

Primljen / Received: 22.1.2014.

Ispravljen / Corrected: 3.3.2014.

Prihvaćen / Accepted: 26.3.2014.

Dostupno online / Available online: 10.6.2014.

Ocjena konstrukcijske učinkovitosti povijesne crkve Ishan

Autori:



Mr.sc. **Ferit Cakir**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Amasya, Turska
Odjel za arhitekturu
ferit.cakir@amasya.edu.tr



Doc.dr.sc. **Burcin S. Seker**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Amasya, Turska
Merzifon Vocational School
senol.seker@amasya.edu.tr



Prof.dr.sc. **Adem Dogangun** dipl.ing.građ.
Sveučilište Uludag, Turska
Odjel za građevinarstvo
adogangun@uludag.du.tr

Stručni rad

[Ferit Cakir, Burcin S. Seker, Adem Dogangun](#)

Ocjena konstrukcijske učinkovitosti povijesne crkve Ishan

U ovom radu razmatra se povijesna crkva Ishan, smještena u turskom gradu Artvinu, te njena konstrukcijska učinkovitost. Glavni cilj istraživanja je određivanje konstrukcijske učinkovitosti povijesne građevine. Rezultati analiza i podaci iz literature dokazuju da su pukotine nađene u konstrukciji uzrokovane vanjskim utjecajima i prekomjernim opterećenjima. Uz to su kritična naprezanja uočena i na nekoliko mjesta u uporištu glavnih lukova, pa se ta mjesta smatraju rizičnima u smislu konstrukcijske učinkovitosti.

Ključne riječi:

zidane crkve, konstrukcijska učinkovitost, statičke i dinamičke analize, model konačnih elemenata

Professional paper

[Ferit Cakir, Burcin S. Seker, Adem Dogangun](#)

Assessment of structural performance of historical Ishan church

This study focuses on the historical Ishan Church in Artvin, Turkey and its structural behaviour. The main purpose of this study is to investigate structural behaviour of the church. Therefore, Ishan Church is modelled numerically, and analyzed by means of static and dynamic analyses. Analysis results and literature review prove that the cracks identified in the structure are caused by external effects and excessive load. Moreover, critical stresses are frequently observed in the skewback of main arches, and these parts are considered to be risky in terms of structural performance.

Key words:

masonry churches, structural performance, static and dynamic analyses, finite element model

Fachbericht

[Ferit Cakir, Burcin S. Seker, Adem Dogangun](#)

Zustandsbewertung der Baustruktur der historischen Ishan Kirche

In dieser Arbeit wird die historische Ishan Kirche in der türkischen Stadt Artvin in Bezug auf das Tragwerk erforscht. Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist die Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Baustruktur des historischen Bauwerks. Daher ist ein numerisches Modell der Kirche erstellt und mittels statischer und dynamischer Berechnungen analysiert worden. Die Resultate und ein Literaturüberblick weisen darauf hin, dass die identifizierten Risse im Tragwerk durch äußere Einflüsse und übermäßige Lasten verursacht sind. Außerdem sind mehrfach kritische Spannungen an den Bogenlagern beobachtet worden, die als Gefahr für die Baustruktur eingeschätzt werden.

Schlüsselwörter:

Kirche aus Mauerwerk, Strukturleistungsfähigkeit, statische und dynamische Analyse, Finite-Elemente-Modell

1. Uvod

Zahvaljujući svom položaju na stjecištu nekoliko civilizacija, Turska danas posjeduje građevinsko nasljeđe nekadašnjih kultura. Neke od takvih povijesnih građevina sačuvane su u svom izvornom obliku, dok su druge oštećene zbog raznih utjecaja i više se ne koriste za svoju prvobitnu namjenu. Stoga je zaštita povijesnih građevina i njihovo sigurno prenošenje budućim generacijama jedan od glavnih izazova današnjega svijeta.

Artvin, grad smješten na sjeveroistoku Turske, jedna je od najpopularnijih urbanih cjelina Turske, prije svega zbog svojih povijesnih i kulturnih znamenitosti te prirodnih ljepota. U ovom gradu nalazimo tragove nekoliko različitih kultura pa se stoga može reći da je bio pravo stjecište raznih civilizacija. Jedna od najznačajnijih građevina koje se nalaze u središtu grada je i samostan Ishan, smješten u području Yusufeli. Taj je samostan jedan od najznačajnijih primjera gruzijske

arhitekture. Samostan Ishan, smješten na rubnom području naselja Ishan, sastoji se od crkve Ishan i glavne kapele Djevice Marije (slika 1.). Prema raznim izvorima, svećenik Seba, nećak svećenika Khandzae (759–861), izgradio je taj samostan uz financijsku potporu kralja Andemesea. Gradnja samostana počela je 955. godine za vrijeme vladavine gruzijskog kralja Davida, a dovršena je 1027. godine kada je zemlju vodio kralj Bagratli Magistros [1].

Vanjske dimenzije crkve Ishan iznose 35,00 x 35,00 x 20,70 m, a projektirana je kao građevina u obliku križa. Srednju zonu kvadratnog tlocrta zauzimaju čunjasti elementi koji leže na četiri glavna nosiva stupa. Ta središnja kvadratna zona proširena je krakovima koji se prostiru u četiri smjera. Polukružna apsida nalazi se u istočnom kraku. Originalnost apsida ove crkve potvrđuje raspored s osam stupova povezanih lukovima (slika 2.).

Dvokatne su pastoforije smještene odmah uz apsиду. Na vanjskim fasadama crkve nalazimo nekoliko biljnih



Slika 1. Crkva Ishan i glavna kapela Djevice Marije



Slika 2. Apsida u istočnom kraku i stupovi koji povezuju apsidu



Slika 3. Pregradni zid izgrađen u vremenu kada je crkva korištena kao džamija

ornamenata, geometrijskih motiva i ukrasa na dijelovima oko ulaznog prostora i prozora. Uz to, na glavnoj kupoli mogu se vidjeti i ostaci fresaka, a ti su ostaci također vidljivi i na sjevernom, južnom i zapadnom kraku te u zoni zidova i prozora.

