

**СЕЙЗМИЧКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ СТУБОВА МОНТАЖНИХ ЈЕДНОСПРАТНИХ  
КОНСТРУКЦИЈА ХАЛА ПРЕМА ЕВРОКОДУ 8****SEISMIC DESIGN OF COLUMNS OF PRECAST SINGLE-STOUREY HALL STRUC-  
TURES ACCORDING TO EUROCODE 8**

Томислав Терзић, Факултет техничких наука, Нови Сад

**Област – ГРАЂЕВИНАРСТВО**

**Апстракт** – Радом је представљено сеизмичко пројектовање конзолног армираног бетонског стуба као изолованог сеизмичког елемента једне типске монтажне једноетажне конструкције хале. Као резултат спроведене анализе, дефинисани су критеријуми оптималног сеизмичког пројектовања на основу препорука датих у одговарајућим деловима Еврокода.

**Кључне речи:** „SDOF” систем; Еврокод 8; P-Δ ефекти; Капацитет деформације

**Abstract** – This paper presents the aseismic design of a cantilever reinforced concrete column as an isolated seismic element of a typical precast one-story hall structure. As a result of the conducted analysis, criteria for optimal seismic design were defined based on the recommendations given in the corresponding parts of the Eurocode.

**Keywords:** SDOF system; Eurocode 8; P-Δ effects; Deformation capacity

**1. УВОД**

Са идејом да се у одређеном броју корака покрије широки интервал практичне примене типског конзолног сеизмичког стуба монтажне конструкције хале зглобно везаног у врху у два главна правца, анализиран је утицај комбинација улазних параметара на основу којих су симулирани пројектни услови и спроведено димензионисање критичних области предметних стубова. За релевантна дејства при димензионисању претпостављена су:

- Гравитационо оптерећење - сведено на стуб са припадајуће површине кровне равни;
- Сеизмичко дејство – у “x” и “y” правцу.

Анализа је спроведена у три корака:

- Анализа минималне димензије стуба. Спроведена је на основу утицаја релевантних критеријума, који се по величини утицаја разликују за изабране класе дуктилности, па је анализа спроведена за све три класе дуктилности: DCL, DCM, DCH.
- Димензионисање пресека. На основу резултата претходне анализе, одређене су потребне количине арматуре.

**НАПОМЕНА:**

Овај рад проистекао је из мастер рада, чији ментор је био др Зоран Брујић, ванр. проф.

- Верификација перформанси конзолног стуба. Резултати димензионисања су затим верификовани нелинеарном статичком „pushover” анализом.

Као резултат спроведених анализа, дефинисани су критеријуми оптималног сеизмичког пројектовања.

**2. АНАЛИЗА**

Анализа је спроведена за велики број комбинација улазних параметара варираних на следећи начин:

- Маса у врху стуба ( $M$ ): ..... 25, 50, 75, 100, 125, 150t
- Висина стуба ( $H$ ): ..... 4, 6, 8, 9, 12, 15, 18m
- Реф. макс. убрзање тла ( $a_{gr}$ ): ..... 0.1g, 0.2g, 0.3g
- Фактор понашања ( $q$ ): ..... 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5
- Класа дуктилности: ..... DCL; DCM; DCH

Резултати анализе су добијени уважавањем следећих захтева, дефинисаних у Еврокоду 8[4]:

1. Допуштено укупно (косо) померање  $d$ , није веће од  $0.02H$ , за неконструктивне елементе који не утичу на деформацију конструкције; §4.4.3.2 у [4].
2. Максимални коефицијента армирања је 4% површине бетонског пресека; §5.4.3.2.2 у [4].
3. Максимална вредност релативне аксијалне силе не прелази 0.65 за средњу или 0.55 за високу дуктилност; §5.4.3.2.1 и §5.5.3.2.1 у [4].
4. Захтеви везани за ефекте другог реда постављени по коефицијенту  $\theta = G \cdot d / (S \cdot H)$ , где је  $G$  гравитациона сила,  $d$  померање, а  $S$  хоризонтална сила:
  - a. Критеријум обавезујућег увођења у прорачун P-Δ ефеката при  $\theta > 0.1$ ; §4.4.2.2(2) у [4]
  - b. Критеријум максималног дозвољеног удела ефеката другог реда ( $\theta \leq 0.3$ ); §4.4.2.2(4)П у [4]
  - c. Геометријских ограничења (§5.4.1.2.2 у [4]), по којим, за класе дуктилности DCM и DCH, минимална димензија пресека конзолног стуба мора бити бар десетина висине стуба ако је  $\theta > 0.1$ .

