

Primljen / Received: 06.10.2011.

Ispravljen / Corrected: 19.1.2012.

Prihvaćen / Accepted: 24.1.2012.

Dostupno online / Available online: 15.2.2012.

Seizmičko ponašanje i sanacija povijesnog zidanog minareta

Autori:



Prof. dr. sc. **Ahmet Murat Turk**
Istanbul Kultur University
Civil Engineering Department
murat.turk@iku.edu.tr



Cumhur Cosgun, dipl. ing. građ.
Istanbul Kultur University
Civil Engineering Department
c.cosgun@iku.edu.tr

Stručni rad

Ahmet Murat Turk, Cumhur Cosgun

Seizmičko ponašanje i sanacija povijesnog zidanog minareta

U radu se razmatra dinamičko ponašanje blokovima zidanog minareta povijesne džamije u Istanbulu i metoda protupotresne sanacije. S obzirom na visoku seizmičku aktivnost regije, za određivanje bočnih pomaka i načina otkazivanja uslijed seizmičkih djelovanja odabran je prostorni model konačnih elemenata. Provedene analize pokazuju da se najveća oštećenja obično pojavljuju u podnožju i donjem dijelu minareta, te da se ojačavanjem tih dijelova trakama od polimera armiranog vlaknima (engl. FRP - Fiber Reinforced Polymer) poboljšava otpornost na bočne sile. Postignuti rezultati su u smislu seizmičke zaštite obećavajući.

Ključne riječi:

povijesna zidana građevina, minaret, sanacija, potres, polimer armiran vlaknima (FRP)

Professional paper

Ahmet Murat Turk, Cumhur Cosgun

Seismic Behaviour and Retrofit of Historic Masonry Minaret

The dynamic behaviour of block masonry minaret of a historical mosque in Istanbul is analyzed, and a seismic retrofit method is proposed. Due to high seismicity of the region, a 3D finite element model is used to determine lateral displacements and failure modes under seismic load. The analyses show that the highest damage usually occurs at the base and the lower part of the minaret, and that lateral behaviour can be improved by strengthening these sections with fiber reinforced polymer (FRP) sheets. The results obtained are promising in terms of seismic protection.

Key words:

historic masonry structure, minaret, retrofit, earthquake, fibre reinforced polymer (FRP)

Fachbericht

Ahmet Murat Turk, Cumhur Cosgun

Seismisches Verhalten und Sanierung des historischen gemauerten Minaretts

In der Arbeit wird das dynamische Verhalten der Blöcke des gemauerten Minaretts der historischen Moschee in Istanbul sowie die Methode der erdbebensicheren Sanierung erörtert. Hinsichtlich der hohen seismischen Aktivität dieser Region, wurde zum Zwecke der Feststellung von Setzungen und der Art und Weise des Einsackens des Gebäudes infolge von seismischen Wirkungen das Raummodell der Finite-Elemente-Methode ausgewählt. Die Analyseresultate zeigen, dass die größten Beschädigungen üblicherweise am Fuße sowie am unteren Teil des Minaretts erscheinen und mit der Verstärkung dieser Teile durch Streifen aus Faser- Kunststoff-Verbund (FKV) der Widerstand gegen die Seitenkräfte verbessert wird. Die Resultate sind im Sinne des seismischen Schutzes vielversprechend.

Schlüsselwörter:

historisches gemauertes Gebäude, Minarett, Sanierung, Erdbeben, Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)

