

Primljen / Received: 8.2.2014.
 Ispravljen / Corrected: 27.6.2014.
 Prihvaćen / Accepted: 14.8.2014.

Dostupno online / Available online: 10.9.2014.

Analiza stanja konstrukcije tradicijskih kameno-drvenih kuća u Turskoj

Autori:



Doc.dr.sc. **Fahriye H. Halicioglu**, dipl.ing.arh.
 Sveučilište Dokuz Eylül, Turska
 Arhitektonski fakultet
hilal.halicioglu@deu.edu.tr



Doc.dr.sc. **Ferit Cakir**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište Amasya, Turska
 Arhitektonski fakultet
ferit.cakir@amasya.edu.tr



Mr.sc. **Sevilay Demirkesen**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište Bogazici, Turska
 Fakultet inženjerstva
sevilay.demirkesen@boun.edu.tr

Pregledni rad

Fahriye H. Halicioglu, Ferit Cakir, Sevilay Demirkesen

Analiza stanja konstrukcije tradicijskih kameno-drvenih kuća u Turskoj

Rad je usmjeren na ponašanje povijesnih građevina izvedenih u kombinaciji kamenih zidova i drvenih okvira. Metodom konačnih elemenata analizirana je izvedba takvih građevina s ciljem predviđanja mogućih mehanizama razaranja i osjetljivosti na potres. Radi se o tradicionalnim kućama u naselju Sirince u Izmiru (Turska). Rezultati analize pokazali su da je kritični presjek takve kombinirane građevine prijelazna zona, između prizemlja i kata. Također je ustanovljeno da su kameni zidovi i drveni okviri u takvim konstrukcijama vrlo osjetljivi na potres.

Ključne riječi:

kombinirane povijesne građevine, kameni zid, drveni okvir, graditeljska baština, metoda konačnih elemenata

Subject review

Fahriye H. Halicioglu, Ferit Cakir, Sevilay Demirkesen

Structural assessment of traditional stone-timber houses in Turkey

This study mainly focuses on the performance of historical stone-timber structures. The finite element method (FEM) is used to analyse structural performance of such buildings in order to predict possible damage mechanisms and seismic vulnerability. Traditional Şirince houses in İzmir (Turkey) were selected for the analysis. Results obtained show that the critical section of such combined structures is the transition zone between the ground level and upper floors. Furthermore, the results indicate that the "rubble stone masonry and timber frame" of these combined structures is highly vulnerable to seismic action.

Key words:

historical structures, stone-timber structures, architectural heritage, finite element method

Übersichtsarbeit

Fahriye H. Halicioglu, Ferit Cakir, Sevilay Demirkesen

Tragwerksbewertung traditioneller Häuser aus Stein und Holz in der Türkei

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Verhalten historischer Bauten, die durch die Verknüpfung von Steinmauerwerk und Rahmenkonstruktionen aus Holz entstanden sind. Die Ausführung solcher Bauten ist mittels der Finite-Elemente-Methode analysiert, um mögliche Beschädigungsmechanismen und die seismische Vulnerabilität zu ermitteln. Dazu sind ausgewählte traditionelle Fachwerkhäuser in der Siedlung Sirinice in Izmir (Türkei) analysiert worden. Die gegebenen Resultate zeigen, dass kritische Querschnitte dieser kombinierten Bauwerke sich in der Übergangszone zwischen dem Erdgeschoss und dem Stockwerk befinden. Außerdem ist eine hohe Empfindlichkeit dieser Konstruktionen gegenüber Erdbebeneinwirkungen festgestellt worden.

Schlüsselwörter:

historische Bauten, Bauten aus Mauerwerk und Holz, Architekturerbe, Finite-Elemente-Methode

1. Uvod

Povijesne građevine koje čine arhitektonski vrijedne pojave su identificirane kao kulturna dobra koja treba očuvati. Tijekom vremena neke su građevine uništene, a neke su ostale sačuvane. Međutim, te građevine su bile izložene mnogim oštećenjima iz više razloga. Dobro je poznata činjenica da potres može izazvati ne samo znatnu štetu na graditeljskoj baštini nego i gubitak u smislu povijesnih, kulturnih i arhitektonskih vrijednosti. Utjecaji od potresa su najvažniji faktori rizika, koji ugrožavaju sigurnost konstrukcija. Ustvari, otpornost konstrukcije na potres ovisi o geometrijskoj konfiguraciji, materijalima ugrađenih u konstrukciju, interakciji među nosivim elementima konstrukcije, načinu izgradnje i dinamičkim karakteristikama [1, 2]. S druge strane, pogrešni zahvati te loša kvaliteta radova na sanacijama mogu prouzročiti znatne nepravilnosti na samoj konstrukciji. Kao posljedica toga, nepravilno ponašanje konstrukcije može negativno utjecati na njezino opće stanje te bi moglo prouzročiti veliku štetu u cijeloj konstrukciji. Dakle, to se smatra još jednom ključnom prijetnjom kojoj je izložena graditeljska baština. Arhitekti i građevinski inženjeri koji su uključeni u sanaciju i održavanje moraju prepoznati svojstva konstrukcija povijesnih građevina kako bi mogli ponuditi kompatibilna rješenja u smislu izvornih svojstava konstrukcija. Stručnjacima uglavnom nedostaju potrebne informacije o analizi konstrukcije povijesnih građevina, primjerice nosivosti i ponašanja konstrukcija uslijed utjecaja sila potresa. Dakle ne uzme li se u obzir analiza djelovanja potresa na konstrukciju tijekom sanacije i održavanja povijesnih građevina, može doći do djelomične ili potpune degradacije tih građevina čak i pod umjerenim djelovanjem potresnih sila. Stoga je glavno težište ovog rada usmjereno na ponašanje nosivih elemenata povijesnih građevina od kamenih zidova i drvenih okvira (kombinirane konstrukcije) u seizmički aktivnim zonama u Turskoj.

Ziđe i drveni okviri prevladavaju u povijesnim konstrukcijskim sustavima. Riječ je o najranijim primjerima povijesne baštine jer su upotrebljavani prirodni materijali i jednostavna tehnika gradnje. Njihova konstrukcijska svojstva igraju važnu ulogu u ponašanju same građevine.

