

Primljen / Received: 26.11.2014.

Ispravljen / Corrected: 13.12.2015.

Prihvaćen / Accepted: 27.3.2016.

Dostupno online / Available online: 10.8.2016.

Analiza konstrukcije povijesnih građevina iz arhitektonskog i građevinskog aspekta

Autori:



Doc.dr.sc. **Ferit Cakir**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Yildiz, Turska
Arhitektonski fakultet
cakirf@yildiz.edu.tr



Doc.dr.sc. **Fazilet Kocyigit**, mag.pov.umj.
Sveučilište u Amasyji, Turska
Arhitektonski fakultet
fazilet.kocyigit@amasya.edu.tr

Stručni rad

Ferit Cakir, Fazilet Kocyigit

Analiza konstrukcije povijesnih građevina iz arhitektonskog i građevinskog aspekta

Povijesne građevine značajan su dio svjetske kulturne baštine i trebaju se na siguran način sačuvati za buduće naraštaje. Interdisciplinarni pristup izuzetno je važan za očuvanje i restauraciju zidanih građevina. Imajući to na umu, u radu se s aspekta povijesti umjetnosti i stabilnosti konstrukcije razmatra medresa Gok, građevina stara 750 godina, smještena u Amasyji u Turskoj. U radu je provedena analiza dekorativnih elemenata iz povijesno-umjetničkog aspekta te detaljna prostorna analiza konstrukcije metodom konačnih elemenata.

Ključne riječi:

antički ornamenti, povijesna građevina, metoda konačnih elemenata, zidane konstrukcije, ponašanje konstrukcije

Professional paper

Ferit Cakir, Fazilet Kocyigit

Architectural and structural analysis of historical structures

Historical structures are integral to the cultural heritage of the world and ought to be safely preserved for posterity. An interdisciplinary approach is critical in the conservation and restoration of masonry structures. Taking this into consideration, this study discusses Gok Madrasah, a 750 year-old structure situated in Amasya, Turkey, in terms of art history and structural engineering. An analysis of decorative elements is made in the paper from an art-history aspect, and a detailed three-dimensional finite element analysis of the structure is conducted.

Ključne riječi:

antique ornaments, historical structure, finite-element method, masonry structures, structural behavior

Fachbericht

Ferit Cakir, Fazilet Kocyigit

Architektonische und baustatische Analyse historischer Bauwerke

Historische Bauwerke stellen einen bedeutenden Teil des Kulturerben dar und sollen auf sichere Weise für zukünftige Generationen erhalten werden. Interdisziplinäre Lösungen sind ausgesprochen wichtig für die Erhaltung und Restaurierung von Mauerwerksbauten. Daher werden in dieser Arbeit kunstgeschichtliche und bautechnische Aspekte der Medresse Gok, eines 750 Jahre alten Bauwerkes in Amasya in der Türkei, untersucht. Die Arbeit umfasst Analysen dekorativer Elemente vom kunsthistorischen Aspekt, sowie eine detaillierte räumliche Analyse des Tragwerks mittels der Finite-Elemente-Methode.

Ključne riječi:

antike Ornamente, historische Bauwerke, Finite-Elemente-Methode, Mauerwerkskonstruktionen, Verhalten von Konstruktionen

1. Uvod

Izraz "medresa" je arapski pojam koji označava "vjersku školu". U medresama se polaznici posebno poučavaju o vjerskim zakonima i islamskoj teologiji. Koncept medrese poznat je i koristi se već više od tisuću godina. U Turskoj nalazimo velik broj takvih građevina. Vrijedi napomenuti da su one u antičko doba bile najznačajnija obrazovna središta. Brojne su medrese izgrađene u Turskoj i to naročito u doba Seldžučkog carstva, Anatolijskog Seldžučkog carstva i Otomanskog carstva.

Mnoge turske medrese bile su građene u čast nekadašnjih vezira i sultana. Stoga su se medrese smatrale jednim od najznačajnijih i najprestižnijih građevina. I danas se deseci tih zdanja još uvijek koriste diljem Turske za razne namjene. Mnoge imaju status spomenika državne vrijednosti. Te se građevine cijene kao zajedničko naslijeđe ljudskog roda čije je očuvanje, utemeljeno na prikladnim restauratorskim postupcima, od sveopće važnosti jer nam omogućuje da to značajno naslijeđe ostavimo generacijama koje dolaze.

Za dobro razumijevanje načina ponašanja konstrukcija povijesnih građevina potrebni su podaci o njihovim nosivim elementima. Ti su podaci naročito važni za razumijevanje njihovih potreba za restauracijom i očuvanjem, naročito u seizmički aktivnim područjima. Stoga znanstvenici veliko značenje pridaju povijesnim građevinama i njihovim nosivim svojstvima. Autori brojnih studija u svojim su radovima istražili ponašanje statičkih sustava raznih vrsta povijesnih građevina [1-9]. Međutim, medrese i njihovi statički sustavi još nisu bili predmet opsežnijih istraživanja i analiza. Stoga je u ovom radu osnovna usmjernost na Medresu Gok, tj. na njena arhitektonska svojstva i obilježja nosivog sustava.

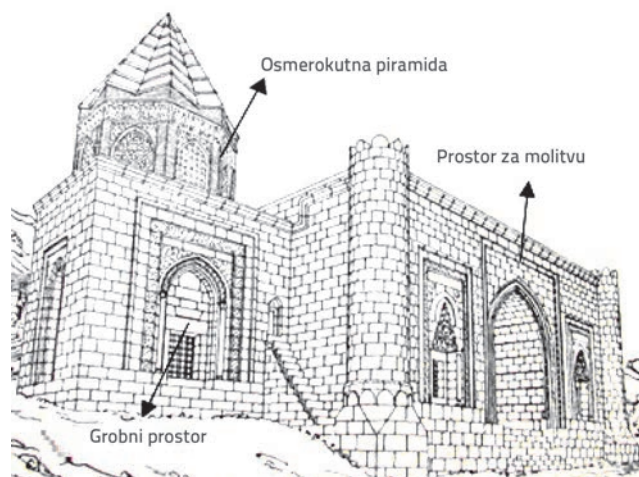
2. Opis povijesne građevine - Medresa Gok

2.1. Uvodni opis

Amasya je značajno gradsko središte smješteno u središnjoj crnomorskoj regiji Turske. Ona je jedno od najstarijih naselja u Anatoliji, a može se pohvaliti veličanstvenom poviješću koja seže još od doba hetitske civilizacije [10]. Taj grad je bio odan domaćin brojnim civilizacijama i kulturama. Amasya je bila prijestolnica mnogih carstava o čemu i danas svjedoče brojne građevine koje su odraz moći davno prošlih civilizacija. Brojni spomenici kao što

