

Primljen / Received: 16.7.2014.  
 Ispravljen / Corrected: 25.10.2014.  
 Prihvaćen / Accepted: 2.1.2015.  
 Dostupno online / Available online: 10.3.2015.

# Potresna osjetljivost povijesnih zidanih konstrukcija nepravilne geometrije

## Autori:



Doc.dr.sc. **Saadet Toker Beeson**, dipl.ing.građ.  
 Texas Sveučilište u San Antoniu  
 Fakultet arhitekture, graditeljstva i planiranja  
[Saadet.Beeson@utsa.edu](mailto:Saadet.Beeson@utsa.edu)



Mr.sc. **Joseph Kubin**, dipl.ing.građ.  
 PROTA Engineering, Turska  
[proje@prota.com.tr](mailto:proje@prota.com.tr)



Prof.dr.sc. **Ali Ihsan Unay**, dipl.ing.građ.  
 Sveučilište Gazi, Turska  
 Arhitektonski fakultet  
[unay@gazi.edu.tr](mailto:unay@gazi.edu.tr)

Stručni rad

**Saadet Toker Beeson, Joseph Kubin, Ali Ihsan Unay**

## Potresna osjetljivost povijesnih zidanih konstrukcija nepravilne geometrije

Povijesne zidane građevine koje pokrivaju veliku površinu nepravilnog oblika pokazuju loše ponašanje pri potresu. Pojavljuju se naprezanja zbog nepravilnosti u tlocrtu ili visini građevine, a posljedica su neuravnotežene raspodjele masa. U ovom istraživanju je proveden proračun ponašanja povijesne medrese Gazanfer Aga na analitičkom modelu pri djelovanju vlastite težine i potresa. Proračun je proveden kako bi se ocijenilo ponašanje građevine pri potresu. Naglašena je važnost metode analitičkog modeliranja u proračunima neuravnoteženih masa.

### Ključne riječi:

povijesne zidane građevine, potresno ponašanje, analitičko modeliranje, metoda konačnih elemenata

Professional paper

**Saadet Toker Beeson, Joseph Kubin, Ali Ihsan Unay**

## Seismic vulnerability of historical masonry structures with irregular geometry

Historical masonry buildings with irregular geometric layouts, which cover a large floor area, display poor seismic behaviour. Stresses occur because of irregularities in plan or elevation, and consequent unbalanced mass distributions. The gravity and earthquake analyses are applied in this study on the analytical model of the historical Gazanfer Aga Madrasah. The analyses are used to examine the performance of the building under earthquake effects. The importance of analytical modelling technique in the analysis of irregular masses is emphasized.

### Key words:

historical masonry structures, seismic behaviour, analytical modelling, finite element analysis

Fachbericht

**Saadet Toker Beeson, Joseph Kubin, Ali Ihsan Unay**

## Seismische Vulnerabilität geometrisch unregelmäßigen historischen Mauerwerks

Historische Mauerwerksbauten, die größtenteils geometrisch unregelmäßig angeordnet sind, verhalten sich unter Erdbebeneinwirkungen ungünstig. Spannungen treten aufgrund der Unregelmäßigkeiten im Grundriss oder entlang der Höhe auf, sowie aufgrund der entsprechenden unausgeglichenen Verteilung der Massen. In dieser Arbeit werden die Einwirkungen vertikaler und seismischer Lasten an einem analytischen Modell der historischen Gazanfer Aga Madrasah berechnet. Die Analysen werden angewandt, um das Verhalten des Gebäudes unter Erdbebenlasten zu untersuchen. Die Bedeutsamkeit analytischer Modellierungstechniken in der Analyse unregelmäßiger Massen wird hervorgehoben.

### Schlüsselwörter:

historisches Mauerwerk, seismisches Verhalten, analytische Modelle, Finite-Elemente-Analyse

## 1. Uvod

Očuvanje kulturne baštine i njeno prenošenje budućim generacijama tema je značajnih istraživanja i radova 21. stoljeća. Budući da je središnja točka mnogih područja, kao što su arhitektura, inženjerstvo, povijest umjetnosti i arheologija, o ovoj temi se opsežno raspravlja u interdisciplinarnim skupinama. Zahvaljujući napretku tehnologije, proračunske metode u građevinarstvu danas pružaju točnije i preciznije rezultate u znatno kraćem vremenu. Razvijeno je nekoliko računalnih programa za proračun i projektiranje suvremenih građevina koji olakšavaju prijenos podataka te omogućavaju prijenos rezultata na građevinske nacрте. Međutim, povijesne građevine se poprilično razlikuju od modernih zgrada po konstrukcijskom sustavu i obliku građevine. Najprikladnija metoda za proračun povijesnih građevina poput prestižnih spomenika, palača, mostova i kula jest analiza metodom konačnih elemenata [1, 2]. Najvažniji dio u proračunu povijesnih građevina metodom konačnih elemenata je analitičko modeliranje. Ono se definira kao pretvorba konstrukcijskih elemenata izrađenih od različitih materijala u matematičke izraze u skladu s temeljnim načelima mehanike.