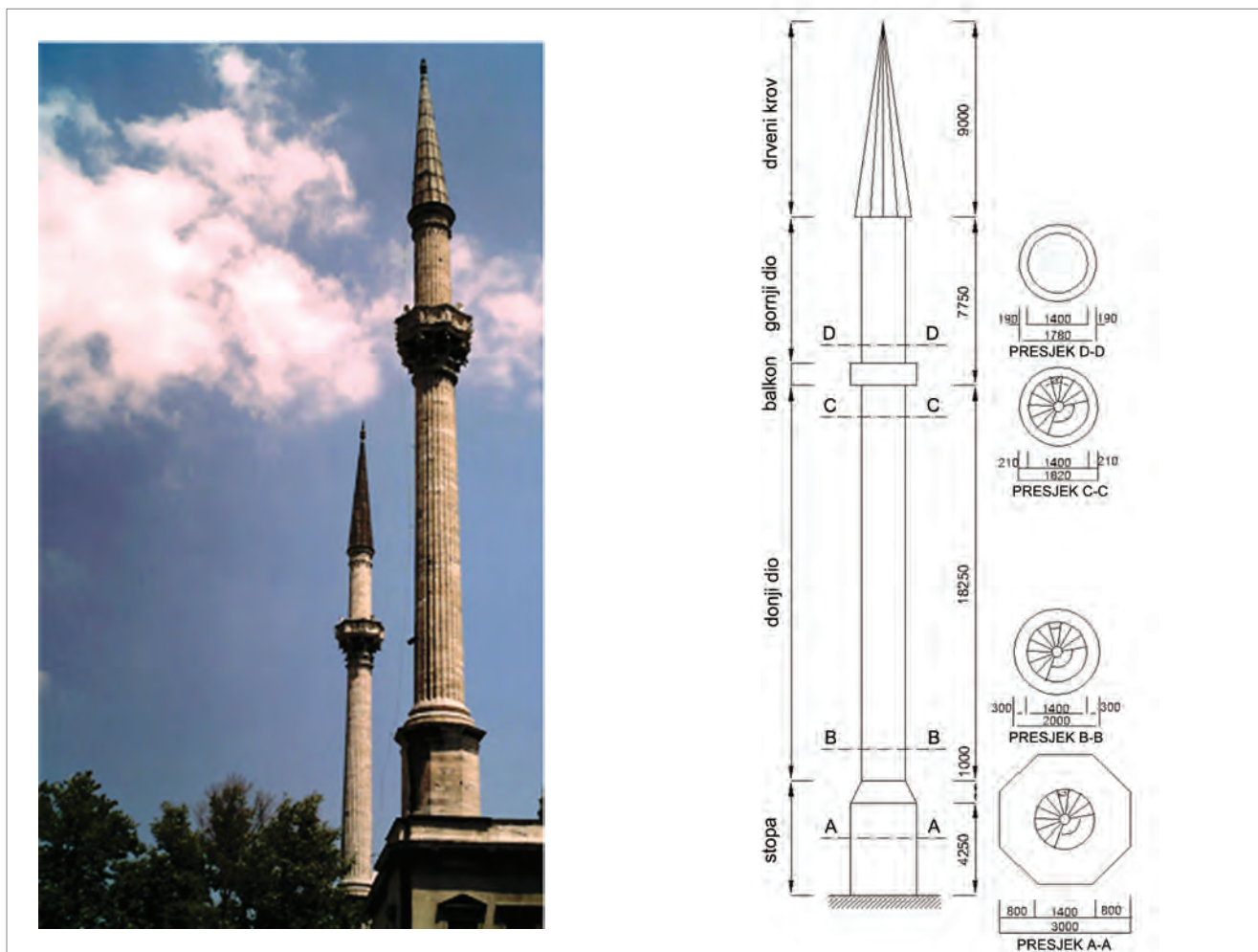
1. Uvod

Potresi su među najvećim prirodnim opasnostima ne samo u Turskoj već i u mnogim državama diljem svijeta. Kako se Turska nalazi u jednoj od seizmički najaktivnijih regija na svijetu, ne čudi koliko se važnosti u toj zemlji pridaje protupotresnoj zaštiti povijesnih građevina. Projektantima je uvijek izazov analiziranje i projektiranje takvih građevina, ponajviše zbog iznimno složenog ponašanja materijala. Problem postaje još kompleksniji kada se počne razmatrati dinamičko ponašanje građevina. Potresi koji su 17. kolovoza 1999. (Kocaeli EQ, $M_w = 7,5$) i 12. studenog 1999. (Düzce EQ, $M_w = 7,2$) zadesili sjeverozapadna područja Turske rezultirali su velikim brojem ljudskih žrtava te uzrokovali znatna oštećenja i otkazivanja konstrukcija ne samo zgrada već i minareta i džamija. Osim toga, stare povijesne građevine su i u proteklim težim potresima pretrpjele raznovrsna oštećenja.

Takvi su potresi Otomansko Carstvo zadesili 1556. i 1894. godine. Vrijedi napomenuti da je u potresu koji je 1894. godine zadesio Istanbul oštećeno čak 69 minareta, od kojih je 30 potpuno srušeno. U okviru razvoja zabilježenog u području dinamičkog ispitivanja

konstrukcija i proračunskih metoda za analizu konstrukcija značajni su rezultati postignuti u pogledu mehaničkog ponašanja povijesnih građevina, što je iskazano brojnim istraživanjima [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Navedena istraživanja nisu značajna samo sa stajališta zaštite građevina već i zbog procjene pomaka tla tijekom prethodnih potresa. U tom okviru istražuje se i dinamičko ponašanje starih zidanih minareta koji su obično prilično osjetljivi na seizmička opterećenja.

Na slici 1. prikazana su dva minareta džamije Dolmabahce u Istanbulu, a ovaj se rad bavi minaretom smještenim na njenoj zapadnoj strani. Džamija Dolmabahce izgrađena je 1855. godine, u doba Otomanskog Carstva u neoklasicističkom i baroknom stilu. Smještena je na europskoj obali Bosporskog tjesnaca, južno od palače Dolmabahce. Dva minareta koja se uzdižu s istočne i zapadne strane džamije po svojoj arhitekturi pripadaju baroknom i rokoko stilu. Iako su po izgledu identični, zapadni je minaret sačuvan u izvornom obliku, dok je drugi nedavno restauriran. U ovom radu se uglavnom obrađuje zapadni minaret kako bi rezultati zorno oslikali stvarno mehaničko ponašanje prvobitnog konstrukcijskog sustava (slika 1.).



Slika 1. Prikaz minareta džamije Dolmabahce s osnovnim obilježjima (dimenzije "mm")

Stopa minareta izgrađena je od vrlo velikih kamenih blokova i povezana je s vanjskim zidom džamije. Minaret se može opisati kao vitka konzolna konstrukcija. Donji dio, od podnožja do galerije, sastoji se od zida, stepenica i jezgre. U tom se dijelu debljina zida smanjuje po visini. U unutrašnjosti gornjeg dijela, od galerije pa do vrha minareta, nema ničega i prostor nema nikakve namjene. U tom je dijelu debljina zida konstantna po čitavoj visini. Balkoni se uglavnom koriste za molitvu, a čine koncentrirane mase po visini minareta i utječu na dinamički odziv čitave konstrukcije [1]. U tom je dijelu konstrukcija uža nego na donjem dijelu. Stožasti krov minareta izveden je od drveta prekrivenog cinkom (slika 1.).

