

## Numerička analiza zidane stambene zgrade primjenom AmQuake software-a

**Mladen Kustura**

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, doc. dr. sc.

mladen.kustura@gf.sum.ba

**Ivan Matijević**, mag. ing. aedif.

**Sažetak:** Mnoge zidane konstrukcije nalaze se u potresno-aktivnim područjima u kojima je djelovanje potresnih sila razotkrilo njihovu povredljivost na iste. Iz razloga što su ovakvi objekti izgrađeni od kompozitnih materijala potrebno je obratiti pozornost na sve elemente konstrukcije koji ju čine. Cilj ovoga rada jeste prikazati postupak i rezultate proračuna zidane stambene zgrade kako bi se odredila njena potresna otpornost. Za analizu je korišten AmQuake software koji omogućuje dizajniranje i proračun zidanih objekata prema Europskim standardima i normama. Kroz proračun se korištenjem metode naguravanja prati odgovor sustava za rastuću horizontalnu sliku uz konstantno vertikalno opterećenje. Na osnovu rezultata proračuna dat je zaključak o provedenoj analizi.

**Ključne riječi:** zidane konstrukcije, potres, metoda naguravanja, numerički proračun

## Numerical analysis of a masonry residential building using AmQuake software

**Abstract:** Many masonry structures are located in seismically active areas where the action of seismic forces has revealed their vulnerability. Since such structures are built of composite materials, attention should be paid to all the structural elements that make it up. The objective of this paper is to present the procedure and analysis results for a masonry building in order to determine its seismic resistance. The AmQuake software, which facilitates the design and calculation of masonry buildings according to European standards and norms, was used for the analysis. By using the pushover method, the system response to an increasing horizontal force with a constant vertical load is monitored through the calculation. Based on the calculation results, a conclusion on the conducted analysis is given.

**Key words:** masonry structures, earthquake, pushover method, numerical analysis

## 1. UVOD

Zidanje, odnosno slaganje kamenih ili glinenih blokova jedan na drugi uz njihovo eventualno međusobno povezivanje mortom najstarija je građevinska tehnika koja se sačuvala sve do današnjih dana. Svoju dugu tradiciju, ali i raširenost po cijelom svijetu, zidanje pripisuje svojoj jednostavnosti, ali i dugovječnosti zidanih konstrukcija koja se očituje u mnogim takvim građevinama starim više stotina, pa i nekoliko tisuća godina. Samo neki od primjera takvih građevina, koje su ujedno postale simboli pojedinih kultura, jesu piramide u Egiptu koje potječu iz razdoblja između 2800.-2000. prije Krista, Partenon u Grčkoj iz petog stoljeća prije Krista, Kineski zid čija je gradnja započela u petom stoljeću prije Krista te Koloseum u Rimu iz prvog stoljeća.

Unatoč jednostavnosti koja se očituje pri gradnji zidanih konstrukcija, razumijevanje i opisivanje mehaničkog ponašanja takvih konstrukcija osobito u uvjetima seizmičkog opterećenja i danas predstavlja pravi izazov zahvaljujući samoj prirodi zidane konstrukcije koja zbog prisutnosti sljubnica između blokova, koje mogu, a i ne moraju biti popunjene mortom, pokazuje kompleksno i izrazito nelinearno ponašanje. Mnoge zidane konstrukcije nalaze se u seizmički aktivnim područjima u kojima je potres otkrio svu njihovu ranjivost. U tim potresima često stradavaju zidane građevine i spomenici koji se svrstavaju u kategoriju kulturne baštine kao i suvremene zidane konstrukcije.

Moderne zidane konstrukcije široko su popularne zbog svoje prihvatljive cijene, toplinske izolacije, zaštite od požara, trajnosti, jednostavnosti pri konstruiranju, te niskih troškova održavanja. Ovaj tip konstrukcija se ponaša dobro pri vertikalnom opterećenju zbog svoje dobre tlačne čvrstoće, međutim umanjena im je otpornost na horizontalna djelovanja.

## 2. MOGUĆNOSTI AMQUAKE SOFTWARE-a

AmQuake software je namijenjen za projektiranje zidanih konstrukcija prema Eurocode-u 6 i 8. Nastao je kao rezultat uske suradnje između tvrtke Červenka Consulting i tvrtke Wienerberger, najvećeg europskog proizvođača opeke i sustava za gradnju. AmQuake pri proračunu zidanih konstrukcija koristi pushover analizu i metodu ekvivalentnog okvira za provjeru seizmičke sigurnosti zidane konstrukcije.

