

Primljen / Received: 30.7.2020.

Ispravljen / Corrected: 28.9.2021.

Prihvaćen / Accepted: 25.11.2021.

Dostupno online / Available online: 10.8.2022.

Ispitivanje procjene uporabljivosti zidanog lučnog mosta izloženog djelovanju potresa dalekog rasjeda

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Memduh Karalar**, dipl.ing.građ.Sveučilište Zonguldak Bülent Ecevit
Zonguldak, Turska

Odjel za građevinarstvo

memduhkaralar@beun.edu.tr

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Mustafa Yeşil**, dipl.ing.građ.Sveučilište Zonguldak Bülent Ecevit
Zonguldak, Turska

Odjel za građevinarstvo

mustafayesil67@windowslive.com

Stručni rad

Memduh Karalar, Mustafa Yeşil

Ispitivanje procjene uporabljivosti zidanog lučnog mosta izloženog djelovanju potresa dalekog rasjeda

U radu je prikazano statičko i dinamičko ispitivanje ponašanja povijesnog zidanog lučnog mosta izloženog djelovanju potresa dalekog rasjeda. U prvom koraku izrađen je model konstrukcije primjenom metode konačnih elemenata uz pomoć programa ANSYS i SAP2000. Navedeno je napravljeno kako bi se ustanovilo mogu li se usporediti najveći mogući pomaci, primarna naprezanja i elastične deformacije. Iz svega navedenoga, ključni je element oštećenja gornja strana plohe. Nadalje, ocjenjivanjem životnog ciklusa zidanog lučnog mosta, uočene su povećane vrijednosti naprezanja i deformacija mosta čime se njegovo očekivano trajanje drastično smanjilo.

Ključne riječi:

povijesni zidani lučni most, potresi dalekog rasjeda, ANSYS, SAP2000, metoda konačnih elemenata

Professional paper

Memduh Karalar, Mustafa Yeşil

Examination of masonry arch bridge's life-cycle assessment under far-fault earthquakes

The goal of this study is to examine the historical masonry arch bridge's static and dynamic behavior using far-field fault earthquakes. The first step is to build a finite element model with ANSYS and SAP2000. This is done to see if the greatest possible displacements, primary stresses, and elastic strains compare. From above, the belt's upper side appears to be vital for damage. Furthermore, a historical masonry arch bridge's life cycle assessment is also researched and observed, which results in increased stress and strain values for the bridge, causing its expected life span to be drastically reduced.

Key words:

historical masonry arch bridge, far fault earthquakes, ANSYS, SAP2000, finite element method

1. Uvod

Početak ljudske povijesti može se smatrati početkom građevinske djelatnosti. Poznato je da su čak i najstarije poznate civilizacije gradile zgrade u različite svrhe kako bi se sakrili, obranili i preživjeli. Neke od najvažnijih povijesnih konstrukcija su mostovi. Ljudi su kroz povijest gradili mostove primjenjujući različite metode i oblike, od najosnovnijih metoda do suvremene tehnologije. Najčešće je primjenjivana lučna nosiva konstrukcija. Iako su Sumerani i Egipćani otkrili lučni oblik mosta, Rimljani su bili ti koji su koristili oblik luka najfunkcionalnije te su dali vizualno najljepše primjerke lučnih mostova. Milvijski most jedan je od najvažnijih primjeraka općenito. Jedan od najvažnijih primjeraka koje su Rimljani izgradili je most Ponte Vecchio iz 6. stoljeća. U Turskoj su rasprostranjeni jednostruki kameni lučni mostovi građeni u Anatoliji tijekom 19. stoljeća. Turskih povijesnih mostova koji se i dalje upotrebljavaju ima približno 1300 te je iznimno važno osigurati njihovu nosivost na dinamičke učinke prometnog opterećenja, vjetra i potresa [1]. Potresi koji se manifestiraju naglim potresanjem tla kao posljedica raspucavanja i pomicanja stijena ispod površine posebno su ra zorni [1] i upravo su ti čimbenici negativno utjecali na trajanje zidanih mostova [2]. Povijesni zidani mostovi sadrže raznolike konstrukcijske elemente kao što su klesano kamenje iz kamenoloma, završni kamen, kolničku konstrukciju, itd., te je kod njih presudno razmatrati učinke potresa. Ti bi učinci mogli biti ključni za rezonanciju konstrukcije kao i njen odgovor u obliku ubrzanja, brzine, pomaka, raspodjele naprezanja, itd. [3]. Uočava se da se značajni učinci uglavnom javljaju uz povećanje konstrukcijske visine, i to pogotovo kod uobičajenih konstrukcija u odnosu na složene konstrukcije [4, 5]. Stoga je nužno provesti istraživanje seizmičke osjetljivosti povijesnih zidanih mostova. Nadalje, ubrzanja, brzine, pomaci, raspodjela naprezanja, itd. postaju još značajniji parametri kada se promatra interakcija tla i složene zidane konstrukcije, [6-9].

U literaturi je moguće pronaći velik broj analitičkih i eksperimentalnih istraživanja povijesnih mostova zbog njihove povijesne vrijednosti [10-13]. Osim tih istraživanja, Drosopoulos i dr. [14] istražuju granično opterećenje koje vodi do sloma kamenog luka uzimajući pritom u obzir visine luka koje variraju. Na temelju rezultata tih istraživanja čini se da geometrija bitno utječe na mehaničko ponašanje lukova. Nadalje, otkriveno je da smanjenje strelice luka (ispod početne, stvarne geometrije) općenito uzrokuje povećanje gornjega graničnog opterećenja sve dok se ne postigne plitki, ravni luk. Boothby [15] je proučavao ponašanje lučnih mostova izloženih djelovanju prometnog opterećenja. Proučio je pet različitih mostova od čega četiri pomoću programa ANSYS. Naposljetku, program za ispitivanje pokazuje važnost linearnosti odgovora na različite razine opterećenja te važnost uzimanja u obzir trajnih oštećenja kako bi se adekvatno procijenila konstrukcija. Osim toga, ispitivanja na terenu potvrdila su spektar odgovora sličnih konstrukcija te je pronađen odgovarajući dokaz za razvoj početnog mehanizma. U drugom istraživanju, Hatzigeorgiou i