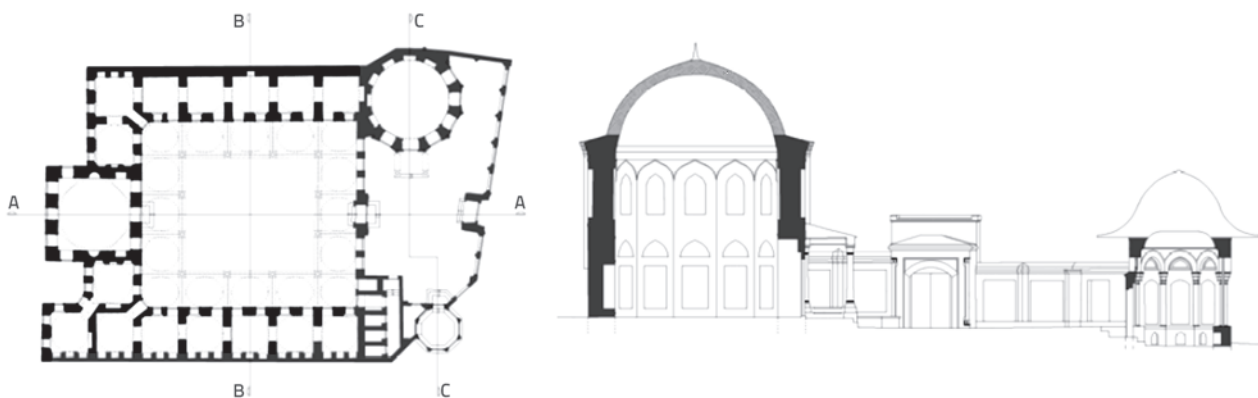
Sustav prijenosa opterećenja, prema temeljnim načelima mehanike konstrukcija, ima važnu ulogu u određivanju geometrije i dimenzija konstrukcijskih elemenata suvremenih građevina, gdje iznimku čine građevine neuobičajenih oblika. Međutim, to ne vrijedi za nosivi sustav povijesnih građevina. Također, nepravilne i velike suvremene armiranobetonske i/ili čelične konstrukcije se mogu preoblikovati u građevine pravilnog oblika primjenom dilatacijskih spojnica. Iako one fizički razdvajaju dijelove konstrukcije i omogućavaju drugačije konstrukcijsko ponašanje, ne zahtijevaju promjenu nepravilnog tlocrta građevine. Suvremeni građevinski propisi i norme zahtijevaju ovakvo razdvajanje kod velikih zgrada. Čimbenici poput temperaturnih razlika, vremenski ovisnih deformacija – poput puzanja i skupljanja, te slijeganja temelja negativno utječu na ponašanje konstrukcija koje imaju veliku tlocrtnu površinu, a posljedično se u nekim nosivim elementima pojavljuju prekomjerno velika naprezanja. Nažalost, povijesne građevine

su se gradile kao jedinstvene cjeline, bez dilatacijskih spojnica unatoč njihovim nepravilnim tlocrtima i visinama. Mjesta gdje se sastaju različite mase osjetljiva su na razvoj pukotina osobito tijekom potresa, a te pukotine povećavaju nepravilnosti unutar konstrukcije [3, 4].

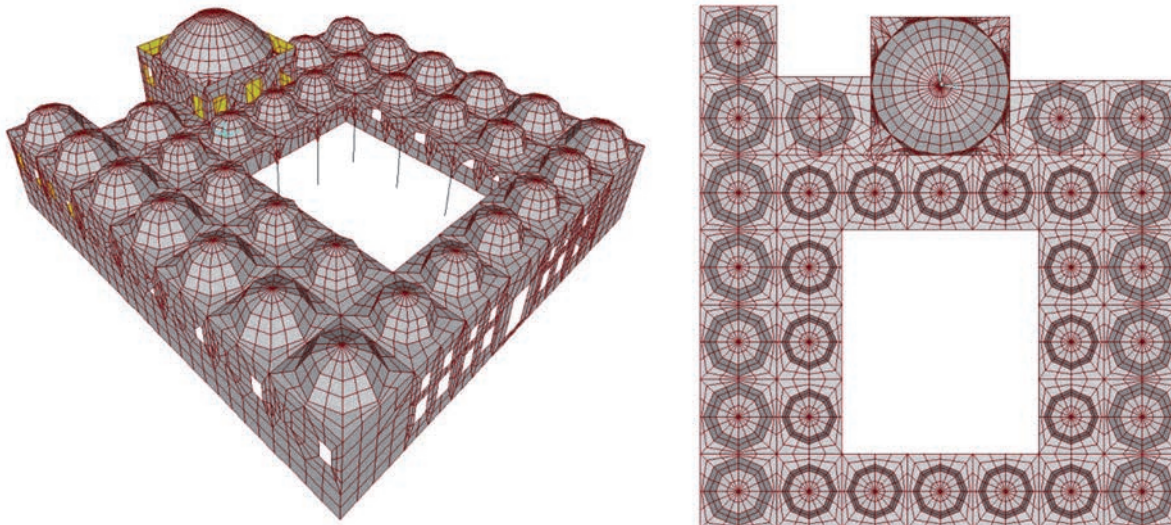
Ovaj rad prikazuje rezultate proračuna metodom konačnih elemenata provedene kako bi se odredilo ponašanje konstrukcije medrese Gazanfer Aga Madrasah pri djelovanju potresa te kako bi se odredila njena potresna otpornost. Izraz medresa (*madrasah*) označava visokoobrazovne muslimanske institucije koje su bile u upotrebi do prve polovine dvadesetog stoljeća. Mogu se zapaziti znatna poboljšanja medresa u arhitektonskom pogledu tijekom vremena. S ukorjenjivanjem ideje o "kompleksu", u središtu bi se uvijek nalazila džamija, zbog svoje moralne vrijednosti, a oko nje su bile smještene medrese, grobnice, fontane i kupališta. Tijekom vremena, porastom svijesti o obrazovanju u seldžučkom i osmanskom razdoblju, medrese su dobile veće značenje i postale su važne znamenitosti. Poput džamije u muslimanskom svijetu, osmanske medrese u Anatoliji i na Balkanu imaju posebne arhitektonske stilove. Tlocrt ima oblik centralnog dvorišta, zbog aridne klime u kojoj se nalazi. Pravokutno unutarnje dvorište je omeđeno *riwaqom* (*Riwaq - arkadni element u islamskoj arhitekturi*), a okružuju ga prostorije za učitelje, studentske sobe i učionice (slika 1.). Ima raspršeni tlocrt koji uključuje vrlo nepravilnu raspodjelu masa (slika 2.).