Zapadni krak crkve tri puta je duži od ostalih tj. poprečnih krakova. Crkva je nekoliko godina korištena kao džamija, pa je između zapadnog kraka i središta građevine izgrađen pregradni zid, čime je ona podijeljena na dva dijela na zapadnom kraku (slika 3.). Dvoja ulazna vrata, na južnom i zapadnom kraku, zatvorena su u vremenu kada se građevina koristila kao džamija. Južna su vrata poslužila kao mihrab (u džamiji je to niša usmjerena prema Meki), dok je prostor u zapadnim vratima korišten kao zajednički prostor. Građevina je napuštena i danas se više ne koristi.

2. Konstrukcijska oštećenja na crkvi Ishan

Crkva Ishan, koja je predmet ovog istraživanja, nalazi se u gradu Artvinu, u četvrti Yusufeli. Ova prva faza uključuje istraživanje na samom mjestu, to jest oslanja se na vizualni pregled koji su obavili autori u crkvi Ishan i u Artvinu. Vidljivi znakovi oštećenja konstrukcije pregledani su u svrhu utvrđivanja konstrukcijskih značajki i arhitektonskih karakteristika. Nedostaci uočeni u samoj crkvi uglavnom su uzrokovani oštećivanjem konstrukcijskih elemenata i propadanjem građevnih materijala. Glavni konstrukcijski problemi su oštećenost konstrukcijskih elemenata, odvajanje materijala te smanjenje nosivosti. Jedna od fasada građevine djelomično je oštećena na nivou kamenih zidova, a u njima su uočene i brojne nepravilne mikropukotine. Pregledom su također uočene razne



Slika 4. Zapadni krak crkve i potpuno uništeni krov



Slika 5. Pogled na odvojeni zapadni i južni zid

vrste oštećenja konstrukcije zbog klimatskih uvjeta, neodržavanja i općeg propadanja građevine. Krov od crijepa, glavni lukovi koji nose krov, te gornji dio svoda, potpuno su uništeni i konstrukcija je u nezaštićenom stanju (slika 4.).

Osim toga, na gornjim dijelovima zidova uočene su na više mjesta izražene pukotine raznih veličina. Očit primjer je velika pukotina na zapadnoj fasadi koja se pruža po visini zida (slika 5.). Baš ta pukotina u najvećoj mjeri ugrožava sigurnost građevine jer zapravo razdvaja dva zida.

Ovaj značajan zid koji spaja zapadni i južni zid prostire se od gornjeg dijela zida pa do temelja. Terenskim je mjerenjima utvrđeno da širina pukotine varira od 2 do 15 cm, te da je pukotina uzrokovala prekid između južnog i zapadnog zida. Fotografije koje nalazimo u Takaichvilijevim studijama, koje su izrađene 1952. i 1960. godine [1, 2], pokazuju da je pukotina na zapadnoj strani postojala već 1917. godine, te da ta pukotina po širini odgovara današnjoj pukotini (slika 6.). Iz tih se fotografija također može vidjeti da srušeni svod nije postojao 1917. godine te da su ti dijelovi bili prekriveni drvenim krovom u vremenu kada je građevina korištena kao džamija. Može se stoga reći da su pukotine na zapadnoj fasadi i oštećenja svoda nastala prije barem stotinu godina, te da se te deformacije do današnjeg dana nisu promijenile. Gornji dijelovi apside koja se nalazi na istočnom kraku potpuno su uništeni, a pastoforijski prostori na stranama apside teško su oštećeni. Svodovi koji povezuju



pastoforijske prostore s apsidom potpuno su uništeni, kao što se to može vidjeti na slici 7. Neke manje pukotine uočene su na istočnoj fasadi građevine, uglavnom na gornjim dijelovima. Projekti sanacije i pojačanja trebaju se usredotočiti na sveukupan nosivi sustav te na rješavanje duboke pukotine na sjevernoj strani. Osim toga, drenažni iskopi pokazuju da je temeljno tlo u dobrom stanju te da temelji građevine nisu bitno oštećeni.



Slika 6. Izgled crkve Ishan u 1917. godini [2]



Slika 7. Uništeni svodni krov pastoforijskih prostora te vanjski pogled na galerijski prostor

3. Eksperimentalno ispitivanje materijala

Korištenje materijala za gradnju povijesnih građevina ovisno je o lokalnoj dostupnosti. Pješčenjak, vapnenac i ručno izrađena cigla najčešće su se koristili u izvođenju zidanih građevina u Anatoliji, i to upravo zbog njihove dostupnosti, izražene čvrstoće i mekoće [3]. Od spomenutih materijala, za izvođenje zidanih građevina u Turskoj najviše se koristio kamen i ručno izrađene cigle. Ustanovljeno je da su tesani kamen i ručno izrađena cigla materijali koji su najčešće korišteni u izgradnji crkve Ishan. U okviru ovog istraživanja provedena su i laboratorijska ispitivanja uzoraka da bi se utvrdile mehanička svojstva materijala. U tu su svrhu uzeti reprezentativni uzorci kamena i cigle u zoni crkve, nakon čega su ti uzorci obrađeni da bi se dobila ispitni uzorci dimenzija 50 mm x 50 mm x 50 mm, te 50 mm x 100 mm x 200 mm (slika 8.). Eksperimentalna su ispitivanja provedena da bi se dobili podaci o tlačnoj čvrstoći, vlačnoj čvrstoći i gustoći. U tom su smislu uzorci kamena i cigle podvrgnuti ispitivanju tlačne čvrstoće i ispitivanju savijanja u tri točke. Tlačna čvrstoća uzoraka dobivena je ispitivanjem tlačne čvrstoće na pet kocaka u skladu s uputama iz Turskog zakona o građenju, TS 699, (tablica 1.) [4]. Vlačna čvrstoća uzoraka dobivena je ispitivanjem savijanja

u tri točke koje je provedeno na pet prizmi u skladu s Turskim zakonom o građenju, TS EN 1467 i 1469 (tablica 3.) [5, 6].



