

Primljen / Received: 13.6.2014.  
Ispravljen / Corrected: 22.1.2015.  
Prihvaćen / Accepted: 5.2.2015.

Dostupno online / Available online: 10.3.2015.

# Određivanje dinamičkih parametara dvoslojnih lukova od opeke

## Autor:



Doc.dr.sc. **Ferit Cakir**, dipl.ing.grad.  
Sveučilište Amasya, Turska  
Arhitektonski fakultet  
[ferit.cakir@amasya.edu.tr](mailto:ferit.cakir@amasya.edu.tr)

Izvorni znanstveni rad

## **Ferit Cakir**

### Određivanje dinamičkih parametara dvoslojnih lukova od opeke

Zidani lukovi imaju važnu ulogu u građevinarstvu, a nalazimo ih u mnogim povijesnim građevinama diljem svijeta. U ovom su radu dinamički parametri, frekvencija i prigušenje zidanih lukova određeni eksperimentalnom modalnom analizom (EMA). Dvoslojni lukovi zidani su standardnom šupljom opekom i tradicionalnim Horasan mortom. Ispitivanje dvoslojnih lukova provedeno je s udarnim čekićem, a odzivi lukova zabilježeni su laserskim vibrometrom. Za potrebe verifikacije izrađenih prostornih modela provedena je usporedba eksperimentalnih ispitivanja s numeričkim proračunima.

#### **Ključne riječi:**

zidane konstrukcije, dvoslojni lukovi od opeke, eksperimentalna modalna analiza, metoda konačnih elemenata

Original scientific paper

## **Ferit Cakir**

### Determination of dynamic parameters of double-layered brick arches

Masonry arches assume a very important role in construction industry, and we find them in many historical structures all over the world. Dynamic parameters, frequency, and damping of masonry arches are defined in this paper using the Experimental Modal Analysis (EMA). Double-layered arches were built using standard hollow bricks and traditional Horasan mortar. The brick arches were tested with an impact hammer, and the arch response was measured using a laser vibrometer. Experimental tests were compared with numerical modelling in order to verify adequacy of physical models.

#### **Key words:**

masonry structures, double-layered brick arches, experimental modal analysis, finite-element method

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## **Ferit Cakir**

### Ermittlung dynamischer Parameter doppelter Mauerwerksbögen

Mauerwerksbögen nehmen im Bauwesen eine wichtige Rolle ein und treten weltweit häufig in historischen Bauwerken auf. In dieser Arbeit werden dynamische Parameter, Frequenz und Dämpfung von Mauerwerksbögen durch experimentelle Modalanalysen (EMA) ermittelt. Die doppelten Mauerwerksbögen sind aus herkömmlichem Hohlziegelstein und traditionellem Horasan Mörtel zusammengesetzt. Die Bogenstrukturen sind mit dem Schlaghammer untersucht und das entsprechende Verhalten ist mittels eines Laser-Vibrometers erfasst worden. Zur Verifikation erstellter räumlicher Modelle ist ein Vergleich experimenteller Versuche und numerischer Berechnungen durchgeführt worden.

#### **Schlüsselwörter:**

Mauerwerk, zweifache Mauerwerksbögen, experimentelle Modalanalyse, Finite-Elemente-Methode

## 1. Uvod

Danas se za građenje koriste moderni građevni materijali kao što su armirani beton ili čelik. Najveći dijelovi povijesnih građevina napravljeni su od materijala kao što su kamen i opeka. Zidane konstrukcije općenito zadržavaju svoja prvobitna svojstva, a to nas upućuje na složenost takvih konstrukcija. Ponašanje zidanih konstrukcija može biti vrlo složen i nejasan problem. Da bismo razumjeli ponašanje zidanih konstrukcija, potrebne su nam informacije o svojstvima konstrukcije. Zidane konstrukcije sadrže mnogo različitih konstrukcijskih komponenti, ali njihovi glavni elementi su lukovi, kupole, zidovi i temelji.

Zidane konstrukcije izložene su različitim vanjskim i unutarnjim djelovanjima tijekom svog postojanja. Iako su dugotrajne, neke povijesne građevine nažalost su oštećene i urušene zbog djelovanja različitih čimbenika. Nedavne studije pokazale su da su zidane konstrukcije osjetljive na potrese, a seizmički utjecaj jedan je od najvažnijih uzroka urušavanja takvih građevina, [1-5].