Danas u svijetu postoje različite vrste građevina s kamenim zidom i drvenim okvirom. Može se primijetiti da te građevine imaju slična svojstva iako su izgrađene pod različitim uvjetima, i u regionalnom i u kulturnom smislu. Na primjer, drveni okvir sa zidanom ispunom se zove "hımsı" u Turskoj, "pombaline" u Portugalu, "half-timbered" u Engleskoj, "fachwerk" u Njemačkoj, "colombage" u Francuskoj, "dhajji-dewari" u Indiji, "Casa baraccata" u Italiju, "telar de medianería" u Španjolskoj, a "bahareque" u dijelovima središnje i južne Amerike [3, 4]. Pregledom dosadašnjih istraživanja uočeno je da pri analizi izvedbe nosive konstrukcije tradicijskih građevina uglavnom prevladavaju zidane konstrukcije ili drveni okviri sa zidanom ispunom [5-16]. U ovom je radu težište na različitim vrstama

tradicijskih kameno-drvenih građevina (kameno ziđe u prizemlju te drvena okvirna konstrukcija na gornjim etažama) koje se najčešće viđaju u tradicijskim turskim kućama. Svakako treba napomenuti da se Turska nalazi u zonama koje su sklone potresima. Jedna od najosebnijih značajki ovakvih složenih građevina jest ta da su u cijelosti izgrađene kombinacijom dvaju različitih konstrukcijskih sustava s dva različita materijala. U toj vrsti kombinirane (složene) konstrukcije kamen i drvo se koriste kao građevni materijali, a cijela se građevina sastoji od prizemlja koje je izvedeno s kamenim zidom, te kata koji je izveden kao drvena okvirna konstrukcija. Zidovi kod drvene okvirne konstrukcije izgrađeni su bez ispune i uglavnom su obloženi letvama i vapnenom žbukom. Ova tehnika vezana za drvene okvirne konstrukcije poznata je u Turskoj pod nazivom "bağdadi". Također treba napomenuti da različiti konstrukcijski sustavi mogu pokazati različito ponašanje u nekoj građevini kada se izvode u kombinaciji. Dakle, glavna se pitanja odnose na određivanje načina izvedbe konstrukcije kod ovakvih građevina i na način njihova ponašanja pod utjecajem potresnih sila.

Na ta pitanja nije moguće izravno odgovoriti zbog nedostatka potrebnih rezultata ispitivanja mehanizma nosivosti u sadašnjim uvjetima i numeričke analize. Zato je cilj ovog rada analizirati izvedbu povijesnih građevina s "kamenim zidom i drvenim okvirom" s obzirom na potres. Istraživanje je provedeno u dvije faze. U prvoj su fazi ispitane karakteristike konstrukcije te degradacije takvih građevina. Ispitivanje je provedeno motreći stanje građevine u povijesnoj jezgri, u zoni jačih potresa u Turskoj. U drugoj fazi, izrađen je prostorni (3D) numerički model kako bi se simuliralo ponašanje cijele konstrukcije pod utjecajem potresa. Za potrebe numeričkog modeliranja korištena su izvorna svojstva postojećih kombiniranih povijesnih građevina. Nakon toga građevina je analizirana metodom konačnih elemenata s ciljem otkrivanja mehanizma oštećenja konstrukcije te njezine osjetljivosti uslijed potresa.

Da bi se provele te dvije faze istraživanja, tri su glavna razloga zašto je za analizu izabrano malo mjesto Şirince u zapadnom dijelu Turske. Prvi razlog je taj što se naselje nalazi u najvišoj potresnoj zoni Turske. Drugi razlog su tradicijske kuće s dvije etaže koje su stare više od 150 godina i izvorni su primjerci povijesnih građevina s "kamenim zidom i drvenim okvirom". Treći je razlog taj što, iako se tradicijske kuće u mjestu Şirince nalaze na popisu kulturno-povijesnih znamenitosti Republike Turske, postoji rizik od gubitka njihove povijesne, kulturne i arhitektonske vrijednosti zbog loše kvalitete zahvata ili nedostatka odgovarajuće sanacije i održavanja. Prema tome, postoji prijevremena potreba da se procijeni šteta tih građevina i osjetljivost takvih konstrukcija na potres, kako bi se mogle obnoviti i očuvati. Nažalost, podataka je o tim građevinama vrlo malo i ne postoje zapisi o oštećenjima zbog potresa i nema dovoljno izvješća o provedenim restauratorskim radovima. Informacije o trenutnom stanju tih povijesnih građevina, te vrsti oštećenja na njima, mogu pružiti dodatne

informacije o povijesnim kombiniranim građevinama. Roca i suradnici [17] ističu da životni vijek povijesnih građevina može imati značajan utjecaj na njihovo ponašanje. Oštećenja mogu nastati zbog elementarnih nepogoda (potresa, poplava, požara, itd.), svojstava korištenih materijala, tipa konstrukcijskog sustava, geometrijskih karakteristika, starosti, biološke degradacije, loše kvalitete provedenih prijašnjih intervencija na konstrukciji, arhitektonskih preinaka i tome slično.

Na osnovi dotrajalosti konstrukcije može se mnogo saznati o konstrukcijskim svojstvima građevine. Primjerice zapisi o ponašanju konstrukcije tijekom posljednjih potresa mogu biti korisni za dobivanje informacija o potresnoj otpornosti konstrukcije [17]. Stoga, u okviru ovog istraživanja provedena je dodatna analiza kao prva faza analize karakteristika konstrukcije. Kao što je već rečeno, u prvoj fazi istraživanja vizualnu su provjeru obavili autori ovog rada. Vidljivi znakovi oštećenja koja su se dogodila u tradicijskim kućama odražavaju sadašnje stanje tih kuća. Detaljan opis značajki ovih građevina i njihovih graditeljskih obilježja također su prezentirani na početku istraživanja kako bi se bolje objasnili razlozi propadanja građevina te da bi se preciznije napravila njihova analiza.

2. Tradicijske kuće u naselju Şirince

Şirince je mjesto smješteno u okrugu Selçuk koji je sastavni dio pokrajine Izmir u zapadnom dijelu Turske (slika 1.a). U okolici Şirince nalaze se brojni povijesni ostaci, u neposrednoj blizini drevnog grada Efeza i Kuće Djevice Marije (slika 1.b). Şirince (što znači "ugodno" na turskom jeziku) mjesto je puno života, bogate kulture i graditeljske baštine. Ima svoj zaštićeni ruralni način života i tradicijski ugođaj. Iako povijest naselja Şirince datira iz 14. stoljeća, kuće odražavaju značajke 19. stoljeća. Početkom 20. stoljeća broj nastambi varira između 1100 i 1800 [18]. Budući da kuće imaju zaštićene povijesne i arhitektonske vrijednosti, naselje je 1984. godine "povijesnim mjestom" proglasilo Vijeće za očuvanje kulturne i prirodne imovine Ministarstva kulture i turizma Republike Turske [19]. Smanjenje broja kuća tijekom vremena upućuje na to da je naselje izgubilo većinu povijesnih građevina. Şirince ima kompaktan tradicijski ugođaj, a na povijesne tradicijske kuće značajno su utjecali topografski, klimatski i geološki uvjeti. Osobito su topografski uvjeti utjecali na oblikovanje naselja i ulica (slika 2.a). U posljednjih nekoliko godina te su kuće bile podvrgnute arhitektonskim promjenama, kao što su funkcionalne promjene koje proizlaze iz nužnosti dodatnih prostora za nove komercijalne djelatnosti poput restorana, trgovina, pansiona i slično (slika 2.b).

Şirince ima tipičnu mediteransku klimu, s toplim do vrućim i suhim ljetima te blagim do svježim i kišovitim zimama. Većina turskoga teritorija nalazi se u seizmičkim područjima, gdje su mnoge građevine izložene potresima. Naselje Şirince se nalazi u najvišoj potresnoj zoni u Turskoj (slika 3.) gdje je seizmička aktivnost česta i intenzivna.