Program posjeduje bazu podataka proizvoda i nacionalnih standarda 11 europskih zemalja. Pri stvaranju novog projekta može se odabrati željeni nacionalni standard te se mogu posebno odabrati parametri odabranog standarda. U postavkama osnovnog seizmičkog opterećenja može se odabrati seizmička zona, kategorija tla, referentno ubrzanje tla, dok kod naprednih postavki se mogu mijenjati granice spektra te ostali potresni parametri. U program je inkorporirana opsežna baza Wienerberger opekarskih proizvoda sa svim tehničkim karakteristikama proizvoda. Moguće je definirati vrstu ziđa, armirano, nearmirano, omeđeno i armirano-betonsko ziđe. Kod unosa ziđa i ostalih elemenata konstrukcije (serklaža, nadvoja, stropova) potrebno je definirati vrstu materijala pojedinog elementa.

Model konstrukcije se unosi u DXF formatu iz CAD programa. U CAD programu se postavi topologija modela gdje su glavni geometrijski elementi zidovi, prozori i strop. Svaki strop sadrži definirano opterećenje, zajedno s odgovarajućim faktorom sigurnosti koji se automatski popunjavaju na temelju nacionalnog dodatka norme, ali može se mijenjati po potrebi. Nakon što se unese model i odgovarajuća opterećenja, automatski se generira mreža konačnih elemenata, a u naprednim opcijama moguće je i ručno postaviti odgovarajuće parametre. Nakon proračuna modela, zidana se konstrukcija provjerava prema

Kustura, M., Matijević, I.

## Numerička analiza zidane stambene zgrade primjenom AmQuake software-a

Eurocode 6, a armirano-betonska konstrukcija prema Eurocode 2. Seizmička procjena modela se radi prema Eurocode 8, a sve rezultate je moguće prikazati u RTF formatu.

### 3. METODA NAGURAVANJA (PUSHOVER METODA)

#### 3.1 Općenito

Metoda naguravanja (pushover metoda) nelinearna je statička metoda proračuna postojećih ili novih konstrukcija. Glavni princip metode je da se prati odgovor sustava za rastuću horizontalnu silu uz konstantno vertikalno opterećenje. Iz dobivenog odnosa horizontalne sile i referentnog pomaka može se odrediti potresna otpornost sustava.

Potresno opterećenje se postupno nanosi na sustav koji je prethodno u potpunosti opterećen na vertikalna djelovanja. Na taj se način simuliraju inercijalne sile koje se javljaju u sustavu prilikom potresnog opterećenja. Povećavanjem opterećenja dolazi do otkazivanja pojedinih elemenata konstrukcije, što uzrokuje smanjenje krutosti sustava. Metoda je nastala na temelju postupaka za projektiranje i saniranje oštećenih građevina, koji sadrže inženjerske koncepte osnovane na ponašanju konstrukcije.

Uvidjelo se da prilikom projektiranja treba posvetiti veću pažnju kontroli oštećenja. To se jedino može postići uvođenjem nelinearnog proračuna u metodologiju potresnih proračuna. Jedan od najprikladnijih pristupa je kombiniranje nelinearne statičke metode naguravanja s metodologijom spektralnog odgovora. Ocjena otpornosti na potres se daje na temelju praćenja jednog karakterističnog čvora – kontrolnog čvora. Kontrolni čvor je najčešće centar masa najvišeg kata. Na osnovu putanje kontrolnog čvora konstruira se krivulja nosivosti iz koje se može ocijeniti potresna otpornost sustava.