Stoga su povijesne građevine u opasnosti od seizmičkog utjecaja, a mnoge od njih slabo podnose potresna opterećenja. Iako su znanstvenici proučavali zidane konstrukcije i njihovo ponašanje, rijetko je istraživano ponašanje konstrukcijskih elemenata pri dinamičkom opterećenju, [6-8]. Predviđanje odziva građevina na dinamičke utjecaje kao što su potresi izuzetno je značajno u svrhu postizanja odgovarajuće protupotresne sigurnosti. Zato se trebaju odrediti dinamički parametri kao što su frekvencija, vlastiti oblici titranja i koeficijent prigušenja. U ovom su ispitivanju parametri oblika oscilacija (modalni parametri) određeni za sve lukove pomoću eksperimentalne modalne analize (EMA). Ova metoda, poznata i kao ispitivanje funkcije frekvencijskog odziva, smatra se jednom od najznačajnijih eksperimentalnih ispitivanja. Temelji se na mjerenju vibracijskog odziva uslijed udarnog opterećenja građevine. Stoga se u ovom ispitivanju primjenjuje postupak EMA u svrhu određivanja dinamičkih parametara kao što su frekvencija, vlastiti oblici titranja i koeficijent prigušenja dvoslojnog zidanog luka.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Tradicionalni Horasan mort

Tradicionalni Horasan mort upotrijebljen je kao vezivni materijal između opeka u mnogim povijesnim građevinama. Taj mort, zvan i "Horasan beton" tradicionalna je smjesa u građevinama iz bizantskog, seldžušskog i osmanskog razdoblja. Pripremao se od vezujućeg vapna, finog pijeska i kamenog praha, a posjeduje čvrstoću poput kamena i betona [9]. Horasan mort imao je široku upotrebu u osmanskim građevinama u Anatoliji. Osim toga, on je osnova današnjeg betona. Danas se u Horasan mortu kao vezivno sredstvo koristi hidratizirano vapno zato što ne sadrži cement, ima velike mogućnosti deformacije i poroznosti. Stoga je u ovom radu korišten mort na bazi hidratiziranog vapna kao Horasan mort. Za pripremu morta miješaju se u

jednakim težinskim omjerima kameni prah, fini pijesak, ljepljivo vapno, prah od opeke Albaria Calce Albazzana® i vezivni materijal (dobiven iz tvrtke BASF) (slika 1.). Albaria je prirodno hidratizirano vapno bez cementa koje se peče na temperaturi od 900 °C u tradicionalnim pećima, [10].



Slika 1. Priprema tradicionalnog Horasan morta

### 2.2. Zidanje šupljom opekam

Za istraživanje u ovom radu upotrijebljena je šuplja opeka dimenzija 90 mm x 190 mm x 50 mm. Najprije je takvu opeku trebalo isprati vodom kako bi se odstranila sva nečistoća i prašina s njezine površine radi ostvarivanja bolje prionjivosti između opeke i morta. Nakon čišćenja, opeka je sušena na sobnoj temperaturi dva dana (slika 2.).



Slika 2. Šuplja opeka korištena u istraživanju

### 2.3. Lukovi od zidane opeke

U ovom radu istraživani su dvoslojni polukružni lukovi s rasponom 1000 mm, visine 500 mm, debljine 180 mm (slika 3.). Lukovi su zidani na drvenim kalupima koji se uklanjaju dva dana nakon što je luk izrađen, a onda se stvrdnjavaju sljedećih deset tjedana (slika 3.).



Slika 3. Prikaz izrade zidanih lukova na drvenim kalupima te proces sušenja

### 3. Mehaničke karakteristike materijala

Najvažnija mehanička svojstva kod zidanja su tlačna i vlačna čvrstoća. Zbog toga su u ovom istraživanju ispitivana naprezanja kako bi se odredila mehanička svojstva konstrukcijskih materijala. Mehanička svojstva zidnih materijala dobivena su iz testnih uzoraka (slika 4.). Tlačna naprezanja određena su ispitivanjem na tlak na pet kocki (50 mm × 50 mm × 50 mm), prema turskim građevnim propisima (TS 699), [11] (tablica 1.), a vlačna naprezanja uzoraka dobivena su ispitivanjem na savijanje u trima točkama na pet prizmi (50 mm × 100 mm × 200 mm), prema turskim građevnim normama TS EN 1467 i 1469 (tablica 1.), [12, 13]. Ispitivanje na tlak i ispitivanje na savijanje u trima točkama na uzorcima morta starima 28 dana korišteni su kako bi se odredila čvrstoća morta. Mehanička svojstva materijala određena su testiranjem uzoraka u

laboratorijima Zavoda za građevinarstvo na Sveučilištu Ataturk, Erzurum, Turska.

Tablica 1. Tlačna čvrstoća opeke i morta

Uzorci	Opeka		Mort	
	Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
1	16,28	2,08	10,08	1,48
2	16,35	2,15	10,10	1,52
3	16,92	2,02	9,89	1,41
4	16,24	2,14	10,05	1,55
5	16,84	2,10	9,96	1,46