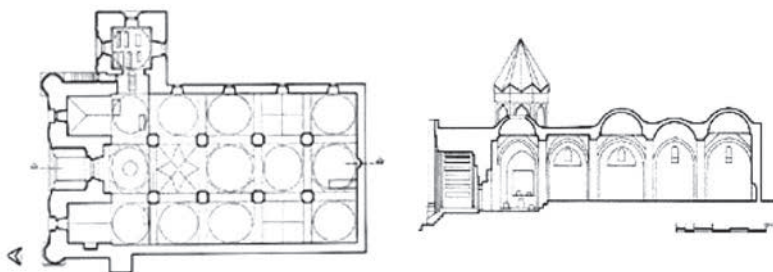
su džamije, grobnice, medrese, karavansaraji, bazari, hanovi, kupatila, mostovi i paviljoni upućuju na preklapanje raznih kultura, a mnogi od njih se smatraju vrijednim arhitektonskim zdanjima. Amasya sa svojim bogatim kulturnim naslijeđem ponajviše se može opisati kao kulturno odredište. Ona se smatra visokovrijednim antičkim gradom ne samo u okvirima Turske, već i na svjetskoj razini, i to ponajviše zbog svojih prirodnih, povijesnih i arheoloških bogatstava i znamenitosti.

Medresa Gok (u doslovnom prijevodu: nebeska ili plava medresa) smatra se jednim od najznačajnijih primjera kulturnog naslijeđa grada Amasyje. Ta je medresa podignuta na središnjoj lokaciji ovog povijesnog grada. Kako se kao materijal za gradnju koristila plava glazirana opeka, građevina je dobila naziv Medresa Gok (tj. nebeska ili plava medresa, slike 1. i 2.). S obzirom na to da nema natpisne ploče, nije nam poznat točan datum gradnje ovog zanimljivog zdanja. Međutim, prema njenim pokroviteljima, izgleda da je medresu izgradio Seyfeddin Torumtay, koji je bio guverner Amasyje u seldžučkom razdoblju.



Slika 1. Pogled na Medresu Gok [11]

Jedini natpis pronađen na građevini nalazi se na drvenim vratima koja su sada eksponat u muzeju grada Amasyje. Natpis sadrži sljedeće riječi "Min Amel'i Abu's Silm El-Neccar" (napravio tesar Abu's Silm) pisane tulutskim pismom (a to je vrsta arapskog pisma poznata kao "Sülüs" u Turskoj). Gabriel [11] i Husamettin [12] smatrali su da je tesar čije se ime spominje na vratima ujedno bio i graditelj Medrese Gok.



Slika 2. Tlocrt, presjek i pogled na Medresu Gok [14]



Međutim, kako i piše na natpisu, Abu's Silm je bio samo tesar koji je izradio vrata [13].

Iako se Medresa Gok sada koristi kao džamija, točna namjena za koju je ova građevina prvobitno izgrađena još uvijek nije poznata. Osim toga, nema ni točnih podataka o tome kada se zapravo građevina prestala koristiti kao medresa. Može se pretpostaviti da su se obrazovne aktivnosti prestale provoditi u Medresi Gok, kao i u drugim medresama u Republici Turskoj, nakon što je 3. ožujka 1924. godine proglašen zakon o jedinstvenom obrazovanju. Mnogi turski znanstvenici danas vjeruju da je građevina prvobitno bila izgrađena kao džamija uglatog tipa (mali islamski samostan, poznat i kao kutna dvorana ili dvorana za molitve, na arapskom Zawiya, a na turskom: Zaviye). Uz to, prema drugoj studiji, građevina je bila izvedena kao opservatorij i služila je kao medresa za astronomiju poput Medrese Cacabey u Kirsehiru u Turskoj [15, 16]. Treba također napomenuti da je, prema Hüsameddinu [12], na sjevernoj strani građevine bilo smješteno mnogo malih prostorija izvedenih od lomljenog kamena. Na istočnoj strani građevine nalazila se učionica koja je bila izvedena kao oktogonal bez krova [12].

2.2. Arhitektonska obilježja građevine

Iako je Medresa Gok izuzetno složena građevina, može se reći da je po svojoj arhitekturi ipak vrlo jednostavna. Oblik zidane građevine smatra se jednim od najznačajnijih faktora za određivanje ponašanja konstrukcije pri opterećenju. Stoga je u prvoj fazi ovoga rada provedena arhitektonska analiza. Prema rezultatima te analize, medresa se sastoji od tri osnovna dijela. Prvi dio je prostor za molitvu, drugi dio je grobni prostor, a treći dio je osmerokutna piramida iznad grobnice [12]. Portal (krunski ulaz) na sjevernoj strani, izveden kao ajvan, služi kao ulaz i vodi do prostora za molitvu. Portal je omeđen pravokutnim okvirom koji je ukrašen s polovicom šestokrake zvijezde. U portalnom dijelu ajvan se sastoji od trodijelnog okvira. Vanjski je okvir ukrašen geometrijskim motivima. Unutarnji okvir ukrašen je motivima tipa "guilloche", koji su u Turskoj poznati pod nazivom "Zencirek". Na obje strane portala nalazimo dvije kolonade.



Slika 3. Dekorativni konstrukcijski elementi

Dva simetrična pravokutna prozora smještena su na prednjem pročelju građevine. Gornje strane prozora, koji su omeđeni okvirom s geometrijskim motivima, ukrašene su nišama tipa mukarnas (dekorativni stalaktiti tipični za islamsku arhitekturu). Objе strane niša ukrašene su dvjema kolonadama s geometrijskim motivima (slika 3.). Kutovi kolonada obrađeni su dekorativnim ispupčenjima koji su u Turskoj poznati pod nazivom "Kabara". Vanjski dijelovi prozorskog okvira obrađeni su tehnikom gravure. Gravirani motivi nisu simetrični i čini se da nisu dovršeni. Uz glavna ulazna vrata smještena na sjevernom pročelju, na istočnom pročelju postoje i još jedna manja ulazna vrata.

Prema Gabrielu, u središnjem dijelu prve kupole nalazi se kružni otvor i drenažni odvod koji je ukrašen motivom osmokrake zvijezde. Taj se ukras nalazi na podu ispod prve kupole. Danas su drenažni otvori još uvijek prisutni, ali ih nema u kružnim otvorima.