#### 3.2 Pretpostavke kod metode naguravanja

Pri korištenju metode naguravanja, koristimo određene pretpostavke prema EN 1998-1:2004:

- ✓ Nulta krutost se može pretpostaviti nakon granice popuštanja;
- ✓ Uzdužne sile uslijed gravitacijskog opterećenja se trebaju uzeti u obzir prilikom proračuna EN 1998-1;
- ✓ Trebaju se koristiti srednje vrijednosti za svojstva materijala;
- ✓ Vrijednost poprečne i savojne krutosti zida i armiranog betona se uzima  $\frac{1}{2}$  od stvarne kako bi se simuliralo raspucavanje presjeka;
- ✓ Treba se koristiti minimalno bilinearni odnos sila-deformacija na razini elementa;
- ✓ Za zgrade nepravilnog oblika potrebno je napraviti prostorni model, te dva različita proračuna za dva različita smjera pri čemu nije potrebno u pojedinom proračunu uzimati u obzir horizontalna djelovanja iz dva različita smjera;
- ✓ Poprečne sile se trebaju zadati u središtu masa, odnosno u središtu katova s ekscentricitetom zadanim prema EN 1998-1

$$e_{ai} = \pm 0.05L_i$$

$L_i$  – dimenzija kata okomita na djelovanje potresa

- ✓ Horizontalne sile za slučaj modalne raspodjele se određuju prema izrazu:

$$F_i = F_b \frac{z_i m_i}{\sum z_j m_j}$$

$F_b$  – ukupna poprečna sila,

$z_i$  – katna visina,

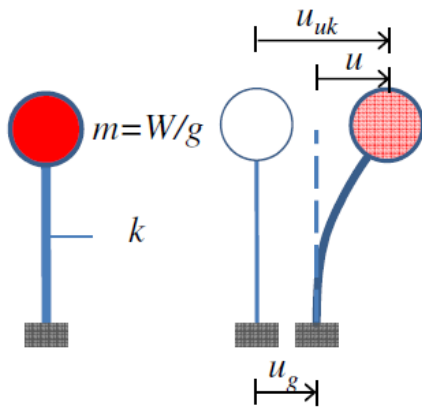
$m_i$  – katna masa prema EN 1998-1:2004.

### 3.3 Postupak provedbe metode naguravanja

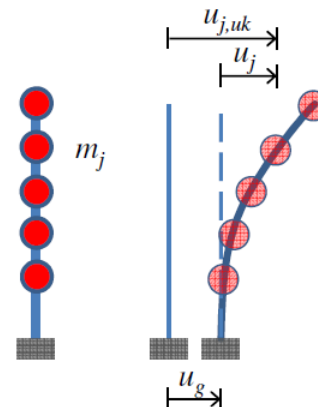
Metoda naguravanja se provodi u sljedećim koracima:

- ✓ Određivanje spektralnog ubrzanja iz elastičnog spektra odgovora jednostupnjevnog sustava;
- ✓ Određivanje pseudosile iz spektralnog ubrzanja, te određivanje odnosa spektralnog ubrzanja i spektralnog pomaka;
- ✓ Određivanje ciljanog pomaka jednostupnjevnog sustava;
- ✓ Transformacija višestupnjevnog sustava u idealizirani jednostupnjevni sustav;
- ✓ Odrađivanje idealiziranog elastoplastičnog dijagrama;
- ✓ Određivanje perioda idealiziranog sustava;
- ✓ Određivanje ciljanog pomaka idealiziranog sustava;
- ✓ Određivanje ciljanog pomaka sustava.

Po potrebi proračuna sustave možemo podijeliti na jednostupnjevne i višestupnjevne sustave.



