

Primljen / Received: 1.10.2014.
 Ispravljen / Corrected: 11.12.2014.
 Prihvaćen / Accepted: 3.1.2015.

Dostupno online / Available online: 10.6.2015.

Istraživanje mehaničkih svojstava ziđa povijesnih građevina

Autori:



Doc.dr.sc. **Fuat Aras**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište Medeniyyet u Istanbulu
 Građevinski fakultet
fuat.aras@medeniyyet.edu.tr



Prof.dr.sc. **Gülay Altay**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište Boğaziçi, Turska
 Građevinski fakultet
askarg@boun.edu.tr

Prethodno priopćenje

Fuat Aras, Gülay Altay

Istraživanje mehaničkih svojstava ziđa povijesnih zidanih građevina

U ovom se radu određuju mehanička svojstva ziđa povijesne palače Beylerbeyi. Primijenjen je posredan postupak jer vlasnik nije dopustio uobičajena ispitivanja. Na početku je određena mineraloška struktura prvobitno ugrađenog morta. Kasnije su pripremljeni i u laboratoriju ispitani uzorci morta i ziđa. Dobivena mehanička svojstva korigirana su dinamičkom identifikacijom da bi se odredio stvaran modul elastičnosti ziđa. U tu je svrhu obavljena analiza okolnih vibracija te je za palaču izrađen i podešen model konačnih elemenata. Na kraju su korigirani parametri čvrstoće ziđa.

Ključne riječi:

povijesne građevine, ziđe, mehanička svojstva, mineraloško ispitivanje, modalno podešavanje

Preliminary report

Fuat Aras, Gülay Altay

Investigation of mechanical properties of masonry in historic buildings

Mechanical properties of masonry from the historic Beylerbeyi Palace are analyzed in the paper. The indirect procedure was used as the owner did not allow usual testing. The mineralogical structure of the original mortar was initially determined. This was followed by preparation and laboratory testing of mortar and masonry samples. Mechanical properties obtained were corrected through dynamic identification so as to determine the real modulus of elasticity of the masonry. To this aim, an ambient vibration survey was performed, and the finite-element model of the palace was constructed and tuned. Finally, the strength parameters of the masonry were corrected.

Key words:

historic buildings, masonry, mechanical properties, mineralogical study, modal tuning

Vorherige Mitteilung

Fuat Aras, Gülay Altay

Untersuchungen mechanischer Eigenschaften des Mauerwerks historischer Mauerwerksbauten

In dieser Arbeit werden mechanische Mauerwerkeigenschaften für den historischen Palast Beylerbeyi ermittelt. Da der Eigentümer herkömmliche Prüfungen ablehnte, wurden indirekte Verfahren angewandt. Zunächst wurde die mineralogische Struktur des ursprünglichen Mörtels ermittelt. Danach wurden Mörtel- und Mauerwerksproben vorbereitet und im Testlabor untersucht. Die mechanischen Eigenschaften wurden mittels dynamischer Identifikation korrigiert, um den wirklichen Elastizitätsmodul zu bestimmen. Dazu wurden Umgebungsschwingungen analysiert und ein Finite-Elemente-Modell des Palastes wurde erstellt. Schließlich wurden die entsprechenden Festigkeitsparameter korrigiert.

Schlüsselwörter:

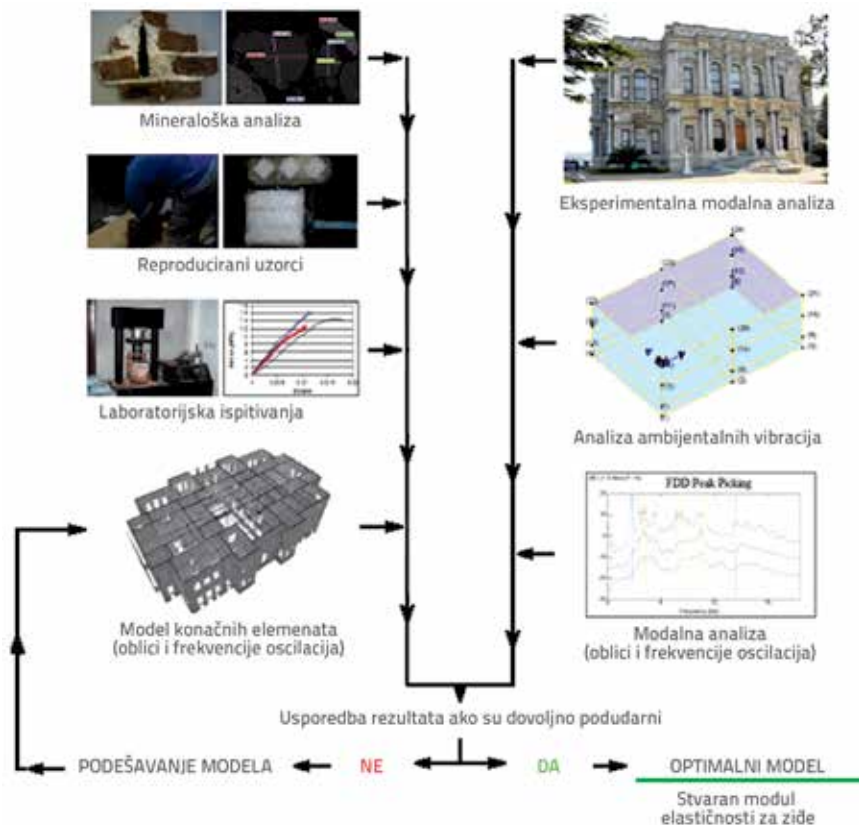
historische Bauten, Mauerwerk, mechanische Eigenschaften, mineralogische Untersuchungen, Modalanpassung