Mihrab je niša usmjerena prema Meki a nalazi se na južnom dijelu građevine. Ostaci žbuke upućuju na to da mihrab nije originalna konstrukcija. Sadašnji mihrab izveden je od gipsane žbuke i obojen je žutom uljanom bojom. Pretpostavlja se da je izveden 1963. godine tijekom restauratorskih radova [13]. Mihrab je prekriven okvirom koji je ukrašen geometrijskim motivima i mukarnasima. Objе strane mihraba ukrašene su dvjema kolonadama s geometrijskim motivima.



Slika 4. Osmerokutni piramidalni prostor

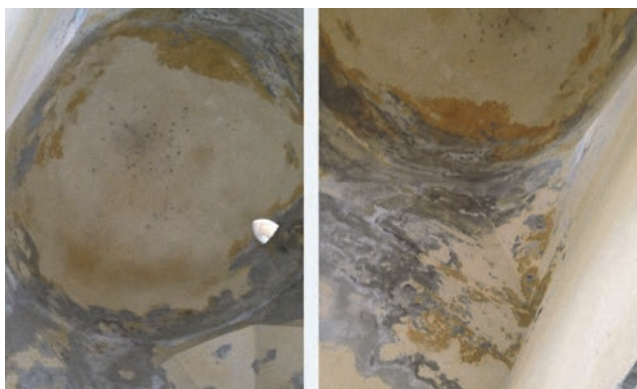
Grobni se prostor nalazi sjeveroistočno od prostora za molitvu. Poznato je da je grobni dio prvobitno služio kao učionica ali je naknadno prenamijenjen u grob za rodbinu Torumtaya,

seldžučkog emira [16, 17]. Radi se o dvokatnom prostoru pravokutnog oblika: u prizemlju je grobnica, a u podrumu je grobna komora. U prizemlju je smješteno šest sarkofaga (sanduka) za koje se smatra da su postavljeni iznad groba neke poznate osobe. Iako je podrumski dio sada prazan, u njemu se - prema navodima starijih stanovnika Amasyje - prije nalazilo nekoliko grobova. Gabriel [11] je zapisao da se ulaz u grobni prostor nalazio na vanjskoj strani građevine. Međutim, nema nikakvih dokaza da se u grobni prostor ulazilo izvana. Također se pretpostavlja da je sadašnji ulaz u grobni prostor, koji gleda prema zidu prostora za molitvu, izgrađen naknadno jer po obliku ne odgovara koncepciji građevine.

Osmerokutna se piramida nalazi iznad grobnice, sjeveroistočno od prostora za molitvu. Taj je prostor najspektakularniji dio građevine. Tu se nalaze plave glazirane opeke po kojima je medresa dobila ime (slika 4.). Iako je uništena većina geometrijskih ukrasa koji su se nalazili u piramidalnom prostoru, neki od njih su ipak sačuvani. Osnovna namjena ove građevine nije poznata.

2.3. Terenska istraživanja i uočena oštećenja

U drugoj su fazi autori obavili istraživanja na mjestu gradnje da bi odredili sadašnje stanje i probleme nosivog sustava na građevini. Što se tiče materijala za građenje, medresa je izvedena od lomljenog kamena i pune opeke. Za vezu između kamena korišten je tradicionalni mort. Unutarnji dio medrese obložen je tradicionalnom žbukom (slika 5.). Kako je žbuka podložna ljuštenju, razumljivo je da su kupole građevine izvedene od pune opeke, a donji dijelovi konstrukcije od lomljenog kamena.



Slika 5. Ljuštenje žbuke

Tijekom svog postojanja medresa je doživjela brojna oštećenja, i to kako zbog okolišnih faktora i prirodnih nepogoda, tako i zbog intervencije čovjeka. Zapravo je građevina bila obnovljena primjenom različitih materijala kao što su kamen i mort, ali joj konstrukcija nije ojačana u tehničkom smislu. Međutim, ti neprikladni popravci uzrokovali su dodatna konstrukcijska oštećenja. Vidljivi znakovi propadanja konstrukcije ispitani su s aspekta konstrukcijskih pokazatelja i arhitektonskih svojstava.

Materijali ugrađeni u konstrukciju s vremenom su propali, a faktori okoline uzrokovali su dodatno propadanje (slika 6.). Osnovni problemi građevine su oštećenje konstrukcijskih elemenata, gubitak materijala i smanjene nosivosti konstrukcije. Mort kojim su bili vezani kameni elementi na glavnoj fasadi konstrukcije djelomično je propao (slika 7.), a i u samom su kamenu uočene brojne nepravilne mikropukotine.



Slika 6. Propadanje materijala ugrađenog u konstrukciju



Slika 7. Lokalna oštećenja morta između kamenih elemenata

Vezni materijal između kamenih elemenata djelomično se isprao. Medresa je najviše oštećena u zoni osmerokutne piramide. U nekim se slučajevima abrazivna djelovanja i oštećenja uočavaju na kamenim elementima zidane fasade. Osim toga, na medresu su nepovoljno utjecale prirodne nepogode i destruktivno djelovanje čovjeka (slika 8.). Neka od tih oštećenja izuzetno su opasna jer mogu uzrokovati destruktivne pukotine i konačno lomove. Uz to, mogući su i diferencijalni pomaci komponenata medrese. Zbog toga se problemu tih oštećenja treba pristupiti s dužnom pažnjom, te se trebaju poduzeti potrebne mjere da bi se izbjegle ili umanjile štetne posljedice.



Slika 8. Duboke pukotine na osmerokutnoj piramidi

Prosječna vlačna čvrstoća iznosila je 7,55 MPa. Vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene za opeku varirale su od 15,85 do 19,32 MPa, a prosječna vrijednost iznosila je 17,49 MPa.

Vlačna čvrstoća varirala je od 2,64 MPa do 2,82 MPa, a prosječna vrijednost iznosila je 2,69 MPa [9]. Mehanička svojstva korištena u svim numeričkim analizama ukratko su prikazana u tablici 1.

3. Numerička analiza konstrukcije

3.1. Karakteristika materijala

Mehanička svojstva kamena i opeke ispitivali su Seker i dr. [9]. U njihovoj se studiji analizira slučaj Džamije Kara Mustafa Pasha koja se nalazi u Amasyjskom okrugu Merzifon. Analizirana su mehanička svojstva građevnih materijala (slika 9.). Smatra se da se rezultati ispitivanja tih materijala mogu primijeniti i na materijale koji su korišteni u Medresi Gok.

Vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene laboratorijskim ispitivanjima varirale su između 43,96 i 57,19 MPa. Prosječna tlačna čvrstoća iznosila je 50,92 MPa. Vrijednosti vlačne čvrstoće iznosile su od 7,45 MPa do 7,61 MPa.



Slika 9. Mehaničko ispitivanje materijala

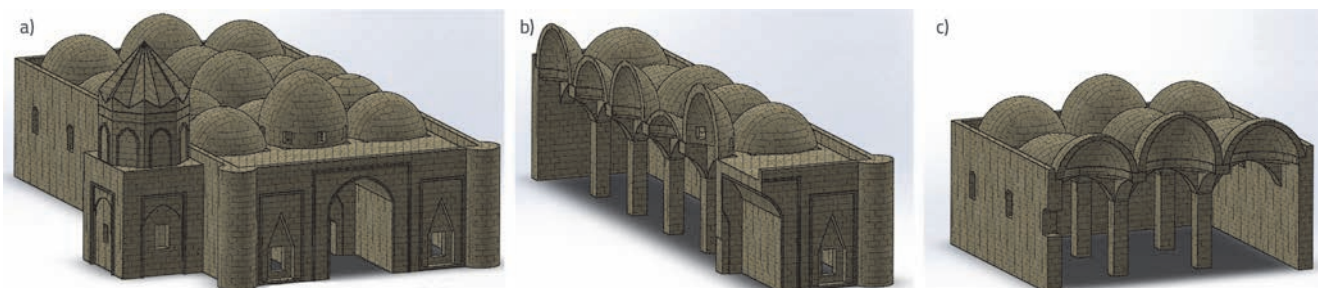
Tablica 1. Svojstva materijala

Materijali	Modul elastičnosti [MPa]	Poissonov koeficijent	Gustoća [kg/m ³]
Kamen	10000	0,17	2358
Opeka	3500	0,15	2037

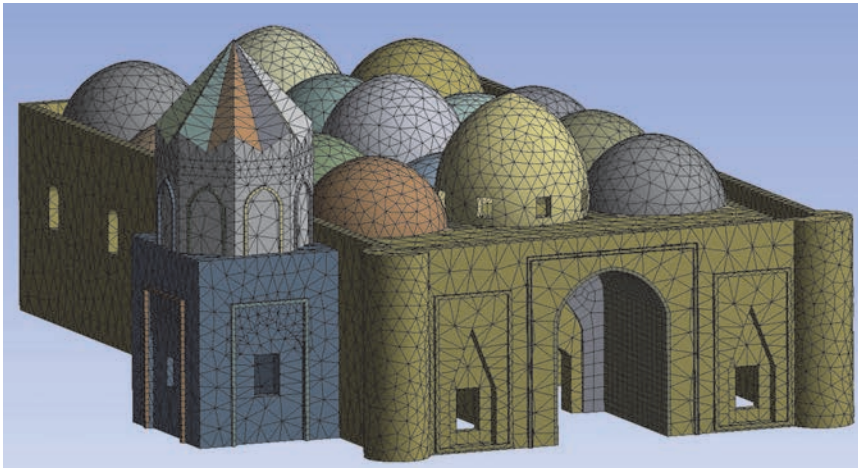
3.2. Numerički model

U slučaju Medrese Gok, najkritičniji dio proračuna konstrukcije bio je uspostaviti numerički model temeljen na metodi konačnih elemenata. Numerički model trebao bi predstavljati konstrukciju koja je predmet analize. U ovom je radu izrađen trodimenzionalni model konačnih elemenata temeljen na geometriji i na stanju konstrukcije građevine (slika 10.).

Model konačnih elemenata izrađen je za građevinu Gok primjenom računalnog programa temeljenog na metodi konačnih elemenata ANSYS Workbench [18]. U numeričkom modelu, konstrukcija sadrži 135311 čvorova i 55373 volumna elementa (Solid186), koji su imali 20 čvorova i tri stupnja slobode po čvoru. Numerički model Medrese Gok prikazan je na slici 11. U ovom radu analiza uglavnom obuhvaća volumne elemente. Uz to, u radu se razmatraju



Slika 10. a) Trodimenzionalni model; b) Uzdužni presjek; c) Poprečni presjek konstrukcije



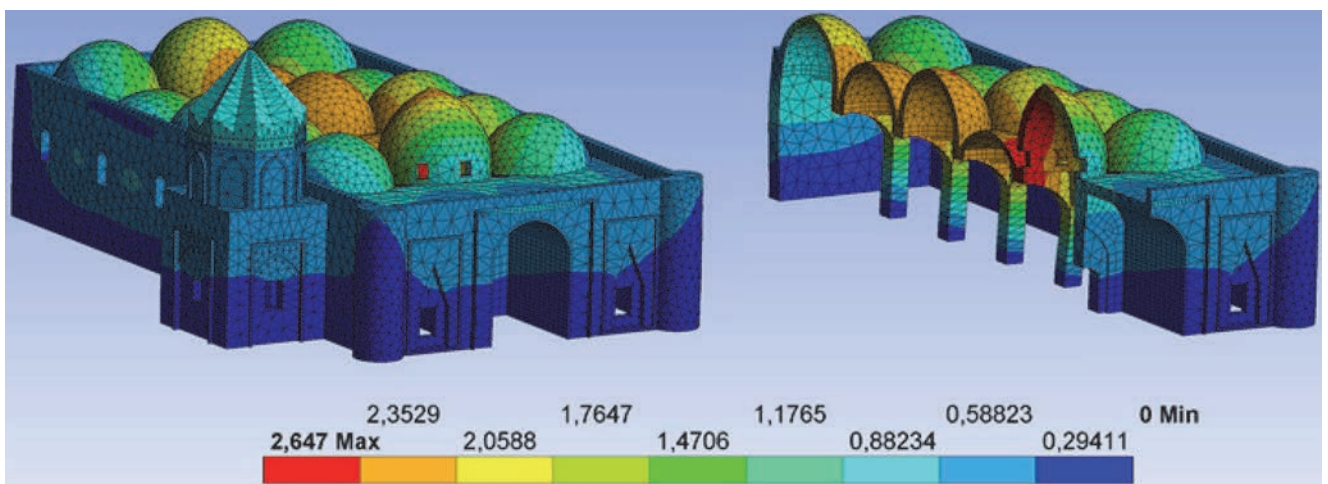
Slika 11. Model konačnih elemenata analizirane konstrukcije

samo problemi vrlo malih deformacija, tj. slučajevi u kojima su deformacije i opterećenja u linearnom odnosu. Stoga se razmatra linearno elastično ponašanje materijala, a zanemaruje

