

Primljen / Received: 7.10.2019.

Ispravljen / Corrected: 16.8.2020.

Prihvaćen / Accepted: 10.8.2021.

Dostupno online / Available online: 10.3.2022.

Dinamička identifikacija triju crkava iz devetnaestog stoljeća u Turskoj

Autor:

Prof.dr.sc. **M. Bilal Bağbanci**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Bursa Uludag, Bursa, Turska

Arhitektonski fakultet

bilalbagbanci@yahoo.com

Autor za korespondenciju

Stručni rad

M. Bilal Bağbanci

Dinamička identifikacija triju crkava iz devetnaestog stoljeća u Turskoj

Prije samog proračuna konstrukcije povijesnih građevina važno je eksperimentalnim postupcima odrediti čvrstoću njihovih zidova isto kao i dinamičke karakteristike konstrukcije. Najdjelotvornije eksperimentalne metode su ispitivanje primjenom plosnatih preša, ispitivanje posmika te ispitivanje vibracija. Nakon eksperimentalnih metoda, treba se ispitati dinamičko ponašanje građevina pomoću analize metodom konačnih elemenata. U ovom se radu analiziraju dinamičke karakteristike triju crkava izgrađenih u 19. stoljeću u pokrajinama Balikesir i Bursa od kojih su sada ostali samo nosivi (vanjski) zidovi. Utvrđeno je da se za definiranje dinamičkih karakteristika takvih građevina treba metodom konačnih elemenata ispitati i ocijeniti kako čitava građevina tako i pojedinačni zidovi.

Ključne riječi:

zidane građevine, ispitivanje materijala, praćenje stanja konstrukcija, dinamičko ponašanje

Professional paper

M. Bilal Bağbanci

Dynamic identification of three 19th century churches in Turkey

It is of great importance to determine the in-situ wall strength and dynamic characteristics of historic structures by experimental methods before structural analysis. The most effective experimental methods are the flat-jack, shear and vibration tests. After experimental methods, dynamic behaviour of the structures should be checked by the finite element analysis. Dynamic characteristics of three churches constructed in the 19th century in Balikesir and Bursa provinces, now reduced to load-bearing walls (outer walls) only, are analysed in this study. It was established that, in order to identify dynamic characteristics of such structures, both the whole structure and the individual walls should be tested and evaluated by means of the finite element analysis.

Key words:

masonry structures, material tests, structural health monitoring, dynamic behaviour

1. Uvod

Povijesne građevine jedinstveni su spomenici naše višestoljetne kulturne baštine pa su stoga iznimno značajne i vrijedne u smislu očuvanja kulturnog naslijeđa. Naš je neminovni zadatak sačuvati te građevine i prenijeti ih budućim naraštajima. Činjenica je da su takve građevine tijekom svoje dugovječnosti bile podvrgnute raznim utjecajima kao što su požari, potresi, ratovi i brojne intervencije. Zbog toga je važno terenskim ispitivanjima i računalnim analizama odrediti njihovo trenutačno stanje kako bi se omogućila njihova pravilna obnova. Ovo se istraživanje bazira na odlukama Međunarodnog vijeća za spomenike i spomeničke cjeline (ICOMOS) koje su donesene tijekom međunarodne radionice održane 2003. godine. Prije izrade studija o obnovi građevina potrebno je terenskim ispitivanjima odrediti trenutačno stanje, postupke građenja, intervencije, rubne uvjete, svojstva konstrukcije te čvrstoću zidova tih građevina. Nakon toga se treba ocijeniti sigurnost građevina, iza čega slijedi definiranje postupaka za provedbu intervencija u sklopu obnove građevine [1].

Iznimno je važno precizno odrediti čvrstoću zidova i dinamičke karakteristike stvarne konstrukcije prije same računalne analize. Dinamički se parametri mogu odrediti modalnom analizom modela konačnih elemenata pripremljenih na temelju rubnih uvjeta i svojstava materijala. Ti parametri mogu bitno odstupati od očekivanih vrijednosti zbog pada čvrstoće materijala tijekom vremena, zbog grešaka u fazi izvođenja građevine, zbog pukotina uzrokovanih raznim opterećenjima te zbog zamora uzrokovanog slomom konstrukcije. Zbog toga se dinamički parametri građevine trebaju odrediti kako eksperimentalnim tako i analitičkim metodama [2].

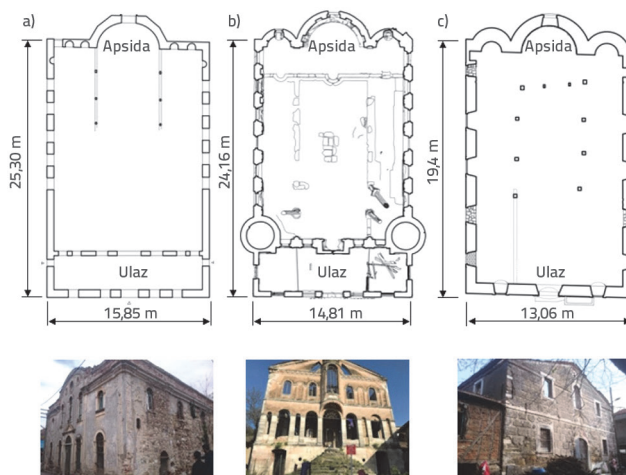
Ispitivanje primjenom plosnatih preša i posmični pokus najdjelotvornije su metode za određivanje čvrstoće zidova. Istraživači se koriste tim metodama već dugi niz godina za precizno određivanje čvrstoće zidova povijesnih građevina [3-8]. Eksperimentalna metoda, poznata pod nazivom operativna modalna analiza (OMA), često se u posljednja dva desetljeća primjenjuje za određivanje dinamičkog ponašanja postojećih građevina. U okviru te nerazorne metode ispitivanja provode se ispitivanja vibriranja postavljanjem osjetljivih akcelerometara u poprečnim smjerovima. Tim se postupkom mogu odrediti vlastite frekvencije, modalni oblici i koeficijenti prigušenja građevina. Međutim, kada se primjenjuju za povijesne građevine, ta metoda ima svoje prednosti ali i nedostatke. Prednosti ove metode su: postupak ispitivanja je brz i jednostavan, ne treba se koristiti opremom za pobuđivanje, građevina se može ispitivati u uvjetima normalnog korištenja i, konačno, postupak se može primjenjivati za određivanje konstrukcijskog oštećenja građevina. Međutim, metoda ima i određene nedostatke: ne mogu se izračunati modalni faktori doprinosa, teško se mogu odrediti modalni parametri u prisutnosti harmonične pobude u blizini vlastitih frekvencija, trebaju se koristiti vrlo dugački kabelski pretvornici, a uočene su i poteškoće pri pozicioniranju akcelerometara. Kako bi

