

NELINEARNA STATIČKA ANALIZA ZIDANE ZGRADE P+4 U NOVOM SADU**NONLINEAR STATIC ANALYSIS OF A MASONRY BUILDING GF+4 IN NOVI SAD***Srđan Bakić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAĐEVINARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je sprovedena nelinearna statička analiza višespratne zidane zgrade spratnosti (P+4) na području Novog Sada, prema Evrokod standardima. Trodimenzionalni matematički model formiran je primenom ekvivalentnih okvira. Nivo seizmičkog dejstva (ubrzanje tla) je postepeno uvećavan kako bi se dobio krajnji seizmički kapacitet objekta. Pri analizi su u obzir uzeta dva rasporeda seizmičkih sila za glavne pravce objekta. Proračunate su vrednosti faktora prekoračenja (OSR), duktilnosti (μ) i faktora ponašanja (q), i upoređene su sa vrednostima dobijenim u softveru, i sa vrednostima datim u Evrokodu.

Ključne reči: višespratna zidana zgrada, model ekvivalentnog okvira, pushover analiza, OSR faktor, q faktor, Evrokod

Abstract – The study presents a nonlinear static analysis of a multi-story masonry building (GF+4) situated in Novi Sad, according to Eurocode standards. A three-dimensional mathematical model was formed using equivalent frames. The seismic intensity (ground acceleration) was incrementally increased to determine the structure's ultimate seismic capacity. Two configurations of seismic forces for the main directions of the building were considered during the analysis. Calculations were conducted to assess the overstrength ratio (OSR), ductility (μ), and behavior factor (q), and the values were compared with values derived from software, and with values given in Eurocode.

Keywords: multi-storey masonry building, equivalent frame model, pushover analysis, OSR factor, q factor, Eurocode

1. UVOD

Zidani objekti su u prošlosti bili najzastupljeniji tipovi građevinskih objekata. Svoju dugu tradiciju zidanje pripisuje svojoj jednostavnosti i dugovečnosti zidanih konstrukcija. Brojni su primjeri takve gradnje u starom Egiptu, Rimu, Grčkoj te drugim civilizacijama i kulturama. U savremenoj građevinskoj praksi, zidane konstrukcije više nisu toliko zastupljene kao u prošlosti. Međutim, iako nemaju primenu u industrijskim i inženjerskim objektima, niti u većim stambeno-poslovnim objektima, zidane konstrukcije su našle široku primenu kao manji stambeni objekti ili u individualnoj gradnji.

Evrokod 6 daje opšta pravila za projektovanje nearmiranih i armiranih zidanih zgrada, a u Evrokodu 8 nalaze se dodatna pravila koja se odnose na projektovanje zidanih zgrada u seizmički aktivnim područjima [1-3].

2. OPIS OBJEKTA

Projektnim zadatkom predviđena je analiza stambenog objekta spratnosti P+4 sprata. Lokacija predmetnog objekta je Novi Sad.

Predmetni objekat se nalazi na katastarskoj parceli broj 0264/1, K.O. Novi Sad IV, ulica Stanoja Stanojevića bb. u Novom Sadu. Površina građevinske parcele br. 256 m². Planirani objekat je kvadratnog oblika, slobodno stojeći u blokovskoj gradnji, i to tako da se građevinska i regulaciona linija poklapaju. Objekat ima 24 stambenih jedinica. Objekat je u osnovi dimenzija 18,66 m x 18,60 m i visine 14,75 m. Prizemni deo objekta je visine 2,85 m, dok su ostale etaže 2,75 m.

Predmetni objekat je masivnog konstruktivnog sistema, izrađen od zidova zidanih blokom Poroherm 25S i 38S koji su ukruženi horizontalnim i vertikalnim serklažima. Blokovi su u sklopu zida povezani malterom opšte namene M10 (čvrstoća 10 MPa) preko horizontalnih i vertikalnih spojnica.

Vrednost savojne i poprečne krutosti zidova i armiranog betona je uzeta kao $\frac{1}{2}$ stvarne, kako bi se simulirala isprskalost preseka. Svi armiranobetonski elementi u konstrukciji su betonirani betonom klase C 25/30. Vertikalni serklaži su dimenzija 25x25 i 38x38 cm. Horizontalni serklaži se oslanjaju na noseće zidove a njihova visina odgovara visinama tavanica. Dimenzije horizontalnih serklaža su 20x25 i 20x38 cm. Serklaži su armirani sa 4Ø12 i UØ8/15 cm.