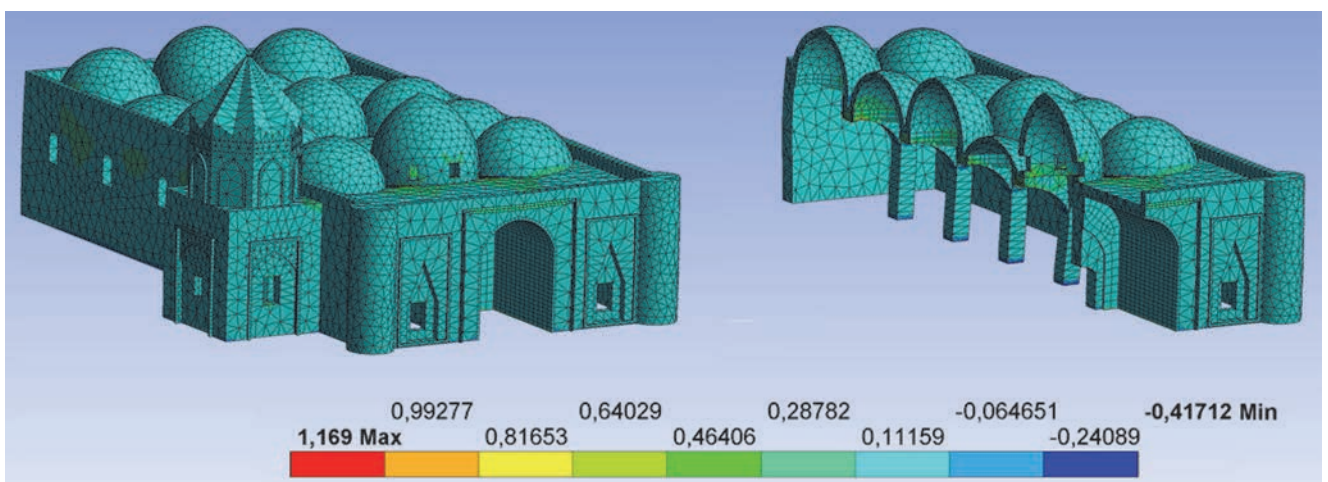
se smanjenje krutosti zbog propadanja materijala.

3.3. Statička analiza

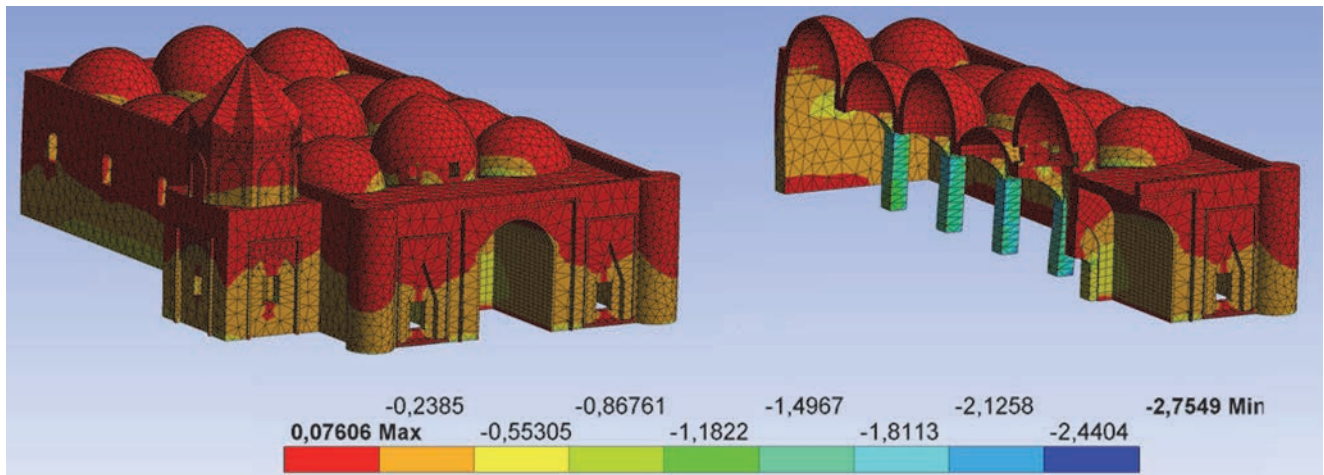
Utjecaj geometrije značajan je za procjenu konstrukcijskog ponašanja građevina. Stoga je kao prvi korak u numeričkoj analizi proveden linearni statički proračun pomoću programa ANSYS Workbench, pri čemu je vertikalno opterećenje jednako vlastitoj težini. Prema rezultatima statičke analize, do maksimalnih pomaka od 2,647 mm dolazi na vrhu središnje kupole (slika 12.). Maksimalna glavna naprežanja iznose 1,169 MPa, a do tih naprežanja dolazi na donjem dijelu perimetra (slika 13.). Osim toga, minimalna glavna naprežanja iznose 2,755 MPa, a do njih dolazi u donjem dijelu glavnih stupova (slika 14.).



Slika 12. Maksimalni vertikalni pomak [mm]



Slika 13. Maksimalna glavna naprežanja dobivena statičkom analizom [MPa]



Slika 14. Minimalna glavna naprezanja dobivena statičkom analizom [MPa]

Tablica 2. Frekvencije, periodi i koeficijenti doprinosa

Modalni oblik	Frekvencija [Hz]	Period [s]	Koeficijent doprinosa		
			X	Y	Z
1	4,9391	0,2025	0.5415	$0.9 \cdot 10^{-5}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$
2	7,8155	0,1279	$0.1 \cdot 10^{-2}$	0.3021	$0.2 \cdot 10^{-3}$
3	8,0727	0,1238	$0.4 \cdot 10^{-2}$	0.1536	$0.3 \cdot 10^{-3}$
4	9,3521	0,1069	$0.1 \cdot 10^{-2}$	0.1013	$0.5 \cdot 10^{-2}$
5	9,6528	0,1036	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-2}$	$0.5 \cdot 10^{-2}$
6	9,9949	0,1001	$0.9 \cdot 10^{-2}$	$0.7 \cdot 10^{-2}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$

