

NELINEARNA STATIČKA ANALIZA VIŠESPRATNE ZIDANE ZGRADE U NOVOM SADU**NONLINEAR STATIC ANALYSIS OF A MULTI - STOREY MASONRY BUILDING IN NOVI SAD**

Božidar Kojić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – GRAĐEVINARSTVO

Kratka sadržaj – *Dokaz nosivosti za seizmička dejstva sprovodi se putem nelinearne statičke analize („pushover“), koja se u Evrokodu daje kao alternativa linearnim metodama analize, ali i za verifikaciju performansi postojećih objekata. Pri analizi kapaciteta, razmatrana su granična stanja ograničenja oštećenja (DL), nosivosti (SD) i blizu kolapsa (NC). Prvu celinu rada čini tehnički opis konstrukcije sa osvrtom na način dimenzionisanja elementa konstrukcije. Drugu celinu čine teorijska poglavlja o odredbama Evrokodova 8-1 i 8-3, o načinima analize konstrukcija na seizmička dejstva i o načinima modeliranja zidanih konstrukcija. Praktični deo prikazuje nelinearnu statičku analizu i zaključke, na osnovu dobijenih rezultata, i opravdanost propisa za jednostavne zidane konstrukcije i propisanih vrednosti faktora ponašanja u Evrokodu 8.*

Ključne reči: *Seizmička dejstva, Nelinearna statička analiza, Odredbe Evrokoda 8, Metode analize*

Abstract – *Proof of capacity for seismic actions is performed via nonlinear static analysis („pushover“), which Eurocode gives as an alternative for linear methods of analysis, but as well as for performance verification of existing buildings. While analyzing capacity, damage (DL), ultimate (SD) and near collapse (NC) limit states were considered. The first part of the thesis consists of technical description of the structure with a reference to the method of design of structural elements. Second part consists of theoretical chapters about provisions of Eurocode 8-1 and 8-3, means of analysis of structures exposed to seismic actions and about ways of modeling of masonry structures. Practical part shows nonlinear static analysis and conclusions, based on the obtained results, and justification of provisions for simple masonry structures and prescribed values of behaviour factor by Eurocode 8.*

Keywords: *Seismic actions, Nonlinear static analysis, Provisions of Eurocode 8, Analysis methods*

1. UVOD

Osnovu rada čini zgrada projektovana u okviru Diplomskog rada autora. Kako je ona tada ispunjavala sve kriterijume za „jednostavnu zidanu zgradu“ [1], proračun uticaja usled dejstva seizmike bio je izostavljen.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz Master rada čiji mentor je bio vanr. prof. dr Vladimir Vukobratović.

U međuvremenu, seizmički hazard na lokaciji je povećan dva puta, te zgrada više ne može biti klasifikovana kao „jednostavna“ - broj etaža za dato ubrzanje tla je veći od dozvoljenog. Objekat je spratnosti P + 3 + Pk, u osnovi 14,66 m x 29,85 m i visine 16 m. Spratna visina je 2,95 m. Rešen je kao masivni sistem sa nosećim zidanim zidovima, uokvirenim armiranobetonskim (AB) horizontalnim i vertikalnim serklažima. Usvojen je minimalan broj nosećih armiranobetonskih greda, tamo gde je bilo potrebno za oslonac međuspratnim tavanicama ili konzolnim ispustima. Noseći zidovi su debljine 25 cm i zidani su glinenim blokovima sa vertikalnim šupljinama normalizovane srednje čvrstoće pri pritisku $f_b = 11,5$ MPa. Blokovi su povezivani u sklop zida malterom M5 (5 MPa), opšte namene, i to na način da su pored horizontalnih spojnica, popunjene i vertikalne spojnice. I vertikalni i horizontalni serklaži su izvedeni od betona C25/30.

Raspored serklaža prati u svemu propise EC6 [2]. Svi vertikalni serklaži se pružaju od temelja do vrha zgrade. Nalaze se na ukrštanjima, sučeljavanjima, suticanjima i krajevima zidova, kao i sa obe strane otvora većih od 1,5 m². Dodatno, vertikalni serklaži se moraju pojaviti i na rastojanjima ne većim od 4 m. Horizontalni serklaži nalaze se iznad svih nosećih zidova u nivou tavanica. Tavanice su polumontažne tipa „fert“, po svojoj statičkoj prirodi sitnorebraste tavanice noseće u jednom pravcu, ukupne visine 20 cm.