Slika 8. Priprema i ispitivanja uzoraka: a) prikupljeni materijal, b) pripremanje uzoraka c) ispitivanje tlačne čvrstoće, d) ispitivanje savijanja u tri točke

Vrijednosti tlačne čvrstoće kamenog materijala varirale su od 39,98 MPa do 42,25 MPa. Prema tlačnim ispitivanjima, prosječna tlačna čvrstoća uzoraka kamena iznosila je 41,20 MPa. Vlačna čvrstoća je uglavnom varirala od 2,79 MPa do 3,01 MPa. Prosječna vlačna čvrstoća iznosila je 2,91 MPa. Što se tiče uzoraka ručno izrađene cigle, vrijednosti tlačne čvrstoće varirale su od 19,15 MPa do 21,02 MPa, a prosječna tlačna čvrstoća iznosila je 20,23 MPa. Vlačna čvrstoća varirala je između 1,32 MPa i 1,51 MPa, a prosječna vlačna čvrstoća iznosila je 1,42 MPa. Rezultati ispitivanja materijala prikazani su u tablicama 1 do 4. Prema Turskom zakonu o potresima iz 2007. godine [7], modul elastičnosti (E_d) zidanog materijala može se izračunati iz $E_d = 200 \cdot f_d$, gdje je f_d prosječna tlačna čvrstoća ispitivanog zidanog materijala. Ekvivalentne vrijednosti gustoće građevnog materijala određene su na osnovi rezultata ispitivanja koji su dobiveni za deset uzoraka. Mehanička svojstva korištena u svim numeričkim analizama sažeto su prikazana u tablici 5.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka kamena

Uzorci	Širina [mm]	Duljina [mm]	Visina [mm]	Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [MPa]
1	49	51	51	2661	42,25
2	51	50	50	2626	41,54
3	50	51	49	2610	41,90
4	50	50	51	2669	40,32
5	51	50	50	2632	39,98

Tablica 2. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za uzorke kamena

Uzorci	Širina [mm]	Duljina [mm]	Visina [mm]	Gustoća [kg/m ³]	Vlačna čvrstoća [MPa]
1	50	201	100	2652	2,93
2	51	200	100	2643	2,85
3	51	201	100	2659	3,01
4	50	200	101	2657	2,96
5	50	200	101	2698	2,79

Tablica 3. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka cigle

Uzorci	Širina [mm]	Duljina [mm]	Visina [mm]	Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [MPa]
1	49	50	50	1909	20,42
2	51	50	50	1901	19,15
3	50	51	49	1910	19,98
4	50	50	50	1899	20,59
5	51	51	50	1900	21,02

Tablica 4. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za uzorke cigle

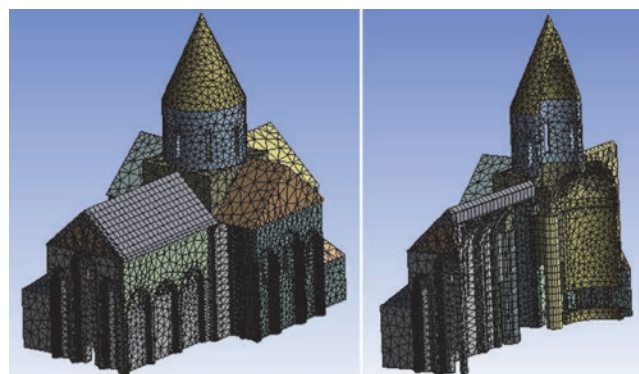
Uzorci	Širina [mm]	Duljina [mm]	Visina [mm]	Gustoća [kg/m ³]	Vlačna čvrstoća [MPa]
1	50	200	100	1929	1,51
2	51	201	100	1898	1,32
3	50	201	101	1910	1,36
4	50	200	101	1903	1,49
5	51	201	100	1899	1,43

Tablica 5. Mehanička svojstva materijala

Mehanička svojstva Elementi građevine	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Poissonov koeficijent	Prostorna masa [kg/m ³]
Zidovi	8200	0,15	2650
Lukovi	8200	0,15	2650
Stupovi	8200	0,15	2650
Krov	4000	0,18	1900

4. Numerički modeli

U studijama o pojačanju povijesnih građevina od ključnog je značenja pravilno određivanje ponašanja građevine te ispravan odabir načina podgrađivanja u svrhu rješavanja mogućih konstrukcijskih problema. Međutim, takve se studije ne mogu provesti primjenom konvencionalnih inženjerskih rješenja. Stoga se danas kao pouzdan način za ocjenjivanje povijesnih građevina koriste računalni modeli te analize koje se provode pomoću tih modela. U ovom su radu generirani numerički modeli u svrhu određivanja konstrukcijske učinkovitosti i razine oštećenja crkve Ishan, a pritom je korišten računalni program ANSYS Workbench [8] (slika 9.).