1. Uvod

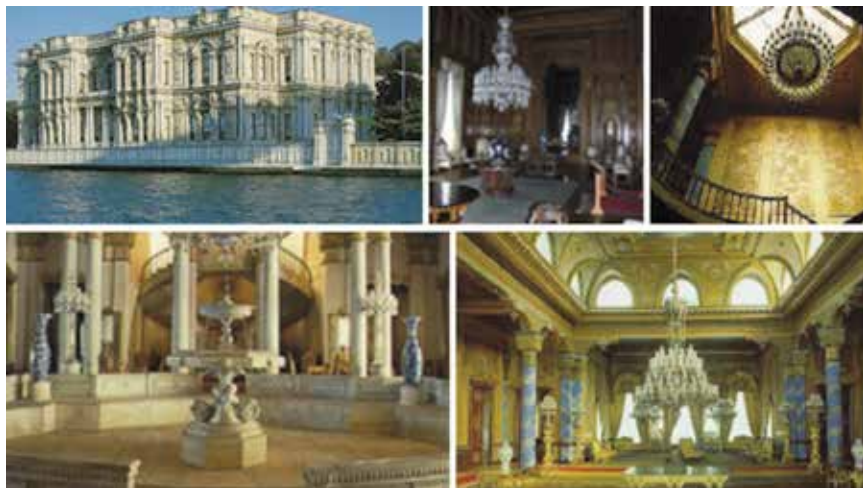
Istraživanja u ovom području smatraju se izuzetno složenima zbog poteškoća na koje se nailazi u analizi svih povijesnih građevina, isto kao i zbog ograničene mogućnosti korištenja dostupnih resursa uslijed povijesnog i arhitektonskog značaja građevina koje pripadaju kulturnom nasljeđu. U ovom se radu prikazuje istraživanje materijala od kojih je izgrađena povijesna palača Beylerbeyi. Područna uprava za nacionalne palače, kao vlasnik te palače, uskratila je izdavanje dozvole koja bi omogućila provedbu uobičajenog postupka istraživanja materijala te obavljanje odgovarajućih razornih i nerazornih ispitivanja. Zato je u ovom istraživanju primijenjen posredni postupak koji se sastoji od mineraloške analize, laboratorijskog ispitivanja i modalne identifikacije (slika 1.).

Istraživanje materijala počelo je obavljanjem kemijske i mineraloške analize ostataka morta s prvobitne konstrukcije. Taj mort podvrgnut je analizi pomoću tankih izbrusaka (TS), pretražnog (skenirajućeg) elektronskog mikroskopa (SEM), rendgenske difrakcije (XRD) i energijski razlučujuće rendgenske analize (EDX). Određena je mineraloška struktura morta te je u tom smislu mort klasificiran kao vapneni mort horasanskog tipa koji se često koristio u doba Otomanskog Carstva. Nakon toga su pripremljeni uzorci morta i ziđa da bi se ispitala i odredila osnovna svojstva materijala. Za uzorke su korištene dvije različite formule morta, prema [1, 2]. Uzorci morta pripremljeni su za ispitivanje tlačne i savojne čvrstoće, dok su uzorci ziđa pripremljeni samo za tlačna ispitivanja. Uzorci su ispitani nakon šestomjesečnog razdoblja njege.

S obzirom na to da su uzorci pripremljeni u laboratoriju, te kako ne dolaze iz prvobitne građevine, podaci dobiveni ispitivanjem smatraju se približnom ocjenom i trebaju se korigirati. Dinamička identifikacija pomoću analize okolnih (ambijentalnih) vibracija (eng. *Ambient Vibration Survey - AVS*) provedena je radi određivanja modula elastičnosti zidova od kojih se sastoji glavni nosivi sustav građevine. Tim su postupkom određena tri različita modula elastičnosti za ziđe od opeke. Na kraju je obavljena analiza parametara čvrstoće ziđa. Za mort su obavljena ispitivanja čvrstoće na savijanje, jer se ona smatraju



Slika 1. Dijagram toka korišten za istraživanje materijala



Slika 2. Palača Beylerbeyi, vanjski izgled i unutarnji prostori

najpouzdanijima. Ta su ispitivanja obavljena radi određivanja tlačne i vlačne čvrstoće ziđa.

2. Opis građevine

Palača Beylerbeyi izgrađena je u razdoblju od 1861. do 1865. godine, a smještena je u Istanbulu, na azijskoj strani Bospora [3]. To je trokatna građevina, a sastavljena je od jednog podrumskog i dva nadzemna kata. Dužina građevine (uzduž

obale) iznosi 72 m, a širina, poprečno na obalu, iznosi 48 m. Visina podrumskog kata varira od 1,5 do 2,5 m, a taj se kat djelomično nalazi ispod razine tla. Visina ostala dva kata varira od 7 do 9 m. Konstruktivni sustav građevine sastoji se od kamenih zidova i zidova od opeke te drvenih podnih konstrukcija. Na podrumskom katu nalaze se kameni zidovi širine 1,4 m, a taj sustav također predstavlja temelje čitave palače. Debljina zidova od opeke iznosi 0,8 m na prvom katu, a 0,6 m na drugom katu. Armatura od lijevanog željeza (metalne spona) ugrađena je u zidove na prvom i drugom katu.

Palača je pod zaštitom Regionalne uprave za nacionalne palače, a sada se koristi kao muzej. U njoj se nalaze dva glavna salona i brojne sobe ukrašene umjetničkim djelima, te sa slikama i rezbarijama na stropovima i zidovima. Završna obrada unutarnjih zidova sastoji se od strukturirane cementne žbuke, ukrasne strukturirane žbuke i drvenih obloga, dok je vanjska fasada obložena kufeki kamenom i vapnenom žbukom (slika 2.).

3. Mineraloška analiza originalnog morta iz palače Beylerbeyi

Nadležna državna tijela nisu dopustila uobičajena ispitivanja materijala, pa ni nerazorna ispitivanja. Međutim, ispitivanje morta ipak je omogućeno zbog oštećenja uzrokovanog metalnim sponama kojima su učvršćeni zidovi palače. Oksidiranje metalnih spona uzrokovalo je bubrenje i konačno pojavu pukotina u jednoj prostoriji palače. To oštećenje dovelo je do pojave pukotine veličine 50 x 50 cm². Na slici 3. prikazani su detalji zidova palače i oštećenje uzrokovano oksidiranjem metalnih spona. To oštećenje omogućilo je autorima prikupljanje originalnih uzoraka morta za mineraloška i kemijska ispitivanja.