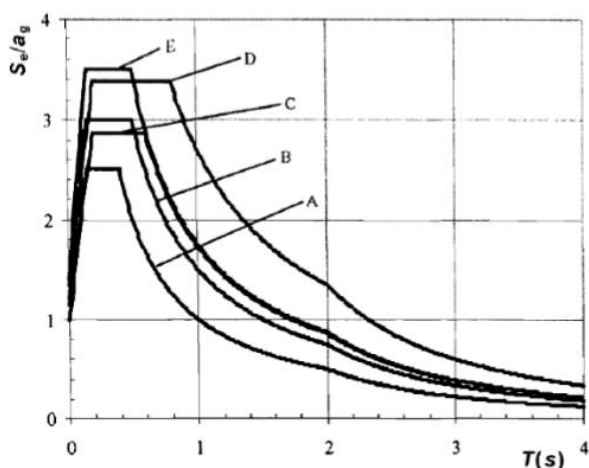
Projektom je predviđena AB međuspratna ploča debljine $d=20$ cm izvedena betonom klase C25/30 i armirana u obe zone armaturom Q335. Krovna ploča je izvedena kao AB ploča debljine 20 cm, sa minimalnim potrebnom nagibima za odvod atmosferilija.

3. ANALIZA OPTEREĆENJA

Na objekat pored sepsstvene težine djeluju i sledeća opterećenja: dodatno stalno opterećenje čija je vrednost 1,18 kN/m², odnosno 1,47 kN/m²; promenljivo opterećenje koje iznosi 2,50 kN/m² na međuspratnim tavanicama, dok na krovnoj ploči iznosi 1,00 kN/m²; opterećenje snegom je 1,0 kN/m². Seizmičko opterećenje je izraženo preko spektra odgovora tip 1 (Slika 1), tip tla je B.

NAPOMENA:

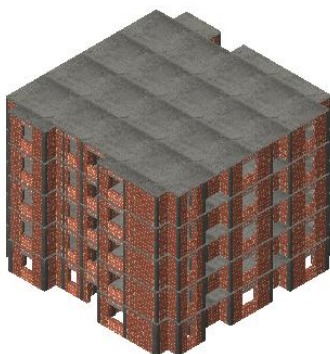
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio vanr. prof. dr Vladimir Vukobratović.



Slika 1. Preporučeni tip 1 elastični spektra odgovora za kategorije tla A do E (5% prigušenja)

4. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE I OPTEREĆENJA

Objekat je modeliran kao trodimenzionalan (3D) u programu AmQuake (Slika 2). Za modeliranje konstrukcije korišćen je model ekvivalentnog okvira, gde su svi elementi konstrukcije, osim međuspratnih ploča, prikazani kao 1D elementi. Kao vertikalni gredni elementi prikazani su noseći zidovi i vertikalni serklaži, dok su kao horizontalni gredni elementi modelirani parapeti, horizontalni serklaži, natprozorne i nadvratne grede. Međuspratne tavanice su u svojoj ravni beskonačno krute i obezbeđuju kompatibilnost horizontalnih pomeranja svih čvorova tj. zidova koje povezuju [4].



Slika 2. 3D model zgrade

U Evrokodu razlikujemo stalno (GO), dodatno stalno (G1) i korisno (Q), te ga tako zadajemo i u programu. Stalno opterećenje odnosi se na konstantna opterećenja koja su prisutna na objektu tokom celog veka njegove eksploatacije. Promenljiva opterećenja - korisno opterećenje i opterećenje snegom prikazana su kao jednakopodeljena opterećenja po površini međuspratnih ploča, odnosno krovne ploče. Pored intenziteta opterećenja u ovom prozoru definišu se i vrednosti koeficijenata za kombinacije opterećenja.

Na modelu je varirano ubrzanje i vršena je provera za koje maksimalno ubrzanje bi zgrada imala zadovoljavajući odgovor. Klasa značaja objekta je II i faktor $\gamma_I = 1,0$.