Slika 9. Model konačnih elemenata za crkvu

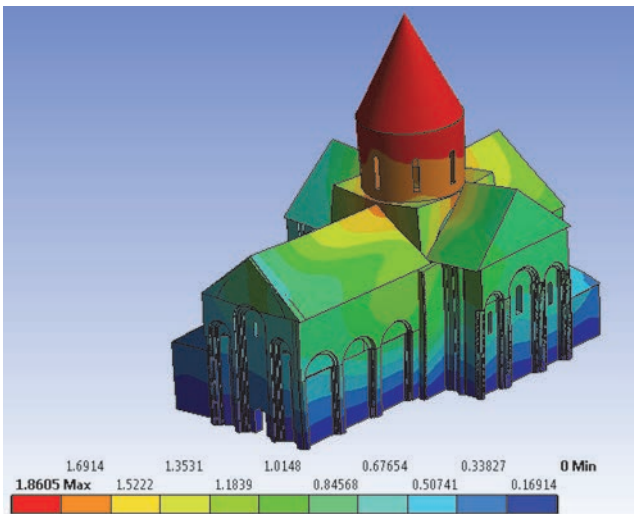
U fazi modeliranja uzeti su u obzir arhitektonski, sanacijski i restauratorski planovi, a svi su modeli izrađeni na bazi mjera i detalja prikazanih u projektnoj dokumentaciji. U numeričkom

modelu trebalo je upotrijebiti 222.701 čvora i 113.909 krutih elemenata (Solid 186).

Svojstva materijala izuzetno su značajna za analizu ponašanja konstrukcije. Teško je međutim odrediti svojstva materijala koja će se koristiti u analizi povijesnih građevina. U ovom su radu svojstva materijala određena uzimajući u obzir rezultate prethodnih studija, te su izvedene opće pretpostavke zbog složenosti u određivanju stvarnih svojstava materijala. Stoga su u ovom radu svojstva materijala preuzeta iz sličnih studija [9-12] (tablica 1.).

4.1. Statički proračun

U ovom je radu težište ispitivanja na statičkom proračunu crkve Ishan za njenu vlastitu težinu, pa je stoga obavljena analiza vertikalnog opterećenja. Rezultati analize pokazuju da je do maksimalnog pomaka došlo u vertikalnom smjeru na čunjastom dijelu crkve. Dobivena je maksimalna vrijednost od 1,86 mm (slika 10.).



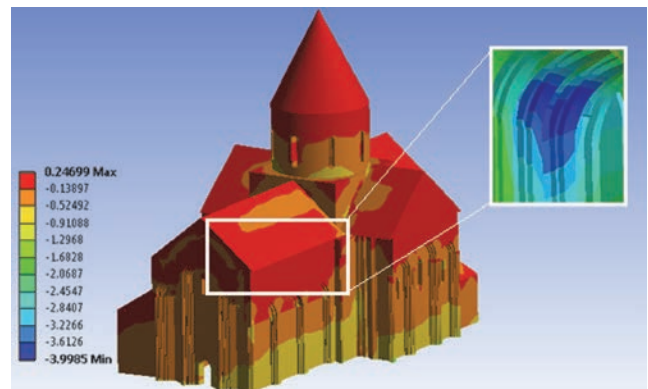
Slika 10. Vertikalni pomaci crkve, dimenzije u [mm]

Analizom tlačnih i vlačnih naprezanja ustanovljeno je da se maksimalna tlačna čvrstoća može očekivati na donjim dijelovima glavnih nosivih stupova te na donjim dijelovima glavnih stupova koji nose krovne crjepove. Maksimalna vrijednost iznosi 3,99 MPa (slika 11.). Vlačna naprezanja izražena su na uporištima lukova i na bočnim zidovima te na čunjastim nosivim lukovima.

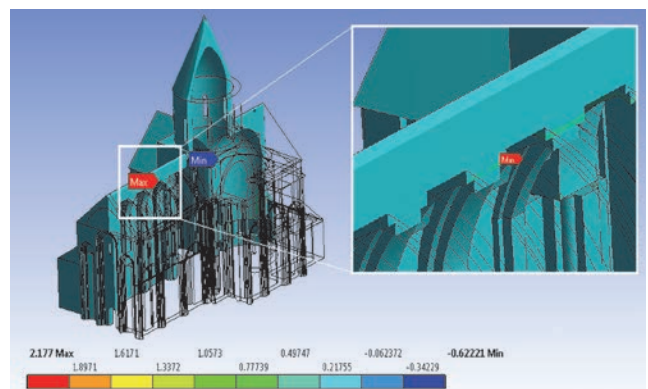
Tablica 6. Frekvencija i omjer stvarnog sudjelovanja mase za određene tonove

Ton	Frekvencija [Hz]	Omjer stvarnog sudjelovanja mase [os X]	Omjer stvarnog sudjelovanja mase [os Y]	Omjer stvarnog sudjelovanja mase [os Z]
1	5,10	0,0053	0,6371	0,0003
2	6,68	0,1227	0,0045	0,15E-6
3	6,90	0,2617	0,0132	0,20E-4
9	10,98	0,1405	0,0025	0,0003
15	15,70	0,0002	0,0047	0,1487

Pojačanja su također uočena na donjim dijelovima lukova, a maksimalno vlačno naprezanje iznosi 2,18 MPa (slika 12.).