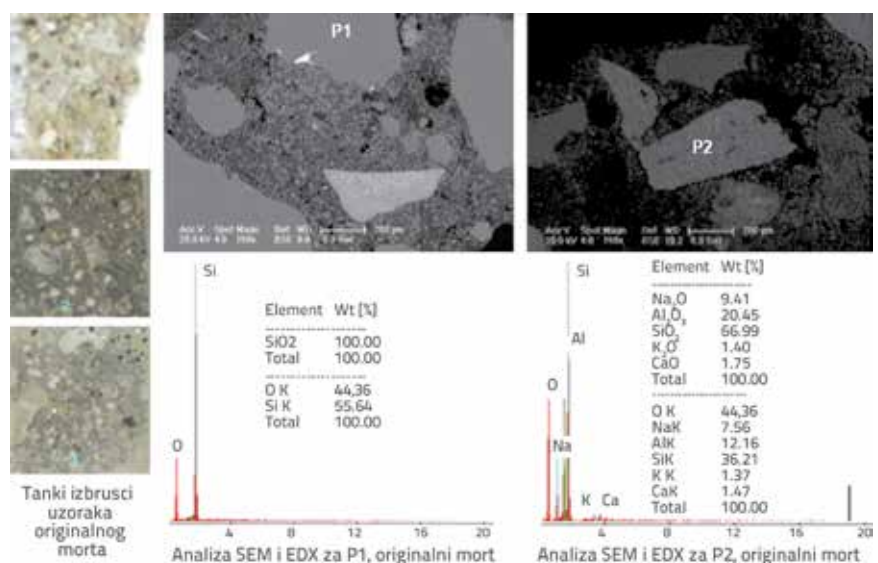
U okviru novijih postupaka za karakterizaciju morta, optička se mikroskopija primjenjuje kao prvi korak u okvirnom definiranju agregata, te u određivanju raznih mineralnih dodataka, vrste veziva, zrnatosti veziva te strukture pora. Kao najprikladniji drugi korak u analizi povijesnih mortova primjenjuje se analiza SEM u kombinaciji s analizom XRD. Pomoću SEM mikroskopa opremljenog EDX detektorom dobivaju se dragocjeni podaci o mineraloškom sastavu [4]. Oznaka EDX označava energetska disperzivnu analizu X-zrakama (eng. *Energy Dispersive X-ray - EDX*). U tu je svrhu kemijski i mineraloški sastav ostataka morta određen analizom tankog izbruska (TS), pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa – energijski razlučujućeg rendgenskog postupka (SEM-EDX), te primjenom rendgenske difrakcije (XRD).

U ovom istraživanju ispitano je pet tankih izbrusaka (TS). Ustanovljeno je da mort sadrži otprilike 60 posto vezivnog materijala, a ostalo je zrnati materijal. Taj se zrnati materijal sastoji od mineralnih čestica, čestica kvarca te jasno razlučivih čestica opeke. U drugom je koraku provedena analiza SEM u kombinaciji s analizom EDX. Analizirana su tri uzorka morta, a za to je korišten okolišni uređaj SEM tipa Philips XL30ESEM-FEG&EDAX. Ustanovljena je dobra povezanost između čestica i vezivnog materijala, te nisu nađene šupljine niti pukotine. Veličina zrna morta varira od 50 µm do 1200 µm. Analizom EDX ustanovljeno je da se čestice mogu mineraloški klasificirati kao kvarc, SiO₂. Minerali feldspata (Na, Al, K) također se lokalno uočavaju u strukturi agregata definiranoj pomoću postupka EDX. I konačno, četiri pulverizirana uzorka morta, različita od onih ispitanih pomoću prethodnih metoda, analizirana su Cu Kα zračenjem pomoću uređaja Rigaku D/Max-Ultima+/PC XRD. Prema XRD strukturi, mort se sastoji od kalcita, kvarca i feldspata. Djelomični rezultati SEM i XRD analiza prikazani su na slici 4.

U dvije slične studije, Boke i dr. [6] analizirali su mort u tri povijesna kupališta u Anatoliji, dok su Ipekogly i dr. [7] analizirali vapneni mort u medresama, povijesnim obrazovnim ustanovama. Ti su autori dobili mineraloški sastav koji odgovara sastavu određenom u palači Beylerbeyi. Još jednu studiju je izradila i Područna uprava za nacionalne palače



Slika 3. Detalji zidova palače: a) podrum, b) drugi kat, c) oštećenje zbog oksidiranja metalne spone u zidu



Slika 4. Analiza originalnog morta pomoću SEM i XRD analiza

radi određivanja karakteristika morta koji je korišten prilikom izvođenja povijesne palače Domabahce. Ustanovljeno je da su osnovne komponente uzoraka vapno, sitni pijesak, prah od opeke i mramorni prah, s tim da odnosi između tih sastojaka nisu stalni. U nekim je uzorcima nađen i vlaknasti materijal [8]. U tim je studijama mort definiran kao uobičajeni vapneni mort poznat pod nazivom horasan. Taj se mort koristio u Bizantu, a također i u doba seldžuskog i otomanskog carstva. Kao vezivo za taj mort služilo je karbonatno vapno. Kao agregat se koristio riječni pijesak, obluci, fragmenti opeke i prah od opeke, u kombinaciji sa sijenom, konjskom dlakom i jarečom dlakom, što je služilo kao vlaknasti dio morta [1, 9]. Na temelju mineraloške analize, nedavnih istraživanja i povijesnih podataka iz razdoblja kada je građevina izvedena, možemo zaključiti da se u palači Beylerbeyi upotrebljavao mort tipa horasan.

4. Laboratorijsko ispitivanje reproduciranih uzoraka

Mehanička svojstva materijala korištenih u građevini smatraju se osnovnim i vrlo značajnim ulaznim podacima za detaljnu analizu. Vrijedne se informacije mogu dobiti određivanjem odnosa između sile i deformacije. Od primarnog su značenja vrijednosti tlačne i vlačne čvrstoće, modula elastičnosti, Poissonovog koeficijenta i jedinične težine materijala [10]. U tom su smislu obavljena ispitivanja morta i žida, a u svrhu dobivanja početnih podataka za definiranje ponašanja i mehaničkih svojstava žida Palače Beylerbeyi.

4.1. Mehanička svojstva horasanskog morta proizvedenog u laboratoriju

Za pripremu uzoraka primijenjene su dvije različite formule. Prema prvoj formuli (F1), mort se sastoji od gašenog vapna, praha od opeke i vode (tablica 1.) [1]. Prema drugoj formuli (F2), koju koristi *Područna uprava za nacionalne palače* prilikom renoviranja povijesnih građevina u Turskoj [2], mort se sastoji od gašenog vapna,

praha od opeke, sitnog pijeska, vlakana i vode (tablica 2.). I u jednoj i u drugoj formuli maksimalna veličina pijeska i praha od opeke iznosi 2 mm.