Slika 1. Naselje Şirince: a) lokacija naselja na karti; b) u blizini njegove okolice su drevni grad Efeza i Kuća Djevice Marije (preuzeto iz Google Maps, 2013.)

Treba napomenuti da su arhitektonske karakteristike ovih tradicijskih građevina, kao što su geometrijska konfiguracija, dimenzije, fasade, prozori i vrata, itd. značajno uvjetovani svojstvima konstrukcije te lokalno dostupnim materijalima, uključujući i potrebe korisnika, kulturu, društveno-ekonomske uvjete, vremenske uvjete itd. Kuća je obično pravokutnog oblika ili u obliku slova L (slika 4.a). U prizemlju se nalazi kuhinja i skladište. Sobe su na katovima. Općenito, visina je u prizemlju veća od one koju ima gornja etaža. Prozori i vrata su izrađeni od drva. Gornja etaža ima više prozorskih otvora od prizemlja (slika 4.b).

Mjesto Şirince uglavnom se sastoji od dvoetažnih kuća, a jednokatnice su rijetkost i grade se od čvrstih kamenih zidova. Debljina nosivih zidova u rasponu je od 40 cm do 60 cm. Osim toga, drveni se nadvoji (pod nazivom "lento" na turskom) nalaze na otvorima (iznad prozora i vrata). Žbuka i vapno obično se upotrebljavaju za unutarnje površine zidova

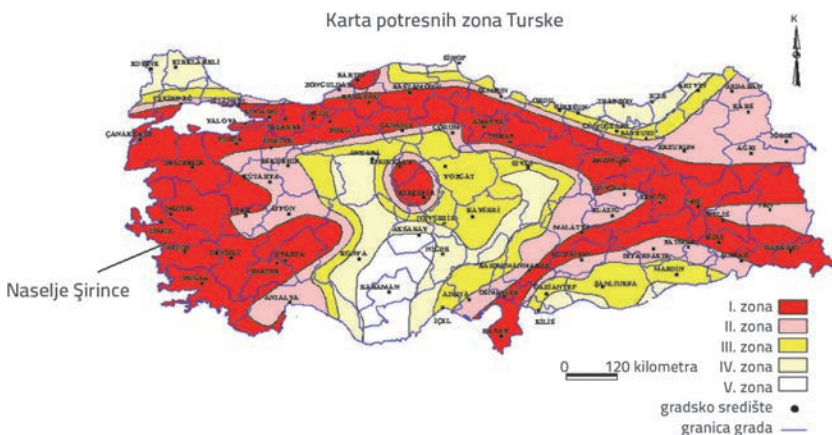


i nisu vidljivi na vanjskim površinama. Sačuvana je izvornost kamene površine.

Glavno je obilježje dvoetažnih kuća u naselju Şirince kombinirana gradnja od kamenog zida i drvenih okvira. Prema obliku toga složenog konstrukcijskog sustava, koji je prikazan na slici 5., dvoetažne se kuće obično sastoje od četiri glavne cjeline: zidani kameni temelji, zidano prizemlje, gornji kat s drvenim okvirima i drveni krov. Međutim, postoje i prizemnice gdje su temelji kuća uglavnom izgrađeni od kamena. O postupku građenja ne može se pobliže saznati jer nedostaju zapisi o tim pojedinostima. Okvirna drvena konstrukcija na gornjim katovima ovih dvoetažnih kuća obično se sastoji od vertikalnih drvenih stupova, horizontalnih drvenih greda, kosnika i dijagonalnih drvenih elemenata. Povezivanje drvenih elemenata u čvorovima je najznačajniji konstrukcijski element okvirnih drvenih konstrukcija.

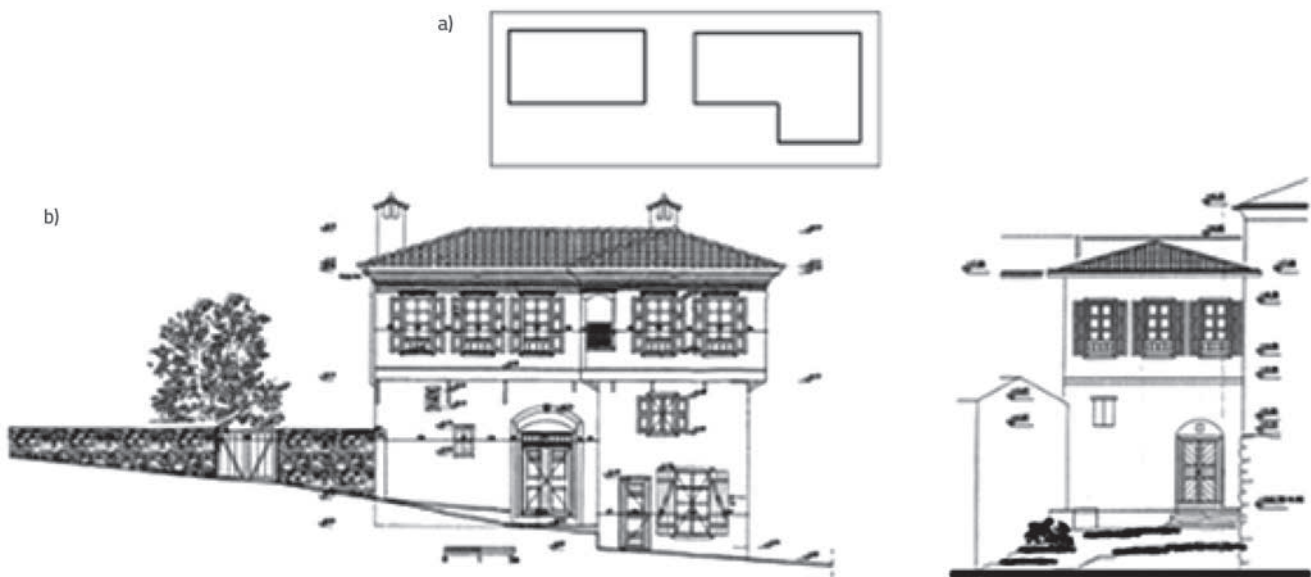
Sve veze među drvenim elementima, kod ovog tipa okvirne konstrukcije, najčešće su izvedene sa čavlima. Međutim, u

Slika 2. Prikaz naselja Şirince: a) uske ulice; b) trgovine u tradicijskim kućama (kolovoz 2013.)



