

Primljen / Received: 7.2.2012.

Ispravljen / Corrected: 7.8.2012.

Prihvaćen / Accepted: 25.9.2012.

Dostupno online / Available online: 15.10.2012.

Utjecaj plitkih potresa na džamiju Sehzade Mehmet

Autori:



Mr.sc. **Zeynep Yeşim İlerisoy**
Gazi Univerzitet u Ankari, Turska
Odjel za arhitekturu
zyharmankaya@gazi.edu.tr



Dr.sc. **Asena Soyluk**
Gazi Univerzitet u Ankari, Turska
Odjel za arhitekturu
asenad@gazi.edu.tr

Stručni rad

[Zeynep Yeşim İlerisoy, Asena Soyluk](#)

Utjecaj plitkih potresa na džamiju Sehzade Mehmet

Potresi negativno djeluju kako na postojeće građevine tako i na građevine od povijesnog značenja. U radu se razmatraju destruktivni utjecaji plitkih potresa, magnitude veće od 7, na povijesne građevine. Analizira se utjecaj potresa na džamiju Sehzade Mehmet u Istanbulu. Džamija je modelirana primjenom programa za analizu konstrukcija SAP2000 metodom konačnih elemenata. Razmatran je utjecaj navedenih potresa na nosivi okvir džamije. Dobiveni rezultati pokazuju da uslijed razlike u magnitudama dvaju potresa, plitki potresi dovode do velikih oštećenja povijesnih građevina.

Ključne riječi:

potres, dinamički proračun, odziv u vremenu, magnituda, džamija

Professional paper

[Zeynep Yeşim İlerisoy, Asena Soyluk](#)

Impact of Shallow Earthquakes on the Sehzade Mehmet Mosque

Earthquakes have negative impact on both the existing structures and buildings of historic significance. This study demonstrates destructive impact of shallow earthquakes (over 7 in magnitude) on historic structures. In addition, the study analyses the earthquake impact on the Sehzade Mehmet Mosque in Istanbul. The mosque model is made by applying the structural analysis program, SAP2000, which uses the finite element method. The effects of these earthquakes on the bearing frame of the mosque are analysed. The results obtained show that, due to difference in magnitudes of the two earthquakes, shallow earthquakes cause major damage to historic structures.

Key words:

earthquake, dynamic analysis, time-history analysis, magnitude, mosque

Fachbericht

[Zeynep Yeşim İlerisoy, Asena Soyluk](#)

Einfluss von schwachen Erdbeben auf die Schehzade Mehmet Moschee

Erdbeben haben einen negativen Einfluss auf bestehende sowie historische Bauten. In der Arbeit werden destruktive Einflüsse von schwachen Erdbeben einer Magnitude von über 7 auf historische Bauten betrachtet. Es wird der Einfluss von Erdbeben auf die Schehzade Mehmet Moschee in Istanbul analysiert. Die Moschee wurde unter Anwendung des Konstruktionsanalyseprogramms SAP2000 modelliert. Es wurde der Einfluss der angeführten Erdbeben auf den Tragrahmen der Moschee gemessen. Die erhaltenen Resultate zeigen auf, dass infolge der Magnitudendifferenz der beiden Erdbeben schwache Erdbeben zu großen Beschädigungen von historischen Bauten führen.

Schlüsselwörter:

Erdbeben, dynamische Berechnung, zeitliche Antwort, Magnitude, Moschee

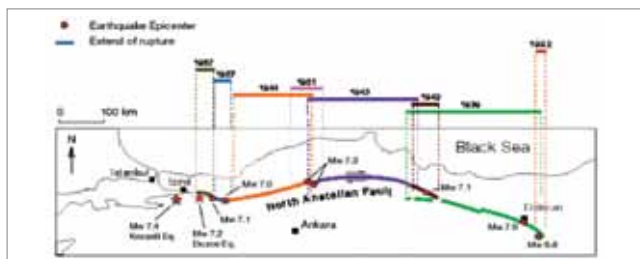
1. Uvod

Povijesne građevine su bogatstva koja nam ostaju kao spomen na tisuće godina kulturne baštine. One su globalno kulturno naslijeđe i stoga ih treba na primjeren način čuvati i održavati. Ta zdanja daju nam uvid u društveno-ekonomska, politička i vjerska načela prema kojima su živjeli naši preci. Pravilna interpretacija tako stečenih spoznaja omogućuje nam tumačenje sadašnjosti i planiranje budućnosti.