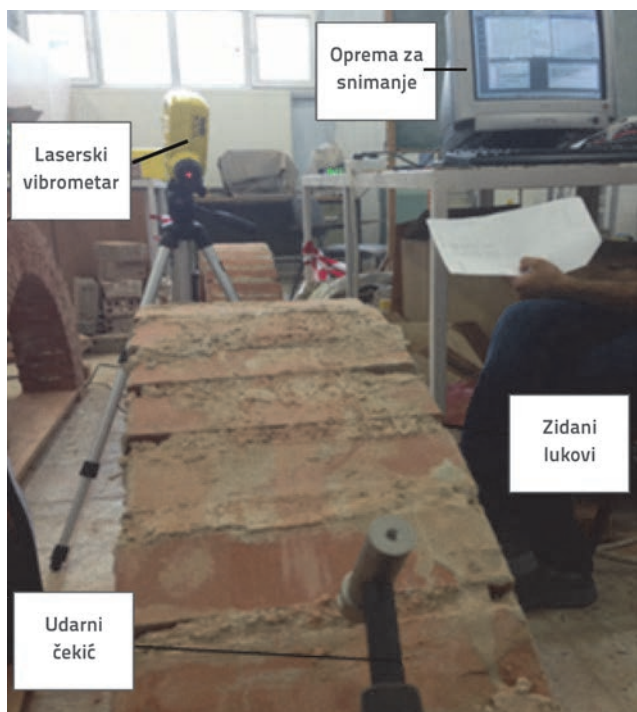
Slika 4. Ispitivanje uzoraka na tlak i na savijanje





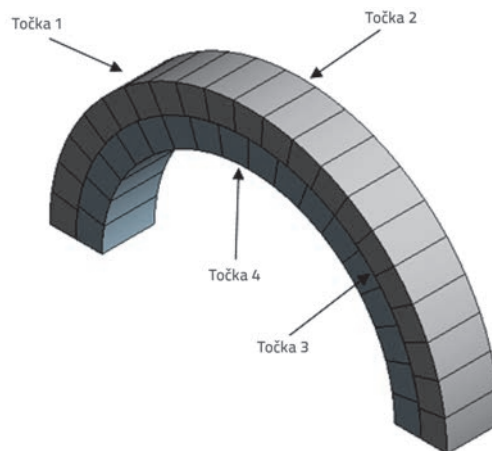
### 4. Eksperimentalna modalna analiza (EMA)

Modalni parametri kao što su prirodna frekvencija i modalni oblici važni su faktori kod dinamičkog ponašanja konstrukcije. EMA, također poznata i kao ispitivanje frekvencije funkcije odgovora, primijenjena je za dinamički odgovor konstrukcija, [14, 15]. EMA podržava princip mjerenja odziva uslijed opterećenja koja su postavljena na konstrukciji. Modalni parametri konstrukcije određeni su na osnovi odgovora konstrukcije na primijenjeno opterećenje, [14, 15]. Eksperimentalna modalna analiza najčešće je korištena metoda za određivanje modalnih parametara, te je primijenjena i u ovom istraživanju [14, 15]. U prvom koraku, svi su uređaji u laboratoriju isključeni, a ljudima je zabranjen ulazak unutra, kako bi se izolirale neželjene vibracije okoline.

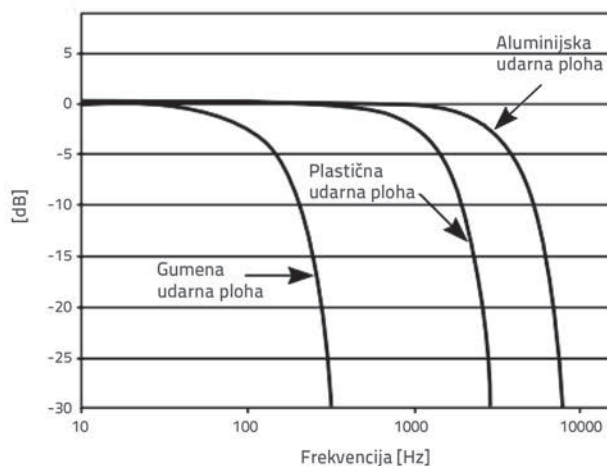
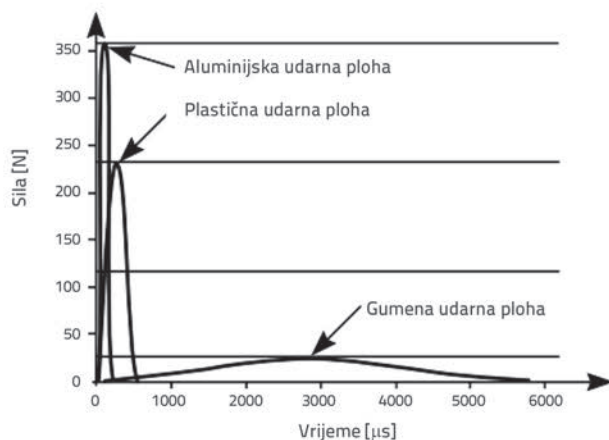