Slika 1. Medresa Gazanfer Aga [7]



Slika 2. Tlocrt i presjek medrese Gazanfer Aga



Slika 3. Model medrese Gazanfer Aga izrađen od konačnih elemenata

Ta dva faktora su važna jer se zgrada nalazi na potresno aktivnom povijesnom poluotoku u Istanbulu. Medresa Gazanfer Aga je u izvornom obliku sagrađena 1595., a danas se u njoj nalazi muzej humora i karikatura [5, 6].

Građevina je pravokutnog oblika površine 40 m x 28 m. Kupola promjera 7 m natkriva unutarnji prostor površine 8,5 m x 8,5 m. Debljina kupole je 50 cm, a oslonjena je na zidove debljine 1,0 m. Visina kupole od oslonaca je 3,5 m, a ukupna visina je 10 m, mjereno od razine tla. Prema nekim podacima je ova građevina rekonstruirana nakon potresa 1908. godine [8].

## 2. Model od konačnih elemenata i glavne značajke proračuna konstrukcije

Model medrese Gazanfer Aga izrađen od konačnih elemenata, prikazan na slici 3., pripremljen je u skladu sa specifikacijama i svojstvima programa SAP2000 [9]. Sva potrebna geometrija je dobivena iz provedenog premjera. U cilju lakšeg praćenja, daje se opis parametara za modeliranje i proračun:

- Glavna kupola, polukupole i male kupole, zidovi glavnog prostora i svi ostali zidovi modelirani su ljuskastim elementima (eng. *SHELL elements*).
- Model se sastoji od 7882 čvora i 7523 ljuskasta (SHELL) elementa.
- Stupovi koji podupiru lukove u unutarnjem dvorištu i željezne vlačne šipke su modelirani štapastim elementima (eng. *FRAME elements*).
- Potpuni kontinuitet je dobiven međusobnim spajanjem čvorova ljuskastih (SHELL) elemenata kupole, lukova i zidova.
- Mali stupovi koji podupiru lukove oko unutarnjeg dvorišta su povezani s podlogom uz pomoć upetih ležajeva. Lukovi i štapasti elementi koji predstavljaju stupove su spojeni pomoću zglobnih veza kako bi se spriječio prijenos momenta.
- Svojstva građevnih materijala su odabrana na temelju podataka iz prijašnjih istraživanja iz strane literature, a

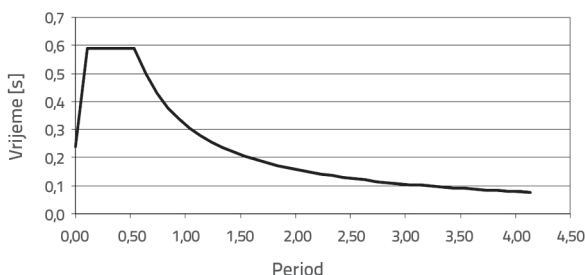
svojstva za zidane elemente su preuzeta iz suvremenih turskih propisa o potresu [10, 11].

- Vrijednosti modula elastičnosti i jedinične težine uzeti su za pretpostavku da su zidni elementi i mort jedan materijal.
- Na modelu su primijenjene dvije vrste opterećenja, gravitacijska opterećenja i potresna opterećenja. Spektar odziva je zadan u dva glavna smjera, kao EQx i EQy opterećenje.
- Radi lakšeg snalaženja pri vrednovanju rezultata, definirane su dvije različite kombinacije opterećenja, tj. G+EQx (gravitacijsko opterećenje i potresno opterećenje u smjeru X) te G+EQy (gravitacijsko opterećenje i potresno opterećenje u smjeru Y).
- Spektralna analiza je provedena za prvih 60 vlastitih oblika.
- Potresno opterećenje i opterećenje konstrukcije nije reducirano tijekom vrednovanja rezultata ( $R=1$ ). Štoviše, dobivene vrijednosti naprezanja su uspoređene s trostruko većim vrijednostima dopuštenih naprezanja. Svojstva nekih materijala koja su uzeta u obzir u analizi konačnim elementima medrese Gazanfer Aga prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva materijala u modelu konačnih elemenata

Svojstva Vrsta elementa	Modul elastičnosti E [kN/m <sup>2</sup> ]	Jedinična težina [kN/m <sup>3</sup> ]	Masa [t/m <sup>3</sup> ]
Zidana kupola i pandantiv (s mortom)	1.200.000 (1 200 MPa)	24	2,45
Kameni zidovi (s mortom)	450.000 (450 MPa)	24	2,45
Mramorni stupovi	2.000.000 (2 000 MPa)	24	2,45
Čelična vlačna armatura	200.000.000 (200 000 MPa)	76,82	7,83

Spektralna krivulja primijenjena u dinamičkoj analizi medrese Ganzafer Aga prikazana je na slici 4. Određena je na temelju podataka o potresu na sjeverozapadu Turske 1999. godine [12]. Normirani spektar odziva se primjenjuje za procjenu odziva konstrukcije. Normirani spektar je stohastičan i ne ovisi o jednom vremenskom zapisu.