Povijesne zidane građevine imaju nizak stupanj duktilnosti pa zbog krutih i krhkih konstrukcijskih elemenata obično teško stradaju u slučaju jačih potresa. Oštećenja se uglavnom javljaju zbog nedostatka duktilnosti, pa konstrukcija ne može podnijeti pomake i distorzije koji se javljaju kod jačih potresa. Seizmička oštećenja povijesnih građevina mogu biti izuzetno destruktivna [1]. Brojni se parametri trebaju uzeti u obzir u analizi konstrukcije povijesnih građevina. Međutim, u analizi zidanih konstrukcija nailazimo na brojne probleme, i to zbog nedostatka informacija i poteškoća u modeliranju složenog ponašanja morta, spojeva i ziđa kao kompozitnog materijala. U radu se analizira utjecaj potresa na džamiju Sehzade Mehmet koju je izgradio Mimar Koca Sinan, "veliki arhitekt Sinan" za vrijeme svog naukovanja u Istanbulu, gradu poznatom po visokom stupnju seizmičkog rizika.

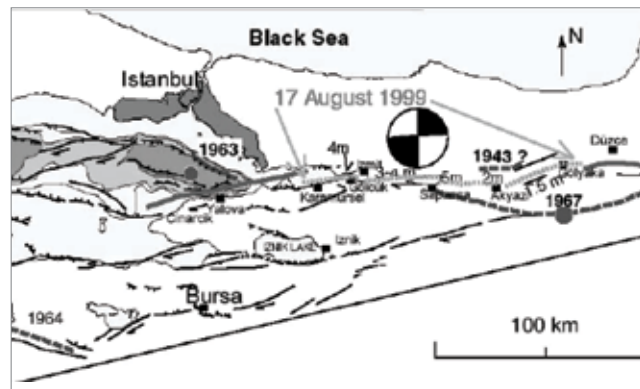
2. Potresi u Turskoj

Ne tako davne 1999. godine Tursku su u vremenskom razmaku od 86 dana zadesila dva velika potresa u zoni sjevernoanatolijskog rasjeda. U seizmičkoj povijesti našeg planeta rijetko se događa da istu regiju pogode dva uzastopna potresa magnitude veće od 7 stupnjeva. Sjeverno anatolijski rasjed (SAR) proteže se u dužini od 1500 km i smatra se jednim od najaktivnijih i najvećih rasjeda s pomakom po pružanju rasjeda na svijetu, a destruktivne potrese uzrokuje klizanjem koje se zbiva brzinom od 20 do 25 mm/godinu. SAR je najaktivnija komponenta u tektonskoj genezi Anatolije. U ovom je stoljeću više od 25 potresa pogodilo područje na potezu od 900 km duž zone spomenutog rasjeda [2]. Na slici 1. prikazan je niz potresa, s naznakom datuma i raspona razornog djelovanja. Iz slike se može zaključiti da se potresi velike magnitude neizbježno javljaju u blizini turskih gradova, i to zbog visoke seizmičnosti SAR-a i zbog činjenice da taj rasjed prolazi kroz najgušće naseljena područja Turske.



Slika 1. Potresi duž sjeverno anatolijskog rasjeda u ovom stoljeću [3]

Potres Kocaeli dogodio se 17. kolovoza 1999. u 03:02 ujutro (po lokalnom vremenu), a velike je štete prouzročio u području od 140 km (slika 2.). Epicentar je bio u Golcuku na istočnoj obali Mramornog mora, tj. na zemljopisnoj dužini od 29,91E i širini od 40,70N [4]. Turski zavod za istraživanje potresnih aktivnosti (ERD) objavio je da magnituda potresa iznosi M_w : 7,51, s dubinom od približno 10 km. Izmjerena vršna akceleracija iznosi 0,18 g.