Slika 3. Naselje Şirince prema prikazu na karti o potresima u Turskoj smješteno je u seizmičkoj zoni prvoga stupnja, [20]

Slika 5. Konfiguracija konstrukcije tipične dvoetažne tradicijske şirinceuske kuće



Slika 4. Tradicijska şirinceuska kuća: a) vrste tlocrta; b) tipičan izgled fasade (kolovoz 2013.)

nekim slučajevima mogu se vidjeti spojevi na preklop. Glavne grede (oko 10 x 10 cm u presjeku) postavljene su na obodu građevine te su na uglovima povezane čavlima. Na ovako položene glavne grede postavljaju se na svakih 30 do 40 cm drveni stupovi (oko 5 x 10 cm u presjeku). Za ukrutu okvirnih drvenih konstrukcija primjenjuju se dijagonalni drveni elementi. Tako izvedeni okvirni drveni zidovi prekriveni su drvenim letvama i vapnenom žbukom te je na taj način konstrukcija zida na gornjoj etaži završena. Ova vrsta tradicijske tehnike građenja s drvenim okvirima naziva se "bağdadî" na turskom jeziku. Tehnika bağdadî (letva), osim za oblaganje zidova, primjenjuje se i za oblaganje podova te streha, što je osnovna značajka kuća u naselju Şirince. Drvene letve (oko 2 x 4 cm u presjeku) najprije se horizontalno pričvrste na vertikalne drvene stupove na vrlo malim razmacima kako bi se zatvorio prostor između vertikalnih i horizontalnih drvenih elemenata (slika 6.). Te drvene letvice uglavnom su smještene i na unutarnje i na vanjske zidne površine. Općenito, ne postoji ispuna između tih površina, iako se ponekad za ispunu upotrebljava sitni kameni materijal s vapnom ili blatom kao vezivom. Konačno, vapnena žbuka te završno bojanje vapnom osnovna je primjena na ovakvim drvenim površinama čime se postiže da drvene letvice nisu vidljive izvana.

Da bi se izvela gornja okvirna drvena konstrukcija, drvene su grede postavljene na zidove prizemlja, na razmaku od približno 30 do 40 cm. Osim toga, tu je i dio koji je izveden kao konzola (pod nazivom "çikma" na turskom) u gornjim katovima (slika 7.). Izvedba s drvenim konzolama češća je od one bez

ovakvih rješenja. Može biti pravokutnog ili trokutastog oblika, jer obično čini ugao između zidova prizemlja i ulice. Konzole se grade na produžetku horizontalnih drvenih greda prema vanjskoj strani zida.

3. Uzroci propadanja tradicijskih şirinceuskih kuća

Većina oštećenja tradicijskih şirinceuskih kuća uglavnom su nastala zbog štete na konstrukcijskim elementima i propadanja materijala od kojih su kuće izgrađene. Glavne posljedice oštećenja mogu se vidjeti na površinskom djelu, primjerice na konstrukcijskim elementima, zatim zbog gubitka materijala te smanjenja nosivosti konstrukcije [21]. Stanje kamenih zidova u prizemlju tih kuća općenito je jako loše. Na vanjskim površinama ovih zidova vidljive su pukotine, koje su jasan pokazatelj nastale degradacije. Razlozi za pojavu pukotina mogu biti različiti: deformacija tla, promjene temperature, preveliko opterećenje i utjecaj potresa. U ovim povijesnim građevinama pukotine su najčešće nastale blizu uglova kamenog zida i općenito imaju vertikalni smjer pružanja (slika 8.). Te pukotine često počinju na vrhu kamenog zida (ili ispod drvene grede) i šire se dalje prema dnu zida u vertikalnom smjeru.

Kameni zidovi u prizemljima uvelike su bili izloženi degradaciji materijala (slika 9.). Štoviše, kao što je vidljivo na slici 9., ljuštenje zidova, pojava praha te mrlja uslijed vlage vidljivi su znak propadanja materijala na vanjskim površinama. Mort između kamenih blokova djelomično je nestao. Gubitak

tog vezivnog materijala izazvao je slabljenje nosivosti. Najviše su stradali kameni dijelovi pri dnu zida. U nekim slučajevima prisutna je abrazija.

Često se uočava i degradacija fasadnih zidova na katu okvirne drvene kuće (slika 10.). Ovaj djelomični raspad materijala nije tako uobičajen, a može se vidjeti samo kod onih tradicijskih kuća koje su pretrpjele velika oštećenja (slika 10.a i 10.b). To se događa zbog pomaka zidova izvan svoje ravnine i zato što su se samo čavlima povezivali drveni elementi u okvirnoj drvenoj konstrukciji na gornjim katovima. Kao što je prikazano na slici 10.c, postoje mnoge nepravilne mikropukotine na žbuci zidova na gornjim katovima. Osim toga, nastaju i dijagonalne pukotine (slika 10.d) koje u pravilu počinju na dnu uglova prozorskih otvora i šire se prema dolje dijagonalno do poda. Ta vrsta pukotina može biti posljedica posmičnih naprezanja uzrokovanih djelovanjem horizontalnih sila. Ostala



Slika 6. Izgradnja zida drvene okvirne konstrukcije prema bağdadî tehnici (Sirince, 2013.)



Slika 7. Primjeri kuća s drvenim konzolama u tradicionalnim şirinceuskim kućama (kolovoz 2013.)



Slika 8. Vertikalne pukotine u uglovima i na vanjskim površinama kamenih zidova u prizemlju (kolovoz 2013.)

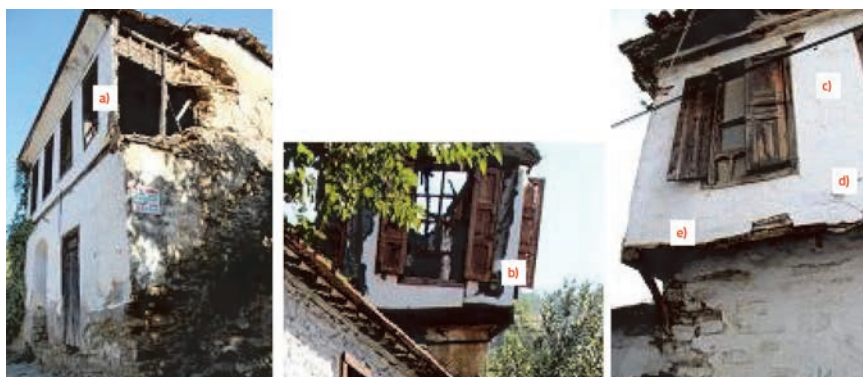


Slika 9. Prikaz propadanja materijala u kamenim zidovima prizemlja (kolovoz 2013.)

velika oštećenja konstrukcije nastaju na horizontalnim drvenim gredama koje su položene na gornji rub kamenih zidova. U nekim slučajevima prisutni su horizontalni pomaci (slika 10.e) pri čemu nastaju velika oštećenja.

Drvena okvirna konstrukcija na katu je povezana s kamenim zidovima prizemlja preko horizontalnih drvenih greda koje su smještene na vrhu kamenih zidova. U nekim slučajevima to može dovesti do raspada konstrukcijskih elemenata u razini poda i pri vrlo malim pomacima (slika 11.). Pukotina je vidljiva između drvenog elementa i kamenog zida, a neke se pukotine protežu duž cijele dužine kamenog zida. Deformirani drveni elementi su vidljivi na dnu drvenih greda u prizemlju (slika 12.).