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I \quad (1)$$

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,10 \cdot 10 \frac{m}{s^2} = 1,0 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,12 \cdot 10 \frac{m}{s^2} = 1,2 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,13 \cdot 10 \frac{m}{s^2} = 1,3 \frac{m}{s^2}$$

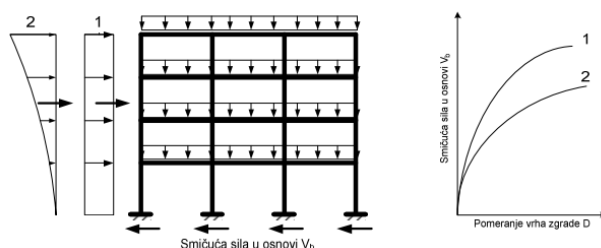
5. PUSHOVER ANALIZA

Pushover analiza primenjuje se za verifikaciju performansi novoprojektovanih i postojećih zgrada u sledeće svrhe:

1. da se provere ili revidiraju vrednosti odnosa prekoračenja α_u/α_1 ;
2. da se proceni očekivani plastični mehanizam i raspodela oštećenja;
3. da se oceni konstrukcijsko ponašanje postojećih ili rekonstruisanih zgrada za potrebe Evrokoda EN 1998-3;
4. kao alternativa proračunu koji je zasnovan na linearno-elastičnoj analizi koja koristi faktor ponašanja q . U tom slučaju, ciljna pomeranja treba da se koriste kao osnova proračuna.

Glavni princip metode je praćenje odgovora konstrukcije za rastuću horizontalnu silu uz konstantno vertikalno opterećenje. Iz dobijenog odnosa horizontalne sile i referentnog pomeranja može se odrediti seizmička otpornost konstrukcije. [5].

Neophodno je primeniti dve vertikalne raspodele bočnih sila ravnomerne raspodele, gde su bočne sile proporcionalne masama bez obzira na visinski položaj i modalnu raspodelu gde su bočne sile u skladu sa raspodelom sila pri elastičnoj analizi (Slika 3). Nepovoljniji rezultati se usvajaju kao merodavni.

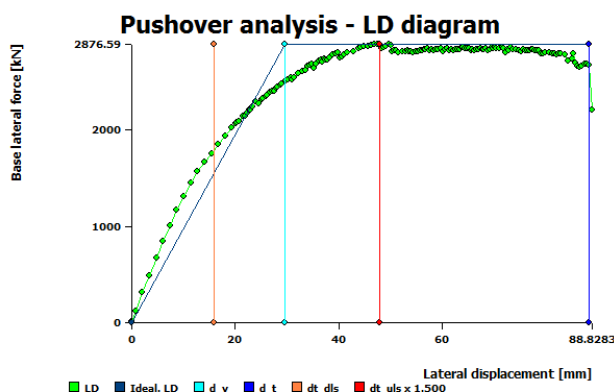


Slika 3. Raspodela bočnih sila za pushover analizu [6]

6. REZULTATI PRORAČUNA

Postupno guranje je vršeno na prostornom modelu konstrukcije u X i Y pravcu. Na osnovu dobijenih rezultata iz softvera: faktora prekoračenja (overstrenght factor - OSR) i duktilnosti izračunava se faktor ponašanja q , koji se upoređuje sa njegovim preporučenim vrednostima za zidane konstrukcije definisanim u Evrokodu 8.

U Tabeli 1 je dat prikaz rezultata pushover analize (prikazane Slikom 4).



Slika 4. Slučaj opterećenja - X^+ , exc. pos, uni – GSN – $a_g = 1,0 \text{ m/s}^2$; GSU – $a_g = 0,5 \text{ m/s}^2$

Tabela 1. Rezultati pushover analize, X^+ , exc. pos, uni

Ciljno pomeranje za GSU - dt_{dls}	15,981	[mm]
Kapacitet za GSU - dc_{dls}	57,612	[mm]
Ciljno pomeranje za GSN - dt_{uls}	47,944	[mm]
Kapacitet za GSN - dc_{uls}	88,371	[mm]
Period - T	0,781	[s]
Maksimalno referentno ubrzanje tla - a_g	1,843	[m/s ²]
Duktilnost - μ	3,217	/
Faktor prekoračenja - OSR	2,876	/
Elastično pomeranje - dy	29,594	[mm]