Slika 2. Potres Kocaeli, 17. kolovoza 1999. [5]

Otprilike tri mjeseca nakon potresa u Kocaeliju, tj. 12. studenog 1999., mjesto Duzce zadesio je potres magnitude 7.14. Taj je potres svojim djelovanjem zahvatio oko 40 km onog istog rasjeda koji se nešto istočnije aktivirao tijekom potresa Kocaeli. Početak druge zone loma nalazi se na kraju zone loma koja je nastala 17. kolovoza. Po svojim značajkama, lom je bilateralan, simetričan i dominantno s pomakom po pružanju rasjeda, s epicentrom na 40.76 S i 31.15 I, dok je hipocentar na dubini od 11 km. Izmjerena je vršna akceleracija od 0.029 g [6].

2.1. Magnituda potresa

Magnitudom potresa iskazuje se količina energije koja se oslobađa u vrijeme potresa. Seizmolozi za određivanje magnitude primjenjuju razne metode, što ovisi o veličini, vrsti i lokaciji potresa. Najčešće se koristi metoda koju je razvio Richter i koja je po njemu i nazvana. Magnituda po Richteru, M ili M_L , izračunava se na temelju površinskih seizmičkih valova zabilježenih na seizmogramu. Tako se na posredan način izračunava količina oslobođene energije. Magnituda se iskazuje kako slijedi:

$$M_L = \log A - \log A_0 \quad (1)$$

gdje je A maksimalna zabilježena amplituda nekog potresa na udaljenosti registriranoj pomoću Wood-Andersonova instrumenta, dok je A_0 amplituda potresa koja je usvojena kao referentna vrijednost. Ostale metode za određivanje magnitude su magnituda površinskih valova (M_s), magnituda prostornih valova (m_b) i magnituda trajanja (M_p) [7]. U novije

su vrijeme seizmolozi razvili momentnu magnitudnu ljestvicu (za koju je usvojena kratica MMS, a označava se s M_w) radi mjerenja veličine potresa u smislu energije koja se tom prilikom oslobađa. Geološki institut SAD-a koristi ljestvicu MMS za određivanje magnituda svih velikih potresa [8].

Momentna se magnituda izračunava na temelju momenta koji se oslobađa u trenutku potresnog udara. Za momentnu magnitudnu ljestvicu koristi se oznaka M_w , gdje indeks w označava izvršeno mehaničko djelovanje. Momentna magnituda M_w je bezdimenzijski broj koji se opisuje kako slijedi:

$$M_w = \frac{\log M_0}{1,5} - 10,7 \quad (2)$$

gdje je M_0 magnituda seizmičkog momenta u dinima po centimetru (10^{-7} Nm). M_0 se može odrediti na temelju zabilježenih spektara valova [9].

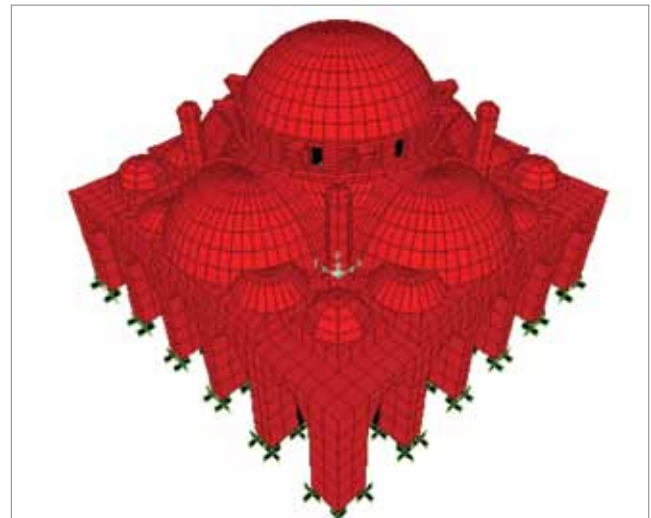
3. Analitička metoda

Džamiju Sehzade Mehmet izgradio je Sinan u vremenu između 1543. i 1548. godine u spomen jednog od Sulejmanovih sinova, krunskog princa Mehmeta (slika 3.a). Džamija je izgrađena tehnikom zidanja na bazi vapnenca, a odlikuje se četvrtastim tlocrtom i središnjom kupolom. Na svakoj od četiri strana nalazi se polukupola (slika 3.b).