Slika 5. Eksperimentalno ispitivanje uzoraka zidanih lukova

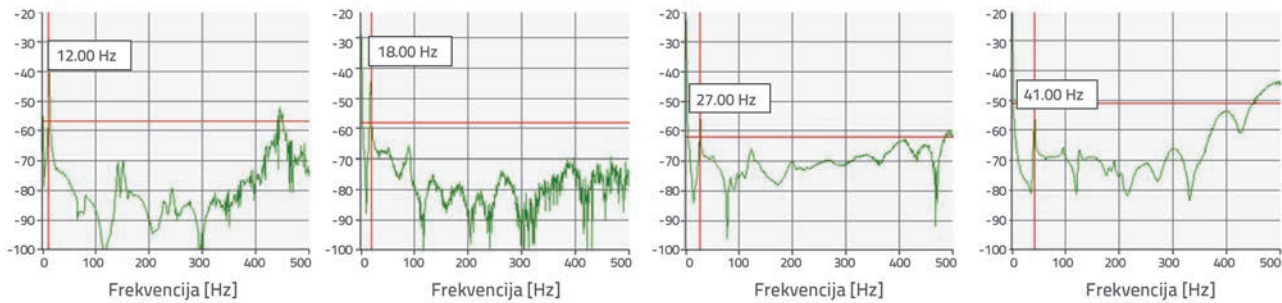
Zidani lukovi su najprije učvršćeni na pod, potom su testirani modalnim čekićem (Brüel&Kjaer 8206-002). Odgovor lukova na ove utjecaje snimljen je pomoću laserskog vibrometra (ometron VH300+). Tijekom ispitivanja svi su podaci snimani opremom za snimanje s više kanala (Brüel&Kjaer 3050-B-040) (slika 5.). Pomoću eksperimentalne modalne analize određene su frekvencije i prigušenja lukova. U tu svrhu lukovi su bili izloženi udarcima modalnog čekića najmanje po pet puta na pojedinim točkama, a kod analize odgovora konstrukcije na primijenjeno opterećenje korišteno je linearno usrednjavanje. Kako je udarac modalnim čekićem uzrokovao vibracije na lukovima, bilo je potrebno pričekati određeno vrijeme između dva udara čekićem radi stabilizacije konstrukcije. Na monitoru analizatora promatrani su omjeri frekvencijskih spektara vibracija konstrukcije (m/s) i udara čekićem (V). Na taj način zabilježen je samo odgovor luka na udarac modalnim čekićem, a vanjske vibracije i šumovi nisu utjecali na mjerenje. Kod svih ispitivanja odabrane su četiri različite točke nanošenja opterećenja: na četvrtini raspona i na sredini raspona luka, u ravnini i izvan ravnine (slika 6.). Osim toga, raspon frekvencija u ovom je ispitivanju iznosio od 0 do 500 Hz. Za takav raspon frekvencija odabran je udarni čekić s gumenim vrhom (slika 7.).



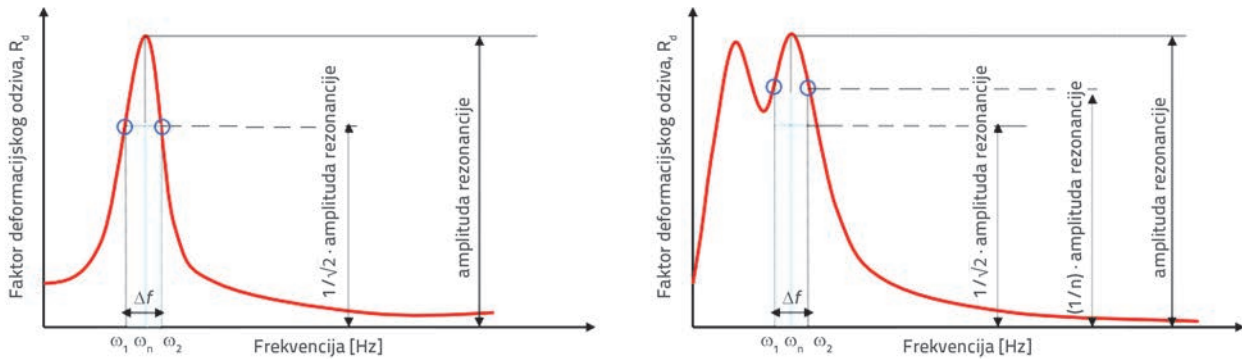
Slika 6. Mjesta nanošenja opterećenja (udara) na luku



Slika 7. Oblici impulsnih pobuda glave čekića od različitih materijala: a) raspon sila; b) frekvencijski raspon glave čekića [16]



Slika 8. Neke vrijednosti vlastitih frekvencija dobivene u različitim točkama nanošenja opterećenja



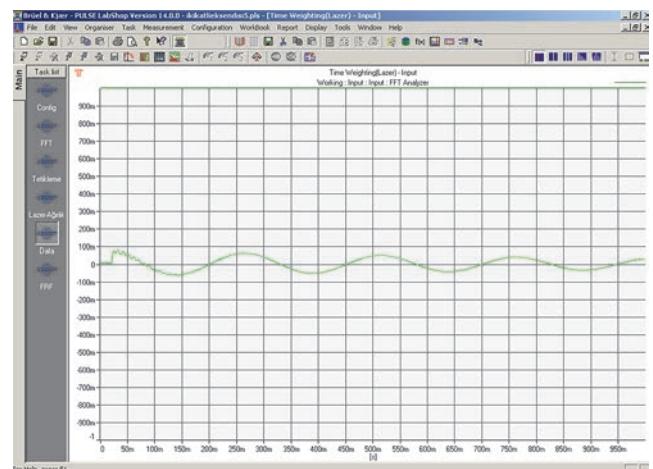
Slika 9. Metoda pojasa pola snage [17]