Razumijevanje dinamičkog ponašanja zidanih minareta od iznimne je važnosti za pouzdanost te za očuvanje i ojačanje/sanaciju povijesnih spomeničkih građevina. U okviru prethodnih istraživanja istih minareta, koja su izveli istraživači s Tehničkog sveučilišta u Istanbulu, provedena su mjerenja mikropodrtavanja te je za minaret izrađen numerički model korištenjem konačnih elemenata ljsuke pomoću računalnog programa SAP2000. U istraživanju je zaključno prikazana analiza rezultata numeričkog modela [1].

Sezen i ostali razmotrili su osjetljivost i stupanj oštećenja na 64 zidana i armiranobetonska minareta nakon potresa u pokrajinama Kocaeli i Düzce 1999. godine te su istraživali i potresni odziv armiranobetonskih minareta [7]. Dogangun i ostali izradili su 2008. godine procjenu ponašanja nearmiranih zidanih minareta pod utjecajem dinamičkog potresnog opterećenja [8]. U ovom radu se istražuje dinamičko ponašanje reprezentativnog minareta izgrađenog od prirodnih kamenih blokova korištenjem računalnog programa za analizu konstrukcije pomoću metode konačnih elemenata [9]. Modeliranje i ocjena konstrukcije obavljani su pomoću analize spektra odziva, prema turskim propisima TSC - Turkish Seismic Code [10].

2. Opis konstrukcije minareta

Kao što se može vidjeti na slici 1., ukupna visina minareta iznosi 40,25 m, od čega se 4,25 m odnosi na stopu, 1 m na prijelazni element, 26 m na cilindrično tijelo, a 9 m na drveni krov minareta. Vanjski promjer i debljina cilindra varira u svakom dijelu minareta. Zidovi minareta počinju debljinom od 30 cm, koja se u gornjem dijelu minareta smanjuje na 21 cm, i to postupno za 1 cm na svaka 2 m visine. Na stopi je vanjski promjer 3 m, a debljina 0,8 m, dok u donjem dijelu minareta te mjere iznose 2 m i 0,3 m, u balkonskom dijelu 1,8 m i 0,2 m te u gornjem dijelu 1,78 m i 0,19 m [1].

Kao materijal za izvođenje svih dijelova džamije Dolmabahce korišten je vapnenac, lokalno zvan *kufeki* kamen ili *maktarali* vapnenac. Za vrijeme obnove džamije obavljena su brojna ispitivanja uzoraka tog vapnenca uzetih iz ostataka starih povijesnih građevina i starih kamenoloma smještenih u blizini Istanbula. Konačno izvješće o tim uzorcima izradilo je Tehničko sveučilište u Istanbulu 2000. godine. Tipična mehanička svojstva *kufeki* kamena iskazana su u tablici 1. [1]. Taj je kamen koristio i Mimar Sinan, najpoznatiji arhitekt Otomanskog Carstva, koji

je živio od 1489. do 1588. godine, za izgradnju gotovo svih povijesnih građevina u okolici Istanbula. Prema navedenim nalazima, *kufeki* kamen pripada miocenskim formacijama i sadrži CaCO_3 (93–100%). To je prirodan kompozitni materijal jer sadrži ostatke metamorfoziranih morskih školjaka.

Tablica 1. Mehanička svojstva *kufeki* vapnenca [1]

Fizikalna svojstva	Maks.	Min.	Prosjeak
Gustoća (suha, kN/m ³)	25,0	22,8	23,9
Gustoća (potpuno zasićena, kN/m ³)	25,3	23,7	24,5
Jednoaksijalna tlačna čvrstoća (MPa)	19,2	12,3	16,7
Jednoaksijalna vlačna čvrstoća (MPa)	0,95	0,88	0,9
Modul elastičnosti (GPa)	7,36	4,30	5,84