Slika 1. Jednostupnjevni sustav



Slika 2. Višestupnjevni sustav

$u_g$  – pomaci tla pri seizmičkom djelovanju

$u_j$  – relativni pomaci

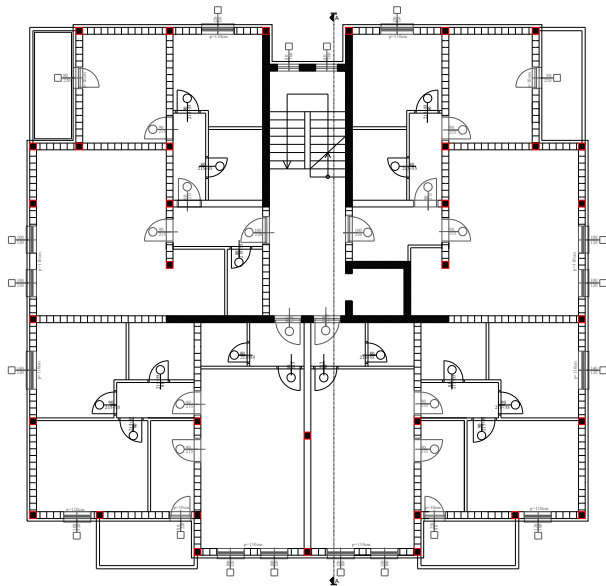
$u_{j,uk}$  – ukupni pomaci

## 4. PRIMJER PRORAČUNA ZIDANE STAMBENE ZGRADE

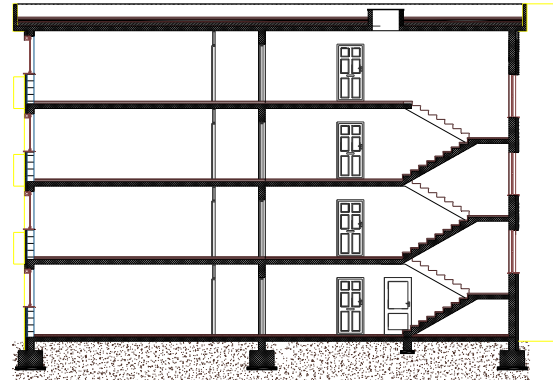
### 4.1 Tehnički opis

Stambena zgrada uzeta za primjer proračuna sastoji od 4 etaže, prizemlje i 3 kata. Visina objekta od kote terena do vrha krovne ploče iznosi 11,48 m. Katna visina etaža iznosi 2,87 m, dok svijetla visina iznosi 2,60 m. Tlocrtna bruto površina prizemlja iznosi 362 m<sup>2</sup>, dok bruto površine katova iznose 390 m<sup>2</sup>. Na svakoj se etaži nalaze po 4 stana približno jednakih površina. Vertikalnu komunikaciju u zgradi čini dizalo i dvokrako stubište koji se protežu do posljednje etaže. Krov je izveden kao ravni neprohodni s parapetima visine 80 cm.

Objekt se temelji na tlu kategorije B i nalazi se u seizmički aktivnom području u kojemu je predviđeno proračunsko ubrzanje tla 0,28 g za povratni period od 475 godina, odnosno 0,14 g za povratni period od 95 godina.



Slika 3. Tlocrt



Slika 4. Presjek

Temeljnu konstrukciju objekta čine temeljne trake širine 0,90 m i debljine 0,60 m, a nalaze se na koti -1,10 m, i temeljna ploča dizala dimenzija 2,65 x 2,80 m i debljine 0,30 m, koja se nalazi na koti -1,70 m. Vertikalni sustav čine zidani zidovi od porotherm opeke, debljine 25 cm, te armirano-betonski zidovi debljine 25 cm klase betona C25/30 koji se pravilno protežu kroz sve etaže. Horizontalni sustav čine monolitne armirano-betonske ploče debljine 17 cm i podna ploča debljine 15 cm. Stubište je predviđeno kao armirano-betonski element čija debljina ploče iznosi 15 cm.

## 4.2 Analiza opterećenja

Osnovna opterećenja koja djeluju na konstrukciju jesu stalna, promjenjiva i izvanredna djelovanja.

### 4.2.1 Stalno djelovanje

U stalno djelovanje na konstrukciju se ubraja vlastita težina same konstrukcije, te dodatno stalno opterećenje. Dodatno stalno opterećenje za:

- međukatnu ploču (POZ 100, 200, 300):

Završna obloga: 0,54 kN/m<sup>2</sup>

Izolacije, instalacije, žbuka: 0,21 kN/m<sup>2</sup>

Cementni estrih: 0,96 kN/m<sup>2</sup>

Ukupno: 1,71 kN/m<sup>2</sup>

- krovnu ploču (POZ 400)

Završna obloga: 0,72 kN/m<sup>2</sup>

Izolacije, instalacije, žbuka: 0,68 kN/m<sup>2</sup>

Cementni estrih: 2,16 kN/m<sup>2</sup>

Ukupno: 3,56 kN/m<sup>2</sup>

Kustura, M., Matijević, I.

## Numerička analiza zidane stambene zgrade primjenom AmQuake software-a

### 4.2.2 Promjenjiva djelovanja

Promjenjiva djelovanja na konstrukciju su uporabno opterećenje, opterećenje vjetrom, te opterećenje snijegom. Prostorije su svrstane u 5 osnovnih kategorija za koje su određene karakteristične vrijednosti opterećenja na međukatne konstrukcije, balkone i stubišta. Vrijednosti za kategoriju objekta A (stambene površine i domaćinstva, prostorije u stambenim zgradama i kućama):

Međukatne konstrukcije: 1,50 kN/m<sup>2</sup>

Balkoni: 3,00 kN/m<sup>2</sup>

Stubišta: 3,00 kN/m<sup>2</sup>

Pregradni zidovi: 0,80 kN/m<sup>2</sup>

Ukupno uporabno opterećenje na međukatne konstrukcije iznosi 2,30 kN/m<sup>2</sup>.