se postigla što veća preciznost dinamičkih parametara, trebaju se koristiti ispitivanja ambijentalne vibracije uz primjenu postupaka modalnog ažuriranja. Ponavljanje ispitivanja značajno je za ocjenjivanje dinamičkih parametara. Ortogonalnost oblika može se provjeriti pomoću kriterija modalne ortogonalnosti (MAC) i dijagrama složenosti [9-13]. Operativna modalna analiza do sada je primijenjena u brojnim studijama za određivanje dinamičkih parametara građevina [14-20].

U ovom se radu analiziraju tri crkve iz devetnaestog stoljeća, tj. crkve Dereköy i Aydınpınar smještene u pokrajini Bursa i crkva Ballıpınar koja se nalazi u pokrajini Balıkesir. Analiza crkava provodi se eksperimentalno te primjenom metode konačnih elemenata. Tlačna i posmična čvrstoća zidova izračunava se pomoću ispitivanja primjenom plosnatih preša te primjenom posmičnih ispitivanja. Vlastite frekvencije i modalni oblici čitave konstrukcije i pojedinih zidova analiziraju se u smjeru x pomoću operacionalne modalne analize. Podaci dobiveni eksperimentalnim analizama koriste se u modelima konačnih elemenata. Eksperimentalni se rezultati uspoređuju s rezultatima dobivenima metodom konačnih elemenata.

2. Arhitektonske karakteristike crkava

Zbog nemara i zapuštenosti analizirane se crkve ne koriste već više od dva desetljeća. Srušeni su krovovi crkava kao i svi drveni stupovi i grede koji su bili povezani s krovnom konstrukcijom, tako da danas stoje još samo nosivi tj. vanjski zidovi. U okviru arhitektonskih obilježja crkava definirani su datumi gradnje, materijali korišteni u gradnji crkava, dimenzije crkava i visine zidova. Crkva Aydınpınar izgrađena je između 1846. i 1870. godine. Zidovi su izvedeni od lomljenog kamena i klesanog kamena. Kao vezivo je korišten vapneni mort. Građevina zauzima prostor dimenzija 15,85 x 25,30 m. Prosječna debljina vanjskih zidova iznosi 0,70 m. Visina zidova iznosi 7,82 m. Crkva Dereköy izgrađena je 1857. godine.



Slika 1. Tlocrti i fotografije ulaznih fasada: a) crkva Aydınpınar; b) crkva Dereköy i c) crkva Ballıpınar

Tablica 1. Fotografije eksterijera, interijera i zidova analiziranih crkava

Crkve	Vanjski prikaz crkve	Unutrašnjost crkve	Prikaz zida
Crkva Aydınpinar			
Crkva Dereköy			
Crkva Ballıpinar			

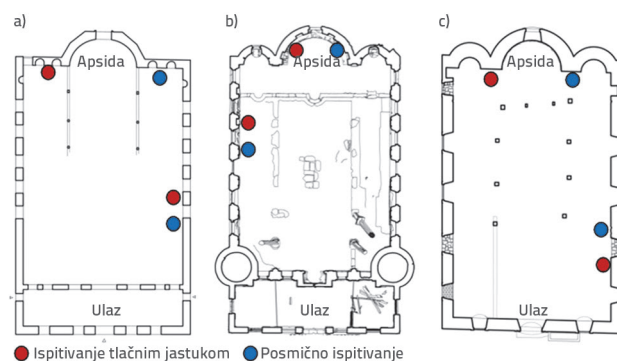
Zidovi su izvedeni od cigle, lomljenog kamena i klesanog kamena. Građevina zauzima prostor dimenzija 14,81 x 24,16 m. Prosječna debljina vanjskih zidova iznosi 0,85 m. Visina zidova iznosi 9,0 m. Crkva Ballıpinar izgrađena je 1895. godine. Građevina zauzima prostor dimenzija 13,06 x 19,04 m. Zidovi su izvedeni od kamena i cigle. Prosječna debljina zidova iznosi 0,80 m a visina zidova iznosi 6,80 m. Slika 1. prikazuje tlocrte i fotografije ulaznih fasada analiziranih crkava [21, 22]. Fotografije eksterijera, interijera i zidova analiziranih crkava prikazane su u tablici 1.