dr. [16] konačnim elementima modeliraju povijesni zidani most Arta primjenom linearne, nelinearne statičke i dinamičke analize. Rezultati tog istraživanja, temeljeni na različitim analizama, navode na zaključak kako će moguća slijeganja tla ispod jednog ili više temeljnih stupova i seizmička pobuda prilično opteretiti most uzrokujući oštećenja u kritičnim područjima. Arteaga i Morer [17] to su napravili u istraživanju u kojem se koristila granična analiza kako bi se ispitao utjecaj različitih geometrijskih svojstava na konstrukcijsku nosivost mosta. Kako konstrukcijsko istraživanje zidanog lučnog mosta zahtijeva primjenu raznih metodologija radi dobivanja sveobuhvatnije geometrije, smatra se da geometrija ima značajnu ulogu u tome. Sarhosis i dr. [18] proveli su dodatne eksperimente koji su potvrdili da zidani lučni mostovi pokazuju nepravilnu raspodjelu težine. Prema rezultatima analize, povećanje kuta nagiba rezultiralo bi uvijanjem luka, što bi naposljetku vodilo do sloma pod djelovanjem manjeg opterećenja. Boothby i Fanning [19] koji su proučavali tri zidana lučna mosta, objavili su rezultate ispitivanja po Feldu i modeliranjem metodom konačnih elemenata. Ispod konstrukcije mosta postavljen je dodatni LVDT na referentnom okviru kako bi se izmjerila gibanja konstrukcije mosta, a tada se vozilo poznate težine položilo na okvir. Osim toga, nelinearni modeli konačnih elemenata simulirani su uz pomoć programa ANSYS. Odabran je primjeren skup karakteristika materijala, primijenjena je nelinearna analiza konačnih elemenata i dobiveni su dobri rezultati. Sarhosis i dr. [18] proveli su istraživanje koje je u suprotnosti s istraživanjem koje su proveli Arteaga i dr. [17]. Primjenom prostorne analize metodom konačnih elemenata, Frunzio i dr. [20] otkrili su da su analitički rezultati bili jednostavni i prikladni za obnovu. Otkriveno je da kad su razine naprezanja niske, to je obećavajuće u smislu da do pojave sloma neće doći. S druge strane, razine naprezanja i raspodjela polja deformacije zajedno djeluju kako bi upozorili na proces u kojem dolazi do sloma. Conde i dr. [21] nude drugačije ispitivanje o tome. Oni istražuju kako geometrija utječe na procjenu opterećenja koje vodi do sloma srednjovjekovnog zidanog lučnog mosta koji je još uvijek u uporabi. Vidjevši rezultate, može se reći da ako idealizirani podaci nisu dostupni, u obzir se s oprezom trebaju uzeti opterećenja koja vode do rušenja kamenog luka kad se provode numerički izračuni budući da se tim pristupom stvara precjenjivanje očekivanog opterećenja. Toker i Unay [22] u svom su istraživanju koristili prototipni model za različito opterećenje. Povijesni lučni most, prema Uralu [23], izgrađen je uporabom analize metodom konačnih elemenata. Najprije se trebala provesti linearno elastična analiza kako bi se odredile ključne konstrukcijske komponente i ukupna stabilnost konstrukcije. Po uzoru na te eksperimente mogu se koristiti jedinstveni alati za modeliranje kako bi se istražila pitanja geometrijske nepravilnosti te kako ona utječu na ponašanje izloženo djelovanju dinamičkih opterećenja poput potresa. Ural je u svom istraživanju prikupio podatke o micanju tla i naprezanju za most, a također je i seizmički analizirao most. Bayraktar i dr. [24] proveli su drugo istraživanje. Otkrili su dinamičke karakteristike mostova pa je model temeljen na metodi konačnih elemenata mosta ponovno ispitan.

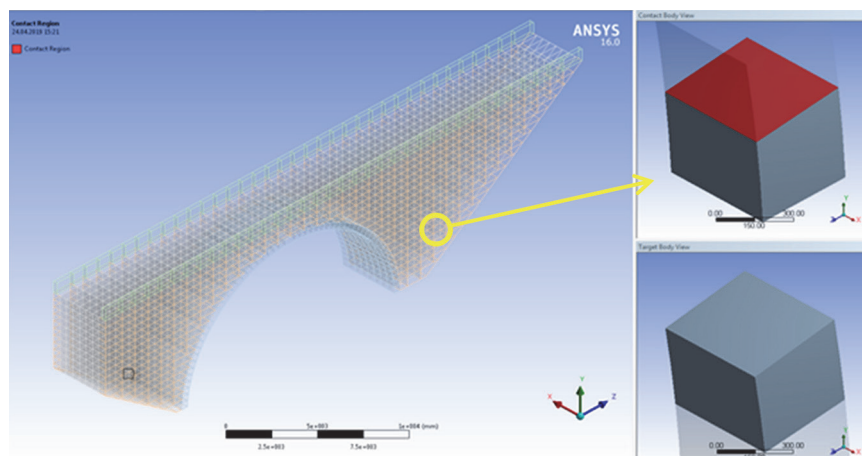
istok. Most je širok 4,08 metara kad ga se prelazi preko zapadnog prilaza. Međutim, kad se prati luk, most je širok samo 4,21 metar, a prije izlaska, širok je 3,21 metar. Slika 1. prikazuje povijesni most Tokatli. Za strukturnu analizu važno je znati svojstva materijala na mostu. Međutim, u starijim konstrukcijama to se teško može nadgledati. Geometrijska svojstva građevine lako se mogu izračunati, no traženje rješenja problema zahtijeva približne brojeve kad su u pitanju obilježja materijala određene građevine. Materijali koji su opisani u literaturi obično se upotrebljavaju za slične konstrukcije, a opisani su u ovom istraživanju. Kako bi se izračunala veličina kamenog luka, u proračunu se koristi modul elastičnosti materijala iz iznosa 3×10^9 N/mm², te Poissonov koeficijent. Za bočne zidove u analizi se koristi modul elastičnosti ($2,5 \times 10^9$ N/mm²) i Poissonov koeficijent (0,2).

3. Modeliranje metodom konačnih elemenata

Primjenom programa temeljenog na metodi konačnih elemenata sastavlja se i ispituje model povijesnog mosta Tokatli za različite potresne scenarije, uključujući potrese koji počinju na udaljenom rasjedu. Kako bi se to učinilo, prvi je korak primjena nelinearni proračun metodom konačnih elemenata u programu ANSYS 3D. Rješenja u programu ANSYS [42] otkrivena su u raznim potresima obližnjeg i dalekog rasjeda. Unatoč činjenici da obje aplikacije koriste metodu konačnih elemenata za dobivanje rješenja, ipak se njihova sučelja, grafika, modeli, pristupi mreži te nanosena opterećenja značajno razlikuju. Identična geometrija, podaci o materijalu te potporni uvjeti primijenjeni su kako bi se iznova stvorio taj model povijesnog mosta Tokatli u programu SAP2000 [43]. Jednako tako, provedena su dinamička i statička ispitivanja. Također, model je izrađen u programu SAP2000 s ciljem da se odredi konfiguracija modalnih oblika mosta, kao i vlastite frekvencije. Kako bi se dobili i usporedili rezultati, primijenjena je nelinearna analiza metodom konačnih elemenata poput onih u programu ANSYS i SAP2000.

3.1. Vrste elemenata

Prema konstrukcijskom modelu temeljenom na metodi konačnih elemenata primijenjenom na povijesni most Tokatli, konstrukcija se dijeli na manje i jednostavne dijelove povezane čvorovima koji se sijeku, a koji omogućuju željeni stupanj slobode za svaku komponentu. Trodimenzionalni izoparametarski konačni elementi s 8 čvorova, Solid65, koristili su se kao materijal žida koji je konstruiran metodom konačnih elemenata u programu ANSYS. Ovdje upotrebljavani model pukotine je model razmazanih pukotina koji dopušta pukotini da se oblikuje u



Slika 2. Detalji kontaktnih površina

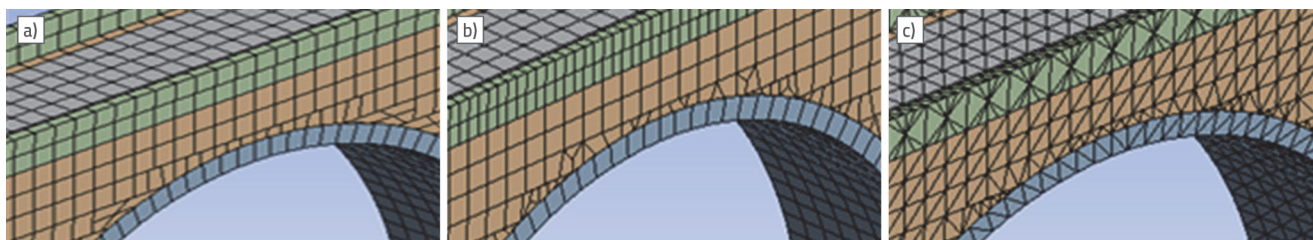
suprotnim smjerovima u odnosu na dominantno naprezanje [44, 45]. Svaki čvor elementa ima tri stupnja slobode; odnosno ima svojstvo da se može premještati po osima x, y i z osi. Potrebno je odrediti kontaktnu površinu kako bi kontaktni algoritam modela konačnih elemenata funkcionirao. Specifikacije modeliranja kontaktnih površina navode se u nastavku.

3.2. Kontaktno modeliranje

Kontakt mehanika [44] je učenje o deformaciji koja nastaje međusobnim dodirivanjem tvrdih predmeta u jednoj ili više točaka. Ovo istraživanje određuje na koji su način povezani povijesni most Tokatli i njegove komponente. Trodimenzionalne kontaktne tarne površine [46] omogućuju da ispuna klizi ili se pomiče u odnosu na svod i čione zidove, a da pritom ne uzrokuje značajne vlačne deformacije na mjestu gdje su dva materijala međusobno povezana (slika 2.).