3.4. Modalna analiza

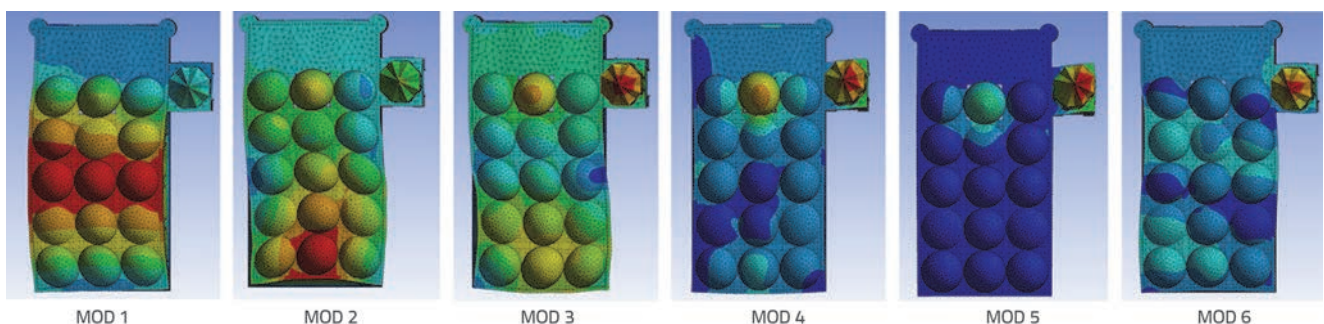
Modalna se analiza primjenjuje za ocjenjivanje i analiziranje dinamičkog odziva konstrukcija. Pritom je cilj odrediti frekvencije i oblike titranja konstrukcije. U ovom istraživanju modalna analiza prije svega služi za određivanje dinamičkog ponašanja, a razmatra se prvih šest modalnih oblika. Odgovarajuće frekvencije, periodi i koeficijenti doprinosa prikazani su u tablici 2., a prvi oblici titranja prikazani su na slici 15.

3.5. Dinamički proračun

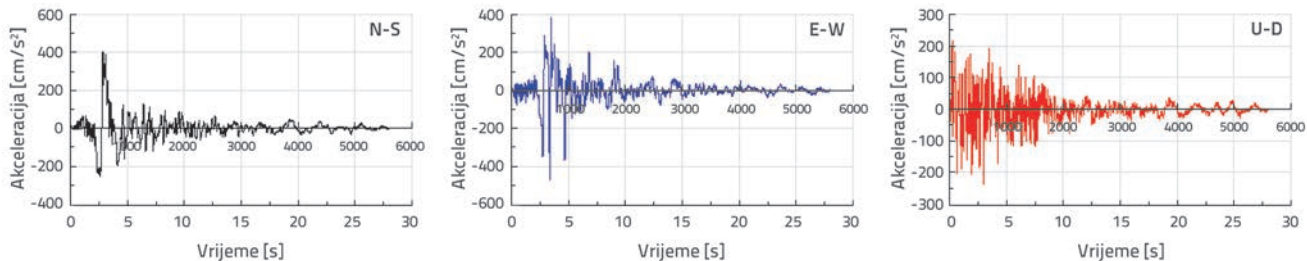
Prema podacima turskog Ministarstva za civilnu zaštitu i prirodne katastrofe, Amasyja se nalazi u prvoj (najopasnijoj)

potresnoj zoni u kojoj se mogu očekivati vrijednosti ubrzanja veća od 0,4 g. Amasyja leži na pravcu sjeverno-anatolijskog rasjeda, tj. na opasnom i seizmički aktivnom pravcu koji prolazi kroz Tursku [19]. Stoga se u ovom radu u obzir uzima i vremenski proračun seizmičkog djelovanja.

U vremenskom se proračunu koristi Rayleighov koeficijent prigušenja od 5 %. U analizi je korišten potresni zapis registriran tijekom potresa koji je 13. ožujka 1992. zadesio grad Erzincan. To je jedan od najjačih potresa koji je do sada pogodio Tursku, s magnitudom od 6,8. U obzir su uzeti zapisi ubrzanja zabilježeni na centralnoj stanici tijekom potresa Erzincan. Nepročišćene vrijednosti vršnog ubrzanja tla iznose $404,97 \text{ cm/s}^2$ za pravac sjever-jug, $470,91 \text{ cm/s}^2$ za pravac istok-zapad te $238,55 \text{ cm/s}^2$ za pravac gore-dolje [20], s tim da je na konstrukciju utjecalo



Slika 15. Prvih šest vlastitih oblika titranja

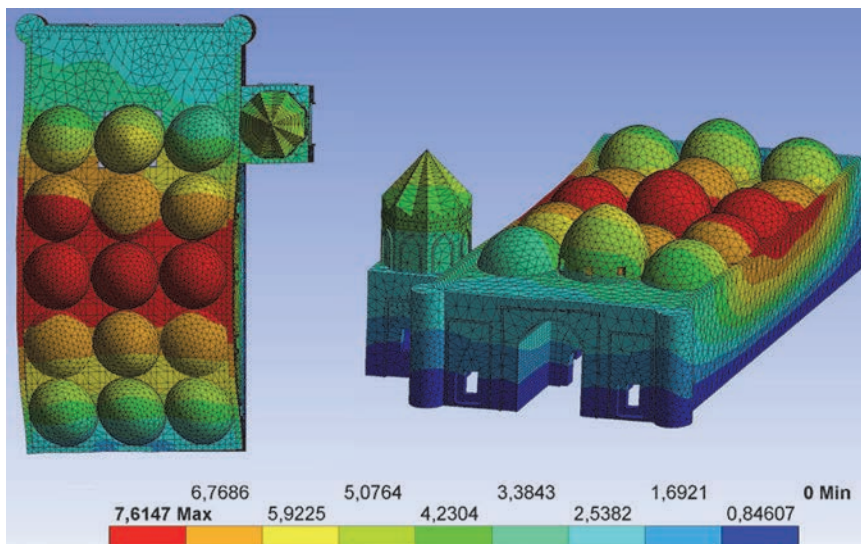


Slika 16. Zapis ubrzanja tla za potres u gradu Erzincanu: sjever-jug (lijevo), istok-zapad (sredina) i gore-dolje (desno), [20]

