

PROJEKTOVANJE ARMIRANOBETONSKIH ZIDOVA ZA UKRUĆENJE PREMA EVROKODU 8**REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS DESIGN ACCORDING TO EUROCODE 8**Aleksandar Maksimović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAĐEVINARSTVO**

Kratka sahržaj – *Evropske norme donose novine kada je u pitanju projektovanje armiranobetonskih zidova u seizmičkim područjima u poređenju sa dosad primenivanom domaćom praksom. U ovom radu dat je pregled osnovnih pravila za dimenzionisanje, armiranje i oblikovanje detalja za lokalnu duktilnost duktilnih zidova, projektovanih za umerenu (DCM) i visoku (DCH) klasu duktilnosti, prema savremenim načelima datim u Evrokodu 8.*

Ključne reči: *Evrokod 8, programirano ponašanje, duktilni zid, kritična zona, lokalna duktilnost,*

Abstract – *European norms brings novelties when it comes to design of reinforced concrete walls in seismic areas, compared to the so far applied national practice. This paper presents an overview of the basic rules for analysis, reinforcement and detailing for local ductility of ductile walls, designed for medium (DCM) and high (DCH) ductility class, according to modern principles given in Eurocode 8.*

Keywords: *Eurocode 8, capacity design, ductile wall, critical region, local ductility, UVOD*

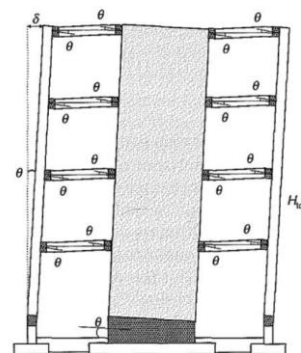
Prema Evrokodu [1, 2], zidovi su vertikalni konstruktivni elementi, izduženog poprečnog preseka, tako da im je odnos stranica najmanje jednak 4. U konstrukcijama se prvenstveno primenjuju u funkciji elementa za horizontalno ukrućenje, kada preuzimaju veći deo horizontalnog opterećenja, koje prihvataju dominantno u svojoj ravni. Savijanje se prihvata koncentrisanjem vertikalne armature u pojaseve zida, formiranjem ivičnih elemenata (koji su jednake ili veće širine od širine rebra), dok se prijem smicanja poverava rebu zida.

Prema Evrokodu 8 [1] zidovi se klasifikuju na duktilne i velike lako armirane zidove, a duktilni na spojene (eng. “coupled” - najmanje dva individualna zida spojena veznim gredama) i nespregnute. U ovom radu razmatrani su samo, kao osnovni tip, nespregnuti duktilni zidovi. Duktilni zidovi (Slika 1), se projektuju sa ciljem

disipacije energije momentnim plastičnim zglobom samo u svojoj osnovi, a u ostatku se projektuju tako da ostanu u elastičnom području rada. Na taj način se obezbeđuje poželjan mehanizam plastifikacije (duktilno ponašanje

krajeva greda omogućeno je duktilnom rotacijom uklještenja duktilnog zida). Da bi ovaj zid razvio visok kapacitet disipacije i visoku duktilnost važno je obezbediti dobro fundiranje, kojim se sprečava rotacija zida kao krutog tela. Takođe, u zoni plastifikacije zida ne treba projektovati otvore, kako se ne bi ugrozila njegova duktilnost.

Pri projektovanju zidova za DCM i DCH, pred projektante se postavljaju mnogobrojni zahtevi i ograničenja: zahtevi po pitanju karakteristika materijala, geometrijska ograničenja, odredbe “programiranog ponašanja” i odredbe koje se odnose na projektovanje detalja [3].

Slika 1. *Duktilni zid* [3]**1. ZAHTEVI ZA MATERIJALE I GEOMETRIJSKA OGRANIČENJA**

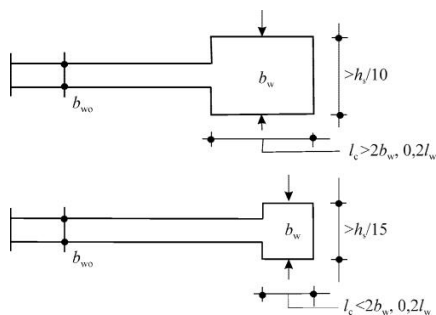
Za primarne seizmičke elemente, generalno, projektovane za klasu duktilnosti M, nije dozvoljena upotreba betona klase niže od C16/20, odnosno betona klase niže od C20/25 kad je u pitanju klasa duktilnosti H.