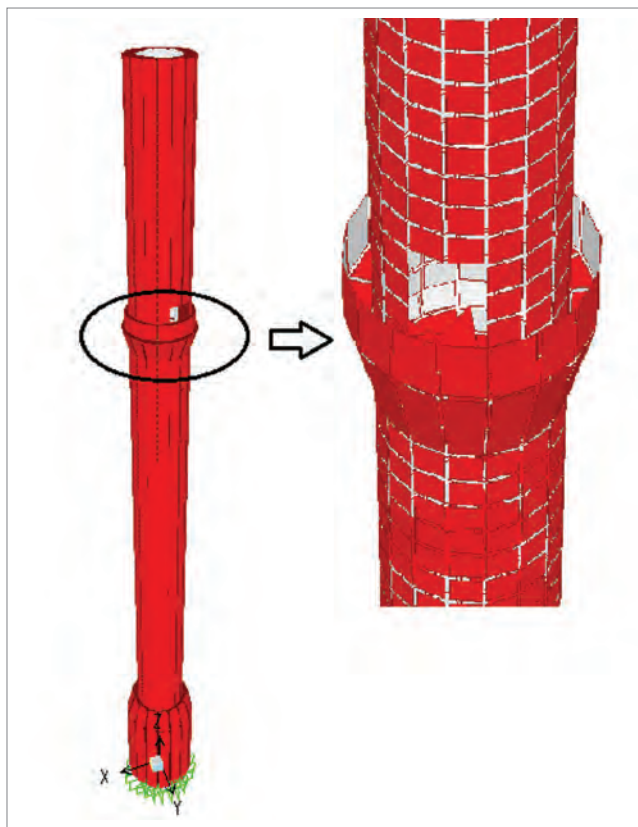
Mehanička svojstva *kufeki* vapnenca su sljedeća: modul elastičnosti neraspucalog kamenog presjeka $E = 8856$ MPa, Poissonov koeficijent $\nu = 0,24$, a jedinična težina kamena $\gamma = 23$ kN/m³. Pri izračunavanju modula elastičnosti vapnenačkog materijala ($E = 8856$ MPa) pretpostavljeno je da odnos modula elastičnosti i tlačne čvrstoće materijala iznosi $E/f_c = 720$, pri čemu je vrijednost $f_c = 12,3$ MPa (minimalna tlačna čvrstoća *kufeki* kamena) preuzeta iz tablice 1. Odnos između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće materijala (720) preuzet je iz prethodnih istraživanja u kojima su detaljno ispitana mehanička svojstva *kufeki* vapnenca te je ustanovljeno da tipični omjer između jednoosne tlačne čvrstoće i jednoosne vlačne čvrstoće varira od 11 do 12, prema [11, 12, 13, 14].

3. Dinamička analiza konstrukcije i vrednovanje rezultata

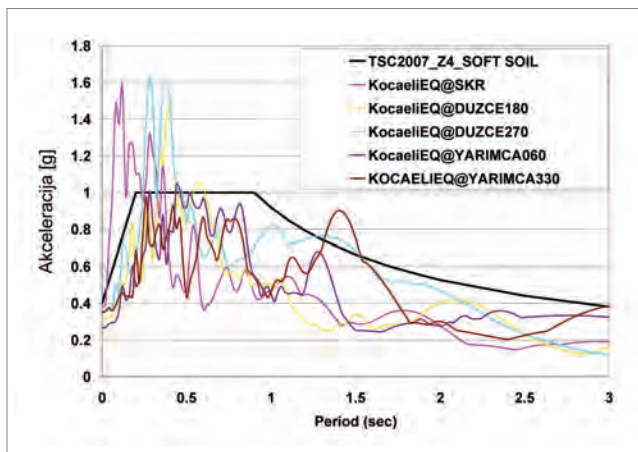
Prostorni model konstrukcije, izrađen za potrebe analize dinamičkog ponašanja minareta, prikazan je na slici 2. Model obuhvaća i spiralno stubište izrađeno od kamena koje je spojeno s vanjskim zidovima minareta. Vlastita težina drvenog krova (gornjeg dijela minareta) ravnomjerno je raspoređena po vrhu zida minareta.

Što se tiče rubnih uvjeta, stopa minareta smatra se upetom. Kao što se vidi na slici 1., stopa minareta spojena je na masivni vanjski zid džamije pa stoga nije uzeta u obzir interakcija između tla i konstrukcije niti rotacija stope minareta.

U modelu konstrukcije pretpostavljeno je linearno elastično ponašanje materijala, a promjene krutosti su zanemarene. Pretpostavljeno je da se minaret nalazi u području visoke seizmičke aktivnosti i u pretežno slabo nosivim slojevima tla, tj. pretpostavljena je prva seizmička zona i kategorija tla Z4 prema TSC 2007 [10] te kategorija tla tipa D prema Eurokodu 8 [15]. Radi simuliranja mogućeg elastoplastičnog ponašanja minareta



Slika 2. 3D model minareta s detaljem balkona



Slika 3. Usporedba računskog spektra odziva sa spektrima prije snimljenih potresa

pretpostavilo se da vrijednost faktora umanjenja seizmičkog opterećenja (tj. faktora R) za zidane minarete prema [10] iznosi 2, dok faktor ponašanja q (sličan faktoru R) za zidane tornjeve prema dodatku E, dijela 6, Eurokoda 8 [16] iznosi 1,5. Koeficijent prigušenja od 2% pretpostavljen je za potrebe dinamičke analize takvih konstrukcija. Efekt drugog reda (P-delta) zanemaren je u analizi. Dinamička analiza modela minareta provedena je primjenom računskog spektra odziva definiranog prema [10]. Računski spektar odziva određen je za vrstu tla Z4, sa 2% prigušenja za najvišu seizmičku aktivnost u Turskoj, što

je prikazano na slici 3. Na istoj su slici prikazane spektralne karakteristike prijašnjih velikih potresa zabilježenih 1999. godine u uvjetima mekog tla. Kao što se može vidjeti, računski spektar odziva određen prema TSC 2007 i spektri određeni na temelju snimljenih akceleracija dobro se podudaraju.

Prvih pet modalnih perioda modela minareta (određenih modalnom analizom) i doprinos modova dinamičkom odzivu prikazani su u tablici 2. Modalnom analizom i mjerenjima pri ambijentalnim vibracijama određen je gotovo isti osnovni period minareta. Prva četiri moda bitno sudjeluju u odzivu, a to se naročito odnosi na prvi mod koji u odzivu sudjeluje s čak 34%. Torzijski mod (5. mod) gotovo uopće ne utječe na odziv minareta. Na konstrukciji minareta obavljena su mjerenja mikropodrtavanja uslijed ambijentalnih pobuda te je izmjerena osnovna frekvencija minareta od 0,88 Hz i odgovarajući period 1,136 s [1]. Prvi period izračunan u ovom istraživanju iznosi 1,21 s (tablica 2.). Razlika od 6% može se smatrati zanemarivom za praktične potrebe projektiranja.