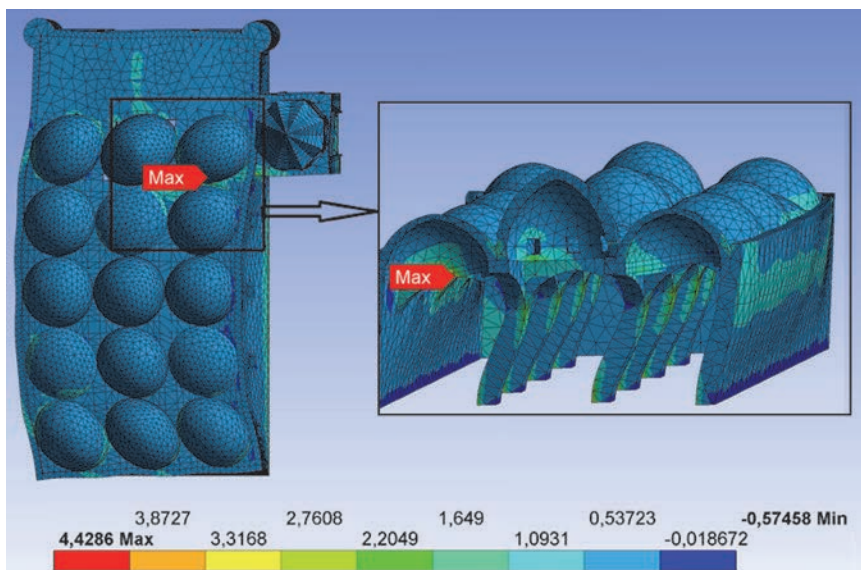
samo ubrzanje u pravcu sjever-jug, a to je najveća komponenta (slika 16.). Kao što se vidi iz dinamičkog proračuna, maksimalni bočni pomak od približno 7,62 mm zabilježen je na vrhu istočnih zidova (slika 17.). Utvrđeno je da maksimalno glavno naprezanje iznosi 4,43 MPa u području donjeg prstena istočne kupole i na fasadama istočnog zida (slika 18.). Osim toga, minimalno glavno naprezanje iznosi oko 3,57 MPa a zabilježeno je u zoni oko donjih dijelova glavnih stupova (slika 19.).

4. Rezultati i analiza

U ovom se poglavlju analizira konstrukcija ponajprije s aspekta arhitektonskih svojstava i vremena građenja. Zatim se analiziraju numerički proračuni i dobiveni se podaci uspoređuju s rezultatima drugih studija. Sve dosadašnje arhitektonske analize pokazuju da je ova građevina drugačija od ostalih medresa i džamija ne samo po svojoj namjeni nego i po načinu projektiranja. Iako je u početku prevladavalo mišljenje da je Medresa Gok uglata džamija, ona po svojoj konstrukciji nije niti medresa niti džamija, a razlikuje se od uglatih džamija i po tlocrtu i po lokaciji. Osim toga, uglate džamije obično nalazimo u seoskim područjima a odlikuju se i nekim dodatnim građevinama kao što su kvadratna kuća, kuća za goste, kuhinja, spremište i staja za stoku. Zato se može pretpostaviti da Medresa Gok ipak nije uglata džamija. Uz to može se reći da ta građevina nije ni opservatorij jer opservatoriji uglavnom imaju otvorenu kupolu i prostor za osmatranje. Nadalje, njemački prirodoslovac i putnik Andreas David Mordtmann [21] napisao je da se konstrukcija opservatorija razlikuje od konstrukcije Medrese Gok, koja je bila u lošem stanju kada je taj putopisac

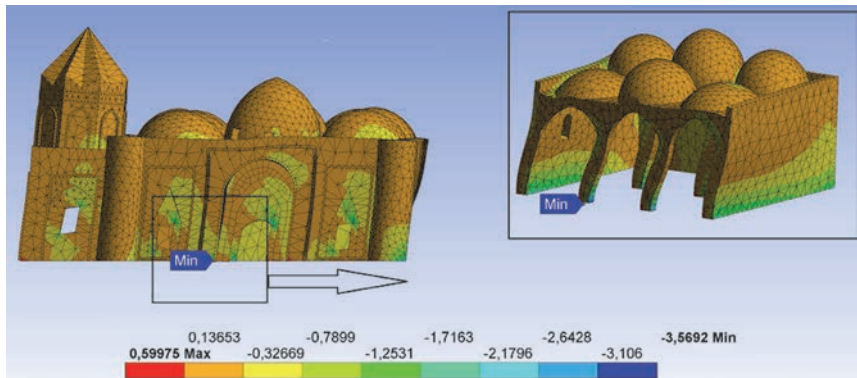


Slika 17. Maksimalni bočni pomak [mm]



Slika 18. Maksimalno glavno naprezanje dobiveno dinamičkim proračunom [MPa]

posjetio Amasyju 1850. godine. Kada je zaklada pokrovitelja džamije analizirala građevinu, ustanovljeno je da je Medresa Gok korištena i kao džamija i kao medresa. Općenito je prihvaćeno da je građevina prije svega izvedena kao džamija te da je korištena



Slika 19. Minimalno glavno naprezanje dobiveno dinamičkim proračunom [MPa]

i kao medresa za izobrazbu manjeg broja polaznika. I na kraju, Vitale (Casimir) Cuiet [24], francuski diplomat i putnik, navodi da je građevina korištena i kao džamija i kao medresa.

Kako na Medresi Gok nema pločice s datumom građenja, obavljena je i analiza u svrhu utvrđivanja tog datuma. Građevina je retroaktivnim datiranjem uspoređena s ostalim građevinama koje su izvedene u tom razdoblju. Medresa-džamija Gok u velikoj mjeri slična džamijama Ani (1064.-1092.) i Divrigi (1229.) u pogledu gornjih pokrovnih elemenata. Osim toga, građevina je slična Medresi HanudHatun (1238.) i Medresi Sahabiye (1267.) u Kayseriju, Medresi Gok (1271.) u Sivasu, Medresi Cacabey (1273.) u Kirsehiru te Medresi Yakutiye (1310.) u Erzurumu. Treba još spomenuti da je analizom građevine s aspekta korištenja plave glazirane opeke ustanovljeno da je takav stil karakterističan za prvu četvrtinu trinaestog stoljeća [23]. Što se tiče dekoracija, takve ukrase obično nalazimo u prvoj polovini 13. stoljeća. Stoga se može pretpostaviti da je Medresa Gok izvedena u prvoj polovini 13. stoljeća. To se podudara s navodom putopisca Vitalea (Casimira) Cuieta koji je zapisao da je Medresa Gok izvedena 1231. godine [22].

Što se tiče statičke i dinamičke analize, rezultati statičke analize pokazuju da do maksimalnih tlačnih i vlačnih naprezanja dolazi u podnožju glavnih stupova i u donjim presjecima, tj. prstenovima središnje kupole. Analizom maksimalnog vlačnog naprezanja ustanovljeno je da se naprezanja bitno mijenjaju u rubnim točkama lukova kupole. Slična studija o džamiji s kupolom, koja je izrađena u Turskoj, pokazuje da do maksimalnih vlačnih naprezanja obično dolazi na vrhu glavnih kupola i glavnih lukova. Osim toga,

maksimalna tlačna naprezanja također se javljaju u podnožju glavnih stupova i na vrhu luka na ulazu u džamiju [9]. Modalni i dinamički proračuni pokazuju da se maksimalna tlačna i vlačna naprezanja javljaju na kupolama građevina i na prostoru osmerokutne piramide. Modalnim je analizama utvrđeno da su periodi vibracije džamije prihvatljivi za takav tip građevina [9, 24]. Dinamički proračun pokazuje da su najkritičniji dijelovi građevine podnožja kupola i istočni lukovi u gornjim presjecima glavnih stupova.