Za klasu duktilnosti M, u kritičnim zonama, dozvoljava se primena čelika klase B ili C, dok se za klasu duktilnosti H dozvoljava primena čelika samo klase C. Podrazumevano je korišćenje samo rebraste armature, iako se dopušta da poprečna armatura bude i glatka. Navedeni zahtevi se odnose i na zavarene armaturne mreže.

Debljina rebra duktilnog zida b_{w0} treba da zadovolji uslov $b_{w0} \geq \max\{150 \text{ mm}; \square_s/20\}$, pri čemu je h_s čista spratna visina. Minimalna debljina utegnutog ivičnog elementa b_w je, apsolutno, 200 mm, ali ne manje od 1/10 ili 1/15 spratne visine h_s , zavisno od dužine proširenja, prema Slici 2.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Đorđe Ladinović, red. prof.

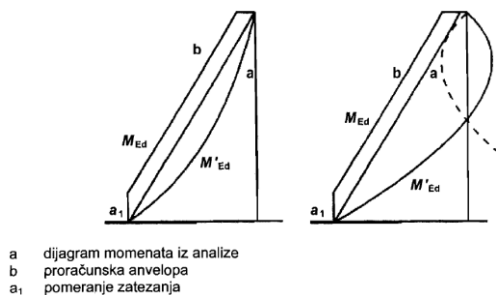


Slika 2. Geometrijski zahtevi - ivična proširenja [1]

2. PRORAČUN UTICAJA OD DEJSTAVA

Kod duktilnih zidova potrebno je proračunom obuhvatiti post-elastične dinamičke efekte i nepouzdanosti proračunskih modela.

Za vitke duktilne zidove (kod kojih je visina bar dva puta veća od dužine, $h_w/l_w > 2$) nepouzdanosti stvarne raspodele momenata savijanja po visini obuhvaćene su proračunskom anvelopom dijagrama momenata savijanja po visini zida, određenoj prema Slici 3. Pomeranje linije zatežućih sila iznosi $a_l = 0.50 \cdot z \cdot \cot \theta$, gde je z krak krak unutrašnjih sila, a θ ugao nagiba pritisnutih štapova, korišćen u analizi smicanja.



Slika 3. Proračunska anvelopa momenata savijanja vitkih zidova [1]

Nepouzdana distribucija momenata znači i nemogućnost određivanja proračunskih vrednosti transverzalnih sila. Da bi se izbegao smičući lom Evrokodu 8 predlaže, konzervativno, skalarno uvećanje projektnih transverzalnih sila koeficijentom ε , pri čemu treba da bude zadovoljeno $1.5 \leq \varepsilon \leq q$.

Za srednju klasu duktilnosti (DCM) se može uvek koristiti vrednost koeficijenta ε od 1.50, dok se za visoku klasu duktilnosti (DCH) koeficijent ε određuje prema izrazu:

$$\varepsilon = q \cdot \sqrt{\left(\frac{Y_{Rd} \cdot M_{Rd}}{q \cdot M_{Ed}}\right)^2 + 0.1 \cdot \left(\frac{S_e(T_c)}{S_e(T_1)}\right)^2} \quad (1)$$

3. NOSIVOST NA SAVIJANJE I SMICANJE

Zidovi se dimenzionišu na momente savijanja i aksijalne sile, proizašle iz seizmičke proračunske situacije, prema odredbama Evrokoda 2 [2]. Pri proračunu nosivosti preseka zida na savijanje uzima se u obzir doprinos vertikalne armature rebra.

Relativna aksijalna sila, određena prema (2) ograničena je na vrednost 0.40 za srednju klasu duktilnosti (DCM), odnosno na vrednost 0.35 za visoku klasu duktilnosti (DCH).

$$v_d = \frac{N_{Ed}}{b_{w0} \cdot l_w \cdot f_{cd}} \quad (2)$$

Kod konstrukcija koje se projektuju za srednju klasu duktilnosti (DCM) nosivost na smicanje zidova se takođe bazira na odredbama Evrokoda 2.