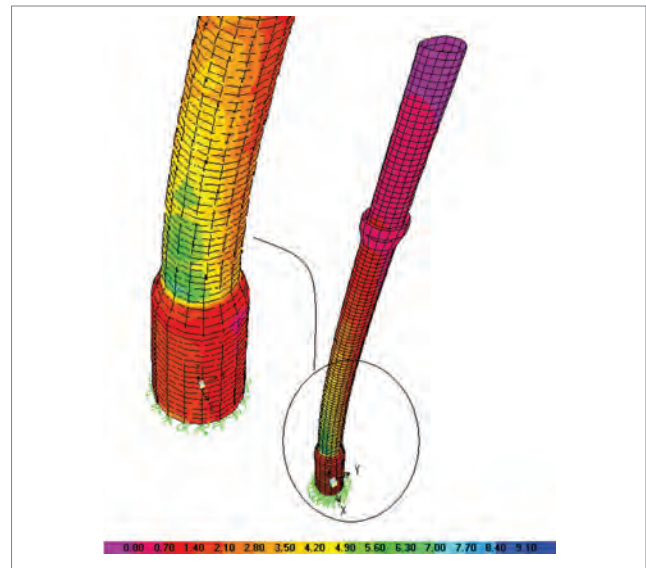
Tablica 2. Prvih pet modova s faktorima sudjelovanja u odzivu

Modovi	1.	2.	3.	4.	5.
Smjer	Bočni	Bočni	Bočni	Bočni	Bočni
Period [s]	1,21	1,21	0,20	0,20	0,08
Faktor	34,0	34,0	13,0	13,0	1,0

Bočni pomaci na vrhu minareta, određeni korištenjem računskog spektra odziva, prikazani su na slici 4. Maksimalni izračunani pomak iznosio je 199 mm za proračunski spektar koji se odnosi na uvjete tla Z4 (meko tlo). Zakrivljenost konture minareta upućuje na uglavnom fleksijske bočne deformacije, pri čemu je najveći pomak izračunan na krovu. Visina minareta, bez drvenog krova iznosi 31,25 m. Iako se minaret ponaša kao konzolna konstrukcija, deformacija je manja po visini relativno krute stope visoke 4,25 m. Vrijednost pomaka počinje rasti iznad prijelaznog dijela na visini od otprilike 5,25 m.

U turskim i drugim seizmičkim propisima nema uputa koje bi se izravno odnosile na procjenu, tj. na sanaciju vitkih toranjskih konstrukcija izgrađenih od zidanih kamenih blokova. U turskim propisima za potres obrađene su uglavnom kuće i zgrade, ali se njegove osnovne odredbe ipak mogu koristiti za određivanje seizmičke otpornosti minareta. Izračunani indeks pomaka na krovu (δ/h) iznosi 0,0063, što je manje od vrijednosti 0,01 koja je iskazana u [10] za građevine kao maksimalni indeks pomaka na krovu za takve slučajeve. Smjernice FEMA 273 [17] predlažu granični pomak (klizanje na spoju) od 0,4% za sprečavanje rušenja nearmiranih zidanih zidova (za zidove napravljene od šupljih ili punih cigala, tj. od glinenih ili betonskih blokova) [17]. Iz prijašnjih istraživanja, u kojima su obrađeni uzroci rušenja minareta nakon potresa očito je da su zidani minareti uglavnom otkazivali na donjem dijelu cilindričnog tijela, upravo

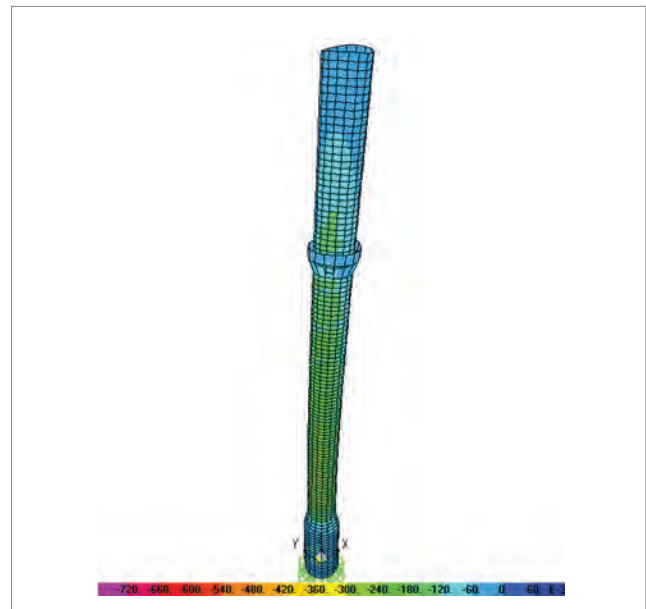
iznad prijelazne zone [7]. Za minaret koji se obrađuje u ovom radu maksimalne vrijednosti naprezanja određene analizom provedenom na modelu konačnih elemenata iznose -11,32 MPa (tlak), 9,20 MPa (vlak) i 0,72 MPa (posmik), kao što se to vidi na slikama 5 i 6. Vlačna naprezanja značajno su veća od vlačne čvrstoće vapnenca čija maksimalna nosivost iznosi 1,0 MPa [9]. Velika vlačna naprezanja pojavljuju se u donjim dijelovima, što je razlog velike osjetljivosti minareta na seizmička opterećenja. Osim toga, što se tiče indeksa pomaka na krovu, dobivena vrijednost od 0,0065 (pomak na krovu od 199 mm) viša je nego kod sličnih vitkih zidanih konstrukcija. S obzirom na spomenute okolnosti, pokazalo se da su povijesne građevine ovog tipa osjetljive na utjecaj jakih potresa. S druge strane, slabost takvih konstrukcija povećava se zbog složenog ponašanja kamenog materijala, isto kao i same interakcije blokova kamena. Nadalje, pri provedbi bilo kakvih intervencija na konstrukciji, u obzir se treba uzeti činjenica da se zaštita povijesnih konstrukcija treba obavljati bez narušavanja vanjskog izgleda konstrukcije.