Središnju kupolu nose četiri luka, a oslanjaju se na četiri stupa. Kupola je visoka 37 m, a promjer joj iznosi 19 m. Tlocrt džamije Sehzade Mehmet je četvrtastog oblika i zauzima površinu od 38 x 38 m, a džamija ima i prednje dvorište. Ovakva gornja konstrukcija leži na zidovima koji su učvršćeni pomoću pet kontrafora. 24 prozora smještene su u prostoru tambura [10]. Konstrukcijski elementi džamije Sehzade Mehmet su kupole, prijelazni elementi (elementi koji omogućuju prijelaz s kružne geometrije na poligonalnu: pendantivi), lukovi, protutežni tornjevi, stupovi, zidovi, kontrafori i temelji.

Numerički model korišten u analizi džamije Sehzade Mehmet izrađen je pomoću programa SAP 2000 koji je baziran na metodi

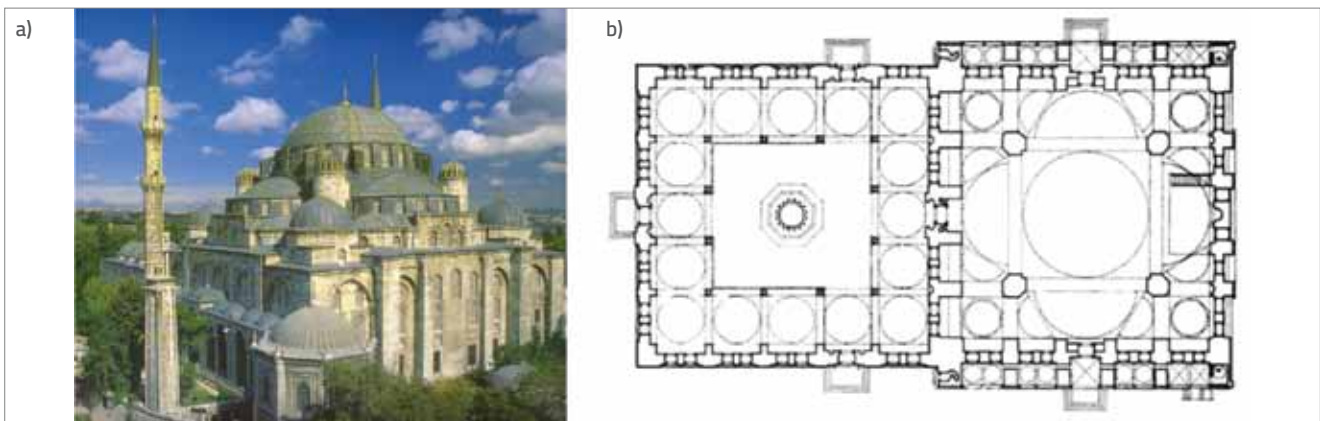
konačnih elemenata [11]. Veličina i složenost konstrukcije uvjetovala je izradu modela koji se sastoji od 7468 čvorova, 2976 konačnih elemenata ljuske i 2352 volumna konačna elementa (slika 4.). Tijekom modeliranja džamije Sehzade Mehmet, volumni su elementi korišteni za lukove i zidove, dok su za pendantive i kupole korišteni elementi ljuske. Svojstva elemenata džamije Sehzade Mehmet prikazana u tablici 1. preuzeta su iz studija koje su izrađene za džamije Aja Sofija i Sulejmanija [12].



Slika 4. Model konačnih elemenata za džamiju Sehzade Mehmet

Tablica 1. Svojstva materijala [12]

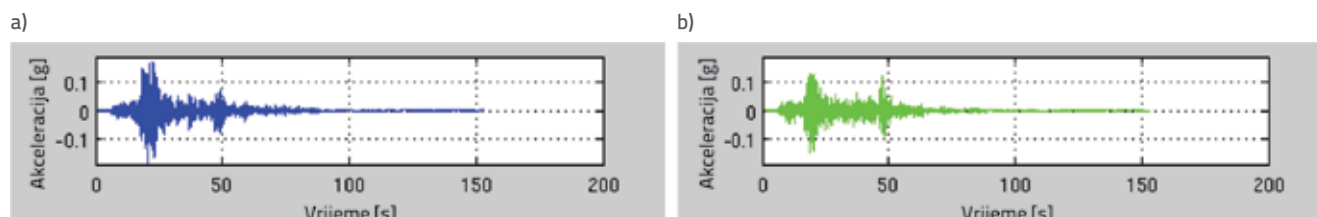
Promatrani element	Karakteristika profila	E [kN/m ²]	γ [kN/m ³]	Poissonov koeficijent [ν]	Debljina [m]
Lukovi	puni	850E+4	21,9	0,20	
Stupovi	puni	850E+4	21,9	0,18	
Glavna kupola	ljuskasti	300E+4	20,0	0,18	0,5
Pendantivi	ljuskasti	300E+4	20,0	0,20	0,7
Polukupole	ljuskasti	300E+4	20,0	0,18	0,7