Prirodne frekvencije određene su na temelju vršnih vrijednosti funkcija frekvencijskog odziva (eng. *frequency response functions* - FRF). FRF daje ulazne i izlazne odnose između točke nanošenja opterećenja i mjerne točke na luku kao funkciju frekvencija. Odabrane vršne vrijednosti funkcije frekvencijskog odziva upotrijebljene su za definiranje vlastitog oblika oscilacija. Dinamički parametri kao što su prirodne frekvencije, koeficijenti prigušenja i vlastiti oblici oscilacija dobiveni su iz skupa krivulja FRF. U ovom je ispitivanju za određivanje frekvencija primijenjena metoda odabira vrhova. Prema toj metodi, uski vrhovi na krivuljama opisuju visoke rezonancije. Funkcija frekvencijskog odziva dobivena na raznim točkama nanošenja udarnog opterećenja prikazana je na slici 8., a u tablici 2. daje se kratak prikaz vlastitih frekvencija i perioda konstrukcije.

Tablica 2. Frekvencije i periodi izračunani u EMA

Vlastiti oblik oscilacija	Točka udara	Frekvencija [Hz]	Period [S]
1	Druga točka	4,25	0,24
2	Prva točka	11,35	0,09
3	Treća točka	15,10	0,07
4	Četvrta točka	18,85	0,05
5	1. do 3. točka	26,35	0,04
6	2. do 4. točka	32,12	0,03

Pomoću dijagrama funkcije frekvencijskog odziva (FRF) određeni su i koeficijenti prigušenja. Koeficijenti prigušenja izračunani su pomoću metode "pojasa pola snage" (eng. *half-power bandwidth*), [15]. Metoda pojasa pola snage prikazana je na slici 9., gdje su  $\omega_1$  i  $\omega_2$  vrijednosti lijevo i desno od rezonantnog vrha, a koje omeđuju pojasnu širinu, dok je  $\omega_n$  vrijednost frekvencije. Modalni koeficijent prigušenja izračunan je pomoću formule koja je prikazana u nastavku. Koeficijent prigušenja sa zaslona računala prikazan je na slici 10. Prvih šest frekvencija, perioda i koeficijenata prigušenja za dvoslojni luk prikazano je u tablici 3.



Slika 10. Prikaz koeficijenta prigušenja sa zaslona računala

Tablica 3. Koeficijenti prigušenja dobiveni pomoću postupka EMA

Vlastiti oblik oscilacija	Točka udara	Koeficijent prigušenja [%]
1	Druga točka	5,36
2	Prva točka	3,92
3	Treća točka	3,09
4	Četvrta točka	2,63
5	1. do 3. točka	2,52
6	2. do 4. točka	2,15

## 5. Numerička analiza

Razvoj tehnologije omogućuje jednostavniju numeričku analizu i ispitivanje ponašanja konstrukcije u prostornom modelu. Zbog toga je metoda konačnih elemenata kojom se određuje statičko i dinamičko ponašanje zidanih konstrukcija danas jedna od najčešće korištenih metoda. Prostorni model konačnih elemenata razvijen je na bazi konstrukcijskih i geometrijskih karakteristika luka, a korišten je za dvoslojne lukove koji su ispitivani. U ovom smislu, računalni programi FEA i ANSYS Workbench korišteni su pri analizi luka sa 186 elemenata, koji ima 20 čvorova i tri stupnja slobode u svakom čvoru. U prvom modelu, dvoslojni luk je diskretiziran sa 7560 polja, što odgovara 37.960 čvorova (slika 11.).

Prema turskim seizmičkim normama (TEC 2007) [16], modul elastičnosti (E) korišten u zidanim konstrukcijama, može se izračunati pomoću formule  $E = 200 \cdot f$ , gdje je f srednja tlačna čvrstoća ziđa u MPa. Zidani lukovi napravljeni su od opeke i morta. Prema [17], modul elastičnosti za novi materijal (opeka + mort) može se dobiti postupcima homogenizacije kako slijedi:

$$E = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \rho \quad (1)$$

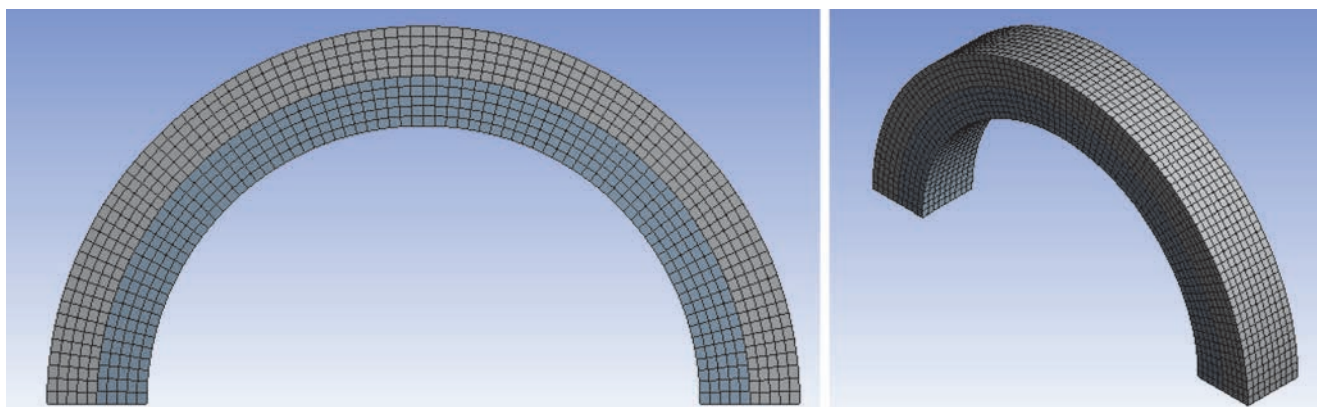
gdje  $t_m$  predstavlja debljinu morta,  $t_u$  se odnosi na širinu opeke, a  $\rho$  je faktor učinkovitosti zbog nedovoljne povezanosti morta i opeke. Konačno,  $E_m$  i  $E_u$  predstavljaju modul elastičnosti morta i

opeke. Debljina opeke koja se koristila u radu je 50 mm, a srednja debljina morta je približno 10 mm. Modul elastičnosti opeke i morta je izračunan te iznosi 3395,2 MPa, odnosno 2003,2 MPa. Faktor učinkovitosti iznosi 0,5 za zidane konstrukcije, [17]. Kada se uzmu u obzir sve vrijednosti korištene u izrazu (1), modul elastičnosti novog kompozita (opeka + mort) iznosi 1521,36 MPa. U svim prostornim modelima od konačnih elemenata modul elastičnosti računa se prema prije navedenom izrazu (1). Poissonov koeficijent je 0,2, uzet iz prijašnjih istraživanja [15], a težina po jedinici volumena predstavlja prosjek dobiven iz eksperimentalnih ispitivanja. Kako bi se dobili najprikladniji rezultati numeričkom analizom, najprije se promatra jednoslojni zidani luk koji ima prethodno određene rubne uvjete, a onda se dobivene vrijednosti frekvencija jednoslojnoga zidanoga luka uspoređuju s vrijednostima frekvencija dobivenima numeričkom analizom. Ovom usporedbom primijećeno je da se eksperimentalni podaci razlikuju od analitičkih podataka. Kako bismo uklonili ove razlike, napravljena je kalibracija numeričkog modela koja se preporuča u literaturi, [15, 19, 20, 21]. Usporedbom su dopuštene neke promjene u svojstvima materijala na optimalnom nivou, bez mijenjanja rubnih uvjeta. Ove izmjene i dopune također su osigurale dosljednost numeričke analize i eksperimentalnih ispitivanja.