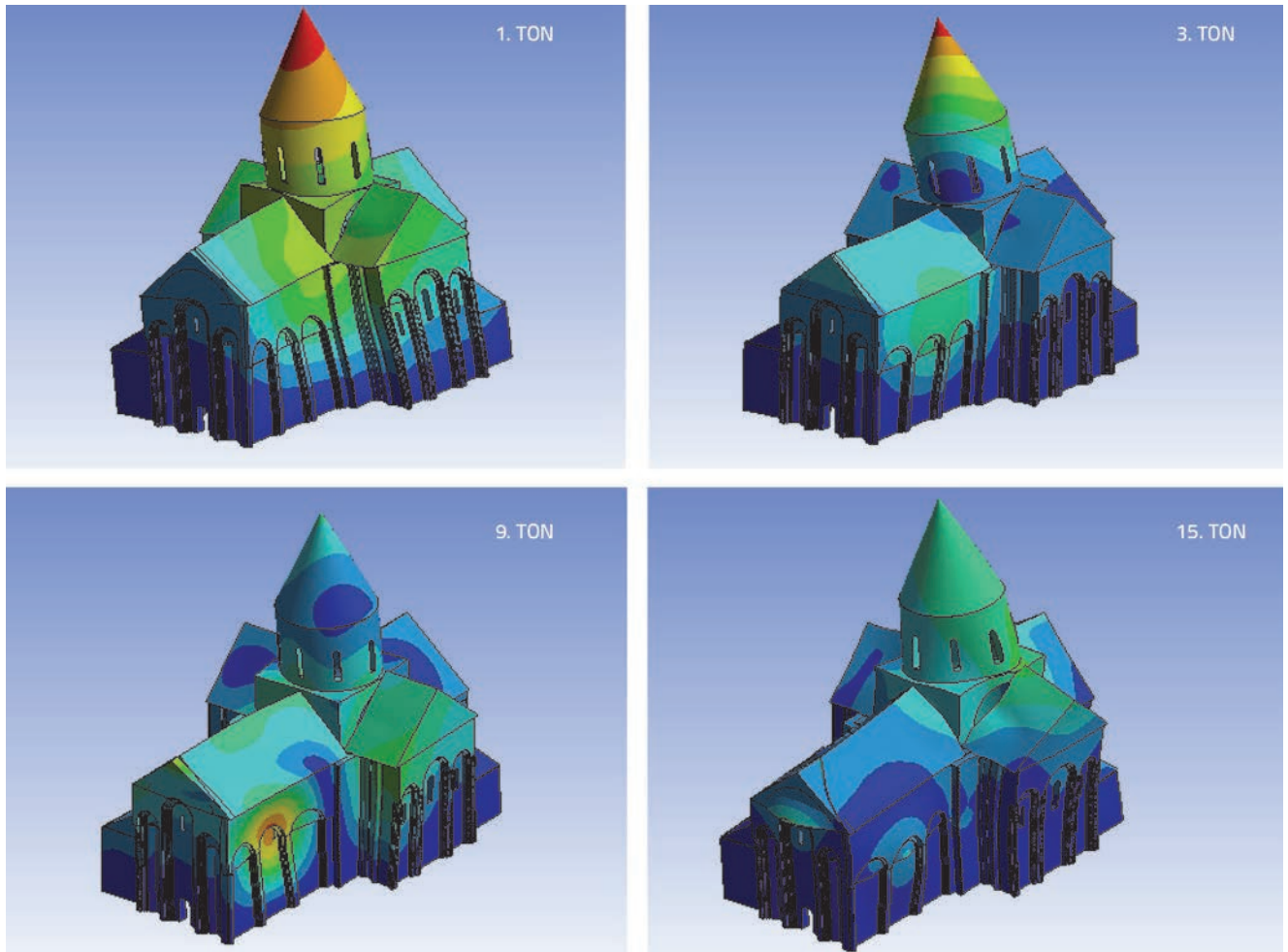
Slika 11. Konture tlačnog naprezanja dobivene statičkim proračunom, dimenzije u [MPa]



Slika 12. Konture vlačnog naprezanja dobivene statičkim proračunom, dimenzije u [MPa]

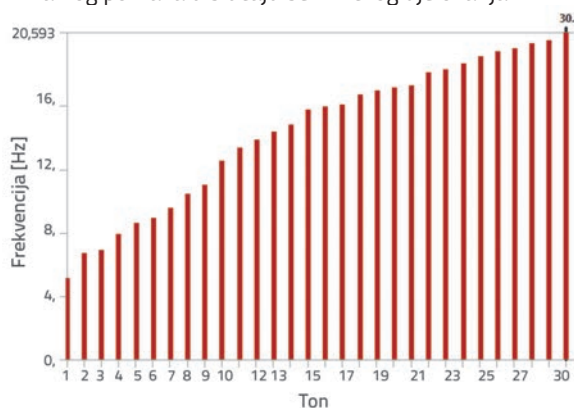
4.2. Modalna analiza

Modalna se analiza najviše koristi za dinamički proračun konstrukcija. Dovoljan broj vibracijskih tonova određuje se u skladu s Turskim zakonom o potresima (TEC). Prema [7], u obzir se treba uzeti dovoljan broj tonova vibracije da bi zbroj omjera stvarnog sudjelovanja mase bio veći od 90 % ukupne mase građevine u svakom smjeru. Modalna se analiza provodi za prvih 30 tonova te za prvih pet tonova koji su više zastupljeni u omjerima stvarnog sudjelovanja mase. Stoga se u modalnim analizama rješenje usvaja za 30 tonova, a pažljivo se razmatra



Slika 13. Neki oblici tonova

pet tonova koji se smatraju rizičnima (tablica 6.). Modalne analize pokazuju da se prvi ton konstrukcije pomiče u smjeru osi Y dok se drugi, treći i deveti tonovi pomiču u smjeru osi X, a ostali su tonovi pod utjecajem torzije. Ti tonovi čine 65 % stvarnog omjera masa i odraz su opće tendencije seizmičkog ponašanja građevine. Osim toga, generirane vrijednosti frekvencije (slike 13. i 14.) pokazuju da je crkva Ishan prilično kruta građevina, te da je izgrađena u skladu sa zakonitostima minimalnog pomaka u slučaju seizmičkog djelovanja.



Slika 14. Vrijednosti frekvencija za sve tonove

4.3. Dinamički proračun

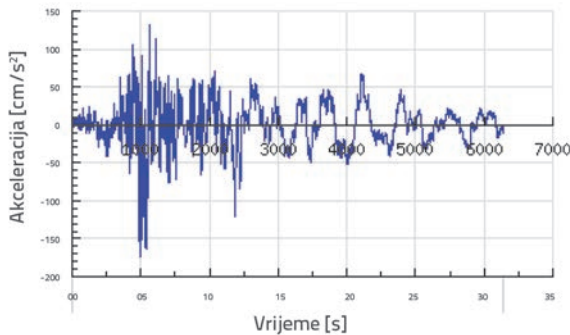
Prema Karti seizmičkog zoniranja u Turskoj, koju je izradilo Povjerenstvo za elementarne i ostale nepogode, područje Artvina i okolna područja nalaze se u drugoj, trećoj i četvrtoj seizmičkoj zoni [13].