3. Eksperimentalna analiza crkava

3.1. Ispitivanja primjenom plosnatih preša i posmična ispitivanja

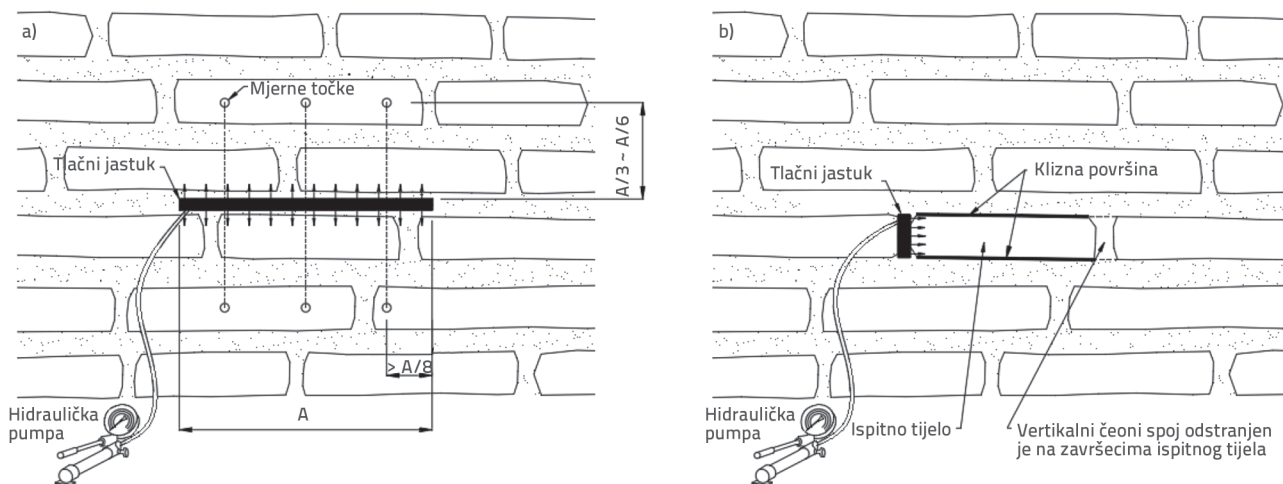
Tijekom ispitivanja primjenom plosnatih preša i posmičnih ispitivanja zabilježeni su prosječni rezultati (jedan za svaki zid u

smjeru x i y). Mjesta ispitivanja u analiziranim crkvama prikazana su na slici 2.



Slika 2. Mjesta ispitivanja plosnatim prešama i posmičnim ispitivanjima: a) crkva Aydınpinar; b) crkva Dereköy; c) crkva Ballıpinar

Tim su ispitivanjima na zidovima određene vrijednosti tlačnog



Slika 3. Ispitivanje plosnatom prešom i posmikom: a) postav ispitivanja s jednom plosnatom prešom; b) postav posmičnog ispitivanja

naprezanja, modula elastičnosti i posmičnog naprezanja. Metoda s jednom plosnatom prešom primjenjena je za određivanje tlačnog naprezanja i modula elastičnosti zida. Prema toj metodi, otvor se izvodi u sloju morta te se u njega postavlja plosnata preša. Prilikom nanošenja tlaka u plosnatoj preši pomoću hidrauličke pumpe kontinuirano se očitavaju vrijednosti naprezanja i pomaka sastavljenog zida [23]. Za ispitivanja posmika korištena je metoda C prema normi ASTM C1531-09 [24]. Prema toj metodi, mala plosnata preša se horizontalno postavlja na jedan kraj ispitne jedinice. Tada se nanosi tlak hidrauličkom pumpom sve do otvaranja pukotine ili klizanja. Slika 3. detaljno prikazuje postav ispitivanja plosnatim prešama i posmikom, uključujući i mjerenje pomaka, postavljanje plosnate preše i klizne površine. Izrazima (1) i (2) prikazan je način izračuna tlačnog naprezanja, modula elastičnosti i posmičnog naprezanja. Tlačno naprezanje, izraz (1):

$$F_m = K_m \cdot K_a \cdot p \tag{1}$$

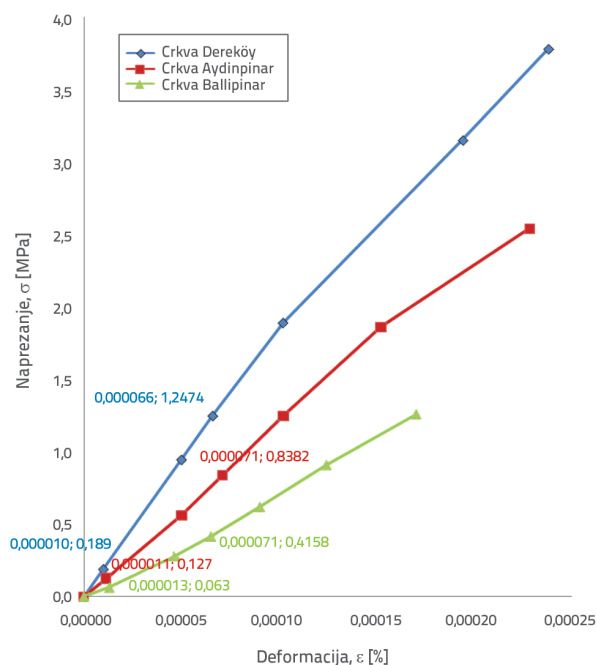
gdje je K_m bezdimenzijska konstanta koja se odnosi na krutost i geometrijska svojstva plosnate preše, K_a je odnos površine plosnate preše i površine otvora, dok je p tlak u plosnatoj preši, psi ili MPa.

Sekantni modul elastičnosti u bilo kojoj točki i , izraz (2):

$$E_{si} = \frac{f_{mi}}{\varepsilon_{mi}} \tag{2}$$

je je f_{mi} naprezanje u točki i , a ε_{mi} deformacija je u točki i [23].

Modul elastičnosti kompozitnog zida izračunan je primjenom krajnjih točaka 0,05 i 0,33 sekantnog modula elastičnosti [25]. Dijagram naprezanje-deformacija za kompozitno zide prikazan je na slici 4.