Мотив спроведене анализе се односи на оптимизацију утрошка материјала, па се рад заснива на критичкој анализи наведених критеријума, али и недоумица које текст Еврокода 8 оставља.

Верификација резултата спроведена је нелинеарном статичком „pushover” методом, са циљем да се оправдају разматрања и потврде закључци добијени применом линеарно-еластичне анализе:

1. Детаљнија анализа критичне зоне стуба;
2. Оцена резерве носивости и деформација;

3. Као алтернатива прорачуну базираном на линеарно-еластичној анализи и фактору понашања ( $q$ ).

Капацитетна резерва пресека је доказивана на основу анализе процењених величина деформација које одговарају циљном померању и величина деформација које одговарају граничном стању значајног оштећења “SD” (*Significant Damage*).

### 2.1. Мин. димензија стуба и анализа резултата

У првом кораку, анализирани су утицаји из 750 комбинација улазних параметара, а на основу којих су дефинисани минимални габарити критичних области стубова (дисипативних зона). Оптималне димензије дисипативних зона су дефинисане на основу упоредне анализе утицаја критеријума изолованих и релевантних за ову врсту анализе уз доследно поштовање препорука Еврокода 8. На графику 2. је приказан део резултата анализе.

Генерални закључак је да су, са становишта утрошака, најјекономичније димензије бетонског пресека стубова добијене на основу анализе граничног стања носивости, а димензионисани по правилима DCL класе дуктилности, без изузетка, у свих 750 комбинација.

Као последица усвајања минималне димензије према DCL класи дуктилности, али при референтним максималним убрзањима тла која не одговарају условима ниске сеизмичности (0.2g или 0.3g), евидентирана је неочекивана појава “пада” минималне потребне димензије са повећањем висине елемента. Појава је резултат веће брзине пада вредности убрзања /силе са својственим периодом на пројектном спектру одговора. Карактеристична илустрација је представљена на графику 1.

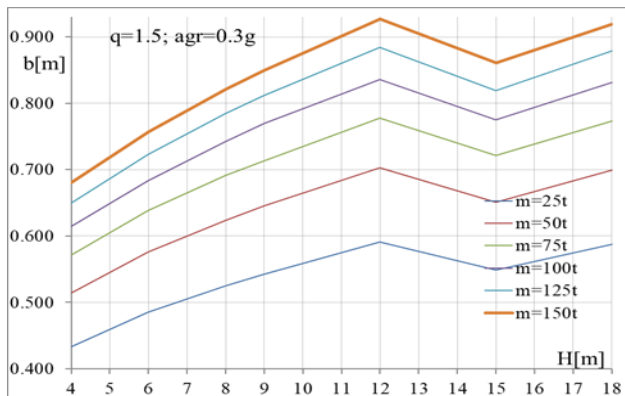


График 1: Минималне димензије пресека; DCL анализе

Границом  $\theta = 0.2$  је дефинисана потреба за обавезним ревидирањем (додатном контролом) резултата димензионисања извршеног на основу линеарно-еластичне анализе. За пресеке DCL класе евидентира-но је прекорачење те границе у следећим случајевима:

- Сви стубови при  $a_{gr} = 0.1$ ;
- При  $a_{gr} = 0.2$ , за висине стубова од 12, 15 и 18m;
- При  $a_{gr} = 0.3$ , за висине стубова од 15 и 18m.

Пресеци виших класа дуктилности који захтевају обавезну верификацију резултата забележени су само у појединим комбинацијама и то при висинама стубова до 6 метара.

Критеријум геометријских ограничења је доминантни критеријум анализе минималних димензија пресека за DCM и DCH класу. Мање димензије су показатељ да се пресек димензионише сагласно препорукама за DCL класу дуктилности. Због геометријског ограничења, дозвољени габарити стубова су по правилу већи од габарита стубова пројектованих у доскорашњој пракси али често и значајно већих димензија од стубова пројектованих за DCL класу. На графику 2. су упоредно дате вредности минималних димензија пресека стубова DCL класе и пресека виших класа дуктилности, у функцији фактора понашања ( $q$ ).