Slika 4. Spektralna krivulja za dinamičku analizu

### 3. Proračun metodom konačnih elemenata

Prema turskim potresnim propisima, vrijednost dopuštenog tlačnog naprezanja za zidane zidove iznosi  $f_{all} = 0,8$  MPa za opeku i  $f_{all} = 0,3$  MPa za zidane kamene zidove. Potresna otpornost medrese Gazanfer Aga može se izraziti usporedbom vrijednosti naprezanja dobivenih proračunima prema dopuštenim naprezanjima navedenim u propisima. Potresno opterećenje i opterećenje same konstrukcije nisu reducirana tijekom procjene rezultata ( $R = 1$ ). Osim toga, dopuštene vrijednosti naprezanja su utrostručene i uzete kao granične vrijednosti. Dakle, granične vrijednosti naprezanja za kupolu i svodove su određene prema predloženim vrijednostima iz turskih propisa o potresu:

$$f_m = 0,8 \times 3 = 2,4 \text{ [MPa]} \tag{1}$$

dok naprezanje pri graničnom stanju nosivosti za kamen u zidovima i lukovima iznosi:

$$f_m = 0,3 \times 3 = 0,9 \text{ [MPa]} \tag{2}$$

Vrijednost dopuštenog vlačnog naprezanja se uzima kao 15 % vrijednosti specifičnog dopuštenog tlačnog naprezanja. Prema tome, dopušteno vlačno naprezanje za kupolu i svodove se može uzeti kao:

$$f_{m(vlačno)} = 2,4 \times 0,15 = 0,36 \text{ [MPa]} \tag{3}$$

a pretpostavlja se da je naprezanje za kamen u zidovima i svodovima

$$f_{m(vlačno)} = 0,9 \times 0,15 = 0,135 \text{ [MPa]} \tag{4}$$

Posmično naprezanje dobiveno dinamičkom analizom (S12 naprezanja u luskastim elementima) uspoređeno je s graničnim posmičnim naprezanjem ( $\tau_m$ ) koje je dobiveno iz jednadžbe

$$\tau_m = \tau_o + \mu \cdot \sigma \tag{5}$$

gdje je:

- $\tau_m$  - granično naprezanje u zidu
- $\tau_o$  - dopušteno naprezanje pri slomu u zidu
- $\mu$  - koeficijent trenja (može se uzeti vrijednost 0,5)
- $\sigma$  - vertikalno naprezanje u zidu.

Kao što je prikazano u tablici 2., naprezanje zida pri pojavi pukotina na opeci u glavnoj kupoli, pandantivima i malim kupolama iznosi:

$$\tau_o = 0,15 \times 3 = 0,45 \text{ [MPa]} \tag{6}$$

Naprezanje pri pucanju kamena u zidovima i lukovima iznosi:

$$\tau_o = 0,10 \times 3 = 0,30 \text{ [MPa]} \tag{7}$$

kao što je predloženo u propisima. Uz pretpostavku da vrijednost vertikalnog naprezanja ne prelazi vrijednost dopuštenog tlačnog naprezanja za određene konstrukcije, vrijednosti dopuštenog posmičnog naprezanja za glavnu kupolu, pandantive i male kupole iznose:

$$\tau_m = 0,45 + 0,5 (2,4/2) = 1,05 \text{ [MPa]} \tag{8}$$

dok je vrijednost dopuštenog posmičnog naprezanja za kamen u zidovima i lukovima sljedeća [10]:

$$\tau_m = 0,30 + 0,5 (0,9/2) = 0,53 \text{ [MPa]} \tag{9}$$

Tablica 2. Dopuštena naprezanja za grupe materijala

Vrsza materijala	Dopušteno tlačno naprezanje [MPa]	Dopušteno vlačno naprezanje [MPa]	Dopušteno posmično naprezanje [MPa]
Kupola od opeke i pandantivi	2,4	0,36	1,05
Kameni zidovi i lukovi	0,9	0,135	0,53

Proračun konstrukcije medrese Gazanfer Aga proveden je za definirane kombinacije opterećenja primjenom programa SAP2000 koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Tumačenje rezultata je dano s obzirom na najnepovoljnije rezultate i grafičke prikaze raspodjele naprezanja u programu SAP2000. Tablica 3. prikazuje periode vlastitih oblika i udjele sudjelujućih masa, a prva četiri vlastita oblika su prikazana na slici 5.