Slika 4. Dijagram naprezanje – deformacija za kompozitno zide

Proračun prosječnog posmičnog naprezanja na podložnom spoju dan je izrazima (3) i (4):

Horizontalna sila:

$$P_h = K_m \cdot A_r \cdot p \tag{3}$$

gdje je K_m bezdimenzijska konstanta koja se odnosi na krutost i geometrijska svojstva plosnate preše, A_r je površina plosnate preše, a p je tlak u plosnatoj preši pri otvaranju pukotine ili na početku klizanja.

Posmično naprezanje:

$$\tau = \frac{P_h}{A_j} \tag{4}$$

gdje je P_h maksimalna sila koju generira hidraulička pumpa, a A , gornja i donja efektivna površina plosnate preše [24].

Mehanička svojstva zida, tj. tlačno naprezanje, posmično naprezanje i modul elastičnosti, izračunana tijekom ispitivanja, prikazana su u tablici 2. Žbuka vanjskih zidova je otpala pa je mort oslabljen zbog djelovanja okolnog zraka i vlage. Stoga se može reći da su zbog tih utjecaja uvelike narušena mehanička svojstva zida.

Tablica 2. Mehanička svojstva zida analiziranih crkava

Crkve	Tlačno naprezanje [MPa]	Posmično naprezanje [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]
Crkva Aydınpinar	2,54	0,46	12
Crkva Dereköy	3,78	0,62	19
Crkva Ballıpınar	1,26	0,28	6

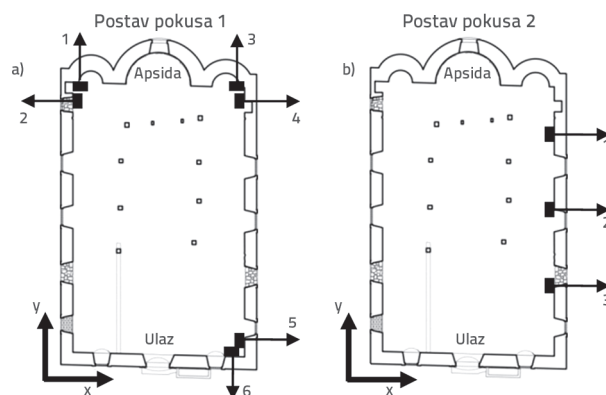
3.2. Ispitivanje stanja konstrukcija

Dinamički parametri analiziranih crkava određeni su primjenom operativne modalne analize (OMA). Ova nerazorna metoda ispitivanja može se koristiti za određivanje vlastitih frekvencija vibracija, koeficijenta prigušenja i modalnih oblika.

Spomenuti postupak može se primijeniti za određivanje dinamičkih parametara konstrukcija ma temelju izlaznih eksperimentalnih podataka. Opterećenja su ambijentalne sile, a određivanje oblika bazira se samo na odzivu. U ovim su ispitivanjima korišteni vrlo osjetljivi akcelerometri (2400 mV/g): jednoosni akcelerometri pojasne širine 0,01-200 Hz te raspona mjerenja od $\pm 3g$. U dinamičkim je ispitivanjima korišten osmokanalni uređaj za prikupljanje podataka Testbox 2010 [26].

Primjenjena su tridesetminutna ispitivanja kako bi se postigla odgovarajuća točnost rezultata ispitivanja. Tijekom postavljanja

senzora, na svim je zidovima pažljivo kontrolirana poprečna orijentacija tih uređaja. Za sve su crkve ispitivanja provedena kako za čitavu građevinu tako i za jedan od zidova u smjeru x. Akcelerometri su postavljeni tako da su otprilike 1,5 m udaljeni od razine krova. Za sve je crkve korištena ista orijentacija senzora te isti postav ispitivanja, kao što je i prikazano na slici 5. za crkvu Ballıpınar. Postavljanje senzora i ispitne opreme prikazano je na slici 6.



Slika 5. Tlocrtni prikaz orijentacije senzora za: a) postav pokusa 1; b) postav pokusa 2

Analizirani su rezultati za postav ispitivanja 1. Uočene su poteškoće u određivanju frekvencija za čitavu konstrukciju. Osnovni problem sastojao se u činjenici da nije bilo krova niti horizontalne povezanosti između zidova. Zato zidovi nisu djelovali kao konstrukcija već kao neovisni zidovi. Dodatan je problem bila nesimetričnost u izvođenju zidova. Frekvencije oblika savijanja za zidove u smjeru x (sjeverni i južni zid) određene su dovoljno točno pomoću operativne modalne analize. Smatra se da je tome razlog dostatna simetričnost zidova te dostupnost adekvatnih podataka za oba zida. S druge strane, frekvencije oblika savijanja zidova na ulaznom dijelu i zidova na apsidnom dijelu u smjeru y (zapadni i istočni zidovi)