3.3. Mreža

Točna veličina i vrsta mreže potrebni su kako bi se pouzdano procijenile vrijednosti naprezanja i/ili deformacije u modelu temeljenog na metodi konačnih elemenata. Studije slučaja različitih veličina mreža provedene su kako bi se simuliralo model konačnih elemenata povijesnog mosta Tokatli i dobila prikladna gustoća mreže. S obzirom na to, da bi se našao najbolji izbor mreže, model temeljen na metodi konačnih elemenata ispituje i uspoređuje četiri opcije mreže: automatsku, tetraedarsku, heksdominantnu i pruženu, slika 3. U slučaju prve opcije mreže, koja ima ukupno 6,680 elemenata i 10,478 čvorova, mreža se automatski oblikuje. Kod mreže s konačnim elementima oblika tetraedra postoji 47818 elemenata mreže te 162920 čvorova. Obilježja drugih opcija mreža prikazana su u tablici 1. Više čvorova u modelu konačnih elemenata znači veće vrijeme računanja u programu ANSYS. Iz tog razloga odabire se opcija mreže u kojoj su četiri tetraedra jedan iznad drugoga budući da je raspodjela veličine modela podjednaka te je potrebno manje



Slika 3. Opcije mreža: a) heksdominantna mreža; b) pružena mreža; c) tetraedarska mreža

čvorova. Zato se provjerava odabrana opcija mreža podešavajući veličinu mreža po dužini dok se ne postignu postojeći rezultati. Za model konačnih elemenata koristi se najveća veličina mreže koja daje konzistentne rezultate. Vrijednost maksimalne trajne deformacije mjeri se za veličinu mreže od 50 mm na povijesnom mostu Tokatli (0,012443), odnosno od 25 mm na mostu (0,012466). Drugim riječima, ručno se unose veličine mreže i koriste se tako da je 25 mm početna/završna točka u kontaktnim područjima, a 50 mm na rubnom dijelu modela.

Tablica 1. Broj čvorova i elemenata za različite vrste mreža

| Broj | Vrsta mreže | Čvorovi | Elementi |
|------|----------------|---------|----------|
| 1 | Automatska | 104788 | 6680 |
| 2 | Heksdominantna | 126342 | 13045 |
| 3 | Pružena | 104788 | 6680 |
| 4 | Tetraedarska | 162920 | 47818 |

3.4. Model materijala i rubni uvjeti

Da bi se dobili točni analitički rezultati za nelinearnu analizu metodom konačnih elemenata, potrebne su točne karakteristike povijesnog mosta Tokatli. Zbog činjenice da je teško odrediti kvalitetu materijala, u ovom istraživanju koriste se ona svojstva koja se mogu naći u graditeljstvu i literaturi. Modul elastičnosti materijala u proračunu iznosi 3×10^9 N/mm² te Poissonov koeficijent koriste se kako bi se odredila veličina kamenog luka. Za bočne zidove u analizi koristi se modul elastičnosti ($2,5 \times 10^9$ N/mm²) i Poissonov koeficijent (0,2). Pregledom literature uočeno je da ispune imaju malo utjecaja na nosač građevine [22]. Iz tog razloga uočeno je da imaju manji elastični modul u

analizi. Kako bi se proučilo ponašanje konstrukcije sa složenim modalnim oblicima, bilo je prihvatljivo samo uzimanje prvih deset oblika [23]. Više o tome u tablici 4. i na slici 6. U tablici 2. daje se popis obilježja materijala koji se koriste u analizama mosta Tokatli. Preporučena obilježja materijala su modul elastičnosti, Poissonov koeficijent te jedinična težina. Osim toga, u analizama metodom konačnih elemenata važno je točno određivanje rubnih uvjeta. Rubni uvjeti odnose se na sve kamene stupove mosta koji imaju konstantan broj translacijskih i rotacijskih stupnjeva slobode.

Tablica 2. Obilježja materijala [47]

| Materijal | Modul elastičnosti [N/mm ²] | Poissonov koeficijent | Gustoća [kg/m ³] |
|---------------|---|-----------------------|------------------------------|
| Kameni lukovi | $3,0 \times 10^9$ | 0,25 | 1600 |
| Bočni zidovi | $2,5 \times 10^9$ | 0,20 | 1400 |

4. Gibanja tla uslijed dalekog potresa

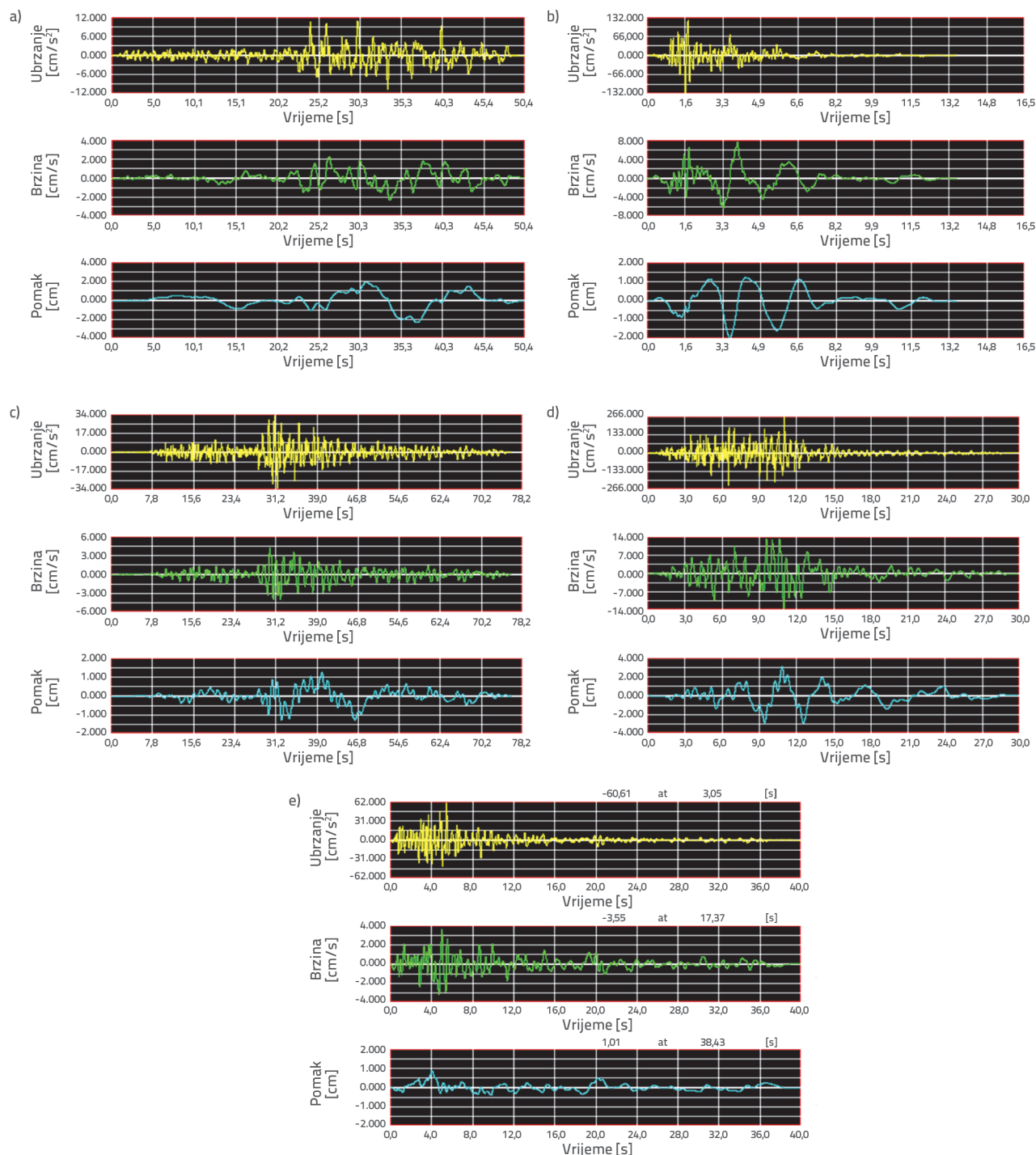
U ovom istraživanju proučavaju se seizmičke vibracije tla koje imaju jasna obilježja impulsne brzine koja uzrokuje oštećenja. U tablici 3. prikazana su gibanja tla s dalekim rasjedom koja su primjenjivana u istraživanju. Slika 4. prikazuje snimke potresa koje se analiziraju u istraživanju. Jedan od načina kako se može odrediti gibanje tla uslijed dalekog potresa jest mjerenje amplitude impulsne brzine (V_p) te period impulsne brzine (T_p) [48]. Ap i V_p su dijelovi omjera A_p/V_p koji se tiče gibanja tla i daje podatke o gibanju tla, te se taj omjer koristi u ovom istraživanju kako bi opisao gibanja tla uslijed dalekog potresa. Omjer između amplitude i frekvencije (ili voltaže i frekvencije) može biti dobar pokazatelj prevladavajuće