Slika 5. Prva četiri vlastita oblika i njihovi periodi

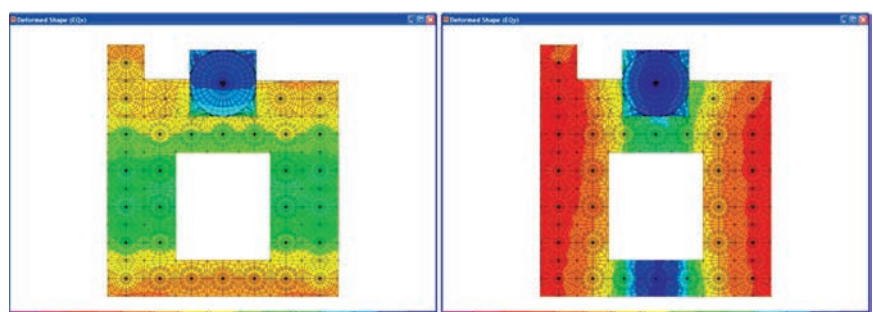
Tablica 3. Periodi vlastitih oblika i udjeli sudjelujućih masa

Vlastiti oblik	Periodi vlastitih oblika [s]	Udio sudjelujuće mase u X-smjeru	Udio sudjelujuće mase u Y-smjeru
1	0,25	0	0,42
2	0,24	0,70	0,42
3	0,23	0,70	0,47
4	0,21	0,73	0,47
5	0,19	0,73	0,47
60	0,04	0,90	0,90

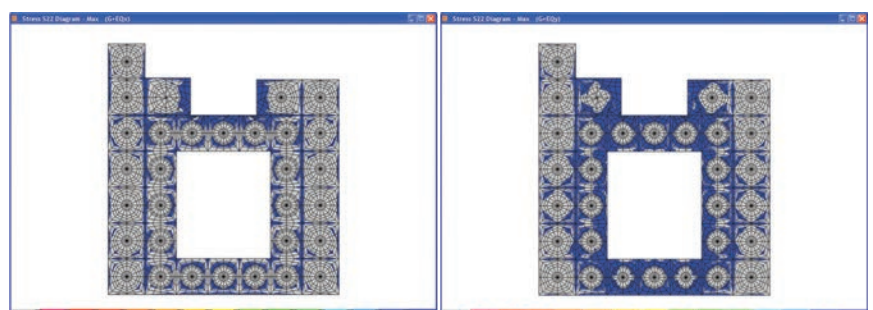
na lokalne osi svakog konstrukcijskog elementa i vrijednosti posmičnog naprezanja (S12 prema izlaznim podacima programa SAP2000). Kada je analitički model pripremljen, posebna se pažnja usmjerava na postavljanje svih ljuskastih elemenata pravokutnog oblika paralelno s lokalnim osima općenitih ljuskastih elemenata koje su definirane u programu. Budući da konstrukcija ima vrlo složenu geometrijsku konfiguraciju, smatra se da će takav pristup pojednostaviti interpretaciju vrijednosti glavnih naprezanja dobivenih proračunom konstrukcije. Dakle, u ocjenjivanju nosivosti konstrukcijskih elemenata primijenjene su vrijednosti S22 i S12, koje su jednostavnije za razumijevanje i prikladnije za interpretaciju. Te vrijednosti naprezanja odgovaraju vertikalnom tlačnom naprezanju (S22) i posmičnom naprezanju (S12) pri djelovanju potresa. Za karakteristične konstrukcijske

Ukupna težina građevine iznosi 37394 kN, ukupna poprečna sila u podnožju zgrade uslijed potresne aktivnosti u smjeru JZ-SI (u X-smjeru prema modelu) iznosi 15060 kN, dok ukupna poprečna sila u podnožju zgrade uslijed potresne aktivnosti u smjeru JI-SZ (u Y-smjeru prema modelu) iznosi 11184 kN. Prema ovim rezultatima, ukupna poprečna sila u podnožju zgrade kojem je izložena konstrukcija iznosi 40 % njene ukupne težine u X-smjeru te 30 % njene težine u Y smjeru. Kao što se vidi na slici 6., najveći pomak pri potresnom djelovanju u X-smjeru iznosio je  $\Delta_x = 16$  mm, a u Y-smjeru  $\Delta_y = 18$  mm. Pomaci na slici 6. se povećavaju od svjetlijih prema tamnijim bojama. Najtamnije boje pokazuju najveće prije spomenute pomake.

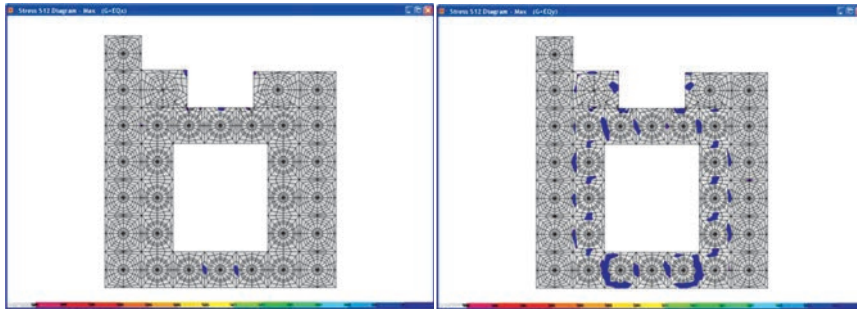
Među naprezanjima određenima za ljuskaste (SHELL) elemente u potresnoj analizi medrese Ganzafer Aga, rezultati koji najbolje opisuju ponašanje konstrukcije pri potresu su dobiveni pomoću vlačnih i tlačnih naprezanja u vertikalnom smjeru (S22 prema izlaznim podacima softvera SAP2000) s obzirom