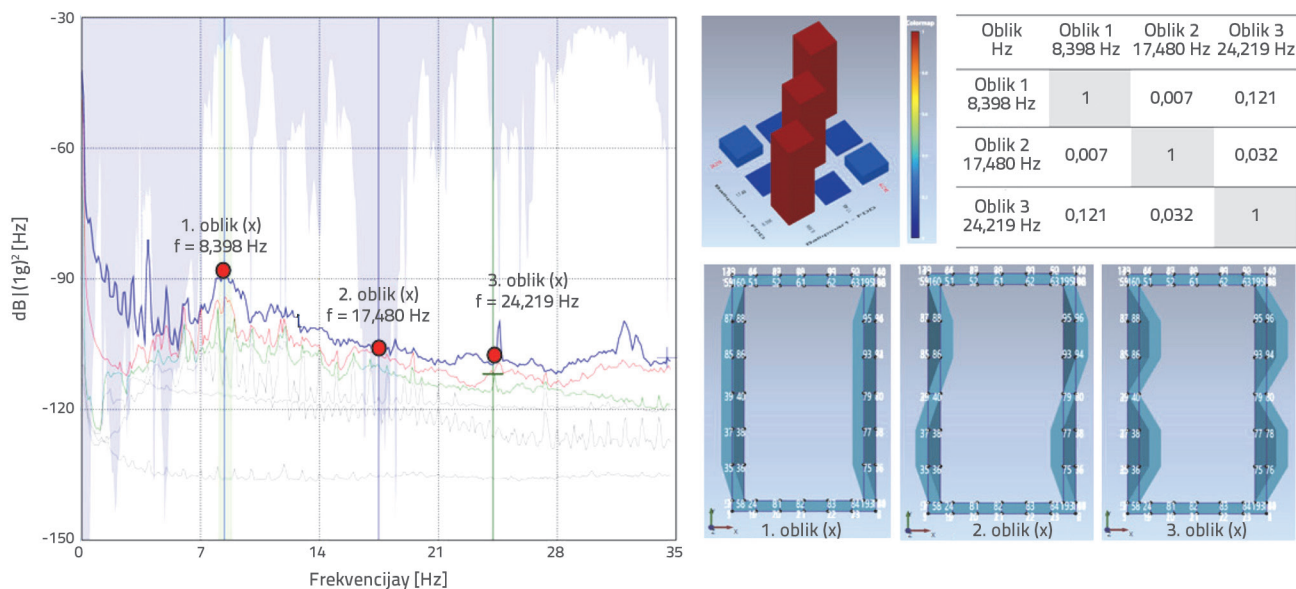
Slika 6. Vibracijska ispitivanja (postavljanje senzora i vibracijska oprema)

određene su pomoću operative modalne analize nedovoljno točno zbog nesimetričnog načina građenja. Za razliku od zidova na ulaznom dijelu, u apsidnom su dijelu u gradnji zidova korištene polukupole. Zato su u obzir uzeti samo oblici savijanja u smjeru x, dok je ortogonalnost između prva tri oblika savijanja kontrolirana pomoću kriterija modalne ortogonalnosti (MAC). Postav ispitivanja 2 također je proveden i to postavljanjem tri akcelometra kako bi se odredila prva tri oblika savijanja pojedinačnih zidova u smjeru x. Pri uspoređivanju postava 1 i 2, za sve su crkve uočene vrlo bliske frekvencije. Osim toga, prva tri oblika savijanja eksperimentalno su se mogla točnije odrediti pomoću postava 2 nego pomoću postava 1. Na slikama

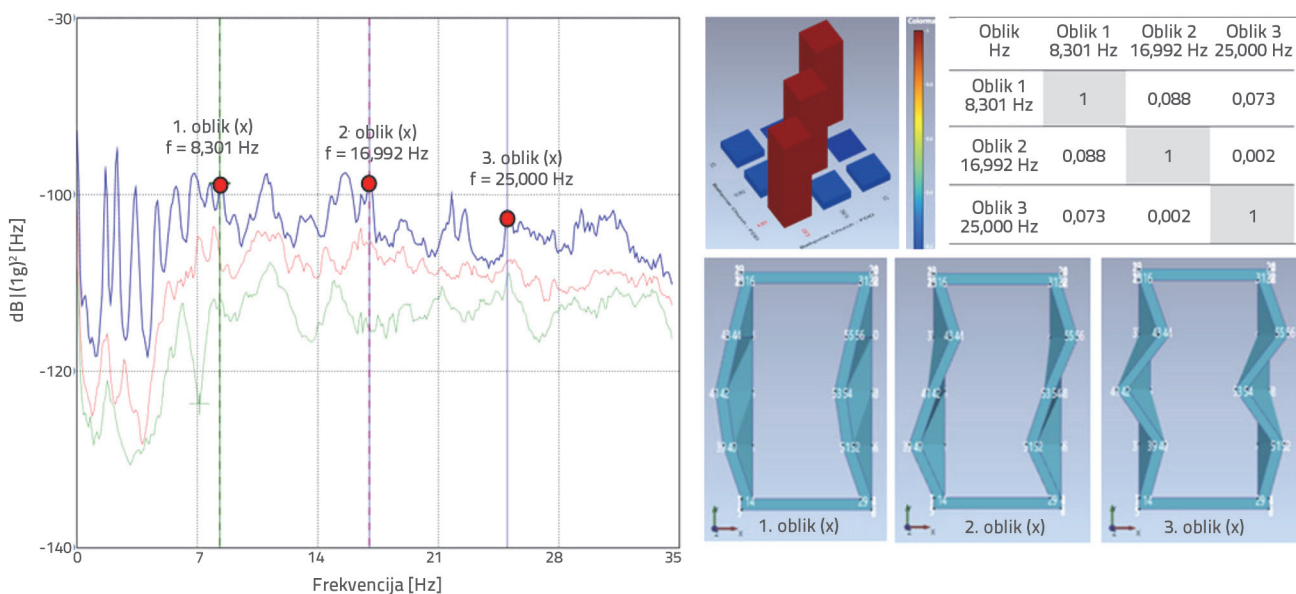
7. i 8. prikazane su singularne vrijednosti spektralnih gustoća, 3D i numerička prezentacija vrijednosti MAC, te prva tri oblika savijanja u smjeru x dobivena eksperimentalno na postavima za crkvu Ballipinar, kao primjer za postave 1 i 2.