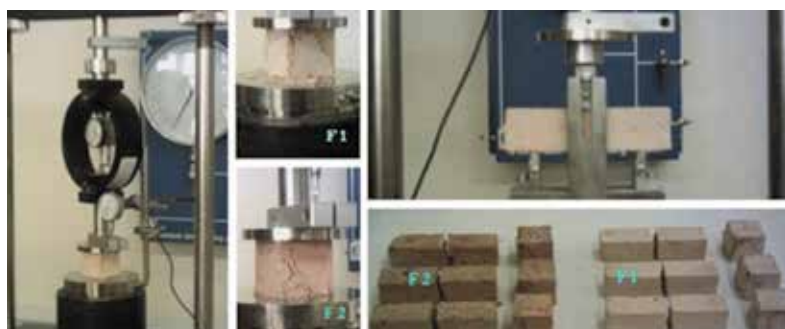
Tablica 1. Sastav mješavine morta prema formuli F1

Sastojci	Vapno	Prah od opeke	Voda
Težinski odnos	1,00	1,22	2,10

Tablica 2. Sastav mješavine morta prema formuli F2

Sastojci	Vapno	Prah od opeke	Sitni pijesak	Voda	Vlakna
Težinski odnos	4,00	4,00	2,00	1,50	0,05

Za svaku su formulu pripremljena tri kockasta uzorka (5 x 5 x 5 cm) i tri prizmatična uzorka (4 x 4 x 16 cm). Nakon šest mjeseci njege, provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje prema normi BS-EN-1015-11 [11]. Postupci ispitivanja i popuštanje uzoraka morta prikazani su na slici 5. Dijagrami naprezanja i deformacije prikazani su za tlačna ispitivanja na slici 6. Uočeno je da se pukotine u točki sloma na sličan način javljaju kod obje vrste uzoraka morta. Međutim, uočena je i izrazita razlika u pogledu otpornosti na deformacije. Također je određen i sekantni modul elastičnosti morta kao dio linije koja siječe ishodište i jednu trećinu maksimalnog naprezanja na krivulji naprezanja i deformacija za svaki uzorak. Nakon toga su po tri uzorka svakog morta ispitana na troosnom uređaju

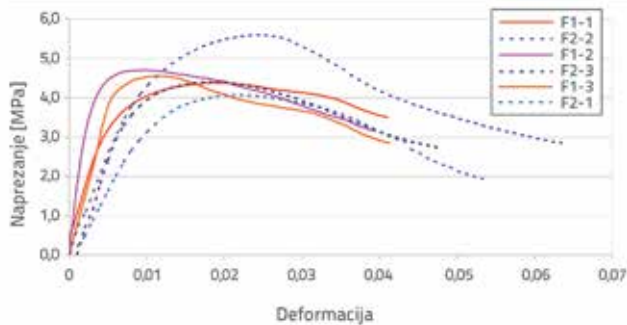


Slika 5. Laboratorijsko ispitivanje uzoraka morta

Tablica 3. Mehanička svojstva na uzorcima horasanskog-morta pripremljenim u laboratoriju

Uzorak	Tlačna čvrstoća [MPa]	Deformacija pri maksimalnom napreznju	Granična deformacija	Modul elastičnosti [MPa]	Savojna čvrstoća [MPa]
F1-1	4,37	0,019	0,041	902	1,86
F1-2	4,69	0,010	0,039	1748	1,32
F1-3	4,55	0,011	0,041	730	1,53
F1 prosjek	4,54	0,013	0,040	1127	1,57
F2-1	4,06	0,022	0,054	312	1,63
F2-2	5,59	0,025	0,064	508	1,79
F2-3	4,39	0,017	0,048	599	1,71
F2 prosjek	4,68	0,021	0,055	473	1,71

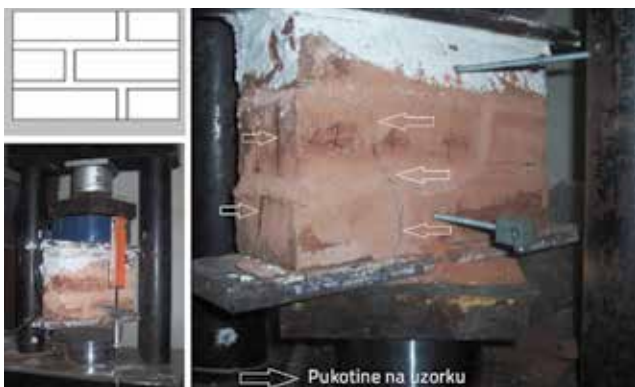
za ispitivanje savijanja (slika 5.). Uzorci su se ponašali krto i do sloma je došlo u obliku samo jedne vertikalne pukotine koja se javila točno ispod točke nanošenja opterećenja. Numeričke vrijednosti mehaničkih svojstava definiranih tijekom ispitivanja prikazane su u tablici 3.



Slika 6. Krivulje napreznja-deformacije za uzorke morta

4.2. Mehanička svojstva zidanih elemenata proizvedenih u laboratoriju, prema konfiguraciji palače Beylerbeyi

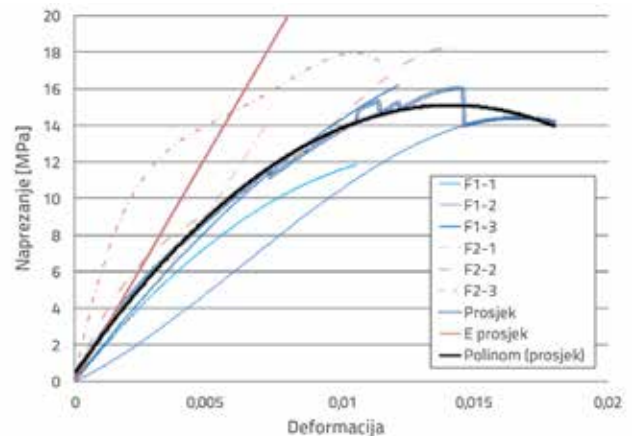
Uzorci zida pripremljeni su u laboratoriju za ispitivanje tlačne čvrstoće primjenom već spomenutih formula morta i korištenjem uobičajene opeke od pečene gline, jer originalne opeke nisu bile dostupne. Kameni se zidovi nalaze u podrumu građevine i oni nisu uzeti u obzir jer bitno ne pridonose ponašanju konstrukcije građevine. Geometrija uzoraka odabrana je na temelju originalne konfiguracije zida zapaženih na građevini. Prosječna debljina morta iznosi oko 18 mm, a visina opeke mjerena na originalnoj građevini iznosi 65 mm (slika 3.).