Tablica 3. Snimke dalekih rasjeda koje su primijenjene u analizi

| Potres | Stanica/Komponenta | A_p [g] | V_p [cm/s] | A_p/V_p [1/s] |
|---------------------------------|---|-----------|--------------|-----------------|
| Borrego Mount, 1968. | Skladište u Hollywoodu / 180° | 0,01 | 2,33 | 4,7 |
| Friuli, Italija, 1976. | Conegliano / 0° | 0,03 | 4,29 | 7,7 |
| Kobe, 1995. | FUK / 0° | 0,05 | 3,52 | 13,6 |
| Morgan Hill, 1984. | San Fran. Međunarodna zračna luka / 90° | 0,06 | 3,65 | 16,7 |
| Sjeverozapad Kalifornije, 1941. | Gradska vijećnica Ferndale / 45° | 0,02 | 0,76 | 23,6 |

frekvencije gibanja tla i energije [3]. Ako je omjer A_p/V_p nizak, dulje će trajati impuls ubrzanja, a ako je taj omjer visok, kraće će trajati impuls ubrzanja. Primjenjuje se jedan skup od više

zapisa gibanja tla. Tablica 3. uključuje pet različitih potresa te vrijednosti A_p/V_p koje variraju od 4,7 do 23,6 po jednoj sekundi.



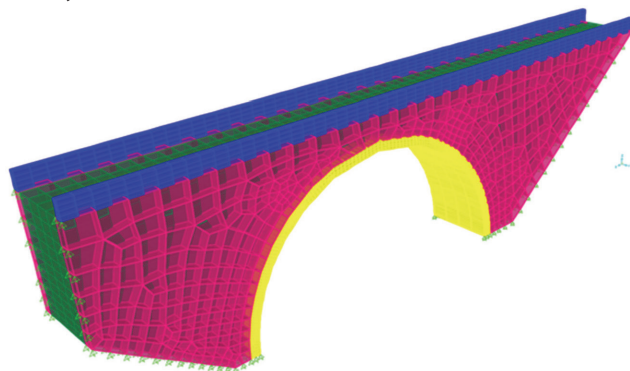
Slika 4. Potresi dalekog rasjeda: a) Borrego Mount, 1968.; b) Friuli, Italija,1976.; c) Kobe,1995.; d) Morgan Hill, 1984.; e) NW California, 1994.

5. Rezultati proračuna

U ovoj fazi istraživanja otkriveno je kako se ponaša povijesni most Tokatli pri djelovanju jakih potresa. Kao što je prije navedeno, određuje se gibanje tla kod rasjeda s učinkom u smjeru loma (komponenta gibanja tla u smjeru loma). Prije dinamičke analize određuju se modalni oblici u programu SAP2000. Kako bi se izračunali karakteristični modalni oblici i drugi podaci, početni je korak određivanje modela temeljenog na metodi konačnih elemenata mosta Tokatli u programu SAP2000, kao što to prikazuje slika 5. Modalni oblik konstrukcije izravno utječe na opće ponašanje konstrukcije. Radi utvrđivanja vlastitih oblika, primijenjena je modalna analiza deformacije prvih deset modalnih oblika povijesnog mosta Tokatli u programu SAP2000 (tablica 4. i slika 6.). Analiza stalnog opterećenja provodi se za vlastitu težinu nakon što se izradi model. Slika 7. prikazuje maksimalnu deformaciju, elastična naprezanja i vrijednosti naprezanja koji su dobiveni proračunom. Osim toga, model ANSYS korišten je kako bi se dobili rezultati za stalno opterećenje mosta Tokatli, što je uspoređeno s rezultatima dobivenih u programu SAP2000 (slika 8.). Kako se vidi na slikama 7. i 8., tlačno naprezanje iznosi 20 MPa, a vlačno naprezanje 1 MPa. Budući da vrijednosti naprezanja i pomaka ne uzrokuju urušavanje povijesnog mosta Tokatli pod utjecajem Zemljine gravitacije, čini se da one ne pridonose urušavanju mosta. Analize su pokazale da vlastita težina mosta ne ugrožava njegov konstrukcijski integritet. Opterećenje koje se pojavljuje na sredini raspona luka raspodijeljeno je kroz krajeve luka, što je prouzročilo maksimalna naprezanja koja se pojavljuju na tim mjestima. Slike 9. i 10. prikazuju grafove naprezanja i pomaka koji su se pojavili tijekom ispitivanja dinamičkog ponašanja pri djelovanju potresa s dalekim rasjedom. Najveća naprezanja pojavila su se u središnjem dijelu, no dinamičko gibanje u bilo kojem smjeru različitom od smjera paralelnog s osi mostom ima za posljedicu rušenje mosta.

Uz pretpostavku da na povijesni most Tokatli ne utječe dodatno vlačno naprezanje od 0,68 MPa, može se zaključiti da taj most neće otkazati pod djelovanjem veće uobičajene gravitacije. Pela i dr. [49] preporučili su omjer vlačne čvrstoće/tlačne čvrstoće u iznosu 1/20 do 1/10 za zidane konstrukcije, te se stoga može tvrditi da je taj omjer prihvatljiv. Moguće oštećenje projicirano je na 1/20 vlačne čvrstoće, a pretpostavlja se omjer između vlačne i tlačne čvrstoće iznosi 5 %. Smatra se da oštećenje čvrstoće konstrukcije smanjuje vlačna naprezanja i za više od 1/20 od 5 %. Vlačna naprezanja koja su uzrokovana slučajevima s dalekim rasjedima vrlo naglo rastu, kao što to prikazuju slike 9. i 10. Uzimajući u obzir magnitudu potresa uključenih u analize, može se procijeniti da je vlačno naprezanje povijesnog mosta Tokatli poraslo na 0,68 MPa pri statičkim opterećenjima, a potom naraslo na 0,74 MPa pod djelovanjem potresa s dalekim rasjedom. Uočeno je da je nekoliko čvorova unutar modela konačnih elemenata u području tlačnih naprezanja koje nije