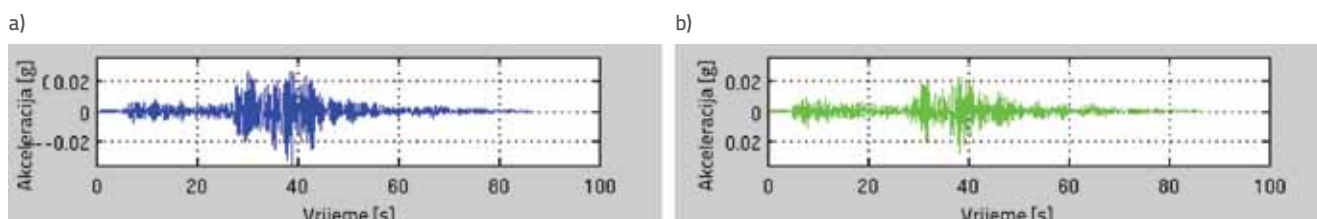
Slika 3. Džamija Sehzade Mehmet: a) pogled, b) tlocrt

Tablica 2. Karakteristike potresa Duzce i Kocaeli

Potresi	Udaljenost od točke loma [km]	Dubina potresa [km]	Kategorija lokacije	Vršna akceleracija (g)		
				Smjer: S-J	Smjer: I-Z	Vertikalno
Duzce	168	11	Meko tlo	0,029	0,024	0,01
Kocaeli	65	10	Meko tlo	0,18	0,16	0,13



Slika 5. Zapis potresne aktivnosti sa stanice Fatih u vrijeme potresa Kocaeli: a) smjer I-Z, b) smjer S-J, [13]



Slika 6. Zapis potresne aktivnosti sa stanice Fatih u vrijeme potresa Duzce: a) smjer I-Z, b) smjer S-J, [13]

Osim konstrukcijskih karakteristika (materijal, načini građenja itd.) koje utječu na ponašanje konstrukcije u vrijeme potresa, na stupanj oštećenosti u velikoj mjeri utječu i lokalni uvjeti tla, što ovisi o dinamičkim karakteristikama potresa i tla. Za dinamičku analizu džamije Sehzade Mehmet odabrana je metoda proračuna odziva u vremenu. U radu se razmatraju potresi Kocaeli i Duzce koji su se dogodili u zoni sjevernoanatolijskog rasjeda desnobočnog tipa. Ti su potresi odabrani kako bi se otklonio utjecaj činjenice da se seizmički valovi prostiru ovisno o udaljenosti od zone fokusa. Osim toga, podaci prikazani u tablici 2. dobiveni su iz iste stanice za bilježenje potresne aktivnosti (Fatih, Istanbul) kako bi se osiguralo da na seizmičke valove ne utječu svojstva geoloških formacija kroz koje prolaze tijekom prostiranja iz zone fokusa. Zapisi o pomacima tla u vrijeme potresa Duzce i Kocaeli prikazani su na slikama 5 i 6.

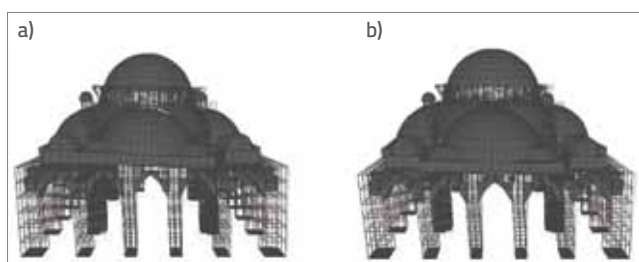
S matematičkoga gledišta potres određene magnitude uzrokuje generiranje seizmičkih valova čije su amplitude proporcionalne 10^x . Stvarna amplituda seizmičkih valova na određenoj lokaciji ovisi o udaljenosti lokacije od epicentra potresa, o dubini potresa te o lokalnim uvjetima u plićem podzemlju. Da bi se usporedila seizmička podrhtavanja prouzročena potresom magnitude 7,54 s podrhtavanjima potresa magnitude 7,14, primjenjuje se jednačba 3.