Slika 7. Laboratorijsko ispitivanje uzoraka zida

Uzorci korišteni u ovoj studiji pripremljeni su u skladu s normom BS-EN-1052-1 [12]. Prema uvjetima za ispitivanje tlačne čvrstoće, trebaju se ispitati barem tri uzorka 1,5 jedinične duljine i 3 jedinične visine opeke. Usvojena je jer se prvobitan raspored zidnih elemenata nije mogao odrediti. Za svaku vrstu morta pripremljena su tri uzorka zida, a ti su uzorci ispitani šest mjeseci nakon njihove pripreme. Slika 7. prikazuje geometriju uzoraka,

postupak ispitivanja i popuštanje uzoraka nakon ispitivanja. Krivulje napreznja-deformacija i njihove prosječne vrijednosti prikazane su na slici 8. Iako su poteškoće u ručnoj kontroli opterećenja tijekom pokusa dovele do promjene nagiba krivulje, prosječna je vrijednost ipak u skladu s očekivanim dijagramom napreznja-deformacija. Iz krivulja se može odrediti početni modul elastičnosti i tlačna čvrstoća.



Slika 8. Krivulje napreznja-deformacija uzoraka zida i njihove prosječne vrijednosti

Tipična tlačna čvrstoća zida f_k određena je kao manja vrijednost dobivena pomoću izraza (1a) i (1b). Osim toga, Youngov modul zida izračunan je pomoću krivulje prosječnih napreznja-deformacija. Prema Eurokodu 6 [13], tipični modul elastičnosti, E_k , definira se kao sekantni modul pri uvjetima radnog opterećenja, tj. pri trećini maksimalnog vertikalnog opterećenja:

$$f_m = \frac{f_{pros}}{1,2} \quad (1.a)$$

$$f_m = f_{min} \quad (1.b)$$

Izračunana svojstva materijala prikazana su u tablici 4. Važno je uočiti da su te vrijednosti dobivene ispitivanjem uzoraka proizvedenih u laboratoriju, nisu iz izvorne građevine. Granulometrija i pucolanska svojstva opeke znatno utječu na mehanička svojstva morta. Dobra razina hidrauličnosti morta može se postići primjenom dobro usitnjene opeke, dok čestice opeke pečene na visokim temperaturama iznad 900°C gube pucolanska svojstva [14]. Dakle, na mehanička svojstva utječu razna hidraulička svojstva čestica koje se koriste u laboratorijski pripremljenim uzorcima, po čemu se razlikuju od originalnog morta. Osim toga, opeke koje su korištene u ispitivanju nisu originalne opeke. Stoga se dobivena mehanička svojstva trebaju korigirati. Modul elastičnosti zida, iako značajan za dinamičko ponašanje građevine, korigiran je pomoću operativne modalne analize, dok je parametar čvrstoće ocijenjen i ponovno korigiran primjenom odgovarajućih formula iz literature.

Tablica 4. Mehanička svojstva uzoraka zida pripremljenih u laboratoriju

Uzorak br.	Maksimalno tlačno naprezanje [MPa]	Deformacija pri maksimalnom tlačnom naprezanju	Granična deformacija	Tlačna čvrstoća [MPa]	Youngov modul [MPa]
F1-1	11,86	0,0106	0,0106	11,8	1455
F1-2	14,43	0,0166	0,018		
F1-3	16,19	0,0121	0,0121		
F2-1	14,28	0,0073	0,0073	14,02	3545
F2-2	17,96	0,0140	0,0145		
F2-3	18,21	0,0105	0,0114		
Prosječna vrijednost	15,49	0,0119	0,0123	12,91	2500

5. Numeričke i eksperimentalne modalne analize (korekcija Young-ovog modula)

U ovom je istraživanju za korekciju Youngovog modula zidova palače primijenjen postupak utemeljen na analizi okolnih (ambijentalnih) vibracija (AVS). Tim se postupkom može iskazati velika raznolikost u palači zbog same veličine građevine, postojećih uvjeta, te metalnih spona koje su korištene za pojačanje zidova. Međutim, modalna identifikacija bazirana na numeričkim i eksperimentalnim analizama može upozoriti na varijacije modula elastičnosti zidova palače.

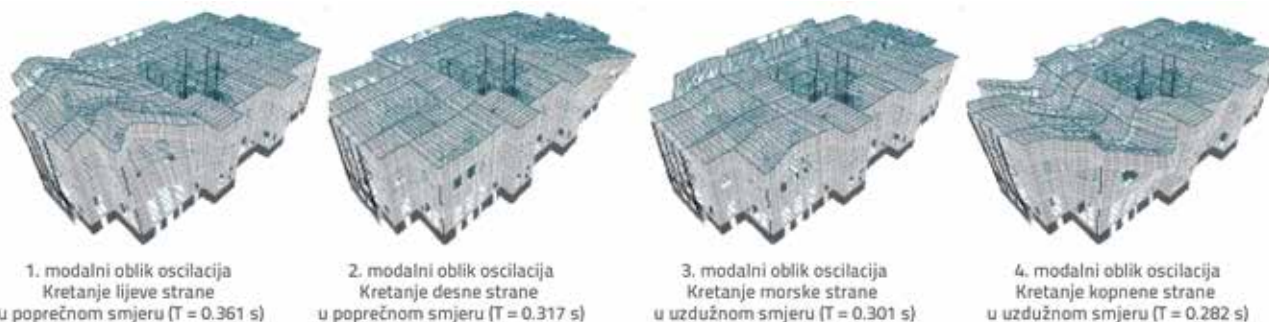
5.1. Numerička modalna analiza

Trodimenzionalni numerički model pripremljen je na temelju definirane arhitekture, nosivog sustava konstrukcije i materijalnih svojstava određenih tijekom spomenutih