Kada je u pitanju nosivost na smicanje zidova kod DCH konstrukcija potrebna je obimnija analiza. U ovom slučaju potrebno je obezbediti zid od: loma pritisnute dijagonale u rebu usled smicanja, od zatežućeg loma rebra usled smicanja i od loma smicanjem usled klizanja.

Lom po pritisnutoj dijagonali je određen maksimalnom smičućom silom koju betonski presek može da prihvati, tj. mora biti zadovoljen uslov $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$. Vrednost sile $V_{Rd,max}$ se izvan kritične oblasti određuje kao u Evrokodu 2, za nagib pritisnutih kosnika od 45° , te za krak sila jednak 80% dužine zida. U kritičnoj oblasti zida ovako određena maksimalna smičuća sila se redukuje za 60%.

Pri kontroli zatežućeg loma rebra, razmatra se "odnos smicanja" $\alpha_s = M_{Ed}/(V_{Ed} \cdot l_w)$. Ako je ovaj odnos veći od 2.0, potreba za horizontalnom armaturom rebra se određuje saglasno Evrokodu 2, uz usvajanje vrednosti za nagib kosnika i krak sila: $\tan \theta = 1$ i $z = 0.80 \cdot l_w$. Ako je ovaj odnos manji od 2.0, horizontalna armatura u rebu mora da bude određena na način da zadovolji sledeći uslov smičuće nosivosti:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} + 0.75 \cdot \rho_{\square} \cdot f_{yd,\square} \cdot b_{w0} \cdot \alpha_s \cdot l_w \quad (3)$$

Vertikalna armatura rebra mora biti određena tako da zadovolji sledeći uslov:

$$\rho_{\square} \cdot f_{yd,\square} \cdot b_{w0} \cdot z \leq \rho_v \cdot f_{yd,v} \cdot b_{w0} \cdot z + \min N_{Ed} \quad (4)$$

Lom smicanjem usled klizanja mora biti proveren u potencijalnim ravnima klizanja unutar kritične oblasti. Potrebno je da bude zadovoljen uslov $V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$, gde je $V_{Rd,s}$ proračunska vrednost nosivosti na smicanje protiv klizanja, koja se određuje prema izrazu:

$$V_{Rd,s} = V_{dd} + V_{id} + V_{fd} \quad (5)$$

gde su:

V_{dd} - otpornosti usled rada vertikalne armature efektom trna, V_{id} - nosivosti na smicanje kosih šipki pod uglom ϕ u odnosu na potencijalnu kliznu ravan, V_{fd} - nosivost na smicanje trenjem u kliznoj ravni.

4. OBLIKOVANJE DETALJA ZA LOKALNU DUKTILNOST

5.1. Visina kritične oblasti

Visina kritične oblasti iznad nivoa uklještenja zida (uklještenje u temelj ili u krutu podrumsku konstrukciju) se određuje prema $h_{cr} = \max\{l_w; h_w/6\}$, pri čemu je l_w dužina zida, a h_w visina zida. Takođe, uslov je da visina kritične oblasti ne bude veća od (h_s je čista spratna visina, a n ukupan broj spratova):

$$h_{cr} \leq \begin{cases} 2 \cdot l_w \\ h_s, \text{ za } n \leq 6 \\ 2 \cdot h_s, \text{ za } n \geq 7 \end{cases}$$

5.2. Ivični elementi zida

U kritičnoj oblasti zida potrebno je ispuniti zahteve lokalne duktilnosti predstavljene redukovanim koefi-

cijentom lokalne duktilnosti μ_φ , čija je vrednost najmanje jednaka:

$$\mu_\varphi = 2 \cdot q_0 \cdot \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} - 1, \text{ za } T_1 \geq T_c \quad (6)$$

$$\mu_\varphi = 1 + 2 \cdot (q_0 \cdot \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} - 1) \cdot T_c/T_1, \text{ za } T_1 < T_c \quad (7)$$

Ako se se za armiranje koristi armaturni čelik klase B koeficijent lokalne duktilnosti treba uvećati za 50%.

Zahtevana lokalna duktilnost se može obezbediti utezanjem uzengijama ivičnih zona zida.