4. Proračun crkava metodom konačnih elemenata

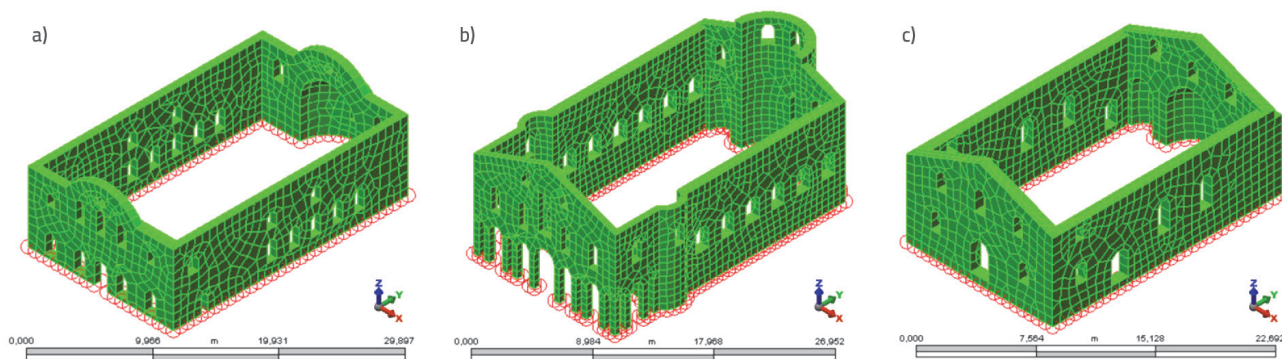
Vlastite frekvencije i modalni oblici crkava istraženi su pomoću Algor V20 programa koji se temelji na metodi konačnih elemenata (MKE) [27]. Elementi cigle, tetraedara, klinova i piramida s po tri stupnja slobode u svakom čvoru pretvoreni



Slika 7. Singularne vrijednosti spektralnih gustoća, 3D i numerička prezentacija vrijednosti MAC za crkvu Ballipinar te prva tri eksperimentalno određena oblika savijanja (postav pokusa 1)



Slika 8. Singularne vrijednosti spektralnih gustoća, 3D i numerička prezentacija vrijednosti MAC za crkvu Ballipinar te prva tri eksperimentalno određena oblika savijanja (postav pokusa 2)



Slika 9. Modeli konačnih elemenata za: a) crkvu Aydınpınar; b) crkvu Dereköy; c) crkvu Ballıpınar

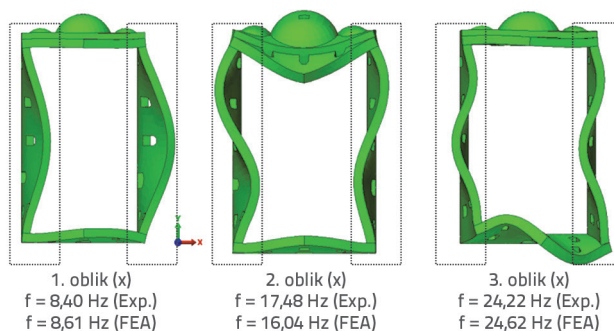
Tablica 3. Svojstva materijala nakon kalibriranja metodom FEA

Crkve	Tlačno naprezanje [MPa]	Posmično naprezanje [MPa]	Modul elastičnosti [MPa]	Gustoća [kN/m ³]
Crkva Aydınpınar	2,54	0,46	10	23
Crkva Dereköy	3,78	0,62	15	24
Crkva Ballıpınar	1,26	0,28	6	24

su u mrežu konačnih elemenata (slika 9.). U analizi konačnih elemenata, za crkve Ballıpınar, Aydınpınar i Dereköy korišteno je redom 2927, 3007 i 5502 punih elemenata. Nakon modalne analize, MKE modeli su kalibrirani kako bi se definiralo stvarno ponašanje građevina.

Nakon kalibriranja modela konačnih elemenata, utvrđeno je da su moduli elastičnosti dobiveni ispitivanjima značajni za preciznost modela. Modul elastičnosti dobiven ispitivanjem iznosio je 6 GPa za Crkvu Ballıpınar, a vrijednost dobivena kalibriranjem pomoću MKE također je iznosila 6 GPa (pogreška = 0 %). Modul elastičnosti dobiven ispitivanjem za crkvu Aydınpınar iznosio je 19 GPa, a vrijednost dobivena MKE kalibriranjem iznosila je 15 GPa (pogreška = 21 %). Modul elastičnosti dobiven ispitivanjem za crkvu Dereköy iznosio je 12 GPa, a vrijednost dobivena MKE kalibriranjem iznosila je 10 GPa (pogreška = 17 %). Dakle, pogreška određena uspoređivanjem rezultata ispitivanja i FEA kalibriranja varirala je od 0 do 21 posto. Usvojeno je da Poissonov koeficijent za zidove iznosi 0,16. Svojstva materijala analiziranih crkava nakon MKE kalibriranja prikazana su u tablici 3. Frekvencije savijanja u smjeru x dobivene ispitivanjem OMA uspoređene su s frekvencijama savijanja dobivenima analizom

MKE koja je provedena radi kalibriranja. Slika 10. prikazuje frekvencije prva tri oblika savijanja zidova crkve Ballıpınar u smjeru x (sjeverni i južni zid), koje su dobivene pokusom OMA (postav 1) i analizom MKE nakon baždarenja. Na ovoj slici, frekvencije savijanja dobivene analizom metodom konačnih elemenata iskazane su oznakom FEA, a oznaka Exp. označava frekvencije dobivene tijekom eksperimentalnog ispitivanja.