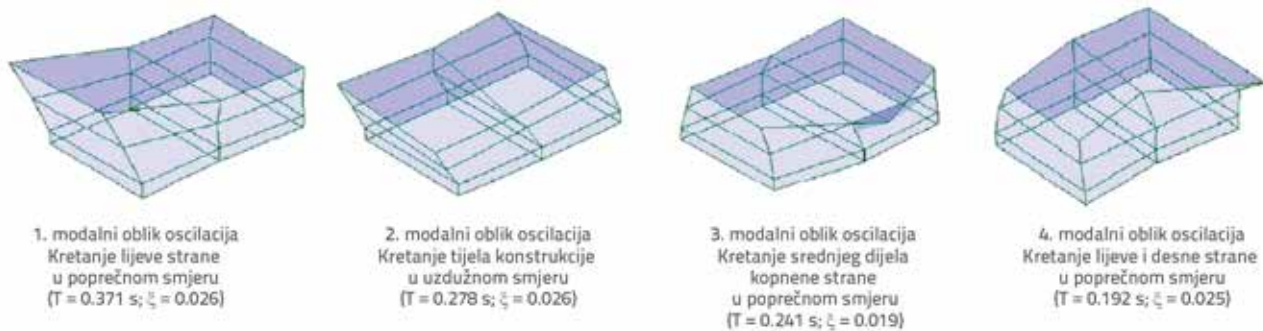
laboratorijskih ispitivanja. Zidovi su modelirani pomoću konačnih elemenata ljuske, a za stupove i elemente drvenih ploča korišteni su gredni konačni elementi. Za kontakt između elemenata drvene ploče i zidova pretpostavljen je zglobni spoj. Na temelju rezultata analize okolnih vibracija (AVS) te u skladu s geotehničkim izvještajem za palaču Beylerbeyi, pretpostavljeno je da konstrukcija ima fiksnu poduporu u podnožju [15, 16]. Numerički je model izrađen za: kameni zid (modul elastičnosti, $E = 50000$ MPa, jedinična težina, $g = 26,5$ kN/m³) [8], zid od opeke (modul elastičnosti, $E = 2500$ MPa, jedinična težina, $g = 22,4$ kN/m³), hrastove ležajne grede (modul elastičnosti, $E = 12500$ MPa, jedinična težina, $g = 7,2$ kN/m³), i grede od jele (modul elastičnosti, $E = 9700$ MPa, jedinična težina, $g = 7,2$ kN/m³) [17]. Modelom su definirana ukupno 15.662 čvora, 3.808 gredna elementa i 13.749 elementa ljuske, a analiza je obavljena pomoću programa SAP2000 [18] (slika 9.).



Slika 9. Numerički model i eksperimentalno određena geometrija građevine



Slika 10. Oblici i periodi titranja dobiveni numeričkom modalnom analizom



Slika 11. Oblici titranja i perioda dobiveni pomoću eksperimentalne modalne analize

Da bi se odredila modalna svojstva, provedena je dinamička analiza. Ritzova vektorska analiza obavljena je za šezdeset oblika oscilacije kako bi se postigao devedesetpostotni doprinos mase. Dobivena dinamička svojstva upućuju na značajne karakteristike građevine. Najvažniji nalazi su nedostatak krutih podova i raspored masa po visini palače. Osim toga, sudjelovanje debelog podrumskog poda u dinamičkim oblicima oscilacija palače uočeno je na 59-om i 60-om obliku titranja, što pokazuje da se podrum ponaša bitno drugačije od nadzemnih katova. Prva četiri oblika oscilacija građevine, dobivena numeričkom analizom, prikazana su na slici 10.

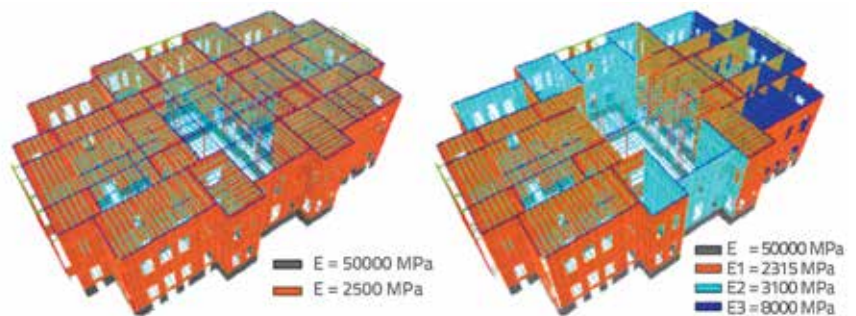
5.2. Analiza okolnih vibracija za palaču Beylerbeyi

Metoda za određivanje okolnih (ambijentalnih) vibracija popularan je i često korišten postupak za eksperimentalno definiranje dinamičkih karakteristika građevina u punoj veličini. U literaturi su opisane mnoge metode i primjene postupka za ispitivanje okolnih (ambijentalnih) vibracija i za modalno određivanje građevina [19-22]. Ovaj brzi i relativno jednostavan postupak prihvatio je i vlasnik građevine, Područna uprava za nacionalne palače, jer omogućuje ispitivanje palače Beylerbeyi bez restrikcija glede njenog korištenja.

Tri seizmometra tipa Ranger koje proizvodi Kinemetrics korištena su za mjerenje okolnih vibracija u palači. Mjerni signal pojačavao se pomoću četverokanalnog uređaja za obradu signala istog proizvođača [15]. Da bi se definirale dinamičke karakteristike palače Beylerbeyi, mjerenja vibracije obavljena su na 24 točke u građevini, po šest točaka na četiri različite razine: podrum, prvi kat, drugi kat i krov. Slika 9. prikazuje geometriju mjernih točaka i njihovu lokaciju na građevini, i na njoj se daju objašnjenja primijenjene terminologije. Program ARTEMIS korišten je za naknadnu obradu i analizu vibracija mjerenih na mjernim točkama [23]. Oblici dinamičkih oscilacija, periode i omjeri prigušenja, definirani pomoću postupka sabiranja, određeni su kako je prikazano na slici 11.

5.3. Podešavanje numeričkog modela

Postupak podešavanja provodi se da bi se na najmanju moguću mjeru svele razlike između modalnih svojstava dobivenih numeričkom analizom i postupkom AVS, i to mijenjanjem nesigurnosti numeričkog modela kao što su geometrija, rubni uvjeti i svojstva materijala. U okviru podešavanja numeričkog modela uspoređeni su oblici titranja i periode građevine, dobiveni eksperimentalnim i numeričkim ispitivanjima, te je Youngov modul zida izmijenjen u potrebnom dijelu zato što su u model točno uvršteni podaci o geometriji građevine, rubni uvjeti poput onih na poduporama i spojevima, te masa sastavnih dijelova. S druge strane, Youngov modul materijala dobiven je na temelju laboratorijskih ispitivanja koja su provedena na reproduciranim (tj. na neoriginalnim) uzorcima, pri čemu nisu u obzir uzete metalne sponne ugrađene u zidove građevine. Ovim postupkom podešavanja, detaljnije opisanim u drugoj studiji [24], dobivena su za zidove od opeke palače tri različita modula elastičnosti (slika 12.).