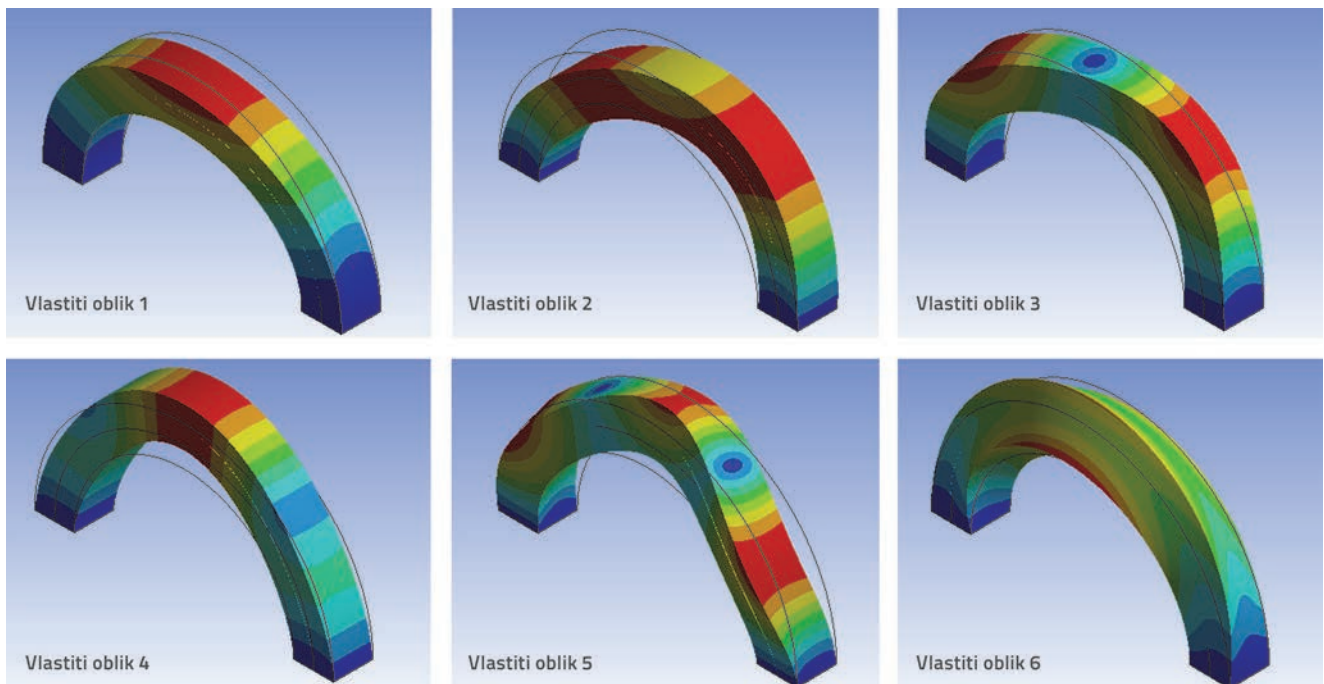


Slika 12. Ažuriranje postupka MKE

S tehničkoga gledišta, numerički su modeli formirani primjenom metode konačnih elemenata. Pogreške u numeričkom modelu uglavnom proizlaze iz pretpostavki kao što su svojstva materijala i geometrijska ograničenja. Rubni uvjeti konstrukcije definirani u modelu ne moraju se podudarati s fizičkim sustavom [22]. U



Slika 11. Prostorni model dvoslojnoga zidanoga luka



Slika 13. Vlastiti oblici i smjerovi oscilacija

Tablica 4. Frekvencije, periodi i omjer efektivne i ukupne mase dobiven postupkom MKE

Vlastiti oblik oscilacija	Frekvencija [Hz]	Period [s]	Omjer efektivne i ukupne mase		
			X	Y	Z
1	4,13	0,24	0,66074	$1,14 \cdot 10^{-23}$	$5,91 \cdot 10^{-26}$
2	11,30	0,09	$2,42 \cdot 10^{-24}$	0,73748	$3,49 \cdot 10^{-20}$
3	14,55	0,07	$4,30 \cdot 10^{-21}$	$0,16 \cdot 10^{-21}$	$1,39 \cdot 10^{-23}$
4	18,94	0,05	$2,38 \cdot 10^{-23}$	$0,26 \cdot 10^{-19}$	0,40872
5	26,23	0,04	0,16504	$2,19 \cdot 10^{-22}$	$1,24 \cdot 10^{-22}$
6	31,69	0,03	$9,99 \cdot 10^{-03}$	$5,04 \cdot 10^{-21}$	$5,73 \cdot 10^{-22}$

ovom su ispitivanju mehanička svojstva materijala modificirana kako je prikazano na dijagramu toka (slika 12.). Numerička analiza ponovljena je za ažurirane uvjete radi provjere analize pomoću postupka MKE i rješenja.

Modul elastičnosti na numeričkom modelu promijenjen je za približno 1,5 % te novi iznosi 1500 MPa, umjesto 1521,36 MPa, Poissonov koeficijent je 0,2, a specifična težina je 2800 kg/m<sup>3</sup>. Vrijednosti frekvencija i modalni oblici prikazani su u tablici 4. i na slici 13.

Prema rezultatima dobivenima pomoću metode konačnih elemenata, prvi, drugi i četvrti vlastiti oblik oscilacije su oblici čistog savijanja, dok je treći vlastiti oblik torzijski. Peti i šesti vlastiti oblici kombinacija su savojnog i torzijskog ponašanja.

## 6. Zaključak

Određivanje modalnih parametara, kao što su prirodna frekvencija i modalni oblici, važno je pitanje pri projektiranju konstrukcija kada je riječ o dinamičkom opterećenju. U ovom radu primijenjena je eksperimentalna modalna analiza (EMA) za određivanje dinamičkih karakteristika dvoslojnih zidanih lukova.

Zbog toga je provedeno ispitivanje dinamičkoga ponašanja lukova pomoću eksperimentalnih ispitivanja. Ispitano je prvih šest vlastitih oblika oscilacija, a rezultati eksperimentalnih istraživanja uspoređeni su s numeričkim proračunima primjenom metode konačnih elemenata. Promatrana je konzistentnost u rezultatima eksperimentalnih i numeričkih istraživanja. Prema podacima prikazanim u tablici 2. i tablici 3., može se vidjeti da prvi period titranja iznosi oko 0,25 s, a sljedeći pada za 0,1. Ovi rezultati dokazuju da dvoslojni lukovi imaju kruto ponašanje, za razliku od nekih drugih tipova konstrukcija. Konačno, očekuje se da će ova analiza i njezini rezultati potaknuti nova istraživanja s drugačijim konstrukcijskim sustavima i materijalima.