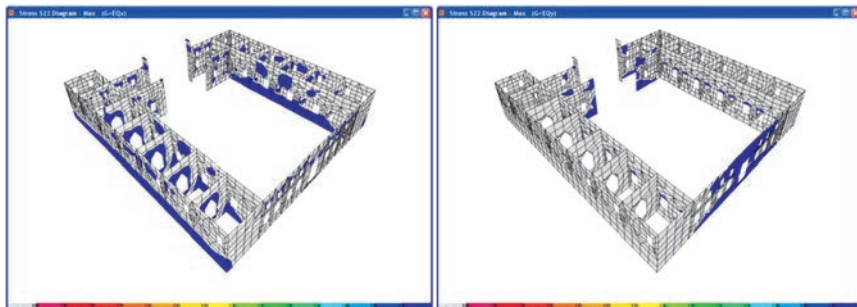
Slika 6. Pomaci u smjeru X i Y uslijed potresnog opterećenja prikazani različitim bojama. Tamnije boje prikazuju veće pomake



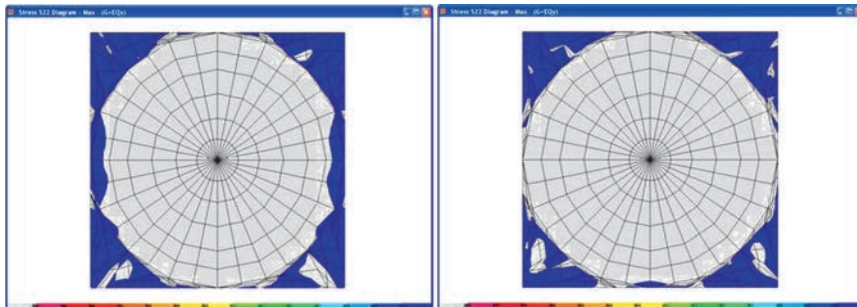
Slika 7. S22 vlačna naprezanja prikazana tamnim bojama na malim kupolama za kombinacije opterećenja G+EQx i G+EQy



Slika 8. Posmična naprezanja S12 prikazana tamnim bojama na malim kupolama za kombinaciju opterećenja G+EQx i G+EQy



Slika 9. Vlačna naprezanja S22 iznad graničnih vrijednosti prikazana tamnom bojom na glavnoj kupoli i pendentivima za opterećenja G+EQx i G+EQy



Slika 10. Vlačna naprezanja S22 iznad dopuštenih vrijednosti prikazana su tamnom bojom na zidovima glavne kupole za kombinaciju opterećenja G+EQx i G+EQy

elemente koji određuju ponašanje konstrukcije određene su vrijednosti naprezanja S22 i S12 primjenom sheme naprezanja napravljene posebno za kombinacije opterećenja G+EQx te G+EQy, kao što je prikazano na slikama 7. i 8. Slika 7. prikazuje vlačna naprezanja S22 na malim kupolama za opterećenja G+EQx i G+EQy. Tamno obojena područja na slici su dijelovi u kojima su vlačna naprezanja veća od granične vrijednosti  $f_{m(vlačno)} = 0,36$  MPa.

Posmična naprezanja S12 na malim kupolama za opterećenja G+EQx i G+EQy prikazana su na slici 8. Predloženo dopušteno posmično naprezanje za kamene kupole ( $\tau_m = 1,05$  MPa) nije prekoračeno. Za obje kombinacije, vrijednosti naprezanja veće od 0,5 MPa prikazane su tamnijom bojom kako bi se istaknula područja najvećih posmičnih naprezanja.

Slika 9. prikazuje vlačna naprezanja S22 u glavnoj kupoli i pendentivima pri opterećenjima G+EQx i G+EQy. Tamnija boja označava područja u kojima su vrijednosti vlačnog naprezanja veće od granične vrijednosti vlačnih naprezanja za opeku  $f_{m(vlačno)} = 0,36$  MPa. Vrijednost graničnog tlačnog naprezanja ( $f_m = 2,4$  MPa) nije prekoračena niti u jednom dijelu glavne kupole i pendentiva. Najveće tlačno naprezanje iznosi oko 0,1 MPa.

Vlačna naprezanja S22 na kamenim zidovima pri opterećenjima G+EQx i G+EQy prikazana su na slici 10. Tamno obojena

Tablica 4. Maksimalna naprezanja (S22) izmjerena na različitim dijelovima građevine

Grupa elemenata			G+EQx [MPa]	G+EQy [MPa]
Glavna kupola i pendentivi	gornja površina (vrh)	tlačno	-0,8	-1,1
		vlačno	1,0	1,2
	donja površina (dno)	tlačno	-1,5	-1,4
		vlačno	1,1	1,3
Zidovi	gornja površina	tlačno	-1,1	-1,1
		vlačno	0,7	0,8
	donja površina	tlačno	-1,1	-1,0
		vlačno	0,5	0,6
Male kupole	gornja površina	tlačno	-1,5	-2,3
		vlačno	1,9	2,7
	donja površina	tlačno	-2,3	-3,2
		vlačno	1,3	2,6
Lukovi	gornja površina	tlačno	-2,0	-3,1
		vlačno	0,5	0,9
	donja površina	tlačno	-2,4	-3,2
		vlačno	0,2	1,2

Tablica 5. Maksimalna posmična naprezanja (S12) izmjerena na različitim dijelovima građevine

Grupe elemenata		G+EQx [MPa]	G+EQy [MPa]
Glavna kupola i pandantivi	gornja površina (vrh)	0,5	0,5
	donja površina (dno)	0,4	0,2
Zidovi	gornja površina	0,4	0,5
	donja površina	0,4	0,4
Male kupole	gornja površina	1,0	1,4
	donja površina	1,1	1,0
Lukovi	gornja površina	1,2	1,3
	donja površina	0,6	1,6

područja na slici prikazuju dijelove zida s vlačnim naprezanjima koja su veća od 0,135 MPa, što je ujedno i granična vrijednost naprezanja za zidove. Granična vrijednost tlačnog naprezanja ( $f_m = 0,9$  MPa) nije prekoračena niti u jednom dijelu zida.