Slika 12. Numerički model palače Beylerbeyi prije i nakon modalnog podešavanja

Postupkom baždarenja ustanovljeno je da zidovi na lijevoj strani građevine imaju manji modul elastičnosti od onih na desnoj strani. Očito je da postoje razlozi za takvu razliku. Prvi razlog je armatura od lijevanog željeza koja je korištena u zidovima. Osim toga, uočen je i problem s oksidacijom. U tom smislu treba obratiti pažnju ne samo na upotrebu metalnih spona već i na postojeće uvjete. Kao treće, treba spomenuti i postojeći stupanj oštećenja koji bitno utječe na tu razliku. Pretpostavka da se ovo oštećenje može povezati sa smanjenjem krutosti čini

se razumna za ovu vrstu građevina, ali to je također slučaj i s građevinama koje su izgrađene od drugih materijala [22]. Studija provedena radi ocjene oštećenja pokazala je da na zidovima palače ima puno pukotina. Međutim, mnoge prostorije na lijevoj strani palače obložene su rezbarenom drvenom oblogom koja možda sakriva pukotine i druga oštećenja [2].

6. Određivanje parametara čvrstoće zidova

Vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće zidova značajni su mehanički parametri koji se koriste za ocjenjivanje ponašanja građevina. Parametri čvrstoće definirani tijekom eksperimentalnih ispitivanja također se trebaju razmotriti, jer ispitani uzorci ne dolaze iz originalne građevine. Iako je mort proizveden primjenom povijesno verificiranih formula za mort, opeke koje su korištene u ispitivanju zidova su uobičajene komercijalno dostupne opeke od pečene gline. Zbog toga se trebala obaviti odgovarajuća korekcija.

U literaturi su opisana brojna nerazorna ispitivanja provedena na raznim povijesnim zidanim građevinama [25-28]. Iako bi se dobiveni parametri čvrstoće mogli uspoređivati s tim studijama i zatim tumačiti, teško je generalizirati kada se radi o povijesnim građevinama, jer se svaka od njih odlikuje specifičnim karakteristikama. Stoga su autori ipak odlučili da ne promijene dobivene parametre čvrstoće na bazi eksperimentalnih rezultata s drugih povijesnih građevinama.

U ovom radu ispitivanja su uglavnom usmjerena na zidove i mort. Tlačna čvrstoća zidova dobivena je ispitivanjem neoriginalnih uzoraka zida izrađenih u laboratoriju na bazi povijesnog morta i standardnih opeka od pečene gline. U ovom slučaju, opeke od pečene gline očito dovode do precjenjivanja tlačne čvrstoće zida. Ispitivanja morta obavljena su na uzorcima morta izrađenima u laboratoriju primjenom povijesnih formula morta koje bi mogle biti valjane za palaču Beylerbeyi. Iako se zbog raznih razloga dobiveni rezultati mogu razlikovati od mehaničkih svojstava originalne palače [1], oni ipak predstavljaju najbolji mogući podatak u danim okolnostima. Dva poznata parametra (tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje morta) mogu se koristiti za određivanje tlačne i vlačne čvrstoće zida. U Eurokodu 6 [13] daje se tlačna čvrstoća zida (f_k) u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći morta (f_m) i opeke (f_b), kao što je to prikazano u izrazu (2). U tom bi smislu bilo nemoguće koristiti tlačnu čvrstoću morta za određivanje tlačne čvrstoće zida ako nam nije poznata tlačna čvrstoća opeke. Međutim, polovica savojne čvrstoće morta označava njegovu vlačnu čvrstoću, a ta se vrijednost također može prihvatiti kao vlačna čvrstoća zida. I na kraju, tlačna čvrstoća zida može se odrediti na bazi vlačne čvrstoće. Nakon uspostavljanja korelacija na temelju velikog broja ispitivanja, Tomažević [29] predlaže izraz (3) kojim se određuje odnos između tlačne i vlačne čvrstoće zida:

$$f_k = 0,55 \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad (2)$$

$$0,03 f_k \leq f_{tk} \leq 0,09 f_k \quad (3)$$

Kako je određeno da prosječna vrijednost čvrstoće na savijanje uzoraka morta iznosi 1,64 MPa, vlačna čvrstoća morta jednaka je polovici njegove čvrstoće na savijanje (0,82 MPa). Smatra se da je vlačna čvrstoća zida jednaka vlačnoj čvrstoći morta pa je konačno određeno da tlačna čvrstoća zida iznosi 10 MPa pod pretpostavkom da je $f_{tk} = 0,08 f_k$. Ova vrijednost (10 MPa) također je za 35 posto niža od prosječne tlačne čvrstoće određene ispitivanjima u laboratoriju.

Modul elastičnosti također se može odrediti na bazi tlačne čvrstoće. S obzirom na to da modul elastičnosti nije određen u laboratoriju, može se primijeniti izraz (4), prema EC 6 [13]:

$$E = 1000 f_k \quad (4)$$

Međutim, Tomažević navodi da su vrijednosti modula elastičnosti koji se procjenjuje prema izrazu (4) ponekad daleko od stvarnih vrijednosti [29]. Stvarne vrijednosti variraju od 200 f_k do 2000 f_k , izraz (5):

$$200 f_k \leq E \leq 2000 f_k \quad (5)$$

Izrazom (5) provjerene su vrijednosti modula elastičnosti koje su dobivene postupkom AVS. Čak se i najviša vrijednost, tj. 8000 MPa, čini prihvatljivom. Osim toga, vrijedi uzeti u obzir i nesigurnost u vezi s metalnim sponama.

7. Zaključak

Ispitivanja predložena u ovom radu, provedena radi određivanja mehaničkih svojstava zida u Palači Beylerbeyi bez ugrožavanja njene konstrukcije, dovela su do sljedećih spoznaja.

Prema mineraloškoj analizi originalnih ostataka morta iz palače, dotični se mort sastoji od vapna, opečenog praha i pijeska. Na temelju nedavno provedenih studija, vapneni mort iz palače Beylerbeyi može se klasificirati kao povijesni horasanski mort koji je korišten u doba Otomanskog Carstva. Laboratorijskim je ispitivanjima utvrđen odnos između sile i deformacija za mort i zide. Ispitani na reproduciranim uzorcima, ti odnosi mogu poslužiti za predviđanje općeg ponašanja materijala.

Za ovu su građevinu provedene i eksperimentalne i numeričke modalne analize. Nedostatak krutih ploča i raspodjela mase po visini građevine smatraju se ključnim elementima koji određuju modalno ponašanje građevine. Postupak podešavanja pokazao je da je modalno ponašanje palače dobro predstavljeno pomoću tri različita modula elastičnosti ($E_1 = 2315$ MPa, $E_2 = 3100$ MPa i $E_3 = 8000$ MPa) za zidove od opeke na prvom i drugom katu građevine. Podatak o čvrstoći na savijanje morta korišten je za dobivanje vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće zida, koje iznose 0,82 MPa tj. 10 MPa.