$$A_{(M=x)} = K \times 10^x \tag{3}$$

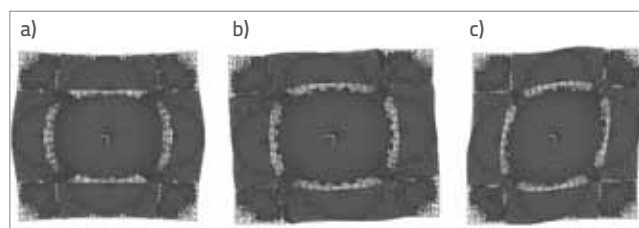
gdje je K proizvoljna konstanta. Prema jednačbi 3, magnituda potresa Duzce otprilike je za 234 posto manja od magnitude dobivene za potres Kocaeli.

4. Analiza osnovnih perioda titranja džamije

Prvih pet tonova koji se analiziraju u studiji prikazani su na slikama 7 i 8. Kao što možemo zamijetiti, prva dva su translacijska, u smjerovima x i y, treći izrazito doprinosi uzdužnoj deformaciji nosivog okvira , četvrti jest torzijski, dok peti naglašeno utječe na posmičnu deformaciju nosivog okvira.



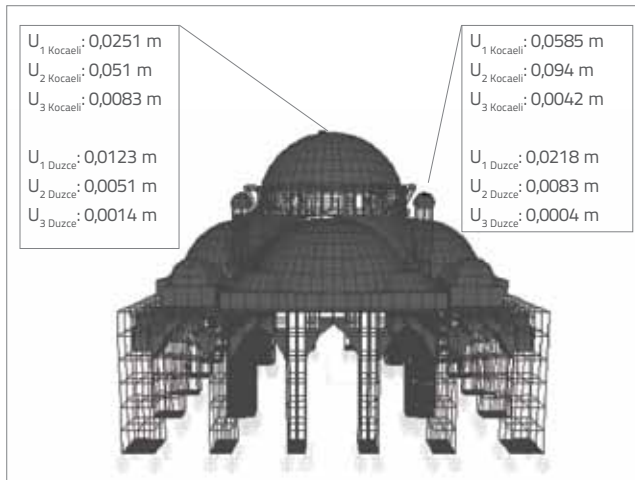
Slika 7. a) Ton 1 (T=0,493 s, translacija x); b) Ton 2 (T=0,465 s, translacija y)



Slika 8. a) Ton 3 (T=0.440 s, uzdužna deformacija nosivog okvira); b) Ton 4 (T=0.379 s, torzija); c) Ton 5 (T=0.314 s, posmična deformacija nosivog okvira)

5. Usporedba dinamičkih odziva džamije Sehzade Mehmet

Deformacije konstrukcije džamije Sehzade Mehmet dobivene pomoću dinamičkih analiza uspoređene su za zapise kretanja tla snimljene tijekom potresa Kocaeli i Duzce. Deformirani oblici džamije, određeni za kretanja tla na lokacijama Kocaeli i Duzce, prikazani su na slikama 9 i 10. Vrijednosti relativnog horizontalnog pomaka, određene u razmatranim analizama, također su prikazane na vrhu glavne kupole i na vrhu protutežnog tornja (slika 9.).



Slika 9. Relativni pomaci na vrhu glavne kupole sustava i na vrhu tornja sustava

Relativni pomaci određeni na vrhu glavne kupole u smjerovima U_1 , U_2 i U_3 manji su 51 %, 90 % i 83 % za potres Duzce u odnosu na potres Kocaeli. Ako se analizira pomak vrha tornja, možemo primijetiti da se pomaci u smjerovima U_1 , U_2 i U_3