2. NELINEARNA STATIČKA ANALIZA

Pushover analizom možemo demonstrirati kako se progresivni lom u zgradi stvarno dešava, i identifikovati modus konačnog loma. Pushover je nelinearna analiza za procenu kapaciteta i snage konstrukcije izvan elastičnog limita, pa sve do svoje krajnje snage u post-elastičnom opsegu. U procesu, ova metoda takođe predviđa potencijalne slabe zone u konstrukciji, prateći sekvence oštećenja svakog konstruktivnog elementa ponaosob. Nelinearna statička analiza se sprovodi pod konstantnim gravitacionim opterećenjem, i sa monotono rastućim horizontalnim opterećenjem. Primenjuje se za sledeće potrebe [3,4]:

→ Za izračunavanje ili proveru tzv. faktora redundantnosti, odnosno faktora prekoračenja čvrstoće α_i/α_1 .

→ Za procenu očekivanog plastičnog mehanizma i raspodele oštećenja.

→ Za procenu konstrukcijskih performansi postojećih ili saniranih, dograđenih, rekonstruisanih, adaptiranih objekata.

→ Kao alternativa proračunu baziranom na uticajima proizašlim iz linearno elastične analize, te na primeni faktora ponašanja q .

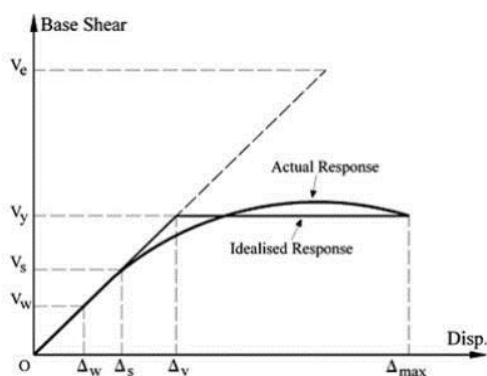
Analiza se vrši primenom elastičnog, a ne projektnog spektra. Sprovodi se uz pretpostavku materijalno nelinearnog ponašanja materijala. Matematički model koji se koristi u elastičnoj analizi treba da se proširi tako da uključi nosivost konstrukcijskih elemenata i njihovo post-elastično ponašanje. Na nivou elemenata treba da se koristi bilinearna veza sila-deformacija. Kod zidanih zgrada, elastična krutost u bilinearnoj relaciji sila-deformacija treba da odgovara isprskalim presećima. Osobine elemenata treba da budu zasnovane na osrednjenim vrednostima osobina materijala. Aksijalne sile usled gravitacionih opterećenja treba da se uzmu u obzir pri određivanju zavisnosti sila-deformacija za konstruktivne elemente. Momenti savijanja usled gravitacionog opterećenja u vertikalnim elementima mogu da se zanemare. Model konstrukcije materijalno nelinearnih karakteristika se opterećuje gravitacionim opterećenjem i horizontalnim silama, koje simuliraju inercijalne sile. Barem dve vertikalne raspodele bočnih sila moraju biti primenjene [1]:

→ Uniformna šema u kojoj su sile proporcionalne samo masama, a nezavisne su od visinskog položaja masa.

→ Modalna šema koja odgovara principu određivanja seizmičkog dejstva metodom bočnih sila.

Bočne sile moraju da se apliciraju na mestu koncentrisanih masa u proračunskom modelu, sa uzimanjem u obzir slučajnog ekscentriciteta [1]: $e_{ai} = +/- 0,05L_i$ (dimenzija objekta u osnovi). Povećavanjem inkrementalnog opterećenja dolazi do otkazivanja pojedinih elemenata konstrukcije, što uzrokuje smanjenje krutosti sistema.

Praćenjem razvoja plastifikacija u nelinearnom sistemu stiže se uvid u plastični mehanizam. Ocena zemljotresne otpornosti se daje na osnovu praćenja jednog karakterističnog čvora – kontrolnog čvora. Kontrolni čvor je najčešće centar masa najvišeg sprata. Na osnovu pomeranja kontrolnog čvora crta se kriva nosivosti iz koje se može oceniti seizmička otpornost sistema, i koja zapravo predstavlja osnovni rezultat pushover analize – kriva kapaciteta. Kriva kapaciteta predstavlja dijagram koji daje zavisnost između ukupne bazne sile (ukupno aplicirano horizontalno opterećenje) V_b , i kontrolnog pomeranja d_n . Kontrolno pomeranje je pomeranje kontrolnog čvora. Oblik krive kapaciteta prikazan je na Slici 1.