Zahvale

Ova istraživanja provedena je u okviru znanstvenog projekta FP6, Zaštita povijesnih građevina pomoću miješanih

reverzibilnih tehnologija (PROHITECH). Autori iskreno zahvaljuju prof. dr. Federicu M. Mazzolaniju (Sveučilište u Napulju, Federico II), prof. dr. Ljubomiru Taskovu, prof. dr. Lidiji Krstevskoj (IZIIS, Skoplje), prof. dr. Fahriju Esenliju i Orhanu Yavuzu (I.T.U. Fakultet

rudarstva), Yunusu Aydın (Područna uprava za nacionalne palače) i Harunu Yukselu (ciglana). Zahvale na brižnosti i pomoći također se upućuju i laboratorijskom osoblju sa Sveučilišta Boğaziçi i s istambulskog tehničkog sveučilišta.

LITERATURA

- [1] Akman, M.S., Güner, A., Aksoy, I.H.: The history and properties of khorasan mortar and concrete. *Turkish and Islamic Science and Technology in the 16th Century*, ITU Research Centre of History of Science and Technology 1986; 1, pp. 101-112.
- [2] Aras, F.: Earthquake protection of Beylerbeyi Palace by reversible mixed technologies. PhD. Thesis, Boğaziçi University, Istanbul (2007).
- [3] Yücel, İ.: Beylerbeyi Palace. T. B. M. M., Department of National Palaces, Istanbul (1993).
- [4] Elsen, J.: Microscopy of historic mortars-a review, *Cem Concr Res*, 2006; 36, pp. 1416-1424, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.006>
- [5] Aras, F.: Damage Assessment and mortar identification in Beylerbeyi Palace, *Gazi University Journal of Science*, 23 (2010)2, pp. 211-226.
- [6] Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., Uğurlu, E.: Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters, *Cem Concr Res*, 2006; 36, pp. 1115-1122, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.011>
- [7] İpekoğlu, B., Böke, H., Çizer, Ö.: Assessment of material use in relation to climate in historical buildings, *Build Environ*, 2007; 42, pp. 970-978, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.029>
- [8] Yüzer, E., Görür, N., Gürdal, E., Vardar, M.: Dolmabahçe Sarayında kullanılan taşların korunmuşluk durumlarının ayrışma nedenlerinin belirlenmesi ve koruma ve onarım yöntemelerinin saptanması, ITU Geliştirme Vakfı: Report No: 01-103, Istanbul (2000).
- [9] Arioglu, N., Acun, S.: A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters, a staging system approach, *Build Environ*, 2006; 41, pp. 1223-1230, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.015>
- [10] Asteris, P.G., Tzamtzis D., Vouthouni P.P.: Sophianopoulos D.S., Earthquake resistant design and rehabilitation of masonry historical structures, *Pract Period Struct Des Constr*, 2005; 10, pp. 49-55, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2005\)10:1\(49\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2005)10:1(49))
- [11] BS-EN-1015-11: Methods of test for mortar for masonry-Part 11: Determination of exural and compressive strength of hardened mortar, 1999.
- [12] BS-EN-1052-1: Methods of test for masonry-Part 1: Determination of compressive strength, 1998.
- [13] Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1.1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, European Committee for Standardization, ENV 1996-1-1:1995, 1995.
- [14] Baronio, G., Binda, L.: Study of the pozzolanicity of some bricks and clays, *Const Build Mater*, 1997; 11, pp. 41-46, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(96\)00032-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(96)00032-3)
- [15] Krstevska, L., Taskov, L.: Ambient Vibration Measurements of Beylerbeyi Palace, IZIIS Report No: 2006-030, Skoplje (2006).
- [16] Eren, R.H., Oktay, F.Y., İlkisik, O.M.: Beylerbeyi Sarayı Jeolojik/Jeoteknik Etüt Raporu, Regional Directorate of National Palaces, Report no. 05-528, Istanbul (2005).
- [17] Bozkurt, A.Y., Goker, Y.: Fiziksel ve mekanik ağaç teknolojisi. Istanbul University Press, Istanbul (1996) (in Turkish).
- [18] SAP2000. Structural Analysis Program-Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Analysis Reference, Berkeley, California, 2006.
- [19] Ivanovic, S.S., Trifunac, M.D., Novikovic, El Gladkovic A.A., Todorovska M.I.: Ambient vibration tests of a seven-story reinforced concrete building in Van Nuys, California, damaged by the 1994 Northridge earthquake, *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2000; 19, pp. 391-411, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00025-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00025-7)
- [20] Gentile, G., Saisi, A.: Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment, *Constr Build Mater*, 2007; 21, pp. 1311-1321, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007>
- [21] Bayraktar, A., Altunisik, A.C., Birinci F., Sevim B., Türker T.: Finite-Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, *J Perform Constr Facil*, 2010; 24 (1), pp. 46-52, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000060](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000060)
- [22] Ramos, L.F., Marques, L., Lourenco, P.B., DeRoeck, G., Campos-Costa, A., Roque, J.: Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies, *Mech Syst Sig Process*, 2010; 24, pp. 1291-1305, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.01.011>
- [23] ARTEMIS. Extractor Pro software, Structural Vibration Solutions ApS. NOVI Science Park, Niels Jernes Vej 10, DK 9220 Aalborg East, Denmark 2004.
- [24] Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., Taskov, L.: Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace, *Constr Build Mater*, 2011; 25, pp. 81-91, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.054>
- [25] Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C.: Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries, *Constr Build Mater*, 2000; 14, 199-233, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00018-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00018-0)
- [26] Baronio, G., Binda, L., Tedeschi, C., Tiraboschi, C.: Characterization of the materials used in the construction of the Noto Cathedral, *Constr Build Mater*, 2003; 17, pp. 557-571, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.08.007>
- [27] Pohle, F., Jager, W.: Material properties of historical masonry of the Frauenkirche and the masonry guideline for reconstruction, *Constr Build Mater*, 2003; 17, pp. 651-667, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00062-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00062-X)
- [28] İspir, M., Demir, C., İlki A., Kumbasar, N.: Material Characterization of the Historical Unreinforced Masonry Akaretler Row Houses in Istanbul, *J Mater Civ Eng*, 2010; 22, pp. 702-713, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000071](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000071)
- [29] Tomazevic, M.: Earthquake-resistant design of masonry buildings, Series of innovation in structures and construction, Imperial College Press, London (1999).