7. RUČNA VERIFIKACIJA REZULTATA

7.1 Ciljna pomeranja i kapaciteti za ULS i DLS

Ciljno pomjeranje u analizi pushover krive predstavlja maksimalno dopušteno pomjeranje (deformaciju) koje konstrukcija može doživjeti pri određenim zemljotresnim dejstvima. Ciljno pomeranje se definiše kao seizmički zahtev određen iz elastičnog spektra odgovora, preko pomeranja ekvivalentnog sistema sa jednim stepenom slobode kretanja. AmQuake koristi N2 metodu za određivanje ciljnog pomeranja.

Kapacitetom konstrukcije se smatra pomeranje pri kome je prekoračen kriterijum:

$$F_{b,i} \leq 0,8 \cdot F_{b,max} \quad (2)$$

$F_{b,i}$ - smičuća sila u osnovi zgrade pri kojoj dolazi do progresivnog oštećenja i loma pojedinih elemenata sistema za prijem bočnog opterećenja; $F_{b,max}$ - maksimalna nosivost zgrade. Za pomeranje $d_{max} = 88,828 \text{ mm}$ sila $F_{b,i}$ ima vrednost od 2189,82 kN a $F_{b,max}$ ima vrednost od 2876,59 kN, tako da je traženi uslov zadovoljen.

7.2 Određivanje maksimalnog ubrzanja a_g

$$a_g = \frac{S_e(T^*)}{S^* \eta * 2,5 * \left(\frac{T_c}{T^*}\right)} \quad (3)$$

Dobijene vrednosti maksimalnih mogućih ubrzanja su prikazane u tabeli (Tabela 2).

Tabela 2. Vrednosti ubrzanja

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	a_g [m/s ²]	AmQuake
Uniformni raspored	X^+ , exc. pos	1.843	1.843
	X^+ , exc. neg	1.810	1.81
	X^- , exc. pos	1.601	1.6
	X^- , exc. neg	1.625	1.624
	Y^+ , exc. pos	2.171	2.171
	Y^+ , exc. neg	1.603	1.602
	Y^- , exc. pos	1.916	1.916
	Y^- , exc. neg	1.919	1.918
Modalni raspored	X^+ , exc. pos	1.675	1.674
	X^+ , exc. neg	1.428	1.428
	X^- , exc. pos	1.307	1.308
	X^- , exc. neg	1.377	1.377
	Y^+ , exc. pos	1.872	1.872
	Y^+ , exc. neg	1.709	1.709
	Y^- , exc. pos	1.503	1.503
	Y^- , exc. neg	1.445	1.445

7.3 Duktilnost μ

Duktilnost je karakteristika materijala koja se meri stepenom plastične deformacije koju materijal može podneti pre nego što dođe do prelaska između elastičnog i plastičnog deformisanja ili pre nego što dođe do konačnog loma. Duktilnost se računa prema sledećem izrazu:

$$\mu = \frac{d_{max}}{d_y} \quad (4)$$

d_{max} - kapacitet konstrukcije za MDOF sistem;

d_y - pomeranje na granici tečenja za MDOF sistem;

Dobijene vrednosti duktilnosti su prikazane u Tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti duktilnosti

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	μ	AmQuake (μ/Γ)
Uniformni raspored	X^+ , exc. pos	2.986	2.987
	X^+ , exc. neg	2.828	2.828
	X^- , exc. pos	2.693	2.694
	X^- , exc. neg	2.617	2.617
	Y^+ , exc. pos	3.539	3.539
	Y^+ , exc. neg	2.603	2.604
	Y^- , exc. pos	2.867	2.867
	Y^- , exc. neg	2.944	2.944
Modalni raspored	X^+ , exc. pos	3.014	3.013
	X^+ , exc. neg	2.404	2.433
	X^- , exc. pos	2.433	2.432
	X^- , exc. neg	2.439	2.439
	Y^+ , exc. pos	3.347	3.346
	Y^+ , exc. neg	3.171	3.170
	Y^- , exc. pos	2.476	2.476
	Y^- , exc. neg	2.412	2.411

7.4 Faktor prekoračenja OSR

Faktor prekoračenja OSR se izražava preko odnosa F_y/F_{el} ili a_u/a_l .

$$OSR = \frac{F_y}{F_{el}} \quad (5)$$

F_y - granična smičuća sila na idealizovanoj bilineralnoj krivi; F_{el} - smičuća sila pri kojoj se formira prvi plastični zglob.