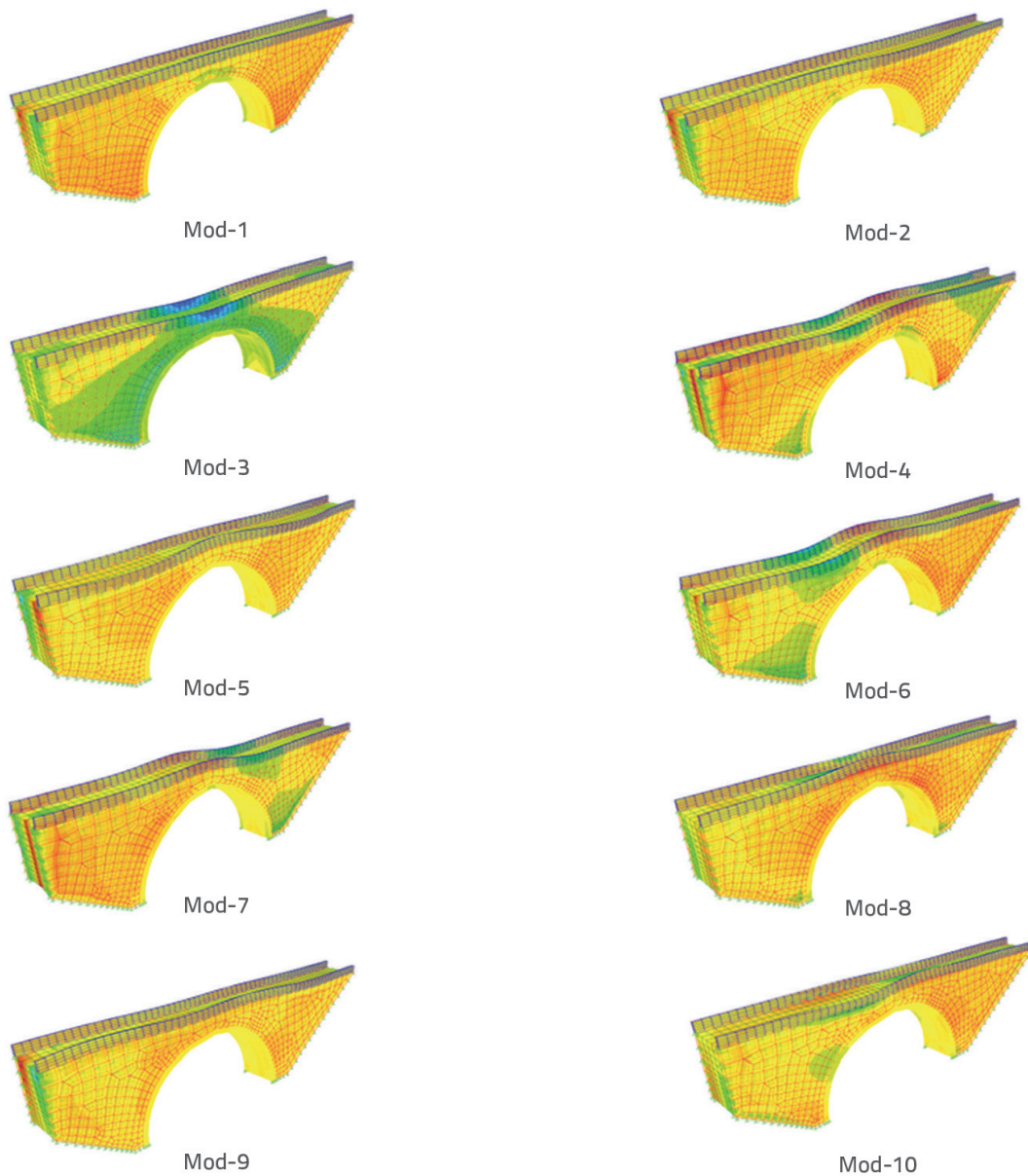
veće od 1 MPa. Rezultati pokazuju da vlačno naprezanje ne uzrokuje oštećenja tijekom potresa s bliskim rasjedom. Kako potresi kod rasjeda ne pobuđuju ni približnu tlačnu silu kao što konstrukcija ima vlačnu čvrstoću, predviđaju se manja oštećenja kao posljedica tlačnih opterećenja. Slike 9. i 10. pokazuju vlačno naprezanje na površini povijesnog mosta Tokatli tijekom jačeg potresa u uvjetima rasjeda koje iznosi između 1 i 1,5 MPa, a naprezanja možda ne uzrokuju oštećenja. Gornja strana velikog pojasa, donja ploha pojasa i stranica pojasa važne su za oštećenja na voznoj površini (kao što to prikazuju slike 9. i 10.). Međutim, kao što je već navedeno, bilo koji dinamički pomak koji je okomit na os mosta mogao bi potencijalno voditi do pucanja u području u kojem se pojavljuju najveća naprezanja, te su stoga okidač za otkazivanje mosta. Dobrobit je ove inovacije što poboljšava mehanizam pukotine, makar i samo malo. Rezultati iz znanstvene literature o njihovoj vlastitoj težini i naprezanju uzrokovanom potresima slažu se s ovim zaključcima. Može se očekivati da će ove lokacije pokazati pukotine s porastom deformacije, nakon čega slijedi otkazivanje. Podaci prikazani u tablici 4. rezultat su dinamičkih analiza. Ti rezultati ujedno pokreću istraživanje vezano uz procjenu uporabljivosti mosta, što slijedi:



Slika 5. Modeliranje povijesnog mosta Tokatli u programu SAP2000

Tablica 4. Razdoblja prvih deset modova povijesnog mosta Tokatli

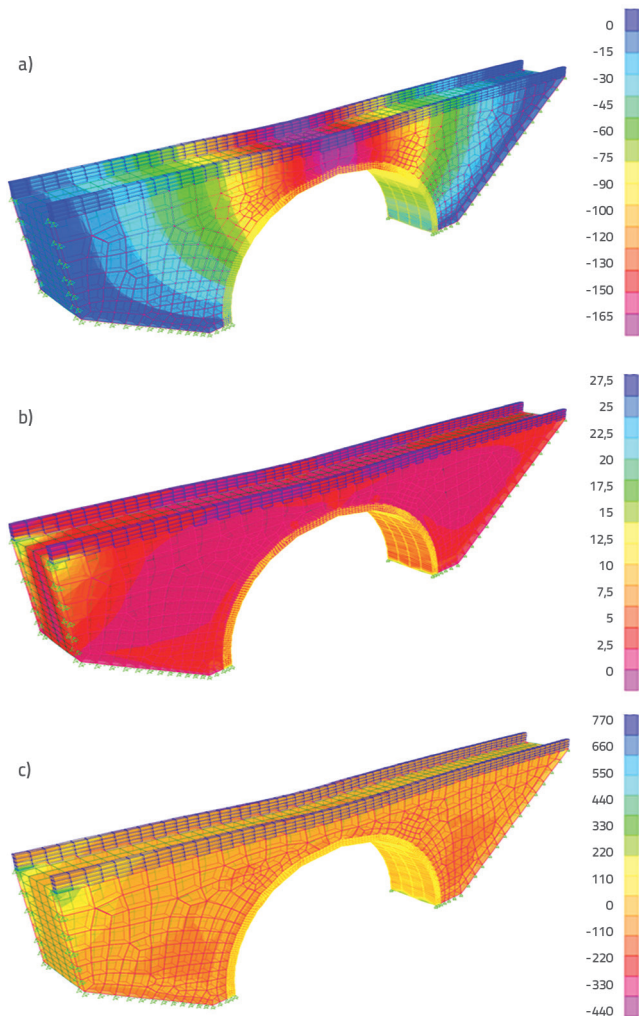
| Modalni oblik | Period [s] |
|---------------|------------|
| 1 | 0,04524 |
| 2 | 0,02531 |
| 3 | 0,02342 |
| 4 | 0,01960 |
| 5 | 0,01656 |
| 6 | 0,01360 |
| 7 | 0,01318 |
| 8 | 0,01296 |
| 9 | 0,01200 |
| 10 | 0,01025 |