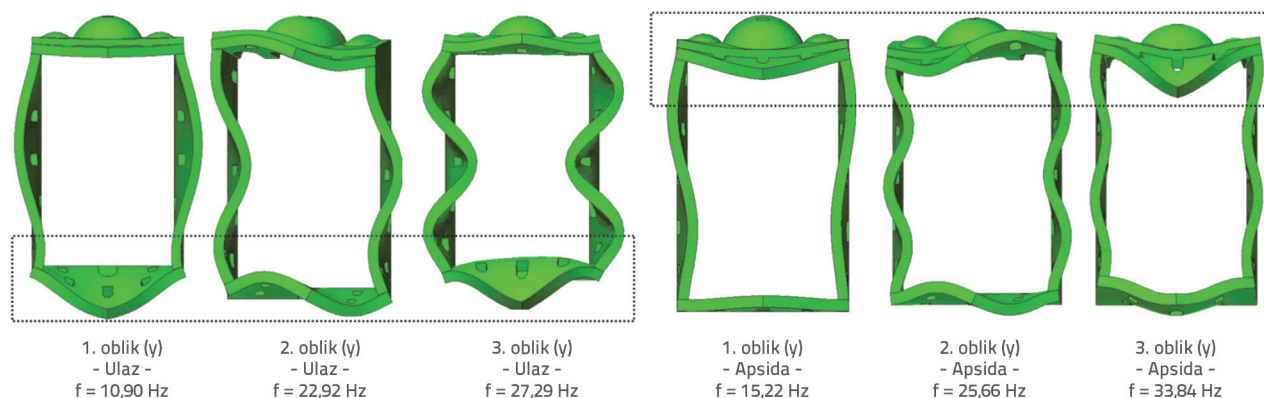


Slika 10. Prva tri oblika savijanja i frekvencije zidova crkve Ballıpınar u smjeru x (usporedba rezultata eksperimentalnog ispitivanja i rezultata analize metodom konačnih elemenata)

Tablica 4. Prve tri frekvencije oblika savijanja zidova crkve u smjeru x (eksperimentalno ispitivanje i analiza metodom konačnih elemenata)

Oblik br.	Crkva Aydınpınar			Crkva Dereköy			Crkva Ballıpınar		
	Exp.	FEA	Err.	Exp.	FEA	Err.	Exp.	FEA	Err.
1 (x)	7,32	7,65	4 %	7,81	8,51	8 %	8,40	8,61	3 %
2 (x)	16,02	14,91	7 %	17,97	16,91	6 %	17,48	16,04	8 %
3 (x)	23,10	22,64	2 %	25,10	26,30	5 %	24,22	24,62	2 %

Exp.: eksperimentalni rezultat, FEA: rezultat analize metodom konačnih elemenata, Err.: pogreška



Slika 11. Prva tri oblika savijanja u smjeru y za zidove crkve Ballipinar (ulazni zid i zid u apsidi)

Tablica 5. Prve tri frekvencije oblika savijanja zidova u smjeru y (ulazni zid i apsidni zid)

Zid	Broj oblika	Frekvencija [Hz] Crkva Aydınpınar	Frekvencija [Hz] Crkva Dereköy	Frekvencija [Hz] Crkva Ballipınar
Ulazni zid	1 (y)	9,77	9,93	10,90
	2 (y)	19,83	21,49	22,92
	3 (y)	26,71	30,50	27,29
Apsidni zid	1 (y)	15,65	15,84	15,22
	2 (y)	24,34	28,53	25,66
	3 (y)	34,57	35,12	33,84

Tablica 6. Faktori sudjelovanja mase za prva tri oblika savijanja u analiziranim crkvama (smjerovi x i y)

Crkve	Prvi oblik		Drugi oblik		Suma prva tri oblika	
	x	y	x	y	x	y
Crkva Aydınpınar	24,17	23,43	15,52	4,53	44,89	39,71
Crkva Dereköy	28,66	15,90	11,68	2,48	44,73	28,95
Crkva Ballipınar	24,85	18,27	18,16	3,16	50,67	32,58

Modalne frekvencije dobivene eksperimentalnim ispitivanjima, modalne frekvencije dobivene analizom metodom konačnih elemenata, te utvrđene razlike (pogreške), prikazane su u tablici 4. Pogreška u rezultatima varira od 2 do 8 posto.

Slika 11. prikazuje frekvencije prva tri oblika savijanja za zidove crkve Ballipinar u smjeru y (zid u ulaznom dijelu – južni zid te zid u apsidnom dijelu – istočni zid) dobivene analizom konačnih elemenata nakon baždarenja. Može se uočiti da se u smjeru y frekvencije oblika savijanja za zid na ulazu razlikuju od frekvencija za zid u apsidi.

Prve tri frekvencije oblika savijanja za zid u ulaznom dijelu i za zid u apsidnom dijelu crkava određene su u smjeru y metodom konačnih elemenata. Rezultati analize konačnih elemenata prikazani su u tablici 5.

Tablica 6. prikazuje faktore sudjelovanja mase za prva tri oblika savijanja u smjerovima x i y. Nakon prva tri oblika savijanja može se uočiti da su faktori sudjelovanja mase za smjerove x i y ispod ili blizu 50 %. Nakon pedeset oblika, faktori sudjelovanja mase rastu na 95 % ili više. To znači da se u statičkoj i dinamičkoj analizi građevina u obzir treba uzeti barem 50 oblika.

5. Zaključak

U radu se analizira dinamičko ponašanje triju crkava iz devetnaestog stoljeća koje su smještene u gradovima Bursi i Balikesiru. Provedena su ispitivanja plosnatim prešama te posmična ispitivanja kako bi se odredilo mehaničko ponašanje ziđa. Uspoređivanjem rezultata vibracijskih ispitivanja s

rezultatima analize metodom konačnih elemenata utvrđeno je da su mehanička svojstva definirana vrlo precizno. Maksimalna razlika između vibracijskih ispitivanja i analize metodom konačnih elemenata varira od 0 do 21 posto.