### 4.2.3 Izvanredno djelovanje

Za mjerodavno ubrzanje tla očitana je vrijednost sa seizmoloških karata za povratni period od 475 godina, a opterećenje je u konačnici zadano u dva tlocrtna, međusobno okomita pravca (X i Y).

Računsko ubrzanje tla:  $a_g = 0,28 g$  ( $T=475$ );  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Kategorija tla: B

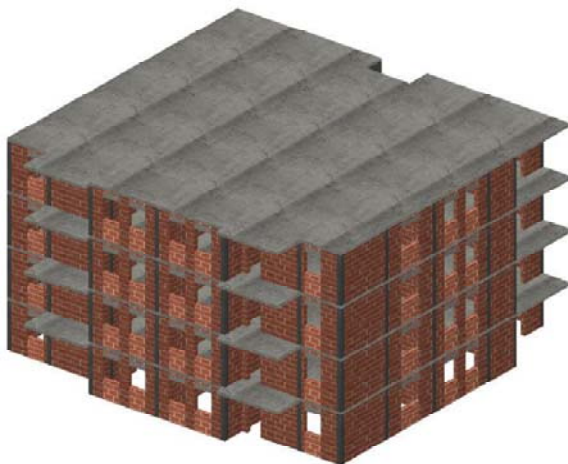
Tip spektra: 1

Faktor značaja: II (obične zgrade, stambene, bez posebnog značaja)

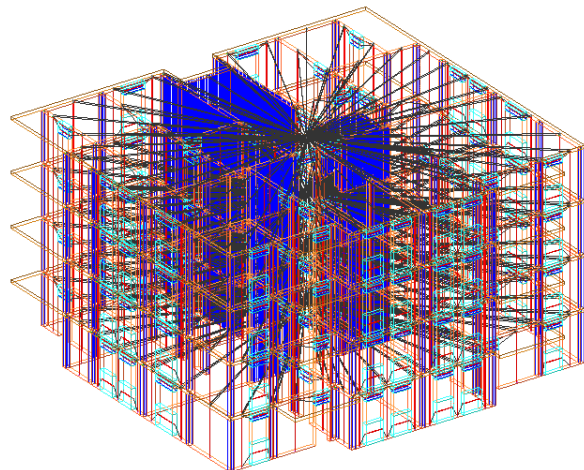
Faktor ponašanja konstrukcije za omeđeno ziđe iznosi  $q = 2,0 - 3,0$ , te je za predmetnu konstrukciju odabran  $q = 2,5$ .

### 4.3 Proračun metodom naguravanja

Proračun metodom naguravanja napravljen je u programu AmQuake koji kombinirajući metodu ekvivalentnog okvira i metodu naguravanja provodi dokaz potresne otpornost. Na rezultate proračuna utječu postavke vezane za mrežu konačnih elemenata, pa je zato potrebno s posebnom pozornosti odabrati pojedine opcije u programu. Osnovna ideja leži u modeliranju svih nosivih elemenata 1D grednim elementima. To se odnosi na vertikalne i horizontalne elemente poput zidova, vertikalnih serklaža, horizontalnih serklaža, nadvoja nad vratima. Sljedeća pretpostavka odnosi se na međukatnu konstrukciju, koja je u svojoj ravnini beskonačno kruta, dok je izvan te ravnine njena krutost zanemariva.