## Zahvala

Ovo istraživanje kao znanstvenoistraživački projekt podržalo je Sveučilište Ataturk u Turskoj te je putem Velikog istraživanja 2012/432 posebno priznato. Autori zahvaljuju profesoru Mustafi Yamanu te izvanrednim profesorima Habibu Uysalu i Gürkanu Sakaru na usmjeravanju i znanstvenom doprinosu.



## LITERATURA

- [1] Uysal, H., Cakir, F.: Static and dynamic analyses of the historical Erzurum Watchtower, *TAC Foundation, Foundation for the Preservation of Turkish Monuments an Environmental*, (2013) 1, pp. 72-80.
- [2] Bayraktar, A., Coşkun, N., Yalcin, A.: Damages of masonry buildings during the July 2, 2004 Doğubayazıt (Ağrı) earthquake in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, 14 (2007) 1, pp. 147-157.
- [3] Kiyono, J., Kalantari, A.: Collapse Mechanism of Adobe and Masonry Structures During the 2003 Iran Bam Earthquake, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 79 (2004), pp. 157-161.
- [4] Lourenco, P.: Computations on historic masonry structures, *Structural Engineering and Materials*, 4 (2002) 3, pp. 301-319.
- [5] Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., Taskov, L.: Experimental and Numerical Modal Analyses of a Historical Masonry Palace, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 1, pp. 81-91.
- [6] Camlibel, N.: The analytically investigate of Architect Sinan's Structures, Associate Professorship Thesis, Graduate School of Natural And Applied Sciences, *Istanbul Technical University*, 1998, Turkey.
- [7] Cakir, F.: Assessment of Structural Integrity And Seismic Retrofit of Masonry Bridges Using Micropiles, Master's Thesis, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, *Graduate College of the Illinois Institute of Technology*, Chicago.
- [8] Cancelliere, I., İmbimbo, M., Sacco, E.: Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches, *Engineering Structures*, 32 (2010), pp. 776-792, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.005>
- [9] Arioğlu, N., Acun, S.: The Evaluation of Lime Mortars and Plasters with The Purpose of Conservation and Restoration, New Perspectives To Save The Cultural Heritage, *CIPA 2003 International Symposium, Antalya-Türkiye*, (2003), pp. 571-576.
- [10] BASF Chemical Company, Albaria Calce Albazzana Technical Sheet, <http://imeryapi.com.tr/wp-content/uploads/ALBARIA-CALCE-ALBAZZANA.pdf>
- [11] TS 699: 2009. Methods of Testing for Natural Building Stones, Turkish Building Code, *Turkish Standards Institution*, Ankara, Turkey
- [12] TS EN 1467:2012. Natural stone - Rough blocks - Specifications, Turkish Building Code, *Turkish Standards Institution*, Ankara, Turkey.
- [13] TS EN 1469. Natural stone products - Slabs for cladding - Requirements, Turkish Building Code, *Turkish Standards Institution*, Ankara, Turkey.
- [14] Turker, T.: Determination of dynamic characteristics of steel frames by experimental modal analysis method, Master's Thesis, *Graduate School of Natural And Applied Sciences*, 2005., Karadeniz Teknik University, Trabzon, Turkey.
- [15] Cakir, F., Uysal, H.: Experimental modal analysis of brick masonry arches strengthened prepreg composites, *Journal of Cultural Heritage*, (2014), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2014.06.003>.
- [16] Product Data, Impact Hammers - Types 8206, 8206-001, 8206-002 and 8206-003, *Brüel&Kjaer*, Denmark
- [17] Kaya, Y.: Tools and Techniques for Real Time Modal Identification, Ph.D. Thesis, Graduate Program in Earthquake Engineering, *Bogazici University*, Istanbul, Turkey, 2009.
- [18] TEC: Turkish Earthquake Code, Specification for Structures to Be Built in Disaster Areas, *Ministry of Environment and Urbanization of Turkey*, 2007.
- [19] Lourenço, P., Vasconcelos, G., Ramos, L.: Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister, *Second International Congress of Studies in Ancient Structures*, (2001), Istanbul.
- [20] Bayraktar, A., Altunisik, A., Sevim, B., Türker, T.: Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge, *IMO Teknik Dergi*, (2009), pp. 4675- 4700.
- [21] Sahin, A.: Digital Signal Processing, Dynamic Characteristic Identification and Finite Element Model Updating Software for Experimental and Operational Modal Testing of Structures: SignalCAD - ModalCAD - FemUP (PhD Thesis), Graduate School of Natural And Applied Sciences, *Karadeniz Teknik University*, Trabzon, 2009.
- [22] Ewins, D.: Modal Testing, Theory, Practice, and Application (Mechanical Engineering Research Studies: Engineering Dynamics Series), *Research Studies Press LTD*, England, 2010.