Najčešćim oštećenjem smatra se otpadanje žbuke u odnosu na druge vrste oštećenja nastalih u tim kućama (slika 13.). Najveća oštećenja žbuke uglavnom su vidljiva na drvenim letvama koje su ugrađene u zidove drvenih okvira na gornjim katovima te ispod strehe. Iako biološko propadanje drvene građe nije uobičajeno, kod ovih tradicijskih kuća promjena boje i pojava mrlja mogu se uočiti na drvenim prozorima, otvorima za vrata te drvenim letvicama kojima su obložene strehe. Negativan utjecaj kiše i danjeg svjetla uzrokuje ovu vrstu propadanja drvene građe. Ustvari, propadanje drvenih letvica ispod strehe prouzročio je nedostatak oluka na krovovima tih kuća. Oštećenje krova također nastaje zbog progiba krovne konstrukcije, iako to nije uobičajeno oštećenje u tim vrstama građevina (slika 14.). Slika 15. ilustrira najčešća oštećenja konstrukcije te degradaciju materijala koja se događa tijekom vremena.



Slika 10. Primjeri najtežeg oštećenja konstrukcije na katovima tradicijskih širinceuskih kuća: a) djelomično rušenje jednog od zidova; b) neočekivano ponašanje zidova s drvenim okvirom; c) brojne nepravilne pukotine na površini žbuke između otvora na gornjem katu; d) dijagonalne pukotine ispod donjeg ruba prozora; e) oštećenje zbog klizanja zidova



Slika 11. Primjer oštećenja konstrukcije



Slika 12. Deformacija horizontalnog drvenog elementa



Slika 13. Oštećenje žbuke na zidovima gornjih katova



Slika 14. Primjeri oštećenja krovova na tradicijskim Širince kućama

4. Analiza građevina metodom konačnih elemenata

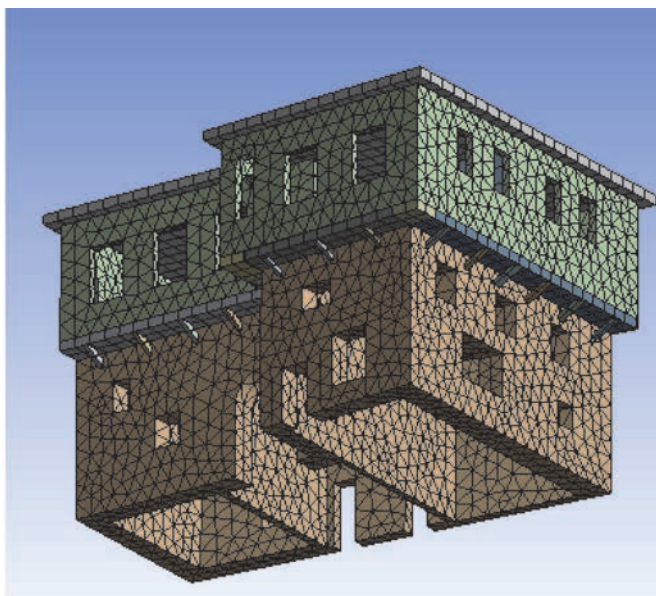
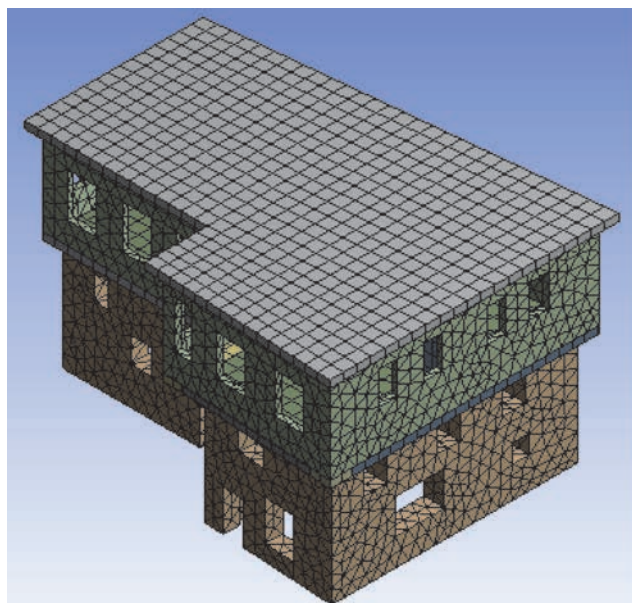
Konzervacija i restauracija povijesnih građevina dobile su na važnosti posljednjih nekoliko godina. Nosiva svojstva konstrukcije te mehanizmi za preuzimanje opterećenja trebaju se učinkovito vrednovati kako bi se utvrdile potrebne mjere za zaštitu takvih građevina. Određivanje ponašanja konstrukcije kod ovakvog tipa građevina vrlo je teško, a uobičajene inženjerske metode nisu dovoljne. Posebice treba istaknuti da su zidane konstrukcije kompleksne i vrlo teško ih je analizirati. Metoda konačnih elemenata je jedna od najprikladnijih metoda za analizu zidanih konstrukcija. Uz današnja poboljšanja u računalnoj tehnologiji dobiva se praktičan način za analizu konstrukcije pomoću izrađenih numeričkih modela, posebice za složenije konstrukcije (velika masa, različiti materijali u konstrukciji). U tu svrhu, izrađen je prostorni model na temelju stanja konstrukcije i geometrijskih karakteristika. Proračun je proveden primjenom računalnog programa ANSYS Workbench [22]. Za analizu konstrukcije korišteni su volumni SOLID186 elementi,



Slika 15. Tipični primjeri oštećenja konstrukcije te degradacije materijala tijekom vremena

koji imaju 20 čvorova, kvadratnu koordinatnu funkciju polja pomaka i tri stupnja slobode po čvoru. Prostorni model se sastoji od 42.349 čvorova i 13.089 volumnih elemenata (slika 16.). Nadalje, u analizi je krov zanemaren kako bi se lakše interpretirali rezultati dobivene analize, ali njegova masa je dodana u model.

Svi su numerički podaci koji se koriste u prostornom modelu konstrukcije izrađeni u skladu s izvješćem restauratorskih projekata povijesnih građevina. U ovom radu uglavnom se razmatra konstrukcija od elastičnih materijala. Osim toga, razmatraju se i problemi vrlo malih deformacija, gdje deformacije i opterećenja imaju linearni odnos. Svrha linearnoelastične analize jest pravilno interpretirati inicijalna naprezanja i oštećenja u elastičnom području. Dakle, linearnoelastično ponašanje materijala uzeto je u obzir, a smanjenje krutosti zanemareno je u ovom istraživanju. Osim toga, mehanička svojstva materijala su preuzeta iz predloženih vrijednosti u literaturi koja pažljivo razmatra prethodna istraživanja, a sve zbog nemogućnosti da se provedu ispitivanja ugrađenih materijala, tablica 1. U ovom istraživanju naglasak je na statičkoj i dinamičkoj analizi kombinirane kameno-drvene konstrukcije. Dobiveni rezultati analize su previše komplicirani da bi se predstavio svaki čvor ili element posebno. Zbog toga je na slikama korišten vizualni prikaz naprezanja i pomaka s pripadnim vrijednostima.