Slika 5. 3D model objekta - AmQuake

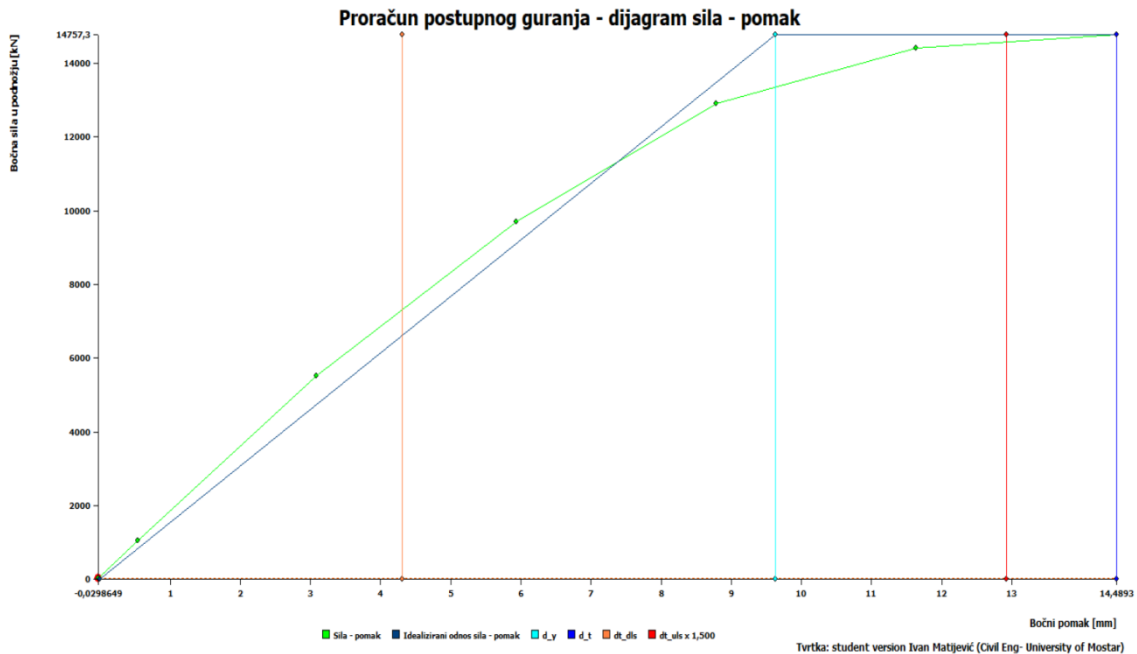


Slika 6. Mreža konačnih elemenata

Kustura, M., Matijević, I.

## Numerička analiza zidane stambene zgrade primjenom AmQuake software-a

## 4.3.1 Rezultati proračuna - jednoliko opterećenje u smjeru X



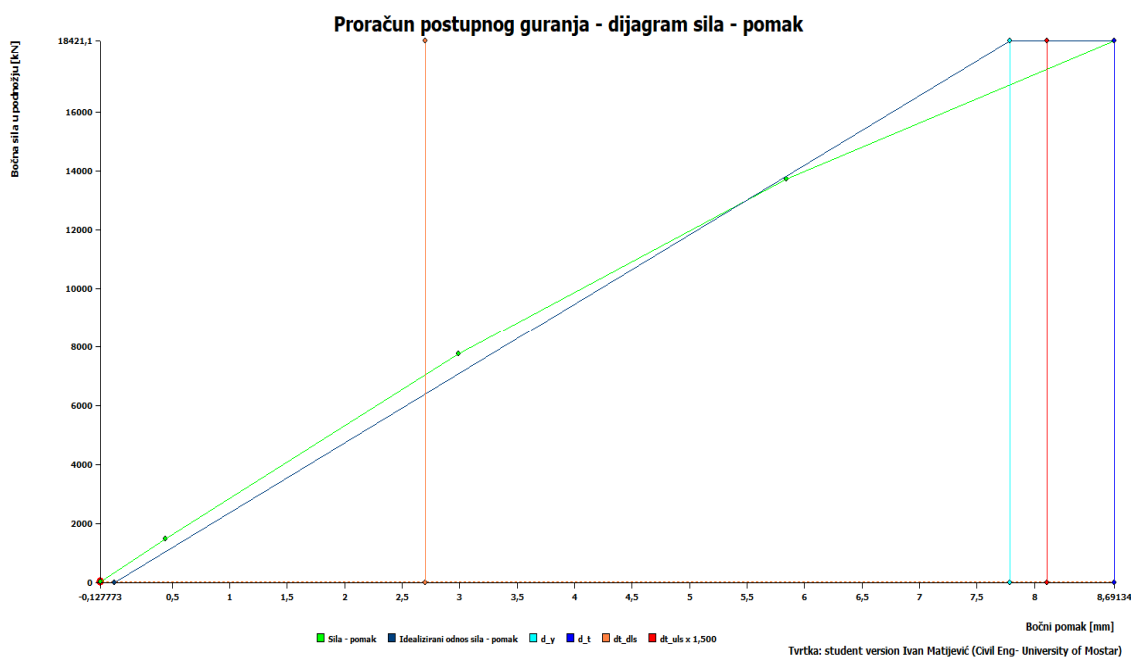
Slika 7. Dijagram sila-pomak za opterećenje u smjeru X