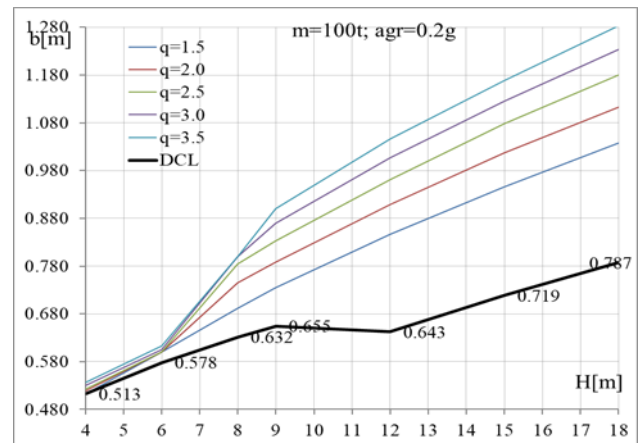


График 2: Минималне димензије пресека при  $a_{gr}=0.2g$  и  $m=100t$

Критеријум по релативној аксијалних сили, није критичан ни у једном од разматраних случајева.

Критеријум максималног допуштеног удела ефеката другог реда је евидентиран у комбинацијама кратких стубова са факторима понашања ( $q=2.5$ ) и ( $q=3.5$ ):

- ( $a_{gr}=0.1g$ )( $q=2.5$ )( $H=4m$ )( $m=100t$ ; 125t; 150t),
- ( $a_{gr}=0.1g$ )( $q=3.5$ )( $H=4m$ )( $m=75t$ ; 100t; 125t; 150t),
- ( $a_{gr}=0.1g$ )( $q=3.5$ )( $H=6m$ )( $m=150t$ ).

### 2.2 Димензионисање и анализа резултата

Претпостављено је да је пресек симетрично армиран, тачно потребном количином арматуре, усвојена арматура је представљена количински, не и по пречнику или по броју усвојених шипки.

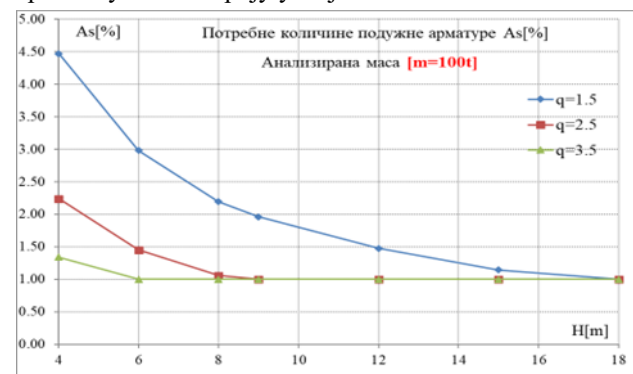


График 3: Коэф. армирања пресека (DCM,  $a_{gr}=0.3g$ )

У анализи је евидентирано прекорачење максималног дозвољеног коефицијента армирања подужном арматуром од 4% само у случају најкраћих стубова, при пројектовању за дуктилно понашање ( $H=4m$ ,  $a_{gr}=0.3g$ ), DCL и DCM.

Фактор понашања  $q = 1,5$  резултира највећим процентом армирања подужном арматуром у свим анализираним комбинацијама (пре свега, због мањих пресека), док фактор понашања од 3,5 резултира најмањом потребом за арматуром. На графику 3 су представљени карактеристични резултати укупне потребе за подужном арматуром пресека DCM класе, за  $a_{gr}=0.3g$ .

Попречна арматура је за све три класе дуктилности усвојена сагласно једначини механичког коефицијента армирања  $\omega_{wd}$  (5.4.3.2.2 у [4]):

$$\alpha * \omega_{wd} \geq 30 * \mu_{\phi} * \nu_d * \epsilon_{sy,d} * \frac{b_c}{b_0} - 0.035 \quad (1)$$

Одређена је искључиво потребна површина узенгија на критичној области стуба, не и број ножица и величина профила. Усвојена је константна вредност за коефицијент ефикасности утезања од 0,55.

У табели 1 представљена је тенденција резултата при варирању вредности улазних параметара.

Табела 1: Тренд раста/пада вредности резултата са растом улазних параметара

	$d_r$	$b_{min}$	$A_s$	$A_{uz}$
$[M] \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
$[q] \uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow \uparrow$	$\uparrow$
$[a_{gr}] \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
$[H] \uparrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow \uparrow$	$\downarrow$

### 2.3 Нелинеарна статичка анализа

Нелинеарна статичка анализа је спроведена за укупно 14 комбинација резултата линеарне анализе, на основу претходно дефинисане геометријске нелинеарности и утицаја статичког бочног оптерећења у комбинацији са гравитационим оптерећењем. Област критичне зоне је моделирана “Fiber P-M-M” елементом, за сваку од комбинација засебно, са дужином критичне зоне која је упоредива са димензијом пресека а срачуната на основу препорука из EN1998-3 [5]:

$$L_{pl} = \frac{L_v}{30} + 0.2h + 0.11 * \frac{d_{bl} * f_y [MPa]}{\sqrt{f_c [MPa]}} \quad (2)$$

Усвојен је “Mander”-ов модел  $\sigma$ - $\epsilon$  везе за бетон, дефинисан за бетон класе C30/37 (график 4).