Prema provedenom proračunu, posmična naprezanja (S12), preporučeno dopušteno posmično naprezanje ( $\tau_m = 0,53$  MPa) za zidove i dopušteno posmično naprezanje za kupole od opeke ( $\tau_m = 1,05$  MPa) pri opterećenjima G+EQx i G+EQy nisu prekoračeni niti u jednom dijelu.

Konstruktivski elementi građevine su detaljno razmotreni unutar četiri kategorije: glavna kupola i pandantivi, zidovi, male kupole i lukovi pri opterećenjima G+EQx i G+EQy uzimajući u obzir naprezanja S22 i S12. Najveće vlačno i tlačno te najveće posmično naprezanje na gornjim i donjim površinama ljuskastih elemenata za svaku grupu elemenata prikazani su u tablicama 4. i 5.

#### 4. Ocjena rezultata proračuna

Vrlo je težak zadatak procijeniti elastična svojstva povijesnih građevina. Utjecaj vremena, pukotine i slijeganja tijekom vremena te nedostatak detaljnijih informacija o konstrukcijskim elementima u istraživanjima jedni su od najvažnijih čimbenika koji zahtijevaju nelinearni proračun. No, u ovom istraživanju je proveden proračun metodom konačnih elemenata na modelu medrese Gazanfer Aga primjenom linearno elastičnih svojstava materijala kako bi se procijenilo cjelokupno potresno ponašanje. Ako se konstrukcija velikih dimenzija, poput medrese Gazanfer Aga, modelira i ocjenjuje pomoću nelinearno elastičnih metoda proračuna, iteracije koje se provode u proračunu dovele bi do sumnje u točnost postupka, čak i ako je model konstrukcije vrlo detaljno izrađen [13]. Na temelju rezultata proračuna mogu se dati sljedeća zapažanja o ponašanju i svojstvima medrese Gazanfer Aga tijekom mogućeg potresa:

- Maksimalni pomaci vrha kupole pri djelovanju potresa u X-smjeru i Y-smjeru iznose redom 18 mm i 16 mm. Odgovarajuća spektralna krivulja je prikazana na slici 4. Budući da se najviša točka kupole nalazi na visini od 10 metara od razine tla, vrijednost pomaka je u granicama prihvatljivog raspona jer je relativni pomak 0.0018. Iako

je unutar ovog raspona relativnog pomaka moguće uočiti pukotine u zidu, uzimajući u obzir vrstu materijala, još uvijek se može reći da je vjerojatnost otkazivanja minimalna.

- Potresno ponašanje konstrukcije nije određeno samo maksimalnim pomakom. Potrebno je proračunati relativni pomak u svim točkama konstrukcije. Također je moguće promatrati vjerojatno potresno ponašanje modela pretvaranjem pomaka u lokalne vrijednosti naprezanja.
- Krutost konstrukcije je u cijelosti nejednolika. Stoga bi bilo pogrešno interpretirati rezultate uzimajući u obzir samo najniže periode vlastitih oblika. Kako bi se dobili pouzdani rezultati, proračun je proveden za prvih 60 perioda vlastitih oblika.
- Zapažanja s obzirom na rezultate proračuna pokazuju da vrijednosti naprezanja koje predlažu turski propisi o potresu za zidane materijale, nisu prekoračene u nosivim elementima medrese Gazanfer Aga.
- Dopuštena vlačna naprezanja su prekoračena samo u kutovima otvora i u donjim kutovima zidova. Ako se u obzir uzmu oblici podjele mreža konačnih elemenata i uvjeti oslanjanja, ta naprezanja se smatraju prihvatljivima pri horizontalnim opterećenjima. Treba imati na umu da su svojstva materijala konstrukcijskih elemenata određena prema vrijednostima iz literature i prema preporučenim vrijednostima iz sadašnjih propisa. S obzirom na starost građevine, može se reći da bi i propadanje i/ili gubitak materijala u konstrukcijskim elementima moglo utjecati na ponašanje konstrukcije. Međutim, kako se vrijednosti pomaka i naprezanja dobivene proračunom nalaze unutar dopuštenog raspona, malo je vjerojatno da će doći do problema pri potresnom opterećenju.

#### 5. Zaključak

Precizno određivanje dimenzija konstrukcijskih elemenata i svojstava materijala dva su vrlo važna uvjeta za pouzdani proračun metodom konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata je najpouzdanija metoda za određivanje potresnog odziva povijesnih građevina. Modeli građevina s pravilnim konstrukcijskim sustavom lako ispunjavaju te uvjete. Međutim,



izrada preciznog modela povijesne građevine od presudne je važnosti jer takve građevine u pravilu nemaju linearno elastična svojstva materijala, nego su im svojstva materijala i geometrija promjenjivi. Mogu se sastojati od višestrukih materijala kao što su opeka + mort + drvo ili kamen + mort u pojedinom nosivom elementu.