Za zidove pravougaonog preseka, bez ivičnih proširenja, potrebno je da bude zadovoljen sledeći uslov:

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_\varphi \cdot (v_d + \omega_v) \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_0} - 0.035, \quad (8)$$

gde su:

α – faktor globalne efikasnosti utezanja, ω_{wd} – mehanički zapreminski koeficijent armiranja uzengijama za utezanje preseka, ω_v – mehanički koeficijent armiranja vertikalnom armaturom rebra, $\varepsilon_{sy,d}$ – proračunska dilatacija na granici razvlačenja čelika.

Kod zidova u konstrukcijama projektovanim za DCM, ako je normalizovana aksijalna sila manja od 0.15, ili ako nije veća od 0.20 u analizi koja je sprovedena za 15% umanjen faktor ponašanja, ovaj zahtev ne mora biti analiziran. U tom slučaju, poprečna armatura ivičnih elemenata se može odrediti saglasno odredbama Evrokoda 2.

Dužinom ivičnog elementa koji treba utegnuti l_c , smatra se najmanje deo dužine zida u kojem je dilatacija u betonu veća od ε_{cu2} . Ova dilatacija, pri kojoj se očekuje odvajanje neutegnutog betona naziva se karakteristična dilatacija neutegnutog betona može se uzeti jednakom 3.5‰ (za klase betona do C 50/60).

Položaj neutralne ose x_u , za graničnu krivinu, nakon odvajanja betona van utegnutog jezgra ivičnog elementa se može proceniti na sledeći način:

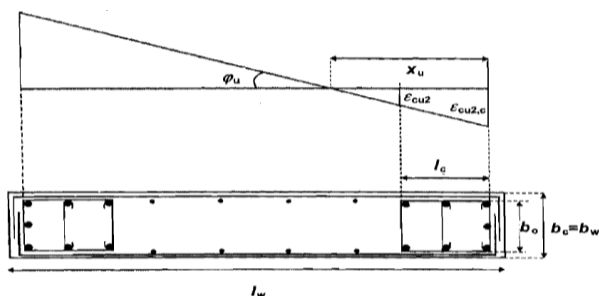
$$x_u = (v_d + \omega_v) \cdot l_w \cdot \frac{b_c}{b_0} \quad (9)$$

Vrednost karakteristične dilatacije utegnutog betona $\varepsilon_{cu2,c}$, može biti određena saglasno odredbi datoj u Evrokodu 2:

$$\varepsilon_{cu2,c} = 0.0035 + 0.1 \cdot \alpha \cdot \omega_{wd}. \quad (10)$$

Sada se minimalna dužina ivičnog elementa može odrediti iz proporcije, prema Slici 4:

$$\min l_c = x_u \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2,c}} \right). \quad (11)$$



Slika 4. Utezanje ivičnog elementa za zidove pravougaonog preseka [1]

Takođe, dužina utegnutog ivičnog elementa ne treba da je manja od $0.15 \cdot l_w$ ili $1.50 \cdot b_w$.

Pri određivanju dužine utegnutog ivičnog elementa, kod zidova sa ivičnim proširenjima, Evrokodom 8 se sugeriše sledeći postupak: pretpostavlja se da je kompletna pritisnuta zona x_u unutar proširenog dela zida. Ukoliko se pretpostavka pokaže tačnom, $x_u \leq l_0$, pritisnuta zona je pravougaonog oblika i slučaj je u potpunosti ekvivalentan analizi ivične zone zida bez proširenja.

U suprotnom, pritisnuta zona je promenljive širine i potrebno je sprovesti eksplicitnu analizu potrebe za utezanjem [3]. U tom slučaju potrebno je odrediti naponsko-dilatacijska stanja za krivinu na početku tečenja armature i za krivinu pri lomu. Koeficijent lokalne duktilnosti se određuje kao $\mu_\varphi = \varphi_u/\varphi_y$, pri čemu su krivina preseka na početku tečenja armature φ_y i krivina preseka za stanje loma φ_u definisane izrazima:

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_{syd}}{d - x_y} \quad \varphi_y = \frac{\varepsilon_{cu2,c}}{x_u} \quad (12)$$

Praktične mogućnosti izostajanja eksplicitne analize, koja može biti zametna, svode se na povećanje dužine proširenja tako da se kompletna pritisnuta zona razvije unutar nje ili na zanemarenje ivičnih proširenja tretiranjem zida kao pravougaonog u širini rebra, što se može smatrati opravdanim samo kada su proširenja mala, tj. ukoliko je zona utezanja većinski unutar rebra zida [3].