Slika 1. Izgled pushover krive

U analizi, horizontalno opterećenje se povećava u inkrementima od nule, do opterećenja koje rezultuje horizontalnim pomeranjem od 100 do 150% ciljnog pomeranja. Ciljno pomeranje je definisano kao seizmički zahtev određen iz elastičnog spektra odgovora, preko pomeranja ekvivalentnog sistema sa jednim stepenom slobode kretanja (SDOF). Procedura za njegovo određivanje data je u Aneksu B EN1998-1. Prema EN1998-3 nelinearnim metodama analize konstrukcija, poredi se zahtev sa kapacitetom. Zahtev je pomeranje vrha zgrade koje odgovara ciljnom pomeranju, a kapacitet je pomeranje vrha zgrade pri kojem, usled progresivnih oštećenja i loma elemenata konstrukcije, bazna sila opadne ispod 80% maksimalne nosivosti konstrukcije [5].

3. ODREĐIVANJE FAKTORA PONAŠANJA

Zbog toga što konstrukcijski sistemi imaju kapacitet da se zemljotresnim dejstvima suprotstave u nelinearnom domenu, to nam dozvoljava da za proračun njihove seizmičke otpornosti koristimo sile koje su manje od onih koje odgovaraju linearno elastičnom odgovoru. Uzevši u obzir kapacitet konstrukcije za disipaciju energije kroz duktilno ponašanje njenih elemenata, sprovodi se elastična analiza zasnovana na spektru odgovora koji je redukovan u odnosu na elastičan spektar. Ova redukcija se ostvaruje uvođenjem faktora ponašanja q . Prema Evrokodu 8 [1], faktor ponašanja konstrukcije q je "aproksimacija odnosa između seizmičkih sila, koje bi nastale u konstrukciji ako bi se ona ponašala potpuno elastično sa 5% relativnog viskoznog prigušenja, te minimalnih seizmičkih sila koje se mogu upotrebiti kod projektovanja sa konvencionalnim elastičnim računskim modelima, koje još osiguravaju zadovoljavajući odgovor konstrukcije." Vrednost faktora ponašanja q za zidane zgrade daje se između 1,5 i 3,0. Međutim, pri primeni linearne analize sa takvim faktorima ponašanja, nailazi se na niz problema u praksi [4]:

→ Poteškoće u zadovoljenju graničnih stanja nosivosti, posebno za nearmirane zgrade, već sa dva ili tri sprata.

→ Rezultati analitičkih provera sigurnosti ne odgovaraju eksperimentalnim ispitivanjima koja su pokazala veće nosivosti takvih konstrukcija.

→ Dolazi se do kontradikcije za odredbe za jednostavne zidane zgrade pri kojima za neke slučajeve ne trebamo dokaz za seizmičko opterećenje, a pritom pri proveru konstrukcija ne zadovoljava.

→ Rezultati linearne analize daju mnogo nižu nosivost nego rezultati nelinearne analize.

Pri tome, standard preporučuje upotrebu vrednosti na donjim granicama preporuka. Međutim konačna odluka ostavlja se nacionalnim dodacima. Procena i određivanje osnovne vrednosti faktora ponašanja q^* , kao i faktora prekoračenja OSR , može se izvršiti numeričkim modeliranjem sprovedenjem nelinearnih metoda analiza (što je odrađeno u praktičnom delu rada). Posmatrajući duktilnost pomeranja konstrukcije, μ , koja predstavlja najpogodniju količinu za ocenu zahteva i kapaciteta prilikom seizmičkog dejstva, osnovna vrednost faktor ponašanja q^* može se predstaviti preko odnosa pomeranja:

→ pomeranje pri graničnom kapacitetu nosivosti konstrukcije d_u

→ i pomeranje na granici tečenja, d_y , određeno sa krive kapaciteta idealizovane bi-linearne krive