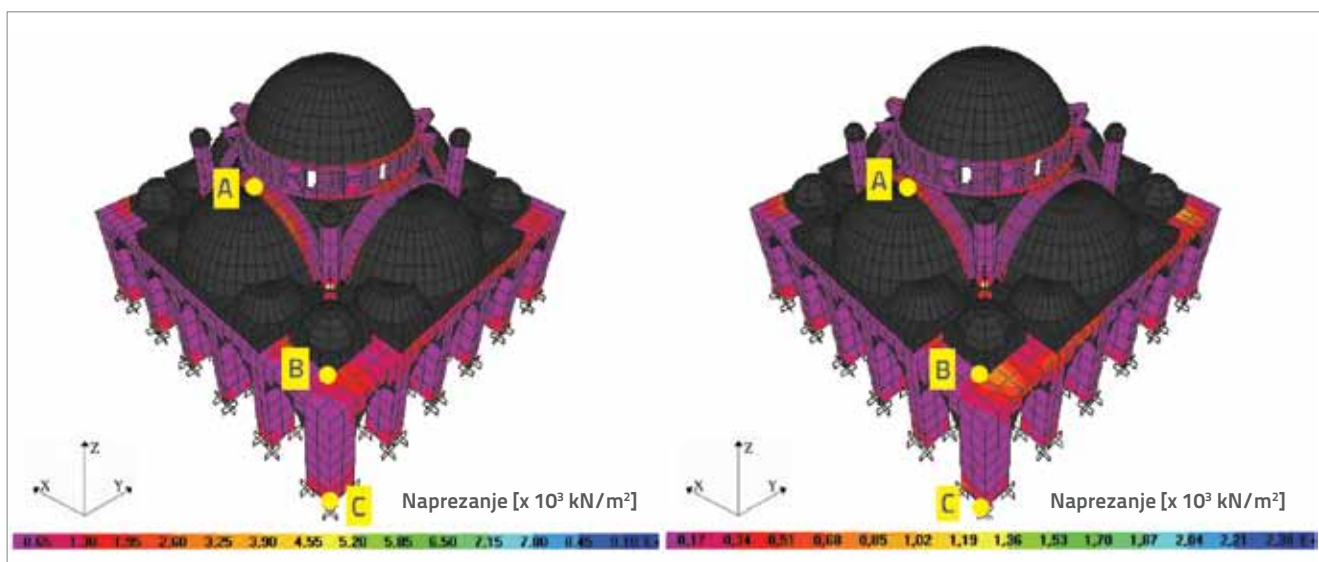
tijekom potresa Duzce smanjuju za 63 %, 91 % i 90 %, u odnosu na potres Kocaeli.

Naprezanja džamije Sehzade Mehmet dobivena dinamičkom analizom uspoređena su sa vrijednostima za potrese Kocaeli i Duzce na značajnim točkama (slika 10.). Tri su točke (A, B i C) odabrane da bi se registrirale vrijednosti naprezanja dobivene analizom. Točka A nalazi se na luku koji nosi glavnu kupolu, točka B na protutežnom tornju, a točka C na spoju između podloge i stupa.

Kao što se može vidjeti iz tablice 3., naprezanja S11 na džamiji koja su se javila u vrijeme potresa Kocaeli u spojevima A, B i C bila su za otprilike 84 %, 82 % i 87 % veća od naprezanja dobivenih za potres Duzce. Naprezanja S22 na džamiji koja su se javila u vrijeme potresa Kocaeli u spojevima A, B i C bila su za otprilike 85 %, 86 % i 87 % veća od naprezanja dobivenih za potres Duzce. Naprezanja S23 na džamiji koja su se javila u vrijeme potresa Kocaeli u spojevima A, B i C bila su za otprilike 84 %, 88 % i 87 % veća od naprezanja dobivenih za potres Duzce.

Tablica 3. Vrijednosti naprezanja džamije Sehzade Mehmet za potrese Kocaeli i Duzce

Potres	Položaj promatranja naprezanja	S11 [kN/m ²]	S22 [kN/m ²]	S33 [kN/m ²]
Kocaeli	A	3777,16	308,41	358,00
Duzce	A	604,97	45,33	57,20
Kocaeli	B	4316,15	2136,60	236,68
Duzce	B	794,58	311,50	29,47
Kocaeli	C	3482,06	3916,68	19467,91
Duzce	C	473,96	531,03	2641,68