Vibracijska su ispitivanja provedena kako bi se odredile dinamičke karakteristike konstrukcija. Nažalost, određene su se poteškoće javile pri određivanju frekvencija čitave građevine. Kao prvo, zidovi nisu djelovali kao jedinstvena konstrukcija već kao neovisni zidovi i to zbog nedostatka krova i horizontalne veze između zidova. Zidovi u smjeru y imali su drugačije frekvencije vibriranja. Za razliku od zida u ulaznom dijelu, u apsidnom su dijelu pri izvođenju zidova korištene polukupole. S druge strane, frekvencije oblika savijanja za zidove u smjeru x (južni i sjeverni zidovi) određene su pomoću ispitivanja OMA, a dobiveni rezultati bili su vrlo precizni. Smatra se da je razlog tome simetrična izvedba zidova i dostatan broj podataka prikupljenih s oba zida. Osim toga, prve tri frekvencije oblika savijanja jednog od pojedinačnih zidova u smjeru x dobivene su primjenom drugog postava ispitivanja. Ortogonalnost između prva tri oblika savijanja u oba postava u smjeru x provjerena je primjenom kriterija modalne ortogonalnosti (MAC). Kod svih je crkava u

oba ispitivanja uočeno da su frekvencije međusobno vrlo bliske. Nakon kalibriranja svojstava materijala, razlike između rezultata ispitivanja i rezultata analiza metodom konačnih elemenata varirale su od 2 do 8 posto.

Određivanje ponašanja konstrukcije i materijala važno je za izradu konzervatorskih studija. Stoga se stanje konstrukcije treba detaljno analizirati kako bi se omogućila što točnija ocjena razina sigurnosti građevine. Jasno je da ispitivanja plosnatih prešanja, posmična ispitivanja i vibracijska ispitivanja imaju važnu ulogu u pravilnom određivanju svojstava i dinamičkog ponašanja takvih konstrukcija. U slučaju analiziranih crkava koje se sada sastoje samo od nosivih zidova (vanjskih zidova), cjelovita analiza treba uključivati ispitivanje i ocjenu kako pojedinačnih zidova tako i čitave konstrukcije, a pritom se trebaju primijeniti modeli temeljeni na metodi konačnih elemenata.

Zahvala

Ova studija provedena je uz podršku Jedinice za koordinaciju znanstvenoistraživačkih projekata TUBITAK. Broj projekta: 117M871.

LITERATURA

- [1] ICOMOS.: Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage, 2003.
- [2] Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T.: Analytical and operational modal analyses of turkish style reinforced concrete minarets for structural identification, *Experimental Techniques*, 33 (2009) 2, pp. 65-75.
- [3] Rossi, P.P.: Analysis of mechanical characteristics of brick masonry by means of non-destructive in-situ tests. In: Proc 6th international brick masonry conference, Rome, pp. 77-85, 1982.
- [4] Binda, L., Tiraboschi, C.: Flat-jack test as a slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures, *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, Zurich, (1999), pp. 449-472.
- [5] Lombillo, I., Thomas, C., Villegas, L., Fernández-Álvarez, J.P., Norambuena-Contreras, J.: Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests. *Construction and Building Materials*, (2013) 43, pp. 266- 277.
- [6] Simões, A., Bento, R., Gago, A., Lopes, M.: Mechanical characterization of masonry walls with flat-jack tests *Exp. Tech.*, 40 (2016) 3, pp. 1163-1178.
- [7] La Mendola, L., Lo Giudice, E., Minafo, G.: Experimental calibration of flat jacks for in-situ testing of masonry, *International Journal of Architectural Heritage*, 13 (2019) 5, pp. 619-629.
- [8] Andreini, M., De Falco, A., Giresini, L., Sassu, M.: Mechanical characterization of masonry walls with chaotic texture: Procedures and results of in-situ tests. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 8 (2014) 3, pp. 376-407.
- [9] Raineri, C., Fabbrocino, G. Operational modal analysis for the characterization of heritage structures, *Geofizika*, 28 (2011), pp.109-126.
- [10] Gade, S., Møller, N.B., Herlufsen, H., Konstantin-Hansen, H. Frequency Domain Techniques for Operational Modal Analysis, 1st IOMAC Conference, Denmark, 2005.
- [11] Foti, D., Gattulli, V., Potenza, F. Output-only identification and model updating by dynamic testing in unfavorable conditions of a seismically damaged building, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29 (2014) 9, pp. 659-675.
- [12] Foti, D., Diaferio, M., Gionnoccaro N.I., Mongelli, M.: Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower, *NDT&E International*, 47 (2012), pp. 88-95.
- [13] Pastor, M., Binda, M., Harčarik, T. Modal assurance criterion, *Procedia Engineering*, 48 (2012), pp. 543-548
- [14] Bendat, J.S., Piersol, A.G., *Random Data: Anaysis and Mesurement Procedures*, Wiley, San Francisco, CA., 1986.
- [15] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.: Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, *Smart Materials and Structures*, 10 (2001), pp. 441-445.
- [16] Raineri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E., Manfredi, G.: Implementation of OMA procedures using Labview: theory and application", 2nd International Operational Modal Analyses Conference, Copenhagen, Denmark, pp.1-12, 2007.
- [17] Gentile, C., Saisi, A.: Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction & Building Materials*, 21 (2007) 6, pp:1311-21.

- [18] Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A.C., Yıldırım, F.: Modal parameter identification of Hagia Sophia bell-tower via ambient vibration test, 28 (2009) 1, pp. 37-47.
- [19] Costa, C., Arêde, A., Costa, A., Caetano, E., Cunha, A., Magalhães, F.: Updating numerical models of masonry arch bridges by operational modal analysis, *International Journal of Architectural Heritage*, 9 (2015) 7, pp. 760-774.
- [20] Torres, W., Almazán, J.L., Sandoval, C., Boroschek R. Operational modal analysis and FE model updating of the metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. *Engineering Structures*, 143 (2017), pp. 169-188.
- [21] Aksoy, F.: Aksoy architectural office, Ballıpinar Church drawings, 2015.
- [22] Dede, R.: DE Design, Dereköy Church drawings, 2018.
- [23] ASTM Standard C1197.: Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flat jack Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [24] ASTM Standard C1531.: Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [25] ASTM Standard C1314.: Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [26] OMA.: Operational Modal Analysis, Release 4.5, Structural Vibration Solution A/S, Denmark, 2016.
- [27] Algor V20.00.: Autodesk Inc., U.S.A. 2007.