Na osnovu pravila o jednakosti pomeranja ili jednakosti energije (u zavisnosti od vrednosti perioda vibracije konstrukcije T^* za SDOF sistem), osnovna vrednost faktor ponašanja q^* može se izraziti na sledeći način:

$$\rightarrow q^* = 1 + (\mu - 1) \cdot T^* / T_c \quad \text{za } T^* < T_c \quad (1)$$

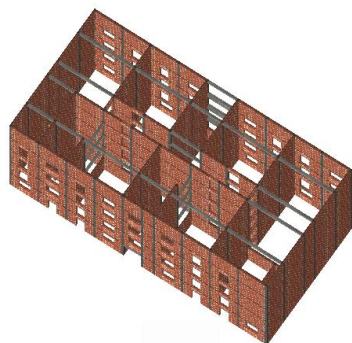
$$\rightarrow q^* = \mu \quad \text{za } T^* \geq T_c \quad (2)$$

Koeficijent prekoračenja OSR možemo izraziti preko odnosa F_y/F_{el} , gde je F_y granična smičuća sila (na idealizovanoj bi-linearnoj krivi), a F_{el} smičuća sila koje odgovara dostizanje kapaciteta po savijanju ili smicanju prvog zida u konstrukciji zgrade prema linearno-elastičnoj analizi (pronalazi se inkrement u kojem se desila plastifikacija u prvom zidu, po savijanju ili smicanju). Faktor ponašanja q se tada može odrediti, prema [6] primenom izraza:

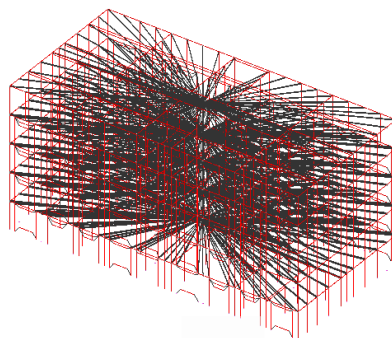
$$\rightarrow q = q^* \cdot OSR \quad (3)$$

4. NAČIN MODELIRANJA

Računski model konstrukcije, kao što je ranije rečeno, odrađen je u softverskom paketu "AmQuaqe". Seizmička verifikacija se obavlja prateći odredbe Evrokoda 8, koristeći pushover analizu i metodu modeliranja ekvivalentnih okvira [7,3]. U ovoj metodi konstrukcija je predstavljena linijskim (1D) elementima postavljenim u težišne linije zidova, serklaža, parapeta i nadvoja. Ovakav pristup dovodi do sadejstva između zidova i u ovoj metodi dolazi do varijacije intenziteta aksijalnih sila (za razliku od drugog najčešćeg pristupa, konzolnog). Zidana konstrukcija modelira se primenom 1D elemenata sa pretpostavkom da zidovi imaju elasto-plastično ponašanje sa ograničenom deformacijom (bi-linearna veza sila-deformacija). Beskonačno krute tavanice u svojoj ravni omogućuju kompatibilnost horizontalnih pomeranja svih čvorova, odnosno zidova koje povezuju. Svi betonski linijski elementi su modelirani sa tačno usvojenom armaturom, a to se odnosi na vertikalne i horizontalne serklaže, nadvratne i natprozorne grede, klasične AB grede i visoke grede. Na Slikama 2 i 3 je, respektivno, dat izgled trodimenzionalnog (3D) modela u svom "render" obliku, kao i u svom "žičanom" (wired) obliku, koji je fizičko - matematička idealizacija realnog stanja prema metodi ekvivalentnih okvira.



Slika 2. 3D model konstrukcije u programu AmQuaqe



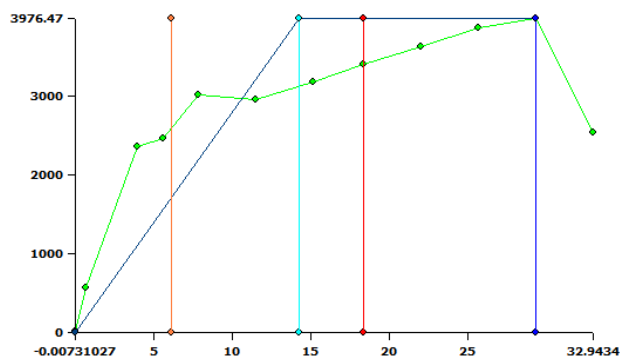
Slika 3. "Žičani model" sa konačnim elementima