Slika 10. Konturne linije naprezanja S11: a) potres Kocaeli, b) potres Duzce

6. Zaključak

U ovom se radu određuje dinamičko ponašanje džamije Sehzade Mehmet u Istanbulu za slučajeve raznih seizmičkih kretanja magnitude koja je veća od 7 stupnjeva u istoj regiji. Da bi se odredilo dinamičko ponašanje džamije, korišteni su zapisi kretanja tla u vrijeme potresa Kocaeli i Duzce u smjerovima U1, U2 i U3. Odzivi konstrukcije džamije Sehzade Mehmet dobiveni dinamičkom analizom pri tim seizmičkim kretanjima su uspoređeni. Rezultati dinamičke analize džamije pokazuju da su odzivi konstrukcije bitno veći u slučaju potresa Kocaeli (MW: 7,51) ako se usporede s potresom Duzce (MW: 7.14).

Pomaci konstrukcije dobiveni za korištene snimljene zapise pomaka tla u vrijeme potresa Duzce u smjerovima U1, U2 i U3 manji su otprilike 57 %, 90 % i 85 % od pomaka dobivenih tijekom potresa Kocaeli. To smanjenje odziva konstrukcije bitno je za razumijevanje važnosti magnituda i za određivanje stupnja oštećenosti konstrukcijskih elemenata u slučaju tako jakih pomaka tla. Osim toga, naprezanja na džamiji pri potresu Kocaeli otprilike su 87 % veća od naprezanja dobivenih pri potresu Duzce. Može se zaključiti da odziv konstrukcije zidane džamije može znatno varirati čak i kada postoji razlika u seizmičkim magnitudama dvaju plitkih potresa koji su se dogodili na istoj lokaciji i na području istog rasjeda.

LITERATURA

- [1] Gavrilovic, P., Kelley, S. J., Sendova, V.: A Study of Seismic Protection Techniques for the Byzantine Churches in Macedonia. APT Bulletin, 34 (2), pp. 63-69, 2003.
- [2] Barka, A., Nalbant, S.: Modelling of the Marmara Earthquakes after year of 1700. Proceedings of the 1st meeting of Active Tectonic Research Group (ATAG-1), Istanbul: Istanbul Technical University press, pp. 32-40., 1998.
- [3] USC-GEES. University of Southern California, Geotechnical Eq. Engineering Server, CA (<http://geoinfo.usc.edu/gees>), 1999.
- [4] Toksöz, M.N., Reilinger, R.E., Doll, C.G., Barka, A., Yalçın, N.: İzmit (Turkey) earthquake of 17 August 1999. First report. Seismological Research Letters, 6 (6), pp. 669-679, 1999.
- [5] Barka, A.: The August 17 and November 12 1999 Earthquakes in the Eastern Marmara Sea Region. Proceedings of the International Symposium on the Kocaeli Earthquake, Istanbul, pp. 383-388, 1999.
- [6] Anderson, J.G., Sucuoglu, H., Erberik, A., Yilmaz, T., Inan, E., Durukal, E., Erdik, M., Anooshehpour, A., Brune J.N., Ni, S.D.: Strong Ground Motions from the Kocaeli and Düzce, Turkey, Earthquakes and Possible Implications for Seismic Hazard Analysis. Earthquake Spectra, Volume 16, Supplement A, pp.113-137, 2000..
- [7] Kramer, S.L.: Geotechnical Earthquake Engineering, New Jersey: Prentice Hall, pp. 48-49, 1996.
- [8] NISEE, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, CA (<http://nisee.berkeley.edu/turkey/Fturkch1.pdf>), 2011.
- [9] Bozorgnia, Y., Bertero, V. V.: Earthquake Engineering Seismology to Performance-Based Engineering, Florida: CRC Press, pp. 13-15., 2004.
- [10] Kuran, A.: The Grand Old Master of Ottoman Architecture, Istanbul: Ada Press Publishers, pp. 64-68, 1987.
- [11] SAP2000, Integrated Structural Analysis and Design Software, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 2005.
- [12] Kaya, S.M., Aydinoglu, M.N., Erdik, M., Yuzugullu, O.: Determination of Dynamic Characteristics of Suleymaniye Mosque by Analytical and Experimental Methods. Compatible Materials for the Protection of European Cultural Heritage. Istanbul, pp. 56-68, 1998.
- [13] Peer Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, CA (http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/spectras/1/unscaled_searches/1537/edit), 2011.