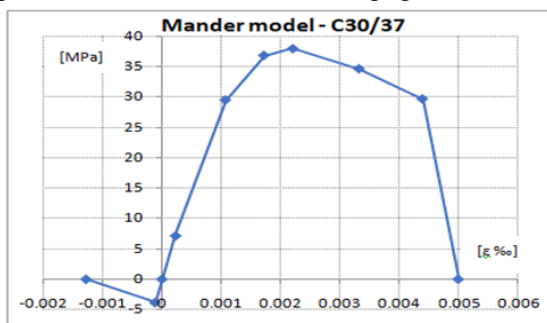


График 4: Mander-ов модел  $\sigma$ - $\epsilon$  везе

На основу анализираних ревидираних комбинација потврђена је већа носивост пресека димензионисаних за DCM класу дуктилности наспрам пресека димензионисаних за DCL класу (график 5.2), изузев комбинације за стуб висине 6m, масе 150 тона при  $a_{gr}=0.3g$ , где је носивост пресека DCL класе дуктилности већа од носивости пресека DCM класе (график 5.1; са  $\theta$  је обележена ротација пластичног

зглоба). Анализом оптималног решења закључено је да би у ситуацијама у којима се DCL пресек са носивошћу и крутошћу нађе изнад комбинације „близанца“ DCM пресека, вероватно указивало да је DCM класа пресека рационалније решење.

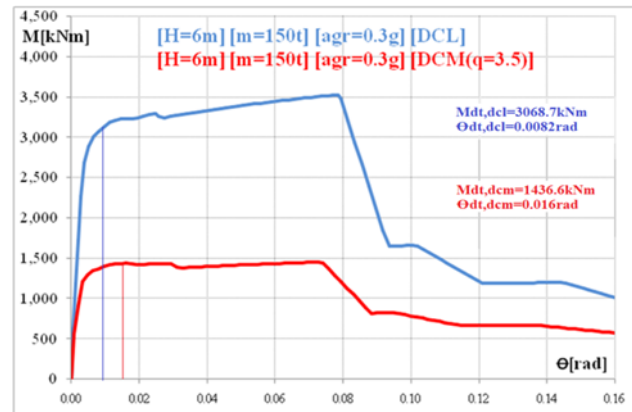


График 5.1: Функција момент-ротација за пресек пластичног зглоба – специфичан случај

У свим анализираним комбинацијама нелинеарне статичке анализе, евидентирани су одговарајуће резерве капацитета деформације конзолних елемената.

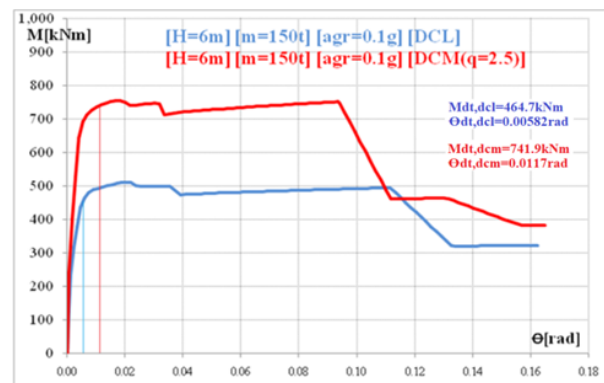


График 5.2: Функција момент-ротација за пресек пластичног зглоба – карактеристичан случај

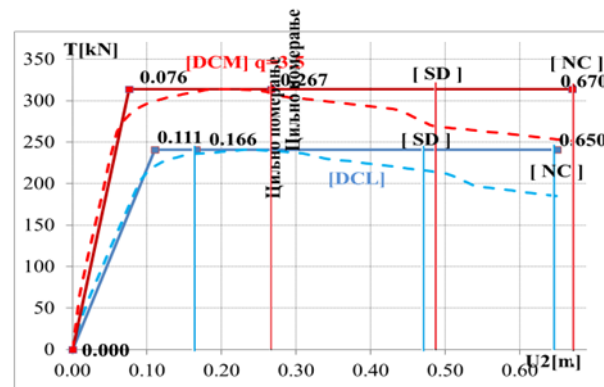


График 6.1: Крива капацитета за комбинацију  $H=12m$ ,  $m=150t$ ,  $a_{gr}=0.3g$

На графицима 6.1 и 6.2 приказане су криве капацитета за једну анализирану комбинацију, димензионисану према DCL и DCM класи, у свом реалном и идеално-еластично-перфектно-пластичном облику, са учртаним величинама деформација које одговарају циљном померању и релевантној вредности деформације „SD” граничног стања а на основу којег се може проценити резерва капацитета носивости и деформације анализираних елемената.