5. REZULTATI ANALIZE I ZAKLJUČAK

Izvedena su dva zasebna proračuna na identičnom modelu: jedan za SD stanje, jedan za NC stanje, i pri tome se u oba slučaja razmatra i granično stanje ograničenja oštećenja (DL). U Tabeli 1, kao primer, biće prikazani rezultati pushover analize za jedan slučaj opterećenja, za jedno razmatrano granično stanje nosivosti (konkretno SD). Na Slici 4 prikazan je izgled pushover dijagrama za rezultate iz tabele. Dijagram pokazuje ciljna pomeranja za DL i SD označen narandžastom, odnosno crvenom bojom. Svetlo plavom bojom označena je granica tečenja d_y , a tamno plavom kapaciteti.

Tabela 1. Rezultati za X+, e+, uniformna raspodela sila

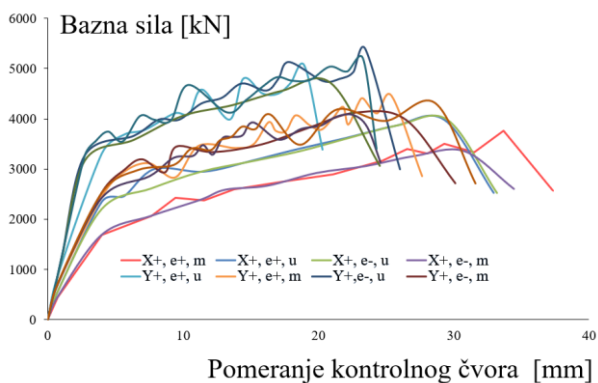
veličina (jedinica mere)	vrednost	veličina (jedinica mere)	vrednost
F_y (kN)	3976,5	T^* (s)	0,48
d_y (mm)	14,30	μ (/)	2,05
$d_{t, DL}$ (mm)	6,10	OSR (/)	1,70
$d_{c, DL}$ (mm)	29,30	q^* (/)	2,05
$d_{t, GSN \times 1,5}$ (mm)	18,40	q (/)	3,48
$d_{c, SD (GSN)}$ (mm)	29,30		



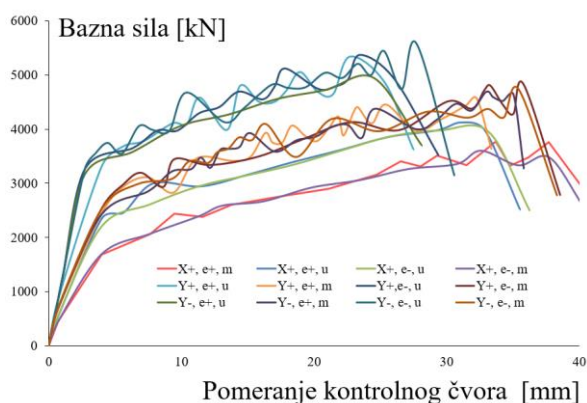
Slika 4. „Pushover“ kriva

Na Slikama 5 i 6 prikazane su sve krive kapaciteta za sve slučajeve opterećenja (dva moguća pravca, dva smera, dva ekscentriciteta, dve raspodele bočnih sila), za svako granično stanje nosivosti ponaosob (SD i NC). Analiza pokazuje da u svim slučajevima opterećenja konstrukcija zadovoljava sva granična stanja (NC, SD, DL). Za granična stanja DL pokazalo se da su ciljna pomeranja uvek u delu dijagrama koji odgovara linearnom elas-

tičnom odgovoru konstrukcije, što je bilo i za očekivati (npr. slika 4).



