjerenja provedena u laboratorijskim uvjetima, temperaturne fluktuacije i pojava izvanrednih opterećenja su kontrolirane. Stoga se bilo kakva zabilježena razlika mogla povezati s gustoćom spona u stupovima. Nakon primjene prognošenja na zgradu, modalne frekvencije određene pomoću SSI metode za prvi i drugi modalni oblik bile su simetrične. Razlika između numeričkih i eksperimentalno dobivenih vrijednosti modalnih frekvencija bile su približno 20 %, što se može povezati s greškama prilikom gradnje konstrukcije i rubnim uvjetima. Prvi modalni oblik konstrukcije je savijanje u x smjeru, drugi modalni oblik je savijanje u y smjeru, a treći je torzijski oblik. Modalni oblici dobiveni pomoću SSI metode u AMP softveru za zgradu sa standardnim i prognošenim sponama bili su slični (slika 8).

5. Zaključak

U ovom istraživanju ispitivane su vlastite frekvencije, modalni oblici i koeficijenti prigušenja umanjnih dvokatnih jednorasponskih zgrada (sa standardnim i prognošenim rasporedom spona u stupovima). Zgrada je modelirana volumnim konačnim elementima (solid) te je provedena analiza linearne perturbacije frekvencija u računalnom programu

ABAQUS. Optimalna gustoća mreže (razmak čvorova) bila je 0,009 m. Frekvencije i modalni oblici dobiveni su numeričkom analizom. Kako bi se eksperimentalno odredila dinamička svojstva zgrade sa standardnim rasporedom spona te prognošenim sponama, primijenjena je operacionalna modalna analiza. Nakon provedenog istraživanja zaključeno je sljedeće. Geometrija zgrada je simetrična, stoga su prvi i drugi modalni oblik imali iste vrijednosti. Razlika u eksperimentalno dobivenim modalnim oblicima za zgrade s normalno i prognošeno raspoređenim sponama bila je za 13 %. Stupovi zgrade B2 imali su veće frekvencije, a time i veću krutost. Primjenom operacionalne modalne analize određeni su točni podaci dinamičkih svojstava za konstrukcije s normalnim i gusto raspoređenim sponama. Istraživanje je pokazalo da prognošenje spona pozitivno utječe na dinamička svojstva ispitivane konstrukcije.

Zahvala

Ovo istraživanje provedeno je uz potporu Znanstveno-istraživačke koordinacije na Sveučilištu Celal Bayar, pod oznakom projekta 2013-91. Autori se zahvaljuju sveučilištu na podršci.

LITERATURA

- [1] Park, R., Priestley, M. J., Gill, W. D.: Ductility of square confined concrete columns. *Journal of the Structural Division*, 108 (1982), pp. 929-950.
- [2] Park, Y. J., Ang, A. S.: Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, 111 (1985) 4, pp. 740-757.
- [3] Arslan, M. H., Korkmaz, H. H.: What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 14 (2007), pp. 1-22, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.01.003>
- [4] Akın, S. K., Kara, N., Kaltakçı, M. Y.: Effects on horizontal load carrying capacity of stirrup order in RC frames; an experimental study. *Journal Fac. Eng. Arch. Selcuk University*, 21 (2006), pp. 1-2.
- [5] Law, S. S., Li, X. Y., Lu, Z. R.: Structural Damage Detection from Wavelet Coefficient Sensitivity with 29 Model Errors. *Journal of Engineering Mechanics*, 132 (2006), pp. 1077-1087, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2006\)132:10\(1077\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:10(1077))
- [6] Morin, P. B., Le'ger, P., Tinawi, R.: Seismic behavior of post-tensioned gravity dams: shake table experiments and numerical simulations. *Journal of Structural Engineering*, 128 (2002), pp. 140-252, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:2\(140\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(140))
- [7] Aktan, A. E., Lee, K. L., Chuntavan, C., Aksel, T.: Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities. In *Proceedings, 12th International Modal Analysis Conference, Honolulu, Hawaii*, 1 (1984), pp. 462-468.
- [8] Ramos, L.: Damage identification on masonry structures based on vibration signatures. *Ph.D Thesis, Universidade do. Minho, Portugal*, 2007.
- [9] Chauhan, S.: Parameter estimation and signal processing techniques for operational modal analysis. *Ph.D, Bhilai Institute of Technology Bhilai, India*, 2008.
- [10] Eduardo, N., Carlos, A., Daniel, A.: Structural assessment of the tower of the university of coimbra by modal identification. *Engineering Structures*, 30 (2008) 12, pp. 3468-3477.
- [11] Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., Tashkov, L.: Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace. *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 1, pp. 81-91.
- [12] Altunisik, C. A., Bayraktar, A., Sevim, B., Birinci, F.: Vibration-based operational modal analysis of the Mikron historic arch bridge after restoration. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28 (2011) 3, pp. 247-259.
- [13] Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N. I., Mongelli, M.: Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower. *NDT & E International*, 47 (2012), pp. 88-95.
- [14] Osmancılı, G., Uçak, Ş., Turan, F. N., Türker, T., Bayraktar, A.: Investigation of restoration effects on the dynamic characteristics of the hagia sophia bell-tower by ambient. *Vibration Test Construction and Building Materials* 29 (2012), pp. 564-572.
- [15] James, G. H. III., Carne, T. G., Lauffer, J. P.: The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating wind turbines. *Sandia Report*, 1993.
- [16] Farrar, C. R., James, G. H. III.: System identification from ambient vibration measurements on a bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 205 (1997) 1, pp. 1-18.
- [17] Stubbs, N., Park, S., Sikorsky, C., Choi, S.: A global non-destructive damage assessment methodology for civil engineering structures. *International Journal of System Science*, 31 (2000) 11, pp. 1361-1373.

- [18] Peeters, B., De Roeck, G.: Stochastic system identification for operational modal analysis: a review, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 123 (2001) 4, pp. 659-667.
- [19] Zhang, L., Wang, T., Tamura, Y.: Frequency-spatial domain decomposition technique with application to operational modal analysis of civil engineering structures. *Proc. of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, 2005*.
- [20] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T.: Modal testing and finite element model calibration of an arch type steel footbridge, *Steel and Composite Structures*, 7 (2007) 6, pp. 487-502.
- [21] Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M., Çolkun, N.: Modal analysis, experimental validation and calibration of a historical masonry minaret, *Journal of Testing and Evaluation*, 36 (2008) 6, pp. 516-524.
- [22] Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T.: Modal testing, finite element model updating and dynamic analysis of an arch type steel footbridge, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23 (2009) 2, pp. 81-89.
- [23] Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B., Yıldırım, F.: Modal parameter identification of hagia sophia bell-tower via ambient vibration test. *Nondestructive Evaluation*, 28 (2009) 1, pp. 37-47.
- [24] Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T.: Effect of the model updating on the earthquake behavior of steel storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, 66 (2010) 3, pp. 462-269.
- [25] Bartoli, G., Betti, M.: Saveriogordano in situ static and dynamic investigations on the "torregrossa" masonry tower. *Engineering Structures* 52 (2013), pp. 718-733, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.01.030>
- [26] Gentile, C., Saisi, A.: Operational modal testing of historic structures at different levels of excitation. *Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 1273-1285, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.013>
- [27] Petyt, M.: Introduction to finite element vibration analysis. *Cambridge university pres, Cambridge*, 1990., <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511624292>
- [28] Ren, W. X., Zhao, T., Harik, I. E.: Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge. *Journal of Structural Engineering*, 130 (2004) 7, pp. 1022-1031.