Medresa Gazanfer Aga je jedna od takvih građevina s vrlo složenim obilježjima, a njezina kompleksna i nepravilna geometrija čine proračun i procjenu iznimno izazovnim. Nepravilan oblik tlocrta utječe na potresno ponašanje povijesnih građevina zbog nedostatka obilježja koja bi osigurala pravilan potresni odziv. Dilatacije, koje su nužne prema suvremenim pravilima za projektiranje i sadašnjim normama, predstavljaju jedno od sredstava koja omogućuju pravilno ponašanje čak i kod konstrukcija s nepravilnim konstrukcijskim rasporedom. Zbog svoje starosti, medresi Ganzafar Aga nedostaju obilježja modernog projektiranja pomoću kojih bi se poboljšalo njeno potresno ponašanje. Potrebno je provesti primjerene analize kako bi se procijenilo njeno konstrukcijsko ponašanje s ciljem poduzimanja prikladnih mjere opreza za zaštitu njene povijesne vrijednosti.

Treba imati na umu da se potresno ponašanje povijesnih građevina ne može točno odrediti primjenom linearno elastične metode proračuna. Također, možda neće biti moguće točno odrediti je li nosivost konstrukcijskih elemenata prekoračena ili nije. Međutim, ove metode predstavljaju dobro polazište u određivanju osnovnih problema u povijesnim građevinama. Ako se u linearnoj analizi pojavljuju problemi, tada treba provesti

nelinearnu analizu. Nelinearne metode mogu dati pouzdanije rezultate ako se detaljno odrede svojstva materijala. Međutim, u proračunima građevina velikih dimenzija i građevina sa složenom geometrijom, nelinearne metode proračuna mogu dovesti do pogrešnih zaključaka zbog iteracija.

Za točnu potresnu analizu je konstrukcije sa složenom geometrijom - poput medrese Ganzafar Aga - važno modelirati u cijelosti čak i ako su neke glavne mase konstrukcije integrirane putem vrlo malih konstrukcijskih elemenata. Stoga su linearno elastične metode proračuna dovoljne da bi se odredilo opće konstrukcijsko ponašanje te potresno ponašanje ovako velike konstrukcije.

U ovom radu je ispitana medresa Gazanfer Aga kao cjelina sa sastavnim konstrukcijskim elementima kako bi se procijenio njen ukupni potresni odziv. Unatoč nepravilnom tlocrtu i neodređenim svojstvima materijala, vrijednosti napreznja su uglavnom u granicama koje propisuju suvremeni propisi o potresu. Vlačna napreznja su prekoračena samo u kutovima otvora i u donjim kutovima zidova. Vrijednosti pomaka su u prihvatljivim granicama s obzirom na ukupnu veličinu građevine. Krutost konstrukcije je također razmotrena; nejednolika je unutar čitave konstrukcije, što se moglo i očekivati zbog veličine geometrije. Iako je moguće ustanoviti da konstrukcija pokazuje dobro potresno ponašanje, nelinearni proračun bi bio znatno korisniji zbog promjene krutosti građevine, složene geometrije, nepoznatih svojstava materijala te pukotina i slijeganja koja su se pojavila u njenom životnom vijeku.

## LITERATURA

- [1] Croci, G.: *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1998.
- [2] Unay, A.: *Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı (In English: Earthquake Resistance of Historical Buildings)*, ODTU Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ankara, 2002.
- [3] Betti, M., Vignoli, A.: Modelling and Analysis of a Romanesque Church under Earthquake Loading: Assessment of Seismic Resistance, *Engineering Structures*, 30 (2008) 2, pp. 352-367.
- [4] Yi, T., Moon, F., Leon, R., Kahn, L.: Analyses of a Two-Story Unreinforced Masonry Building, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 132 (2006) (5), pp. 653-662.
- [5] Aslanapa, O.: *Osmanlı Devri Mimarisi (In English: Ottoman Period Architecture)*, İnkılap Kitapevi, İstanbul, 2004.
- [6] Ahunbay, Z.: Semiz Ali Paşa Medresesi (In English: Semiz Ali Pasha Madrasah)", *Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi (In English: Encyclopaedia of Istanbul from Past to Present)*, Cilt 2, Tarih Vakfı Yayını, İstanbul, 1991.
- [7] İstanbul'daki Tarihi Yapıların Dunu ve Bugunu (In English: Past and Present of Historical Structures in Istanbul), [http://www.degisti.com/index.php/archives/7367/gazanfer\\_aga\\_medresesi\\_2011,10.04.2014](http://www.degisti.com/index.php/archives/7367/gazanfer_aga_medresesi_2011,10.04.2014).
- [8] Kütükoğlu, M.: *XX. Asra Erişen İstanbul Medreseleri (In English: Istanbul Madrasahs that Reach up to 20th Century)*, Türk Tarih Kurumu Basım Evi, Ankara, 2000.
- [9] *SAP 2000*, Computer Program, Computers and Structures, Berkeley, USA, 2000.
- [10] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (In English: Turkish Republic Ministry of the Public Works and Settlement): *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (In English: Earthquake Resistant Design Code)*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yayınları, Ankara, 2007.
- [11] Giordano, A., Mele, E., De Luca, A.: Modeling of historical masonry structures: Composition of different approaches though a case study, *Engineering Structures*, 24 (2001), pp. 1057-1069, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00033-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00033-0)
- [12] Kalkan, E., Gülkan, P.: Site-Dependent Spectra Derived from Ground Motion Records in Turkey, *Earthquake Spectra*, 20 (2004) 4, pp. 1111-1128.
- [13] Lourenço, P.: Computations on historic masonry structures, *Progress in Structural Engineering Materials*, 4 (2002), pp. 301-319, doi: <http://dx.doi.org/10.1002/pse.120>