Slika 5. Raspodjela osnih vlačnih naprezanja po visini minareta (MPa), [6]



Slika 4. Zakrivljenost konture i bočni pomak po visini minareta (mm) [6]



Slika 6. Raspodjela posmičnih naprezanja po visini minareta (MPa), [6]

4. Ojačanje konstrukcije polimerom armiranog vlaknima

U proteklih desetak godina sve više se pridaje važnost primjeni polimera armiranog vlaknima (engl. FRP - Fiber Reinforced Polymer) u protupotresnom ojačanju/sanaciji povijesnih građevina. Istražena je mogućnost primjene FRP-a u svrhu povećanja otpornosti građevina na savijanje i posmik. Kao što se vidi na slikama 5 i 6, slabe točke u smislu otpornosti na osno i posmično naprezanje nalaze se na donjem dijelu minareta, točno ispod i iznad prijelazne zone. Čini se da je omatanje FRP obloge oko tog kritičnog područja jednostavan i pouzdan način za ojačanje/sanaciju građevina. Potpuno povezivanje FRP

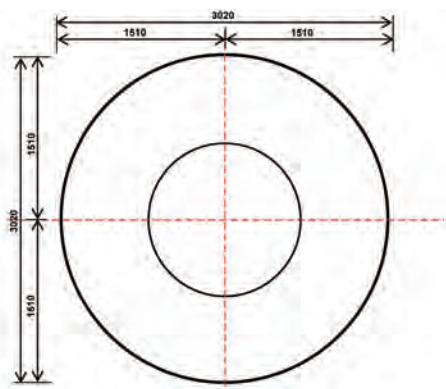
obloge i konstrukcije od zidanog kamenog materijala provodi se upotrebom moždanika/sidara prilikom ugradnje FRP obloge ili povezivanjem FRP obloge s temeljima konstrukcije.

Prema rezultatima prijašnjih istraživanja u vezi s ojačavanjem zidanih stupova pomoću vlaknastih kompozita sljedeća se jednadžba može koristiti za proračun tlačne čvrstoće donjeg dijela minareta u cijelosti omotanog trakama od polimera armiranog vlaknima, [18, 19, 20]:

$$f_{mcd} = f_{md} + \frac{g_m \cdot 4 \cdot t_f \cdot b_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd}}{2000 \cdot D \cdot \rho_f}$$

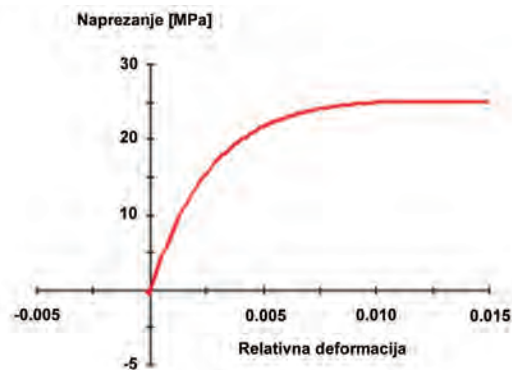
U proračunu povećanja tlačne čvrstoće zidane konstrukcije, nakon postavljanja FRP obloge oko minareta, korišteni su sljedeći parametri: $f_{md}=12\text{ MPa}$, $g_m=2300\text{ kg/m}^3$, $E_f=200000\text{ MPa}$, $\epsilon_{fd}=0.004$, $t_f=10\text{ mm}$, $b_f=500\text{ mm}$, $D=3000\text{ mm}$ i $p_f=500\text{ mm}$. Proračunana tlačna čvrstoća obavijenog zidanog minareta iznosila je čak 25 MPa . Ta je čvrstoća veća od tlačnih naprezanja određenih analizom, ali je vlačna čvrstoća presjeka ipak manja od proračunskih vrijednosti. Moment savijanja na stopi minareta uslijed računskog spektra odziva iznosi 5200 kNm , a ukupno osno opterećenje minareta iznosi 1920 kN .