(2) X+, exc. pos, tri	
Ciljani pomak za GSU [mm]:	4,306
Kapacitet za GSU [mm]:	14,489
Granično stanje uporabljivosti	Ispravno
Ciljani pomak za GSN x 1,50	12,918
Kapacitet za GSN [mm]:	14,489
Granično stanje nosivosti:	Ispravno

Slika 8. Rezultati za GSU i GSN u smjeru X

Iz rezultata je vidljivo da ciljani pomak za granično stanje uporabljivosti (GSU) iznosi 4,306 mm, dok kapacitet za GSU iznosi 14,489 mm, što znači da proračunska konstrukcija zadovoljava granično stanje uporabljivosti. Ciljani pomak pomnožen s faktorom 1,50 za granično stanje nosivosti (GSN) iznosi 12,918 mm, dok kapacitet za GSN iznosi 14,489 mm što znači da proračunska konstrukcija zadovoljava i granično stanje nosivosti.

## 4.3.2 Rezultati proračuna - jednoliko opterećenje u smjeru Y



Slika 9. Dijagram sila-pomak za opterećenje u smjeru Y

(10) Y+, exc. pos, tri	
Ciljani pomak za GSU [mm]:	2,703
Kapacitet za GSU [mm]:	8,691
Granično stanje uporabljivosti	Ispravno
Ciljani pomak za GSN x 1,50	8,109
Kapacitet za GSN [mm]:	8,691
Granično stanje nosivosti:	Ispravno

Slika 10. Rezultati za GSU i GSN u smjeru Y

U smjeru Y može se primjetiti da ciljani pomak za granično stanje uporabljivosti (GSU) iznosi 2,703 mm, dok kapacitet za GSU iznosi 8,691 mm, što znači da proračunska konstrukcija zadovoljava granično stanje uporabljivosti. Ciljani pomak pomnožen s faktorom 1,50 za granično stanje nosivosti (GSN) iznosi 8,109 mm, dok kapacitet za GSN iznosi 8,691 mm te proračunska konstrukcija zadovoljava i granično stanje nosivosti.



## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan proračun zidane stambene zgrade. Analiza potresne otpornosti provedena je koristeći metodu naguravanja implementiranu u AmQuake software. Na osnovu dobivenih rezultata možemo zaključiti da metoda naguravanja predstavlja učinkovit postupak za analizu potresne otpornosti zidanih zgrada kojom se određuju kapacitet nosivosti i deformacija konstrukcije uslijed djelovanja potresnih sila. Na ocjenu potresne otpornosti za zidane građevine u potresnim područjima uvelike utječu pravilnost objekta u tlocrtu i po visini kakav je i primjer građevine prikazan u ovom radu.

## LITERATURA

1. Cervenka, J., Jendele, L., Janda, Z.: AmQuake: Program Documentation, Prag, Cervenka Consulting Ltd, 2011.
2. Trogrlić, B.: Zidane zgrade – projektiranje i proračun, predavanja, Split, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Split, 2018.
3. Meštrović, D.: Potresno inženjerstvo, Zagreb, 2016.
4. Zahir, A., Rizzo, S., Çelebi, E., Stempniewski, L.: Seismic Pushover Analysis of Existing Masonry Structures, Kocaeli, Turkey, 2019.
5. Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž.: Pregled metoda za modeliranje povijesnih zidanih konstrukcija, Građevinar 7/2013.
6. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
7. Galasco, A., Lagomarsino, S., Penna, A.: On the use of pushover analysis for existing masonry buildings, Geneva, Switzerland, 2006.
8. Krstevska, L., Nikolić, Ž., Kustura, M., (2020): Shake Table Testing of Two Historical Masonry Structures for Estimation of Their Seismic Stability, International Journal of Architectural Heritage, DOI: 10.1080/15583058.2020.1779870