Slika 16. Prostorni model tradicionalne širinceuske kuće

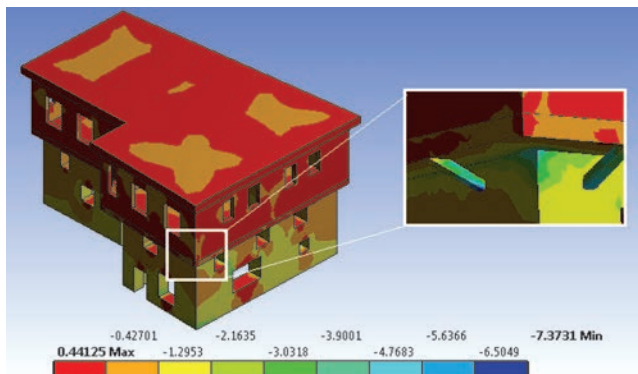
Tablica 1. Mehanička svojstva materijala [13, 23]

Tip materijala	Modul elastičnosti [kN/m ²]	Poissonov koeficijent	Gustoća [kg/m ³]
Kamen	4,0·10 ⁶	0,18	2500
Drvo	10,5·10 ⁶	-	500

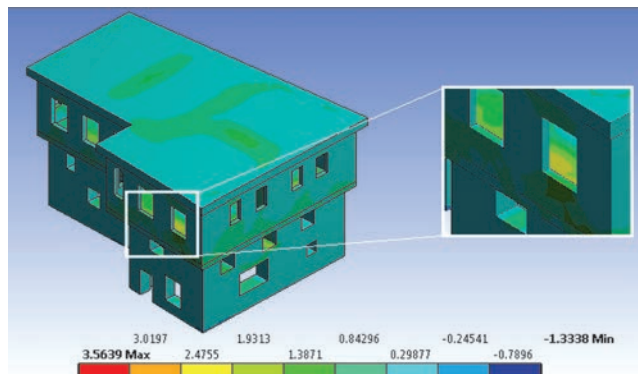
4.1. Statička analiza

Zidane konstrukcije imaju veliku masu zbog materijala koji se primjenjuju za njihovu izgradnju. Stalno opterećenje sastoji se od težine konstrukcijskih elemenata i težine dodatnih elemenata pričvršćenih na njih. Opterećenje vlastitom težinom djeluje na konstrukciju tijekom trajanja građevine i ne mijenja se. Nadalje, stalno opterećenje je statičko i ono pridonosi stabilnosti zidanih konstrukcija [24, 16]. Dakle, najprije treba utvrditi je li konstrukcija u

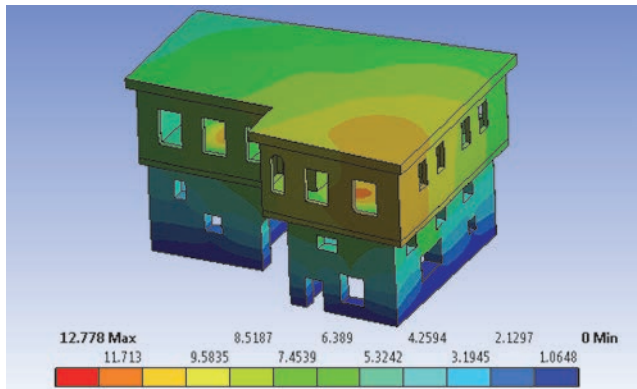
stanju izdržati stalno opterećenje. Tradicijske širinceuske kuće prethodno su analizirane da bi se dobila ocjena njihove nosivosti. Minimalna glavna naprezanja iznose oko 7,373 MPa na drvenim gredama i javljaju se u prijelaznom području između prizemlja i kata (slika 17.). Maksimalna glavna naprezanja iznose oko 3.564 MPa, a pojavljuju se pri vrhu prizemlja i na fasadi prvog kata. Maksimalna glavna naprezanja su se također pojavila na krovu te oko rubova prozora (slika 18.). Maksimalan pomak je na krovu i iznosi 12,80 mm (slika 19.).



Slika 17. Minimalna glavna naprezanja (u MPa)



Slika 18. Maksimalna glavna naprezanja (u MPa)

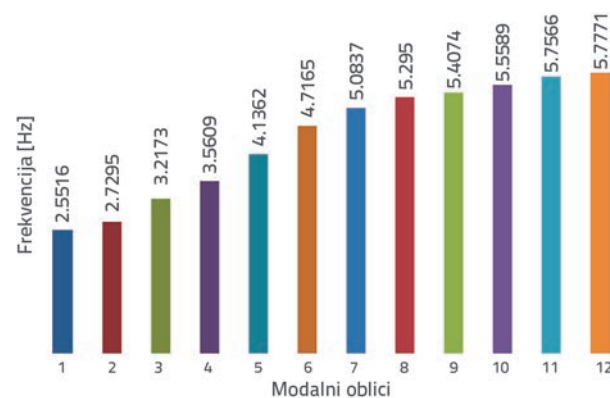


Slika 19. Maksimalni pomaci (mm)

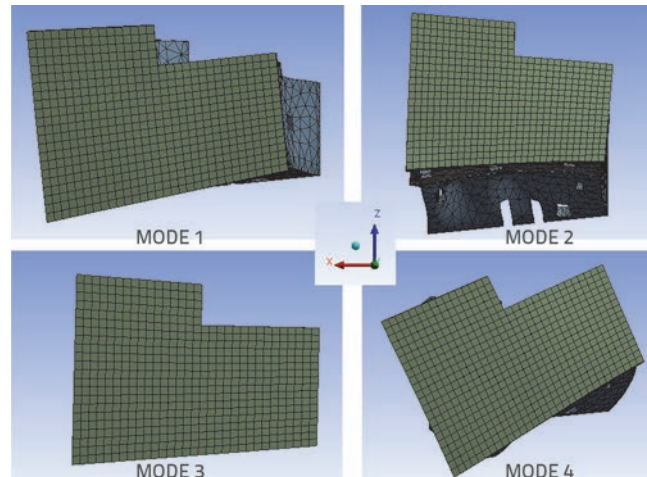
4.2. Modalna analiza

Modalna analiza provedena je kako bi se odredile prirodne frekvencije i odgovarajući modalni oblici konstrukcije tijekom slobodnih vibracija [16]. Svrha je modalne analize dobiti najpouzdanije ponašanje konstrukcije u svakom od značajnih vlastitih oblika osciliranja, koje se kasnije interpretira na odgovarajući način [25]. Modalna analiza konstrukcije je uključila različite modove vibracija u kombinaciju. O ovom primjeru primijenjena je metoda kvadratnog korijena iz sume kvadrata (eng. *square root of sum of squares* - SRSS) koja je u obzir uzela 12 modova. Radi se o modalnoj kombinaciji koja kvadrira vršnu vrijednost svakog oblika. Korijen sume kvadrata tih vršnih vrijednosti daje ukupno ponašanje konstrukcije

Prirodne frekvencije dobivene modalnom analizom prikazane su na slici 20. Slika 21. prikazuje modalne oblike prve četiri vlastite frekvencije. Prema rezultatima modalne analize, prva tri moda su se dogodila u smjerovima x, z i y dok se četvrti mod pojavio samo kao torzija. Nadalje, sve frekvencije su ispod 5 Hz. Prva frekvencija je ispod 2,5 Hz što pokazuje da je konstrukcija kruta u smislu potresnih zahtjeva, ali prijelazna zona između katova je većinom neizvjesna prema rezultatima modalne analize.