Ivični elementi (prošireni ili ne) moraju biti armirani bar minimalnom vertikalnom armaturom, u procentu ne manjem od 0.5%. Maksimalan procenat armiranja ivičnog elementa vertikalnom armaturom je 4%.

Rastojanje između dve susedne podužne šipke pridržane uzengijama nije veće od 200 mm za DCM, odnosno 150 mm za DCH. Preklap uzengija treba da bude takav da svaka šipka podužne armature bude obuhvaćena.

Minimalan prečnik šipki uzengija treba da zadovolji sledeće uslove:

$d_{bw} \geq 6 \text{ mm}$, za DCM

$d_{bw} \geq 0.4 \cdot d_{bL,max} \cdot \sqrt{f_{ydl}/f_{ydw}}$, za DCH.

Razmak uzengija u kritičnim zonama nije veći od (b_0 – minimalna dimenzija utegnutog jezgra preseka, d_{bL} – najmanji prečnik šipki podužne armature):

$s \leq \min \left\{ \frac{b_0}{2}; 175 \text{ mm}; 8.5 \cdot d_{bL} \right\}$, za DCM

$s \leq \min \left\{ \frac{b_0}{3}; 125 \text{ mm}; 6.0 \cdot d_{bL} \right\}$, za DCH.

Minimalna vrednost mehaničkog zapreminskog koeficijenta armiranja za klasu duktilnosti DCM u kritičnoj oblasti iznosi $\min \omega_{wd} = 0.08$, odnosno $\min \omega_{wd} = 0.12$ za klasu duktilnosti DCH.

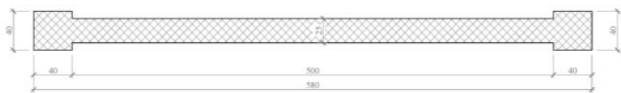
Kod DCH konstrukcija, ivični elementi se obezbeđuju za visinu jednog sprata više, sa najmanje polovinom armature za utezanje u kritičnoj zoni.

Delovi zida van kritične oblasti armiraju se u skladu sa odredbama Evrokoda 2.

Izuzetak su zone zida iznad kritične oblasti u kojima su, u seizmičkoj proračunskoj situaciji, dilatacije u betonu veće od 2‰, kada je je i u ovim zonama neophodno obezbediti minimalni procenat armiranja vertikalnom armaturom od 0.5%.

6. DIMENZIONISANJE KARAKTERISTIČNIH ZIDOVA ZA UKRUĆENJE

U master radu prikazan je detaljno način dimenzionisanja zidova prema zahtevima definisanim u Evrokodu 8, na primeru karakteristitnog zida poprečnog preseka prema Slici 5. Razmatrani zid je složenog poprečnog preseka, formiranog iz ivičnih proširenja i rebra između. Zid je dužine 580 cm i visine 3900 cm. Dimenzionisanje zida je sprovedeno za klasu umerene duktilnosti i klasu visoke duktilnosti. Na Slikama 6 i 7 prikazani se detalji armiranja kritične zone predmetnog zida.



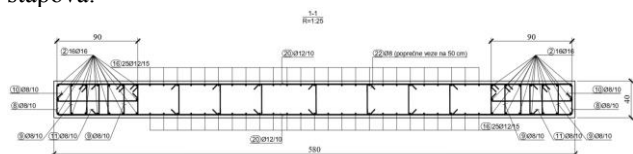
Slika 5. Poprečni presek zida POS Z15

Nivo seizmičkog dejstva, zbog manje vrednosti faktora ponašanja q kojim se redukuje elastični sprektar odgovora, viši je kod DCM nego kod DCH zgrada. To rezultuje većim vrednostima statičkih uticaja kod zida projektovanog za klasu duktilnosti M, nego u slučaju istog zida projektovanog za klasu duktilnosti H. Međutim, zahtevi za obezbeđenje lokalne duktilnosti (sprečavanje krutih lomova) i ograničenje pomeranja su strože postavljeni u slučaju zida projektovanog za DCH.