Faktor prekoračenja (ili faktor bezbednosti) zavisi od različitih faktora koji uključuju karakteristike materijala, vrstu opterećenja, životni vek konstrukcije, krutost tavanica u svojoj ravni, pretpostavke o modeliranju veznih elemenata, veze između konstruktivnih elemenata.

Niže vrednosti faktora prekoračenja merodavne su u pushover analizi, odnosno u našem slučaju merodavna je uniformna raspodela bočnih sila.

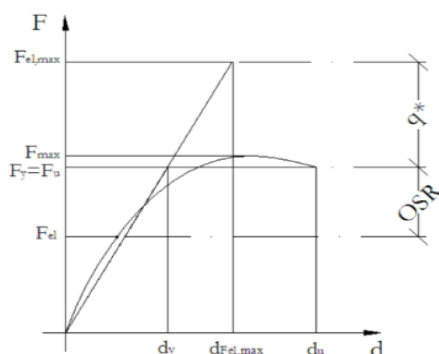
Tabela 4. Vrednosti faktora prekoračenja OSR

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	F _y [kN]	F _{el} [kN]	OSR	AmQuake
Uniformni raspored	X+, exc. pos	2876.59	1,001.07	2.874	2.876
	X+, exc. neg	2939.24	1,132.77	2.595	2.600
	X-, exc. pos	2701.41	989.27	2.731	2.730
	X-, exc. neg	2780.51	968.50	2.871	2.873
	Y+, exc. pos	2827.78	1,120.79	2.523	2.523
	Y+, exc. neg	2838.46	956.66	2.967	2.969
	Y-, exc. pos	3214.45	1,159.34	2.773	2.775
	Y-, exc. neg	3193.94	1,167.86	2.735	2.735
Modalni raspored	X+, exc. pos	2265.58	872.08	2.598	2.599
	X+, exc. neg	2340.36	854.45	2.739	2.740
	X-, exc. pos	2148.98	745.13	2.884	2.886
	X-, exc. neg	2215.35	729.07	3.039	3.045
	Y+, exc. pos	2233.22	842.34	2.651	2.650
	Y+, exc. neg	2191.03	851.64	2.573	2.574
	Y-, exc. pos	2565.9	874.45	2.934	2.936
	Y-, exc. neg	2558.95	884.77	2.892	2.893

7.5 Faktor ponašanja q

Faktor ponašanja predstavlja numerički parametar koji odražava očekivano ponašanje konstrukcije pod dejstvom opterećenja.

Faktor ponašanja q predstavlja približnu vrednost odnosa između seizmičkih sila koje bi delovale na konstrukciju kada bi njen odgovor bio potpuno elastičan ($F_{el,max}$) sa 5% relativnog viskoznog prigušenja i sila koje se koriste u analizi (F_{el}) koristeći uobičajeni linearno-elastični model. Ovaj faktor osigurava zadovoljavajući odgovor konstrukcije (Slika 5). Vrednost faktora ponašanja može da bude različita za različite horizontalne pravce konstrukcije, iako će klasifikacija duktilnosti da bude ista za sve pravce [5].



Slika 5. Parametri za definiciju faktora ponašanja q (F - bazna smičuća sila, d - pomeranje kontrolne tačke)

Za zidane konstrukcije, kao što je to slučaj i kod drugih tipova konstrukcija (armiranobetonske i čelične), u definiciji faktora ponašanja q potrebno je uzeti u obzir ojačanje konstrukcije preko odnosa prekoračenja (OSR). Faktor ponašanja q se tada može definisati na sledeći način:

$$q = \frac{F_{el,max}}{F_{el}} = \frac{F_{el,max}}{F_y} \cdot \frac{F_y}{F_{el}} = q^* \cdot OSR \quad (6)$$

q^* - osnovna vrednost faktora ponašanja koja uzima u obzir disipativnu sposobnost konstrukcije pomnožena sa koeficijentom prekoračenja OSR.