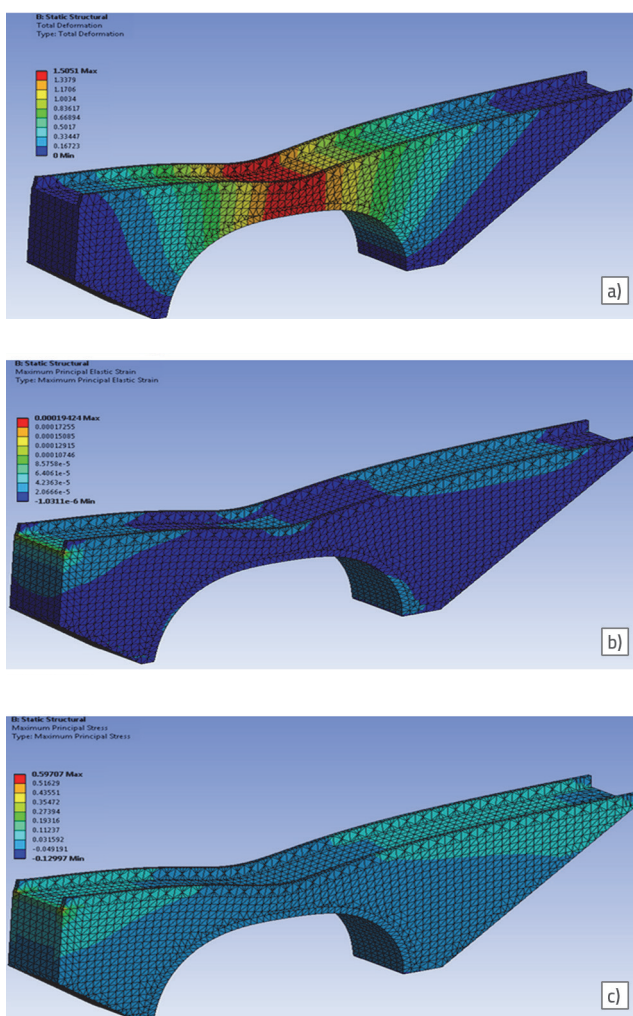
Slika 6. Prvih deset modalnih oblika mosta Tokatli

Tablica 5. Rezultati dinamičkih analiza u programu ANSYS

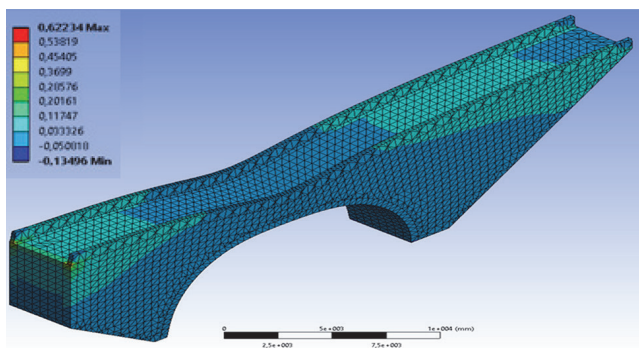
| Broj | Rasjed | Potresi | Povijesni most Tokatli | | |
|------|---------------|---------------------------------|------------------------|---|---------------------------------|
| | | | Deformacija [mm] | Najveće glavno elastično naprezanje [mm/mm] | Najveće glavno naprezanje [MPa] |
| 1 | Daleki rasjed | Borrego Mount, 1968. | 1,52 | 0,00020 | 0,62 |
| 2 | | Friuli, Italija, 1976. | 1,60 | 0,00020 | 0,61 |
| 3 | | Kobe, 1995. | 1,56 | 0,00022 | 0,67 |
| 4 | | Morgan Hill, 1984. | 1,53 | 0,00021 | 0,64 |
| 5 | | Sjeverozapad Kalifornije, 1941. | 1,65 | 0,00024 | 0,74 |



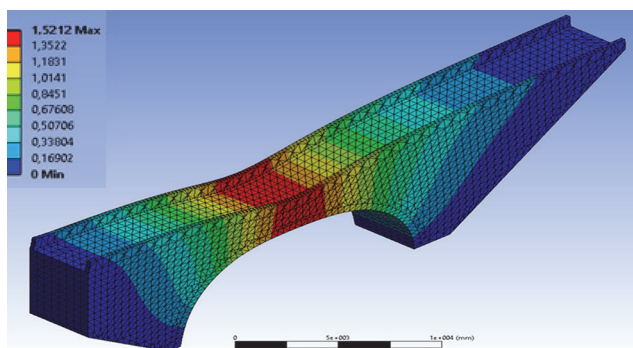
Slika 7. Povijesni most Tokatli, statička analiza u programu SAP2000: a) ukupna deformacija; b) maksimalno glavno elastično naprezanje; c) maksimalno glavno naprezanje



Slika 8. Povijesni most Tokatli, statička analiza u programu ANSYS: a) ukupna deformacija; b) maksimalno glavno elastično naprezanje; c) maksimalno glavno naprezanje



Slika 9. Rezultati pomaka povijesnog lučnog mosta pod djelovanjem potresa s dalekim rasjedom u programu ANSYS; Borrego Mount, 1968.



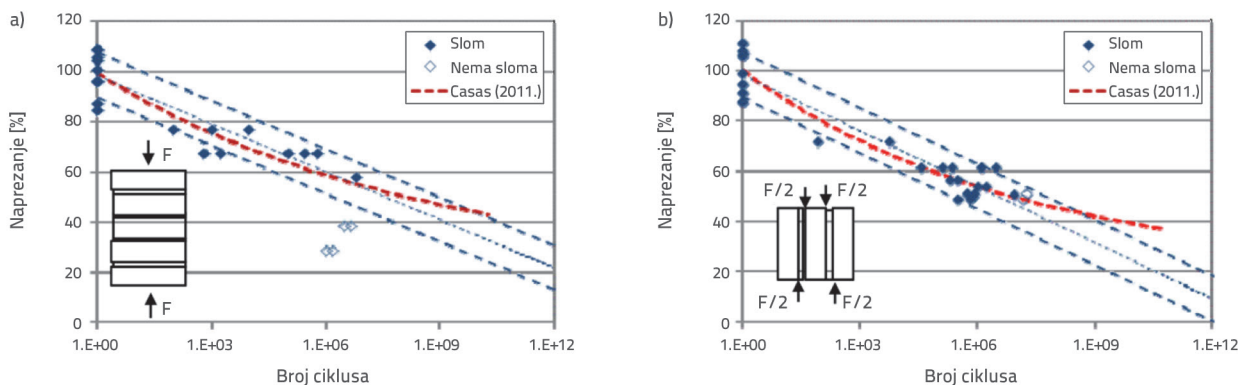
Slika 10. Rezultati za povijesni lučni most, maksimalno glavno naprezanje pod djelovanjem potresa s dalekim rasjedom; Borrego Mount, 1968.

6. Procjena uporabljivosti povijesnog mosta Tokatlı

Dotrajavanje može biti posljedica opterećenja i utjecaja iz okoliša. U ovoj fazi istraživanja ispituju se modeli dotrajavanja za povijesne zidane mostove čiji je uzrok statičko opterećenje. Unatoč tome što u literaturi postoje mnoge tehnike koje su namijenjene za povijesne mostove (o čemu više u Harvey [50], Gilbert i Melbourne [51], Fanning i Boothby [46] i dr.), sve one temelje se na podacima dobivenim statičkim ispitivanjem, a utjecaji dugotrajnog dotrajavanja izazvanog prometnim opterećenjem i utjecajima iz okoliša ne uzimaju se u obzir [52]. Kako bi se uzeli u obzir ti utjecaji, predlaže se tehnika održive zidane otpornosti luka (eng. *Sustainable Masonry Arch Resistance Technique - SMART*) [52]. Primjenjujući tu tehniku omogućava se dugoročno trajanje te se u procjeni određuje sigurna granica dugotrajnog opterećenja. Ta tehnika spaja sve postojeće metode u jedinstvenu metodologiju uzimajući u obzir ne samo granično opterećenje, već i dugotrajno ponašanje i preostalu uporabljivost zidanih lučnih mostova [52]. Što se tiče matematičkog odnosa, Roberts i dr. [54] predlažu SN tip modela dotrajavanja za zidanje koji se temelji na nizu laboratorijskih ispitivanja na uzorcima umanjenog mjerila. Na temelju rezultata razvio se probabilistički model za zidane lučne mostove, kao što to prikazuje jednadžba (1) koju predlaže Casas:

$$S = A \cdot N^{-(1-R)} > 0,5 \tag{1}$$

gdje je S omjer maksimalnog napreznja u odnosu na prosječnu čvrstoću ($S = S_{Max}/S_{Av}$), N je broj ciklusa, a R je omjer minimalnog napreznja u odnosu na maksimalno napreznje ($R = S_{Min}/S_{Max}$). Vrijednost B postavlja se na 0,04 za važeće ispitne podatke [52]. Pretpostavlja se granica izdržljivosti od 50 %. Kako bi se odredila praktična primjena SN krivulja, a na temelju modela koji predlaže Casas, tablica 6. prikazuje razine napreznja i odgovarajuću uporabnu vjerojatnost. Štoviše, Tomor [52] je dobio rezultate statičkih ispitivanja, što je prikazano na slici 11. Kada se slika 11. proučava vezano uz tlak, očekivana uporabljivost za 50 % prosječnog napreznja iznosi otprilike $2 \cdot 10^8$ ciklusa. Ako se razina napreznja smanji 5 % (sa 50 % na 45 %), očekivana uporabljivost povećava se 35 puta (sa $2 \cdot 10^8$ na $8 \cdot 10^8$). S druge pak strane, ako se napreznje poveća 5 % (sa 50 % na 55 %), očekivani životni vijek smanjuje se približno 1/20 (sa $2 \cdot 10^8$ na $1 \cdot 10^7$) [52]. Kao što je prethodno navedeno, u primjeni procjene uporabljivosti na povijesnom mostu Tokatlı pod utjecajem statičnog opterećenja, uočava se da su se dobile razine napreznja u iznosu 0,5971. Iako je vidljivo da vlačna napreznja ne dostižu dopuštenu vlačnu čvrstoću zida, a vrijednosti napreznja čine se vrlo male, opaža se da ne dolazi do zamora mosta izloženog statičkom opterećenju. Iz toga proizlazi da ne može doći do oštećenja pod statičkim opterećenjem. Preporuka je da se uzme u obzir procjena uporabljivosti povijesnog zidanog lučnog mosta zajedno sa statičkim opterećenjem za slučaj potresa s dalekim i bliskim rasjedima.



Slika 11. Rezultati ispitivanja zamora prema Tomoru [52]: a) tlak; b) posmik

Tablica 6. Primjeri približnog očekivanog tijeka uporabe temeljenim na modelu koji predlaže Tomor [52]

| Napreznje [%] | Zbijanje | | Posmik | | |
|---------------|-------------------------|-------|---------------|-------------------------|-------|
| | Očekivani tijek uporabe | | Napreznje [%] | Očekivani tijek uporabe | |
| | Ciklusi | Omjer | | Ciklusi | Omjer |
| 45 | $8 \cdot 10^9$ | 35 | 45 | $1 \cdot 10^8$ | 18 |
| 50 | $2 \cdot 10^8$ | 1 | 50 | $7 \cdot 10^6$ | 1 |
| 55 | $1 \cdot 10^7$ | 1/20 | 55 | $6 \cdot 10^5$ | 1/12 |

7. Zaključak

U radu se opisuje detaljna analiza statičkog i dinamičkog ponašanja povijesnog mosta Tokatlı tijekom različitih potresa s dalekim rasjedom. Izrađen je model temeljen na metodi konačnih elemenata povijesnog mosta Tokatlı u programu ANSYS i SAP2000 koji se tada ispitao pod djelovanjem različitih udaljenih rasjeda. Na temelju nalaza u ispitivanju slijedi:

- Tlačna napreznja bila su znatno ispod tlačne čvrstoće зида te se smatra da nisu opasnost u smislu oštećenja u slučaju potresa s dalekim rasjedom. Štoviše, nije ispunjen uvjet dopuštene vlačne čvrstoće зида. Međutim, utvrđeno je da su potencijalna oštećenja uzrokovana pomacima kritična za

povijesni zidani most. Iz toga proizlazi da je dobro obratiti pozornost na ta oštećenja tijekom analize.

- Kada se vrijednosti napreznja/deformacije ne približavaju dopuštenoj vlačnoj čvrstoći зида, uočava se da porast vrijednosti napreznja/deformacije u slučaju povijesnih zidanih mostova mogu smanjiti očekivano trajanje зида. S tog gledišta, preporuka je da se procjene tijekom uporabe povijesnih zidanih lučnih mostova uzimaju u obzir u budućim istraživanjima, pogotovo za potrese s dalekim rasjedima zbog dinamičkih utjecaja.
- Stručnjaci smatraju da je potrebno više laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja utemeljenih na modelu konačnih elemenata kako bi se razvila tehnika numeričkog predviđanja.

LITERATURA

- [1] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Muvafik, M.: Damages of Minarets During Erciş and Edremit Earthquakes 2011 in Turkey, *Smart Struct. Syst.*, 14 (2014) 3, pp. 479-499
- [2] Altunışık, A.C., Kanbur, B. Genç, A.F., Kalkan, E.: Structural Response of Historical Masonry Arch Bridges Under Different Arch Curvature Considering Soil-Structure Interaction, *Geomechanics and Engineering*, 18 (2019) 2, pp. 141-151
- [3] Güllü, H., Karabekmezi, M.: Gaziantep Kurtuluş Camisinin Deprem Davranışının İncelenmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 7 (2016) 3, pp. 455-470
- [4] Arnold C., Reitherman, R.: *Building Configuration and Seismic Design*, Wiley, New York, 1982.
- [5] Kramer, S.L.: *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- [6] Raychowdhury, R.: Effect Of Soil Parameter Uncertainty On Seismic Demand Of Low-Rise Steel Buildings On Dense Silty Sand, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 29 (2009), pp.1367-78
- [7] Luco, J.E., Lanzi, A.: Approximate Soil-Structure Interaction Analysis By A Perturbation Approach: The Case of Stiff Soils, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 51 (2013), pp. 97-110
- [8] Emre, Ö., Duman, T.Y., Olgun, S., Elmacı, H., Özalp, S.: *Active Fault Map of Turkey: Ankara*, General Directorate of Mineral Research and Exploration, 2012.
- [9] Mazza, F., Labernarda, R.: Structural And Non-Structural Intensity Measures For The Assessment Of Base-Isolated Structures Subjected To Pulse-Like Near-Fault Earthquakes, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 96 (2017), pp. 115-27
- [10] Page, J.: *Masonry Arch Bridges—A State of the Art Review*, HMSO, London, 1993.
- [11] Armstrong, D.M., Sibbald, A., Fairfield, C.A., Forde, M.C.: Modal Analysis for Masonry Arch Bridge Spandrel Wall Separation Identification, *NDT & E International*, 28 (1995) 6, pp. 377-386
- [12] Bensalem, A., Fairfield, C.A., Sibbald, A.: Non-Destructive Evaluation of The Dynamic Response Of A Brickwork Arch, *ICE Journal of Structures and Buildings*, 122 (1997) 1, pp. 69-82
- [13] Bensalem, A., Fairfield, C.A., Sibbald A.: Damping Effects on the NDT of Soil Backfilled Arch Bridges, *Journal of British Institute NDT*, 40 (1998) 2, pp. 107-116
- [14] Drosopoulos, G.A., Stavroulakis, G.E., Massalas, C.V.: Influence of The Geometry And The Abutments Movement on The Collapse of Stone Arch Bridges, *Construct. Build. Mater.*, 22 (2008) 3, pp. 200-210
- [15] Boothby, T.E.: Service Load Response of Masonry Arch Bridges, *Journal of Structural Engineering*, 124 (1998) 1, pp. 17-23
- [16] Hatzigeorgiou, G.D., Beskos, D.E., Teodorakopoulos, D.D., Sfakianaki, M.: Static and Dynamic Analysis of The Arta Bridge By finite Elements, *Arch. Civ. Eng.*, 2 (1999) 1, pp. 41-51
- [17] Arteaga, I., Morer, P.: The Effect of Geometry on The Structural Capacity of Masonry Arch Bridges, *Construct. Build. Mater.*, 34 (2012), pp. 97-106
- [18] Sarhosis, V., Oliveira, D.V., Lemos, J.V., Lourenço, P.B.: The Effect of Skew Angle on The Mechanical Behaviour of Masonry Arches, *Mech. Res. Commun.*, 61 (2014), pp. 53-59
- [19] Fanning, P.J., Boothby, T.E.: Three-Dimensional Modelling and Full-Scale Testing of Stone Arch Bridges, *Computers and Structures*, 79 (2001) 29, pp. 2645-2662
- [20] Frunzio, G., Monaco, M., Gesualdo, A.: 3D FEM Analysis of a Roman Arch Bridge, *Historical Constructions*, (2001), pp. 591-598
- [21] Conde, B., Díaz-Vilariño, L., Lagüela, S., Arias, P.: Tructural Analysis of Monforte De Lemos Masonry Arch Bridge Considering The Influence of The Geometry of The Arches And Fill Material on The Collapse Load Estimation, *Construct. Build. Mater.*, 120 (2016) 1, pp. 630-642
- [22] Toker, S., Unay, A.I.: Mathematical Modelling and finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges, *Journal of Science of Gazi University*, 17 (2004) 2, pp. 129-139
- [23] Ural, A.: Finite Element Analysis of Historical Arch Bridge, *Proceedings of the International Earthquake Symposium Kocaeli, Turkey*, 2005, pp. 408-413
- [24] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Turker, T., Sevim, B.: The Model Updating of Historical Masonry Bridges Using Operational Modal Analysis Method, *Proceedings of the 1st National Conference Reinforcement and Transfer into the Future of Historical Structures*, Ankara, Turkey, 2007, pp. 429-440
- [25] Mertol, H.C., Tunc, G., Akis, T.: Evaluation of masonry buildings and mosques after Sivrice earthquake, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 9, pp. 881-892, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3101.2021>