Slika 6. Usvojena armatura zida u kritičnoj zoni (DCM)

Evrokod 8 postavlja vrlo stroge zahteve kada je u pitanju lom po pritisutoj dijagonali rebra zida. U predmetnom slučaju, tek je povećanjem debljine zida na 40 cm u kritičnoj zoni i usvajanjem klase betona C35/45 ostvarena dovoljna vrednost maksimalne sile smicanja koju presek može da prihvati, po kriterijumu drobljenja pritisnutih štapova.



Slika 7. Usvojena armatura zida u kritičnoj zoni (DCH)

7. ZAKLJUČAK

Armiranobetonski zidovi imaju veliku krutost i nosivost, a ispravnim proračunom, konstrukcijskim oblikovanjem i armiranjem može se postići njihovo duktilno ponašanje. Na taj način zidovi su sposobni trošiti seizmičku energiju, čime se omogućava racionalno projektovanje i građenje.

Za razliku od domaće regulative koja programirano ponašanje zasniva uglavnom na konstruktivnim merama, Evrokod ove konstruktivne mere kvantifikuje, čineći proračun u priličnoj meri detaljnijim.

Posebnu pažnju treba posvetiti konstrukcijskom oblikovanju i armiranju kritičnih zona zidova u kojima se predviđa trošenje seizmičke energije. Pravila za armiranje

i oblikovanje detalja u kritičnoj zoni su kompleksija u poređenju sa dosadašnjom praksom i vode većem utrošku armature i komplikovanijem izvođenju.

Prema Evrokodu 8, dužina utegnuto ivičnog elementa se određuje proračunom, za razliku od domaćeg "Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima" prema kom se dužina ivičnog elementa usvaja kao maksimalno 10% visine poprečnog preseka zida. Takođe, prema Evrokodu 8, uzengije za utezanje ivičnih elemenata se određuju proračunom, dok su u dosadašnjoj praksi ove uzengije, za utezanje obodnog snopa armature, usvajane konstruktivno. Postupak određivanja dužine utegnuto ivičnog elementa, prema Evrokodu 8, je komplikovan i može rezultovati velikim dužinama utegnuto ivičnog elementa, neuobičajenim za dosadašnju praksu. Evrokod 8 detaljno opisuje način utezanja i određivanja dužine utegnuto ivičnog elementa isključivo za simetrično armirane zidove pravougaonog poprečnog preseka, dok su za armiranobetonske zidove sa ivičnim stubastim proširenjima i zidove drugih složenih preseka data samo uputstva koja konceptualno opisuju postupak proračunskog dokaza obezbeđene duktilnosti.

Intenzitet normalne sile u zidu predstavlja faktor koji najznačajnije utiče na povećanje potrebnog nivoa utezanja ivičnih elemenata. Povećanje vertikalne armature zida može značajno da smanji potrebnu količinu uzengija za utezanje (preko faktora M_{Ed}/M_{Rd}) i da utiče na smanjenje dužine ivičnog elementa.

Proračun nosivost na smicanje zidova, kod DCH konstrukcija, obiman je i komplikovan. Evrokod 8 postavlja naročito stroge zahteve kada je u pitanju lom po pritisutoj dijagonali rebra, što može rezultovati velikim debljinama zida u kritičnoj oblasti, neuobičajenim za dosadašnju praksu, a najčešće praćenim i zahtevima za visokom klasom betona. U slučaju velikih vrednosti proračunskih transversalnih sila problematično može biti obezbediti nosivost na smicanje protiv klizanja u potencijalnim ravnima klizanja.

8. LITERATURA

- [1] EN 1998-1: Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Standard, CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [2] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, European Standard, CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [3] Brujić Zoran, "Betonske konstrukcije u zgradarstvu prema Evrokodu", Novi Sad, 2021.

Kratka biografija:



Aleksandar Maksimović rođen je u Užicu 1991. godine. Osnovne akademske studije građevinarstva, smer konstrukcije, završio je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2016. godine. Master rad iz oblasti Građevinarstvo - seizmička analize konstrukcija odbranio je na Fakultetu tehničkih nauka 2021. godine.