Crkva Ishan koja je predmet ovog rada nalazi se u drugoj seizmičkoj zoni gdje maksimalno ubrzanje tla iznosi 0,3 g (slika 15.).



Slika 15. Seizmička karta Turske [13]

Potres Erzurum-Kars, koji je 30. listopada 1983. godine zadesio područje Erzurum u blizini grada Artvima, također je obrađen u okviru ovog rada. Obavljene su odgovarajuće dinamičke vremenske analize. U tim analizama, zapisi ubrzanja za potres Erzurum-Kars dobiveni su sa stanice Horasan, a u obzir je uzeta komponenta ubrzanja istok-zapad (E-W) uvjetovana snažnim pomacima terena (slika 16.).

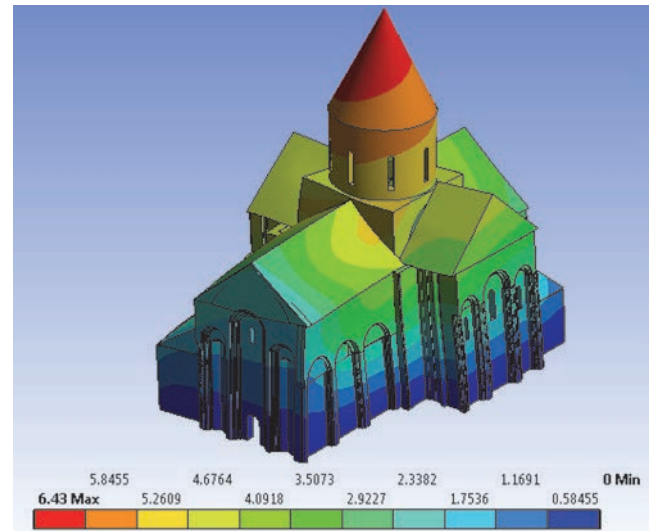


Slika 16. Komponenta ubrzanja istok-zapad potresa Erzurum - Kars [14]

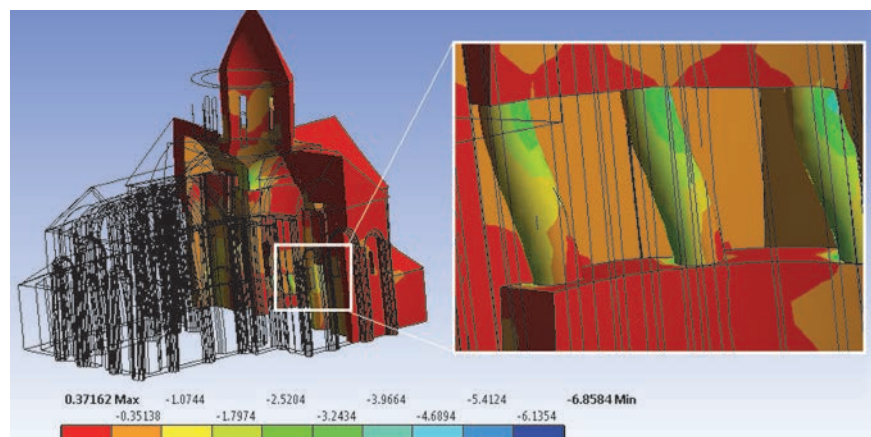
Rezultati analiza pokazuju da do maksimalnih horizontalnih pomaka dolazi na glavnoj kupoli crkve i na gornjim dijelovima glavnog ulaza, te da takvi pomaci dosežu i do 6,43 mm na glavnoj kupoli (slika 17.).

Kritična naprezanja izvedena tijekom analiza ponajviše se uočavaju na nosačima lukova koji nose glavnu kupolu, i u zonama oko prozora. Vlačna naprezanja naročito su uočljiva na nosačima lukova koji nose kupolu i na donjim dijelovima nosivih stupova.

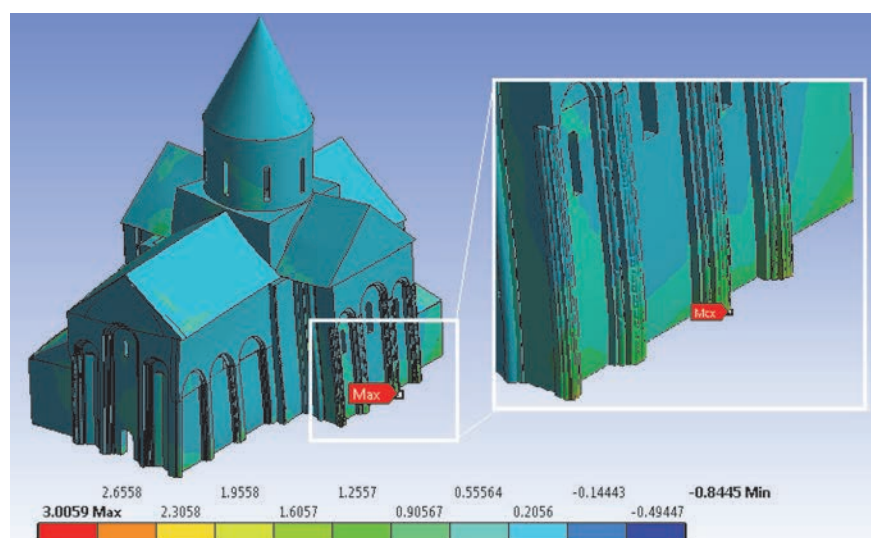
Treća glavna naprezanja očituju se kao tlačna naprezanja, a naročito su uočljiva na donjim i gornjim dijelovima nosivih stupova. Osim toga, povećanje naprezanja uočava se i na donjim dijelovima glavne kupole, a maksimalna tlačna čvrstoća doseže i do 8,06 MPa (slika 18.). Vlačna naprezanja također se mogu uočiti na nosačima stupova koji nose krovni svod u zapadnom kraku, te u gornjim dijelovima glavnih nosivih elemenata, pri čemu maksimalne vrijednosti dosežu i do 3,00 MPa (slika 19.).