Iz toga proizlazi da se FRP omotaču treba dodati i uzdužno ojačanje FRP trakama da bi se povećala otpornost na savijanje. U tu je svrhu obavljena analiza presjeka pomoću XTRACT programa [21] za presjek donjeg dijela minareta, uz sljedeće pretpostavke: $f_m=25\text{ MPa}$, $E_{fip}=200000\text{ MPa}$, maksimalna pretpostavljena relativna deformacija FRP-a u određenom poprečnom presjeku $\epsilon_{max}=0.01$, ukupna debljina ojačanja FRP trakama iznosi 10 mm , vlačna čvrstoća korištenih traka od polimera armiranog ugljičnim vlaknima (engl. CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer) iznosi 2800 MPa . Nakon ojačanja promjer donjeg dijela minareta iznosi 3020 mm .

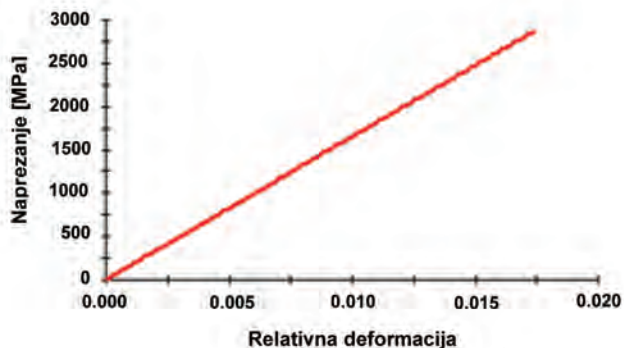


Slika 7. Prikaz poprečnog presjeka donjeg dijela minareta obavijenog FRP-om [6]

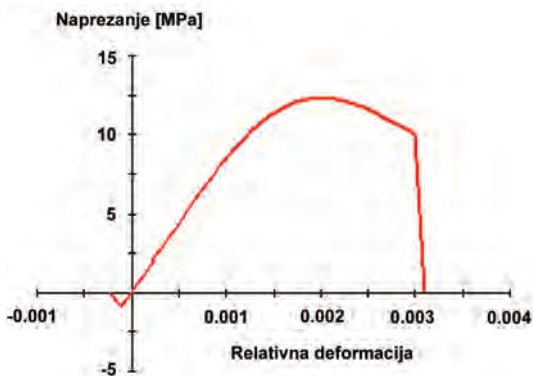
Slike 7. i 8. prikazuju poprečni presjek donjeg dijela minareta koji je omotan poprečno i ojačan uzdužno FRP oblogom te dijagram naprezanje – relativna deformacija za materijal zida. Slike 9. i 10. prikazuju dijagram naprezanje – relativna deformacija zida ojačanog FRP-om, te dijagram naprezanje – relativna deformacija za CFRP materijal [18, 19]. Dijagram moment savijanja-zakrivljenost presjeka ojačanog FRP-om prikazan je na slici 11., iz čega se vidi da izračunani fleksijski kapacitet minareta zadovoljava zahtijevane uvjete.



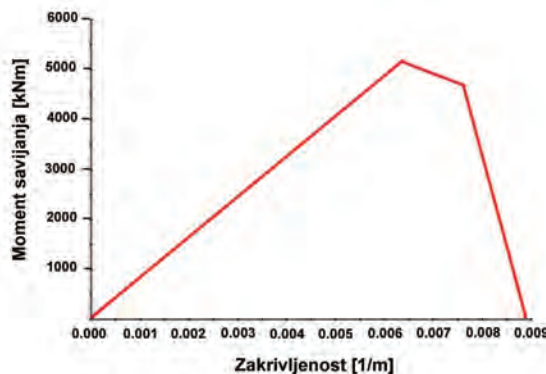
Slika 9. Dijagram naprezanje – relativna deformacija zida ojačanog FRP-om [6]



Slika 10. Dijagram naprezanje – relativna deformacija CRFP-a [6]



Slika 8. Dijagram naprezanje – relativna deformacija zida



Slika 11. Dijagram moment savijanja - zakrivljenost za ojačani presjek donjeg dijela minareta [6]

5. Zaključak

U ovom su radu prikazani mogući načini otkazivanja tipičnog povijesnog minareta, reprezentativnog za minarete u Turskoj. Rezultati mjerenja pri ambijentalnim vibracijama i prethodna ispitivanja materijala pokazuju da se ponašanje građevine pri seizmičkim djelovanjima može prilično točno predvidjeti te da ih je moguće koristiti za ocjenu ponašanja minareta. Analiza je pokazala da se ojačavanjem onih dijelova konstrukcije koji su najpodložniji oštećenju (stopa i donji dio) može jamčiti stabilnost minareta u slučaju proračunskog potresa (10% vjerojatnosti pojave u razdoblju od 50 godina, jak potres).