5. Zaključak

U radu se analizira povijesna Medresa Gok smještena u Amasyji, u Turskoj, s aspekta njene arhitekture i nosive konstrukcije. Osnovni cilj rada je bio detaljnije istražiti arhitektonska svojstva te postići bolje razumijevanje statičkog i dinamičkog ponašanja povijesne građevine.

Arhitektonskim pregledom i analizom lokacije ustanovljeno je da o građevini ima malo podataka, a razlog tome je nedostatak povijesnih zapisa. Kako na građevini nema natpisa s podacima o građenju, točan datum izvođenja građevine nije poznat. Međutim, arhitektonskim ispitivanjima, pregledavanjem literature i analizom sličnih građevina, ipak je zaključeno da je građevina izvedena u prvoj polovini trinaestog stoljeća.

U okviru analize konstrukcije zaključeno je na temelju numeričkih analiza da se, za statičko opterećenje, maksimalna tlačna i vlačna naprezanja javljaju na dnu glavnih stupova te pri dnu središnje kupole. Ustanovljeno je da se naprezanja bitno razlikuju u potpornim dijelovima lukova kupole. Osim toga, kritična tlačna naprezanja javljaju se u bazi glavnih stupova i u gornjem dijelu luka na ulazu u džamiju. Dinamičke analize pokazuju da su kritični dijelovi građevine kupole i područje osmerokutne piramide. Nadalje, dinamički proračun pokazuje da su najkritičniji dijelovi prstenovi kupole i lukovi u gornjim presjecima glavnih stupova. Daljnja istraživanja se trebaju usredotočiti na detaljniju analizu raznih materijala, geometrijskih oblika i raznih potresnih zapisa tla kako bi se omogućilo bolje razumijevanje arhitektonskih i konstrukcijskih značajki povijesnih medresa.

LITERATURA

- [1] Lourenco, P.B.: Computations on historic masonry structures. *Structural Engineering and Materials*, 4 (2002) 3, pp. 301-319, <http://dx.doi.org/10.1002/pse.120>
- [2] 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
- [3] Toker, S., Unay, A.I.: Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges. *Gazi University Journal of Science*, 17 (2004) 2, pp. 129-139
- [4] Bayraktar, A., Coşkun, N., Yalcin, A.: Damages of masonry buildings during the July 2, 2004 Doğubayazıt (Ağrı) earthquake in Turkey. *Engineering Failure Analysis*. Volume 14 (2007) 1, pp. 147-157, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.11.011>

- [5] Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoğlu, R.: Investigation of Dynamic Response of Masonry Minaret Structure. *Bull Earthquake Eng.* 6 (2008), pp. 505-517, <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-008-9066-5>
- [6] 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.054>
- [7] Votsis, R.A., Kyriakides, N., Chrysostomou, C.Z., Tantele, E., Demetriou, T.: Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 43 (2012), pp. 58-68, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.015>
- [8] Cakir, F., Uckan, E., Shen, J., Seker, S., Akbas, B.: Seismic performance evaluation of slender masonry towers: a case study. *The Structural Design of Tall And Special Buildings*, 25(2016) 4, 193-212, <http://dx.doi.org/10.1002/tal.1235>
- [9] Cakir, F., Uckan, E., Shen, J., Seker, S., Akbas, B.: Seismic Damage Evaluation of Historical Structures During Van Earthquake, *Engineering Failure Analysis*, 58 (2015), pp. 249-266, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.030>
- [10] Menc, H.: *Amasya: Throughout History*. First Edition, Net Ofset Publishing, (2000), Ankara, Turkey (in Turkish).
- [11] Gabriel, A.: *Monuments Turcs D'Anatolie*. C.II., pp. 1931-1934, (1934), Paris, France
- [12] Hüsameddin, H.: *Amasya Tarihi*. C.I, Hikmet Matbaa-i İslamiyesi, (1914), Dersaadet.
- [13] Urak, G.: *Amasya'nın Türkdevri Şehir Dokusu ve Yapılarının Analiz ve Değerlendirilmesi*, PhD Thesis, Gazi University, (1994), Ankara.
- [14] Ipekoğlu, B.: *A Systematic Analysis of Spatial Characteristics in Anatolian Seljuk Monumental Buildings*, Research Project, Department of Architectural Restoration, Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey
- [15] Çelikcan, A.: *Amasya Gök Medrese Cami*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, (1991), Ankara.
- [16] Barth, H.: *Reise Von Trepezunt Durch Die Nördliche Hälfte Klein-Asien Nach Scutari Im Herbst 1858*. (1860), Berlin, Germany.
- [17] Kayaoğlu, İ.: *Torumtay Vakfiyesi*. *Vakıflar Dergisi*, S.XII., (1978), pp. 91-107 (106).
- [18] Kanbur, A., Kanbur, E.: *Medreselerde Eğitim, Yönetim ve Organizasyon Faaliyetleri: Amasya Medreseleri Açısından Bir Değerlendirme*, I. Amasya Araştırma Sempozyumu, 13-15 Haziran 2007, Amasya, C. II., pp. 1267-1294.
- [19] FEA program, 2012, 14.0 Release, ANSYS Finite Element Analysis Program, USA.
- [20] TEC. *Turkish Earthquake Code, Specification for Structures to Be Built in Disaster Areas*, Ministry of Environment and Urbanization of Turkey, 2007, Ankara, Turkey.
- [21] NEMC. *National Earthquake Monitoring Center*, Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Turkey.
- [22] Mordtmann, A.D.: *Anatolien-Skizzen und Reisebriefe aus Kleinasien (1850-1859)*, Frans Babinger, (1925), Hannover, Germany.
- [23] Cuinet, V.: *La Turquie d'Asie-Geographie-Administrative Statistique-Descriptive et Raisonnee de Chaque Province de l'Asie Mineure*, C.I, (1890), Paris, France.
- [24] Ödekan, A.: *Selçuklu Çağında Anadolu Sanatı*. Yapı Kredi Yayınları, (2002), Ankara, Turkey.