Slika 5. Krive kapaciteta granično stanje SD



Slika 6. Krive kapaciteta granično stanje NC

Poredeći kapacitete pomeranja za DL, sa ciljnim pomeranjima, pokazuje se da su ta granična stanja zadovoljena sa velikom rezervom, u svim slučajevima (oko 79 % u proseku). Granična stanja nosivosti su takođe zadovoljena sa rezervama. Za granično stanje SD zalih iznosi prosečno 32,9 %, dok za NC iznosi nešto više – 41,5%. Količnik kapaciteta po pomeranju za dva razmatrana granična stanja nosivosti, iznosi u proseku 1,23. To približno odgovara odnosu od 4/3 koje nalaže EC8-3, za odnos kapaciteta ugla otklona za NC i SD stanje (kao i globalnih kapaciteta) [5]. Projektno ubrzanje tla je $0,1g = 0,981 \text{ m/s}^2$. Maksimalno moguće referentno ubrzanje tla, koje konstrukcija može da podnese, proizašlo iz pushover analize iznosi najmanje $1,32 \text{ m/s}^2$. To je više za 34%. Ista konstrukcija ranije bila je tretirana kao jednostavna zidana zgrada, prema kome dokaz nosivosti za seizmičko dejstvo nije potreban [1]. Uzevši u obzir rezerve po pomeranjima, kao i ubrzanjima tla, ova analiza potvrđuje taj stav i pokazuje sa kolikim konzervativizmom odredbe EC8-1 daju uslove za jednostavne zidane zgrade. Može se razmatrati da ima prostora da se takve odredbe ublaže. Kada govorimo o faktorima ponašanja (q faktorima), poznato je da EC8-1 propisuje vrednosti od 1,5 do 3,0. Pushover analiza pokazuje q faktore u rasponu od 2,83 do 4,12. Faktori ponašanja tako u proseku iznose: 3,48 za SD stanje i 3,71 za NC stanje. Osnovne vrednosti q faktora dobijene iz pushover analize iznose 2,03. Ovaj parametar je upravo reda veličine koji bi EC8-1 preporučivao za faktor ponašanja. Postoji, međutim, nešto što omogućava

uvećanje q faktora. To je faktor prekoračenja čvrstoće, OSR (eng. overstrength factor), koji u proseku iznosi 1,78. Ovaj faktor je izuzet iz definicije q faktora za zidane konstrukcije u EC8-1. Može se reći da te propisane vrednosti predstavljaju zapravo osnovne vrednosti faktora ponašanja. Postojanje takve konzervativnosti može da izazove poteškoće navedene u Poglavlju 3. Zbog pozitivnih rezultata naučnih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, može se očekivati da nadolazeća generacija Evrokodova ublaži kriterijume i za jednostavne zidane zgrade, i za veličinu q faktora za zidane konstrukcije. Važno je napomenuti da zidane konstrukcije treba koristiti i razmatrati znajući sve njihove dobro poznate prednosti i mane. Pri samom koncipiranju, i projektovanju, potrebno je pridržavati se svih preporuka Evrokodova za aseizmičko projektovanje: posvetiti pažnju dispoziciji, rasporedu elemenata, regularnostima u osnovi, visini, kontinuitetu zidova. Potrebno je pažnju posvetiti pravilnom rešavanju detalja i, što je najvažnije, pridržavati se maksimalno propisanih spratnosti za data ubrzanja tla na lokaciji.

6. LITERATURA

- [1] SRPS EN 1998-1. Evrokod 8 - Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija - Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade. Srpski standard, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2015.
- [2] SRPS EN 1996-1-1. Evrokod 6 - Projektovanje zidanih konstrukcija – Deo 1-1: Opšta pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije. Srpski standard, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2012.
- [3] Vukobratović, V.: Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija. Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad, 2019.
- [4] Manojlović, D.: Primena Evrokodova za proračun novih i procenu stanja postojećih zidanih zgrada, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad, maj 2019.
- [5] SRPS EN 1998-3. Evrokod 8 - Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija - Deo 3: Ocena stanja i ojačanje zgrada. Srpski standard, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2015.
- [6] Tomažević, M.: Introducing Eurocodes and the calculation of seismic resistance of the masonry constructions. Materijali i konstrukcije 51/2(2008) 3-24.
- [7] Cervenka, J., Jendele, L., Janda, Z.: AmQuake - Program documentation. Cervenka Consulting Ltd., Praga, April 12, 2016. http://www.amquake.eu/download3/AmQuake_Documentation.pdf

Kratka biografija:



Božidar Kojić rođen je u Doboju, 1994. godine. Osnovne akademske studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka 2018. godine, iz oblasti gradjevinarstvo – konstruktivni smer. Master akademske studije smer – konstrukcije upisao je iste godine. Master rad iz oblasti zidanih konstrukcija uradio je i odbranio u 2021. godini.