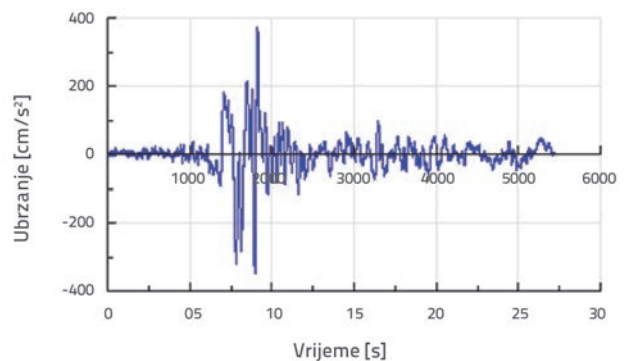
Slika 20. Učestalost frekvencija u modalnoj analizi



Slika 21. Prva četiri modalna oblika i smjerovi deformacije konstrukcije

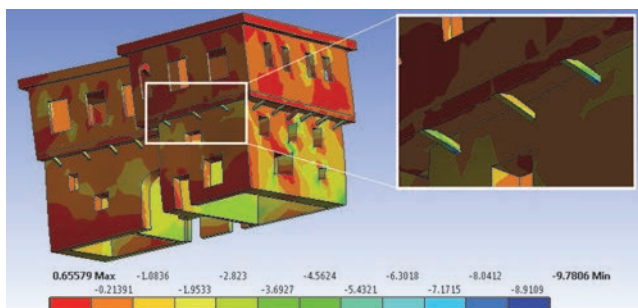
4.3. Dinamička analiza

Zidane konstrukcije su osjetljive na potrese i seizmičke sile što je bio najčešći razlog njihove degradacije. Dakle, vrlo je važno prepoznati mogući utjecaj seizmičkih sila na zidane konstrukcija koje se nalaze u aktivnim seizmičkim područjima. Prema [26], naselje Širince se nalazi u zoni prvog stupnja (najopasniji) u kojoj je maksimalno ubrzanje tla 0,4 g [26]. Dakle, potresi su među glavnim problemima za kuće u naselju Širince. Za dinamički proračun konstrukcije primijenjena je metoda vremenskog zapisa ubrzanja, temeljena na potresu Kocaeli u smjeru istok - zapad (I-Z) koji se dogodio 17. kolovoza 1999 (Mw = 7,4), [27]. Vremenski zapis ubrzanja toga potresa prikazan je na slici 22.

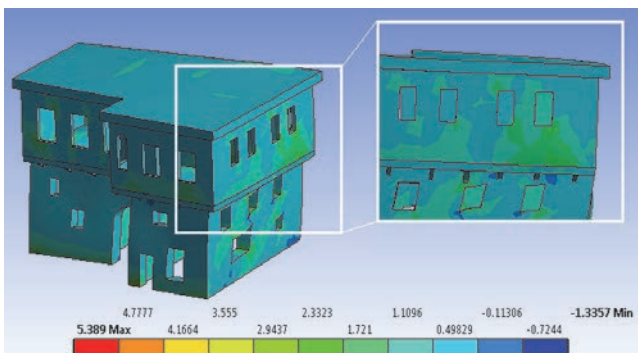


Slika 22. Površinska ubrzanja snimljena tijekom Kocaeli potresa [26]

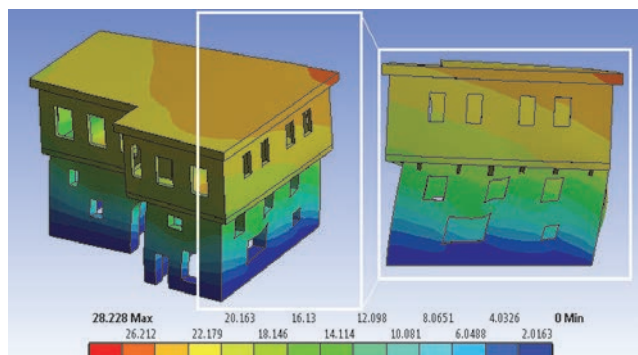
Dobivena maksimalna tlačna naprezanja znatno su intenzivnija na nižim dijelovima konstrukcije tijekom potresa. Minimalna glavna naprezanja na konstrukciji prikazana su na slici 23. Kao što se vidi iz slike, minimalno tlačno naprezanje je oko 9,78 MPa i to u zoni ulaznih vrata te drvenim podupiračima. Maksimalna glavna naprezanja prikazana su na slici 24. Iznose oko 5,389 MPa i javljaju se oko ulaznih vrata, prozora i gornjih dijelova zidova. Nadalje, najveći bočni pomak je na krovu te iznosi 28 mm (slika 25.).



Slika 23. Minimalna glavna naprezanja (MPa)



Slika 24. Maksimalna glavna naprezanja (MPa)



Slika 25. Maksimalni bočni pomaci (mm)

5. Zaključak

U radu je provedena analiza mehanizma oštećenja i potresne osjetljivosti povijesnih kameno-drvenih kombiniranih građevina (kameni zidovi u prizemlju i drvena okvirna konstrukcija na katu) u mjestu Şirince koje je smješteno u seizmički aktivnom području Turske.

U analizi je razmatran najtipičniji oblik tradicijske kuće kako bi se saznalo o ponašanju konstrukcije uslijed djelovanja potresa. Izrađen je prostorni numerički model koji prikazuje ponašanje konstrukcije i njezine moguće lokalne i globalne nedostatke uslijed djelovanja potresa. U ovom radu primijenjena je metoda konačnih elemenata kako bi se predvidjela potencijalna oštećenja konstrukcije te njezina potresna osjetljivost.

Rezultati pokazuju da je kombinirana kameno-drvena tradicijska şirinceuska kuća vrlo potresno osjetljiva. Rezultati numeričkih analiza podudaraju se s rezultatima koji su dobiveni vizualnim pregledom. Prema provedenim analizama, kritični je dio şirinceuske kuće prijelazna zona između prizemlja i kata. Najkritičnije naprezanje u okviru statičke analize dobiveno je na drvenim podupiračima. Rezultati analize pokazuju da dinamička interakcija između drvenih podupirača i zidova ima važnu ulogu u dinamičkom ponašanju konstrukcije. To se može smatrati rizičnim u smislu stvaranja problema za stabilnost konstrukcije. Nadalje, rezultati pokazuju da se oštećenja na konstrukciji şirinceuske kuće uglavnom javljaju na mjestima kritičnih naprezanja i ti rezultati dokazuju točnost numeričke primjene.