Slika 17. Konture bočnog pomaka dobivene dinamičkom analizom, dimenzije u [mm]



Slika 18. Konture tlačnog naprezanja dobivene dinamičkom analizom, dimenzije u [MPa]



Slika 19. Konture vlačnog naprezanja dobivene dinamičkom analizom, dimenzije u [MPa]

5. Rezultati i analiza

Ovdje se razmatraju rezultati eksperimentalnih istraživanja i numeričkih analiza te se uspoređuju s rezultatima sličnih studija koji su prezentirani u literaturi. Prethodni eksperimentalni rezultati dobiveni na zidanim materijalima pokazuju da vrijednosti maksimalnog tlačnog i vlačnog naprezanja iznose 56,0 MPa i 8,2 MPa za kamen, dok maksimalne vrijednosti tlačnog i vlačnog naprezanja iznose 28,0 MPa i 4,0 MPa za rukom rađenu ciglu [15-20]. Dakle, eksperimentalni rezultati dobiveni u ovom radu pokazuju da su prvobitni materijali (kamen i cigla) zadržali svoja mehanička svojstva jer su postignute vrijednosti koje su usporedive s onima iz literature.

Rezultati analiza pokazuju da su u pogledu pomaka najrizičniji dijelovi konstrukcije zapravo čunjasti vrh i slobodno oslonjeno krovništvo, te da su ti dijelovi podložni vertikalnim deformacijama. Također je uočeno da su najrizičniji zidovi oni koji se nalaze na gornjim dijelovima zapadne fasade, kao najduži dio krakova crkve, te donji dijelovi svodova na zapadnim krakovima. Bočna pojačanja uočena na gornjim dijelovima bočnih zidova uglavnom preuzimaju opterećenja sa svodova u zapadnom kraku, pa su stoga vanjski otvori uočeni na desnim i lijevim uporištima svoda. Vlačna se naprezanja javljaju na vertikalnim dijelovima bočnih zidova zbog bočnih utjecaja svodnih elemenata. Veća naprezanja uočena su na nosivim čunjastim lukovima u čunjastom dijelu građevine, a pojačanja su uočena na donjim dijelovima svoda. Primijećeno je međutim da su naprezanja jako izražena na uporišnim točkama nosivih lukova gdje je došlo do slijeganja svodova, pa se stoga konstrukcijska učinkovitost tih dijelova treba vrlo oprezno ocjenjivati. Kao što vidimo na slici 18., maksimalna vlačna naprezanja iznosila su otprilike 3,06 MPa. Vlačna čvrstoća dosegla je vrijednost koja se smatra visokom za kamen, ciglu i vezne dijelove.

Može se reći da bi nosači luka u unutarnjim dijelovima, i glavni nosači kupole, mogli pretrpjeti oštećenja i to u smislu deformacija u obliku tonova. Osim toga, prema modalnoj analizi, deformacije se mogu očekivati i na slobodno oslonjenom krovu koji leži na vanjskim zidovima, te na glavnim kupolama, jer na te dijelove utječu pomaci izvan ravnine. Uočeno je da se posebni treba usmjeriti na nosače lukova koji nose glavnu kupolu u unutarnjim dijelovima crkve, jer oni bitno utječu na učinkovitost konstrukcije. Vjeruje se da su pukotine zbog vanjskih utjecaja, koje su zabilježene u osnovi konstrukcije, nastale tijekom vremena i to uslijed pretjeranog opterećenja. Vlačna naprezanja koja djeluju na zidove uzrokovala su trajne

deformacije, jer je vlačna čvrstoća materijala koji se koriste u zidanim građevinama prilično niska [9, 11, 21, 22, 23, 24]. To je međutim sasvim očekivano stanje kod povijesnih građevina. Kod zidanih građevina možemo očekivati pukotine na gornjim dijelovima zidova, a te se pukotine zbog vlačnih naprezanja pružaju tj. sužavaju prema donjim dijelovima [20]. Takvo ponašanje konstrukcije i takvi oblici pukotina tipični su i za zidove crkve Ishan. Smatra se da je duboka pukotina na zapadnoj fasadi uglavnom uzrokovana vlačnim naprezanjima na donjim dijelovima krova. Ta pukotina napredovala je kroz rub zone s ornamentima i temeljne zone zbog sužavanja debljine zida, a glavni uzrok su duboki ornamenti na prednjoj fasadi.

6. Zaključak

Ovo istraživanje odnosi se na crkvu Ishan koja se nalazi u Artvinu, a smatra se jednim od najznačajnijih primjera gruzijske arhitekture. Obavljene su analize metodom konačnih elementa da bi se odredila konstrukcijska učinkovitost te istražili uzroci oštećenja. Detaljnom analizom oštećenja uočeno je da su deformacije na crkvi Ishan najizraženije na krovnim i lučnim segmentima. Osim toga, detaljne numeričke analize pokazale su da su naprezanja najizraženija na donjim dijelovima slobodno oslonjenog krova te na uporišnim točkama glavnih lukova koji nose krovne svodove. Ustanovljeno je također da je porast naprezanja najveći na kontaktima između različitih materijala i geometrijskih oblika, te da u tim prijelaznim zonama često dolazi do oštećenja konstrukcije. Stoga se tim zonama treba posvetiti posebna pažnja prilikom radova na renovaciji i pojačanju crkve Ishan, te se ozbiljne mjere trebaju poduzeti da bi se ograničilo povećanje naprezanja u tim prijelaznim područjima. Osim toga, predviđa se da će analize obavljene u okviru ovog rada, isto kao i dobiveni rezultati, potaknuti i inspirirati izradu novih studija. U tom se smislu preporučuje da se slične studije provode na povijesnim građevinama od raznih građevnih materijala te na građevinama na kojima se koriste razni nosivi sustavi.