- [26] Brencich, A., Sabia, D.: Experimental Identification of A Multi-Span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 10, pp. 2087–2099
- [27] Diamanti, N., Giannopoulos, A., Forde, M.C.: Numerical Modelling and Experimental Verification of GPR to Investigate Ring Separation In Brick Masonry Arch Bridges, *NDT and E. International*, 41 (2008) 5, pp. 354–363
- [28] Aydia, A., Özkaya, S.G.: The Finite Element Analysis of Collapse Loads of Single-Spanned Historic Masonry Arch Bridges (Ordu, Sarpdere Bridge), *Engineering Failure Analysis*, 84 (2018), pp. 131–138
- [29] Breccolotta, M., Severinib, L., Cavalagli, N., Bonfiglic, F.M., Gusellad, V.: Rapid Evaluation of In-Plane Seismic Capacity Of Masonry Arch Bridges Through Limit Analysis, *Earthquakes and Structures*, 15 (2018) 5, pp. 541-553
- [30] Rovithis, E., Pitilakis, K.: Seismic Assessment and Retrofitting Measures of A Historic Stone Masonry Bridge, *Earthquakes and Structures*, 10 (2016) 3, pp. 645-667
- [31] Sayin, E.: Nonlinear Seismic Response of a Masonry Arch Bridge, *Earthq. Struct.*, 10 (2016) 2, pp. 483-494
- [32] Sevim, B., Bayraktar, A., Altunisik, A.C., Atamturktur, S., Birinci, F.: Assessment Of Nonlinear Seismic Performance of a Restored Historical Arch Bridge Using Ambient Vibrations, *Nonlin. Dyn.*, 63 (2011) 4, pp. 755-770
- [33] Dogangun, A., Sezen, H.: Seismic Vulnerability and Preservation Of Historical Masonry Monumental Structures, *Earthq. Struct.*, 3 (2016) 1, pp. 83-95
- [34] Muvafik, M.: Field Investigation and Seismic Analysis of a Historical Brick Masonry Minaret Damaged During The Van Earthquakes in 2011, *Earthq. Struct.*, 6 (2014) 5, pp: 457-452
- [35] Cakir, F., Seker, B.S.: Structural Performance of Renovated Masonry Low Bridge In Amasya, Turkey," *Earthq. Struct.*, 8 (2015) 6, pp. 1387-1406
- [36] Preciado, A., Bartoli, G., Budelmann, H.: Fundamental Aspects on The Seismic Vulnerability of Ancient Masonry Towers And Retrofitting Techniques, *Earthq. Struct.*, 99 (2015) 2, pp. 339-352
- [37] Basaran, H. Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H., Hökelekli, E., Kozanoğlu, C.: Investigation of Seismic Safety of A Masonry Minaret Using Its Dynamic Characteristics, *Earthq. Struct.*, 10 (2016) 3, pp. 523-538
- [38] Cakir, F., Ergen, Y.B., Uysal, H., Dogangun, A.: Influence of Modified Intended Use on The Seismic Behavior of Historical Himis Structures, *Earthq. Struct.*, 10 (2016) 4, pp. 893-911
- [39] Karalar, M., Yeşil, M.: Effect of near-fault earthquakes on a historical masonry arch bridge (Konjic Bridge), *Earthquakes and Structures*, 21 (2021) 2, pp. 125-136, <https://doi.org/10.12989/eas.2021.21.2.125>
- [40] Karalar, M., Yeşil, M.: Investigation on Seismic Behavior of Historical Tokatlı Bridge under Near-Fault Earthquakes, *Advances in Civil Engineering*, (2021), pp. 18, <https://doi.org/10.1155/2021/5596760>
- [41] Emek, S.: Karabük Safranbolu Tarihi Aşağı Tokatlı Köprüsü Röleve Restitüsyon Restorasyon Raporu, Karayolları Genel Müdürlüğü 15. Bölge Müdürlüğü, Karabük, 2012, pp. 8-60
- [42] ANSYS Inc.: ANSYS, Canonsburg, Pennsylvania, 1998.
- [43] SAP2000: Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, USA, 2008.
- [44] Kamil, J.A., Khan, I.A., Nath, Y.: Numerical and Experimental Dynamic Contact of Rotating Spur Gear, *Modern Applied Science*, 5 (2011), pp. 254-263
- [45] Kadhim, M.M.A.: Factors Effect on The Effective Length In A Double Strap Joint Between Steel Plates and CFRP, *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 1 (2012), pp. 11-18
- [46] Fanning, P., Boothby, T.: Three-dimensional modeling and full-scale testing of stone arch bridges, *Computers and Structures*, 79 (2001) 29–30, pp. 2645–2662
- [47] Çoruhlu, B., Türker, T., Yanık Y., Bayraktar, A.: Tarihi Taş Kemer Köprülerin Modal Davranışlarının Köprü Boyutlarına Bağlı Olarak Tahmin Edilmesi, *Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması Ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, İstanbul*, 2017, pp. 381-389
- [48] Makris, N., Black, J.C.: Evaluation of Peak Ground Velocity As a "Good" Intensity Measure For Near-Source Ground Motions, *Journal of Engineering Mechanics*, 130 (2004) 9, pp. 1032-1044
- [49] Pelà, L., Aprile, A., Benedetti, A.: Seismic Assessment of Masonry Arch Bridges, *Eng. Struct.*, 31 (2009) 8, pp. 1777-1788
- [50] Harvey, W.: Application of the mechanism analysis to masonry arches, *The Structural Engineer*, 66 (1988) 5, pp. 77–84
- [51] Gilbert, M., Melbourne, C.: Rigid-block analysis of masonry structures, *Structural Engineering*, 72 (1994), pp. 356–361
- [52] Tomor, A.: Life-cycle assessment and deterioration models for masonry arch bridges, *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 179 (2013), pp. 535-546
- [53] Melbourne, C., Wang, J., Timor, A.: A New Masonry Arch Bridge Assessment Method (SMART), *Proceedings of the Institution of Civil Engineering – Bridge Engineering*, 160 (2007) 2, pp. 81–87
- [54] Roberts, T., Hughes, T., Dandamudi, V., Bell, B.: Quasi-static and high cycle fatigue strength of brick masonry, *Construction and Building Materials*, 20 (2006) 9, pp. 603–614
- [55] Casas, J.R.: Reliability-based assessment of masonry arch bridges, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2011) 4, pp.1621–1631