Prikazana prostorna analiza omogućuje ocjenu ponašanja minareta pod utjecajem seizmičkog djelovanja, što uključuje i određivanje načina otkazivanja te zone mogućeg otkazivanja. Dodatna bi se istraživanja svakako trebala provesti radi određivanja računskih spektara odziva posebno prilagođenih za tu vrstu konstrukcija. Realnije vrijednosti R - faktora (faktor umanjenja seizmičkog opterećenja) i koeficijenta prigušenja trebalo bi istražiti primjenom odgovarajućih eksperimentalnih i analitičkih metoda. S druge strane, potrebno je ostvariti potpuno sidrenje između zidane konstrukcije i FRP slojeva. Problem se može riješiti primjenom moždanika/sidara ili učvršćivanjem uzdužnih FRP traka za temelje minareta. Omatanjem FRP-a oko zidane konstrukcije dugoročno može doći do pojave

vlage zbog nepropusnosti FRP slojeva. Mjere opreza u svrhu očuvanja povijesnih konstrukcija moraju biti odgovarajuće. Niska otpornost FRP-a na požar može se poboljšati dodavanjem tankog zaštitnog sloja od betona/morta ili obloge koja bi ujedno služila za prekrivanje neuglednih traka. Rezultati numeričke analize pokazuju da do najvećih oštećenja obično dolazi u području baze i u donjem dijelu minareta te da bi se omatanjem FRP traka oko tih kritičnih presjeka poboljšalo bočno ponašanje konstrukcije. Dobiveni rezultati mogu poslužiti za rješavanje problema seizmičke zaštite takvih i sličnih povijesnih građevina.

Oznake

f_c	- tlačna čvrstoća ziđa
E	- modul elastičnosti ziđa
f_{mod}	- čvrstoća omotanog ziđa
f_{md}	- karakteristična tlačna čvrstoća običnog ziđa
g_m	- specifična težina ziđa (kg/m^3)
E_f	- modul elastičnosti FRP-a
ϵ_{fd}	- granična proračunska relativna deformacija FRP-a
t_f	- debljina sloja FRP-a
b_f	- širina FRP traka u vertikalnom smjeru; pretpostavljeno je da su vlakna pod kutom 90° u odnosu na os stupa
D	- promjer zidanog stupa
p_f	- udaljenost između osi dviju uzastopnih FRP traka

LITERATURA

- [1] Oguzmert, M.: *Yigma Minarelerin Dinamik Davranisi*, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, 2002. (in Turkish)
- [2] Cosgun, C.: *Silindirik Yigma Yapilarin Lif Takviyeli Polimer ile Takviye Edilmesi*, M.Sc.-Thesis, Istanbul Kultur University, 2005. (in Turkish)
- [3] Sezen, H., Acar, R., Dogangun, A., Livaoglu R.: *Dynamic Analysis and Seismic Performance of Reinforced Concrete Minarets*, Engineering Structures, 30, 2008., 2253-2264
- [4] Lourenco, P.B.: *Recommendations for Restoration of Ancient Buildings and the Survival of a Masonry Chimney*, Construction and Building Materials, 20, 2006., 239-251
- [5] Lourenco, P.B., Oliveira, D.V., Roca, P., Orduna, A.: *Dry Joint Stone Masonry Walls Subjected to In-Plane Combined Loading*, Journal of Structural Engineering, 131, 2005., 11
- [6] Turk, A. M., Cosgun, C.: *The Determination of Seismic Behaviour and Retrofit of Historical Masonry Minaret with FRP*, 8th International Masonry Conference, Dresden, 148, 2010., 2029-2038.
- [7] Sezen, H., Firat, G.Y., Sozen, M.A.: *Investigation of the Performance of Monumental Structures During the 1999 Kocaeli and Duzce Earthquakes*, Fifth National Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, AE-020, 2003.
- [8] Dogangun, A.; Acar, R.; Sezen, H.; Livaoglu, R.: *Investigation of Dynamic Response of Masonry Minaret Structures*, Bull Earthquake Eng, 5, 2008., 505-517
- [9] SAP2000: Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., California, 2009.
- [10] TSC 2007: Specification for Buildings to Be Built in Disaster Areas, Ministry of Public Works and Settlement, Turkey, 2007.
- [11] Arioglu, N., Arioglu, E.: *Mimar Sinan'in Sectigi Tas: Kufeki ve Cekme Dayanimi*, 14. Turkiye Insaat Muhendisligi Teknik Kongresi, Izmir, 1997. (in Turkish)
- [12] Erguvanli, K., Ahunbay, Z.: *Mimar Sinan Istanbul'daki Eserlerinde Kullandigi Taslarin Muhendislik Jeolojisi ve Mimari Ozellikleri*, Muhendislik Jeolojisi Bulteni, 11, 1989., 109-114 (in Turkish)
- [13] Ahunbay, Z.: *Mimar Sinan Yapilarinda Kullanilan Yapim Teknikleri ve Malzeme*, Mimarbası Kocasınan Yasadığı Cag ve Eserleri, Istanbul, 1988. (in Turkish)
- [14] Arioglu, E., Arioglu, N.: *Mimar Sinan'in Taşiyıcı Olarak Kullandığı Kufeki Tasinin Muhendislik Gizemi*, Mimar Sinan Donemi Yapı Etkinlikleri Sempozyumu, Yapı Merkezi, Istanbul, 1999. (in Turkish)
- [15] Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, 1998.
- [16] Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 6 Annex E, 1998.
- [17] FEMA 273: NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management, Washington, 1997.
- [18] CNR 2004: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening existing structures. Italian Council of National Research, Rome, 2004.
- [19] Aiello, M.A., Micelli, F., Valente, L.: *Structural Upgrading of Masonry Columns by Using Composite Reinforcements*, Journal of Composites for Construction, 11, 2007., 6, 650-658
- [20] Galić, J., Sorić, Z., Rak, M.: *Strengthening masonry walls subjected to shear load*, GRADEVINAR 59 (2007) 4, 289-299.
- [21] XTRACT V3.0.1.: *Cross Sectional Structural Analysis of Components*, IMBSEN software systems, 2004.