Ovo istraživanje je također otkrilo neke preporuke za očuvanje i obnovu tradicijskih şirinceuskih kuća i neke veće probleme koji zahtijevaju daljnje analize. Sva postavljena pitanja mogla bi pružiti daljnje mogućnosti istraživanja. U tim povijesnim kućama razine su oštećenja različite (u rasponu od mikro pukotina u žbuci do djelomičnog urušavanja konstrukcije). Ta oštećenja konstrukcije i degradacije materijala mogu znatno utjecati na potresnu otpornost cijele konstrukcije. Zato se oštećenja konstrukcije i degradacije materijala trebaju ispitati detaljnije pomoću nedestruktivnih dijagnostičkih tehnika.

Nadalje, detaljnim analizama trebalo bi ispitati veze u ovim kombiniranim povijesnim građevinama. Kombinacija kamenih zidova s drvenim okvirima smanjuje težinu cijele konstrukcije i osigurava veću fleksibilnost. Rezultati dobiveni vizualnim pregledom pokazuju da drvena okvirna konstrukcija na gornjem katu ima više oštećenja nego kameni zidovi u prizemlju. To je moglo biti uzrokovano korištenjem samo čavala kao spojnih sredstava za povezivanje drvenih elemenata te zbog nedostatka odgovarajućih priključaka na spoju kamenih zidova u prizemlju i drvene okvirne konstrukcije na gornjem katu.

Dakle, posebno je važno usmjeriti se na sanaciju priključaka kod ovih kombiniranih konstrukcija. Potrebno je pronaći najučinkovitiji način restauracije kako bi se očuvala arhitektonska vrijednost tih građevina kao dragocjeno naslijeđe za buduće generacije. Intervencije na konstrukciji ovih građevina nisu moguće a da se u područjima u kojima postoji rizik od djelovanja potresa ne uzme u obzir i učinak potresa. U tom kontekstu trebaju se pronaći svrhovitije i manje invazivne tehnike za očuvanje i obnovu ovih povijesnih građevina.

Zahvala

Autori zahvaljuju arhitektu Didem Gundogdu iz Ministarstva kulture i turizma, Opće uprave za zaštitu kulturne baštine i muzeja Republike Turske što im je omogućio uvid u projekt restauracije tradicijskih şirinceuskih kuća.

LITERATURA

- [1] Feilden, B. M.: Earthquakes and historic buildings Proceedings of 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, 9, pp. 213–226, 1980.
- [2] Gülkan, P., Wasti, S.T.: Seismic assessment and rehabilitation of historic structures, *SL*, 1 (2), pp. 111–134, 2009.
- [3] Dogangun, A., Tuluk, Ö.İ., Livaoğlu, R., Acar, R.: Traditional wooden buildings and their damage during earthquakes in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 6, pp. 981–996, 2006.
- [4] Dutu, A., Gomes Ferreira, J., Guerreiro, L., Branco, F., Goncalves, A. M.: Technical note: Timbered masonry for earthquake resistance in Europe. *Materiales de Construccion*, 62 (308), pp. 615–628, 2012.
- [5] Lourenco, P.B.: Computations on historic masonry structures, *Structural Engineering and Materials*, Volume 4 (3), pp. 301–319, 2002.
- [6] Kiyono, J., Kalantari, A.: Collapse Mechanism of Adobe and Masonry Structures During the 2003 Iran Bam Earthquake, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, Vol. 79, pp. 157–161, 2004.
- [7] Toker, S., Unay, A.İ.: Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges, *Gazi University Journal of Science*, Vol. 17(2), pp. 129–139, 2004.
- [8] Bayraktar, A., Coşkun, N., Yalcin, A.: Damage of masonry buildings during the July 2, 2004 Doğubayazıt (Ağrı) earthquake in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, Volume 14(1), pp. 147–157, 2007.
- [9] Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoğlu, R.: Investigation of Dynamic Response of Masonry Minaret Structure, *Bull Earthquake Eng.* 2008(6), pp. 505–517, 2008.
- [10] Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., Taskov, L.: Experimental and Numerical Modal Analyses of a Historical Masonry Palace, *Construction and Building Materials*, Volume 25(1), pp. 81–91, 2011.
- [11] 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*, Vol. 43, pp. 58–68, 2012.
- [12] Oliveira, C.S., Çaktı, E., Stengel, D., Branco, M.: Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical Istanbul, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* Vol.41, pp. 19–39, 2012.
- [13] Ural, A., Dogangun, A., Sezen, H., Angin, S.: Seismic Performance of Masonry Buildings during the 2007 Bala, Turkey Earthquakes, *Natural Hazards*, Vol. 60(3), pp. 1013–1026, 2012.
- [14] Milani, G.: Lesson learned after the Emilia-Romagna, Italy, 20–29 May 2012 earthquakes: A limit analysis insight on three masonry churches, *Engineering Failure Analysis*, 2013.
- [15] Uysal, H., Cakir, F.: Static and Dynamic Analyses of the Historical Erzurum Watchtower, *TAC Foundation, Foundation for the Preservation of Turkish Monuments an Environmental*, Issue 1, pp. 72–80, 2013.
- [16] Seker, B.S., Dogangun, A., Cakir, F.: Structural Analysis and Assessment of Historical Kara Mustafa Pasha Mosque in Merzifon, Turkey, *SDU International Technologic Science*, Vol. 5, No 1, pp. 112–120, 2013.
- [17] Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., Pela, L.: Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. *Arch. Comput. Methods Eng.*, 17: 299–325, 2010.
- [18] Beker, O.: Research report: Şirince conservation plan. Ankara, Turkey, 2002.
- [19] Akdogan, K.N.: Management plan of Sirince Village. Available from: http://www.hdm.lth.se/fileadmin/hdm/alumni/papers/CMHB_2007/Turkey__Kivilcim_Nese__Akdogan.pdf [Accessed on 20th August 2013].
- [20] Earthquake map of Turkey, the Republic of Turkey Prime Ministry, Disaster and Emergency Management Presidency, Earthquake Department. Available from: <http://www.deprem.gov.tr/SarbisEng/Shared/DepremHaritalari.aspx> [Accessed on 20th August 2013].
- [21] CIB Publication 335., Guide for the structural rehabilitation of heritage buildings. Prepared by CIB Commission W023 - Wall Structures. Available from: <http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/pub335.pdf> [Accessed on 25th August 2013].
- [22] FEA program, ANSYS Workbench Release:14.0., USA
- [23] Ural, A.: Finite Element Analysis of Historical Arch Bridges, *International Earthquake Symposium*, Kocaeli, Turkey, 2005.
- [24] Cakir, F.: Assessment of Structural Integrity And Seismic Retrofit of Masonry Bridges Using Micropiles, Master's Thesis, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Graduate College of the Illinois Institute of Technology, Chicago, USA, 2011.
- [25] Taranath, B.S.: Reinforced Concrete Design of Tall Buildings, CRC Press, USA, 2009.
- [26] AFAD, The Republic of Turkey Prime Ministry, Disaster and Emergency Management Presidency, Earthquake Department, Available from: <http://kyh.deprem.gov.tr/ftpt.htm> [Accessed on 15th August 2013].
- [27] Soyluk, A., İlerisoy, Z.Y.: Dynamic analysis of Dolmabahçe masonry clock tower, *GRAĐEVINAR* 65 (2013) 4, pp. 345–352.