Tabela 6. Vrednosti faktora ponašanja prema EC8-1

Način gradjenja	q
Nearmirani zidovi prema EC6, slučaj niske seizmičnosti	1.5
Nearmirani zidovi prema EC8	1.5 – 2.5
Zidovi sa serklažima	2.0 – 3.0
Armirani zidovi	2.5 – 3.0

Tabela 5. Vrednosti faktora ponašanja q

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	$q^*=\mu$	OSR	q
Uniformni raspored	X+, exc. pos	2.986	2.874	8.582
	X+, exc. neg	2.828	2.595	7.339
	X-, exc. pos	2.693	2.731	7.355
	X-, exc. neg	2.617	2.871	7.513
	Y+, exc. pos	3.539	2.523	8.929
	Y+, exc. neg	2.603	2.967	7.723
	Y-, exc. pos	2.867	2.773	7.950
	Y-, exc. neg	2.944	2.735	8.052
Modalni raspored	X+, exc. pos	3.014	2.598	7.830
	X+, exc. neg	2.404	2.739	6.585
	X-, exc. pos	2.433	2.884	7.017
	X-, exc. neg	2.439	3.039	7.412
	Y+, exc. pos	3.347	2.651	8.873
	Y+, exc. neg	3.171	2.573	8.159
	Y-, exc. pos	2.476	2.934	7.265
	Y-, exc. neg	2.412	2.892	6.976

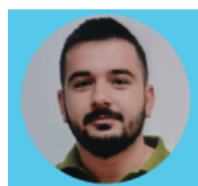
Dobijene vrijednosti faktora ponašanja se kreću u intervalu od 6,6 do 8,9. Veće vrednosti su dobijene za pozitivan pravac delovanja opterećenja. Dobijene vrednosti su veće od vrednosti preporučenih u EC8-1.

8. ZAKLJUČAK

Nakon odrađenog proračuna konstrukcije prema odredbama Evrokodova utvrđeno je da svi elementi zadovoljavaju kriterijume u pogledu nosivosti. Kao što je rečeno na početku rada, jedan od glavnih problema zidanih konstrukcija je mala seizmička otpornost. Zidani zidovi sa većim ukupnim vertikalnim opterećenjem imaju veću graničnu nosivost na delovanje horizontalnih sila. U odnosu na zidove bez otvora, zidovi sa otvorima mogu imati značajno veća pomeranja i manju graničnu nosivost, zavisno od veličine i položaja otvora. Uticaj serklaža kod zidanih zidova sa otvorima je veći od onog kod zidova bez otvora. Zidovi bez vertikalnih serklaža imaju znatno manju graničnu nosivost od istih zidova sa vertikalnim serklažima. Kao što se i do sada događalo, i u ovom slučaju su se oštećenja konstrukcije pojavila u delovima oko otvora, jer prvobitno na tim mestima dolazi do pojave smičućeg loma (pojava dijagonalnih X prslina).

9. LITERATURA

- [1] EN 1996-1-1 : 2005– Evrokod 6 „Proračun zidanih konstrukcija”; Beograd, novembar 2009.
- [2] EN 1998-1 : 2004 – Evrokod 8 „Proračun seizmički otpornih konstrukcija”; Beograd, novembar 2009.
- [3] Stevanović Boško, Lađinović Đorđe: „Osnovni principi i pravila projektovanja, proračuna i izgradnje zidanih zgrada prema EC 6 i EC 8”, Pregledni rad.
- [4] Vukobratović Vladimir: „Materijal za predavanja iz predmeta Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija”.
- [5] Lađinović Đorđe: „Savremene metode seizmičke analize konstrukcija zgrada”, Pregledni rad, 2008.
- [6] Manojlović Dragan: „Materijal za vežbe iz predmeta Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija”.



Kratka biografija: Srđan Bakić – rođen u Banja Luci 1997. godine. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka završio je 2021. godine. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Građevinarstvo – Zidane konstrukcije odbranio je 2024. godine. Kontakt: bakic1997@gmail.com.