Zahvale

Autori izražavaju svoju zahvalnost profesoru Haldunu Ozkanu na njegovim uputama i znanstvenom doprinosu. Autori također zahvaljuju Direkciji za geodeziju i spomenike područja Erzurum, isto kao i tvrtki Osman Gülsüm koja se bavi poslovima obnove, na pomoći i doprinosu tijekom terenskih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Takaichvili, E.: *Archaeologische Forschungsreise in die Südlichen Provinzen Georgiens 1917, 1960*, Tiflis.
- [2] Takaichvili, E.: *Arkeologičeskaja Kspeditsia: 1917, Juznije Provintsii Gruzii, 1952*, Tiflis.
- [3] Uysal, H., Cakir, F.: *Static and Dynamic Analyses of the Historical Erzurum Watch tower*, TAC Foundation, Foundation for the Preservation of Turkish Monuments an Environmental, Issue-1, pp. 72-80, 2013.
- [4] TS 699: 2009, *Methods of Testing for Natural Building Stones*, Turkish Building Code, Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey (in Turkish).
- [5] TS EN 1467:2012, *Natural stone - Rough blocks - Specifications*, Turkish Building Code, Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey.
- [6] TS EN 1469, *Natural stone products - Slabs for cladding - Requirements*, Turkish Building Code, Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey.
- [7] *Turkish Earthquake Code (TEC), Specification for Structures to be Built in Disaster Areas*, Ministry of Public Works and Settlement Government of Republic of Turkey, Ankara, 2007.
- [8] ANSYS: 14.0 Releases, *Finite Element Analysis Program*, USA.
- [9] Seker, B.S.: *Investigation of Behaviour of Architect Sinan's Mosques Under Static and Dynamic Loads*, PhD Thesis, Graduate School of Natural And Applied Sciences, Karadeniz Technical University, 2011, Turkey (in Turkish)
- [10] Ural, A., Doğangün, A., Görkem, S.E.: *Stone Masonry Arch Bridges in Turkey and Analysis of a Sample Bridge Including Nonlinear Behavior*, 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures Cairo, Egypt, April 24-27, 2006.
- [11] Seker, 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, 2013, pp. 112-120 (in Turkish).
- [12] Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoglu, R.: *Investigation of dynamic response of masonry minaret structures*, Bull Earthquake Eng (2008) 6, pp. 505-517.
- [13] AFAD: *Republic of Turkey Prime Ministry, Disaster and Emergency Management Presidency, Earthquake Department*, http://www.deprem.gov.tr/sarbis/Shared/Deprem_Haritalari.aspx, 23.08.2013.
- [14] NEMC: *National Earthquake Monitoring Center*, Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Turkey, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Depremler/tLarge2.htm>, 30.08.2013.
- [15] Sassoni, E., Mazzotti, C.: *The use of small diameter cores for assessing the compressive strength of clay brick masonries*, Journal of Cultural Heritage 14S (2013) e95-e101.
- [16] Sert, M.: *Determination of Physico-Mechanical Properties of Stone Originating In Isparta and Nevşehir Volcanic Terrains And Studying Their Areas of Use*, M.Sc. Thesis, Graduate School of Applied and Natural Sciences, Department of Mining Engineering, Isparta University, 2010, Turkey (in Turkish)
- [17] Halifeoglu, F.M., Sert, H., Yılmaz, S.: *Tarihi Kurt Köprüsü (Mihraplı Köprü, Vezirköprü) Restorasyonu Projeve Uygulama Çalışmaları*, METUJFA 2013/2, (30:2), pp. 81-104, (In Turkish).
- [18] Kaniç, R., Dondüren, M.S.: *Bağlayıcı Özelliği Artırılan Harçla oluşturulan Yığma Duvarların Mekaniksel Davranışları*, Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, Cilt 7, Sayı:1-2008 (In Turkish).
- [19] Kurugol, S., Tekin, C.: *Anadoluda Bizans Dönemi Kale Yapılarında Kullanılan Tuğlaların Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi*, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., Vol 25, No 4, 767-777, 2010, (In Turkish).
- [20] Camlibel, N.: *The analytically investigate of Architect Sinan's Structures*, Associate Professorship Thesis, Graduate School of Natural And Applied Sciences, Istanbul Technical University, 1998, Turkey (in Turkish).
- [21] Doğangün, A., Ural, A., Livaoğlu, R.: *Seismic Performance of Masonry Buildings during Recent Earthquakes in Turkey*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing - China.
- [22] Ural, A., Dogangun, A., Sezen, H., Angin, S.: *Seismic Performance of Masonry Buildings during the 2007 Bala, Turkey Earthquakes*, Natural Hazards, 2012, Vol. 60 (3), pp. 1013-1026
- [23] Korkmaz, H.H., Korkmaz, S.Z., Dondüren, M.S.: *Earthquake hazard and damage on traditional rural structures in Turkey*, Natural Hazards and Earth System Science, 2010, (10), pp. 605-622.
- [24] Adanur, S.: *Performance of masonry buildings during the 20 and 27 December 2007 Bala (Ankara) earthquakes in Turkey*, Natural Hazards and Earth System Science, 2010, (10), pp. 2547-2556.