Вредност капацитета ротације граничног стања “SD” ( $\theta_{um,sd}$ ), може се усвојити као  $\frac{3}{4}$  вредности капацитета  $\theta_{um}$  за гранично стање “NC” (§A.3.2.2 у [5]):

$$\Theta_{um,sd} = 0.75 * \Theta_{um} \quad (3)$$

Формула капацитета ротације граничног стања “NC” (Near Collapse) представљена је изразом:

$$\Theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} * 0.016 * (0.3)^v * \left[ \frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} * f_c \right]^{0.225} * \left( \frac{L_v}{h} \right)^{0.35} * 25^{\alpha} \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} * 1.25^{100\rho_d} \quad (4)$$

Код ревидираних комбинација DCL класе, капацитет деформације је 2,5 до 4,5 пута већи од вредности деформације дефинисане „циљним померањем”, док је за пресеке DCM класе однос у интервалу од 1,5 до 3,0.

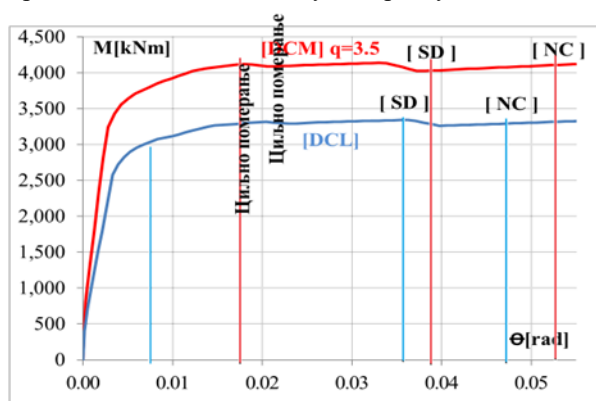


График 6.2: Зависност момент-кривина за комбинацију  $H=12m, m=150t, a_{gr}=0.3g$

Илустрацијом на графику 7 представљени су резултати комплетне анализе минималних димензија пресека у функцији висине стуба, са назначеним (црвене тачке) комбинацијама ревидираним нелинеарном анализом.

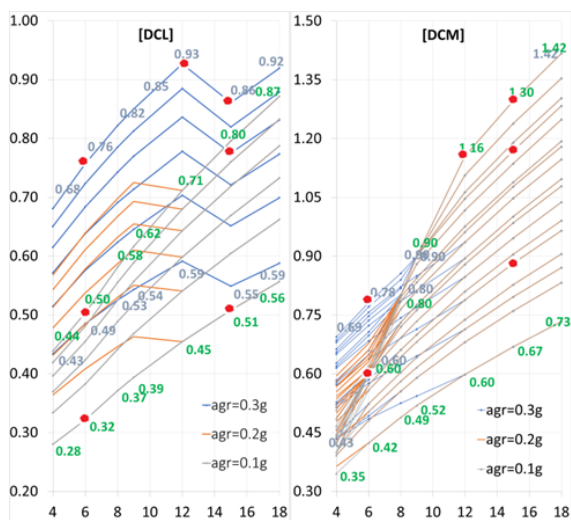


График 7: Илустрација резултата анализе и одговарајућих ревидираних комбинација

### 3. ЗАКЉУЧЦИ – КРИТЕРИЈУМИ ОПТИМУМА

1. Критеријум геометријских ограничења је доминантан критеријум у анализи минималних димензија пресека. Ефекат критеријума је показан упоредном анализом за DCL и за DCM ( $q=1.5$ ) класу.

2. На основу спроведене анализе препоручује се имплементација ефеката другог реда на комплетном

домену анализе, независно од вредности коефицијента  $\theta$ .

3. Најекономичнији пресеци са становишта бруто бетонског пресека су пресеци одређени за DCL класу дуктилности ( $q=1.5$ ).

4. Критеријум оптимума, поред минималне димензије стуба мора узети у обзир и носивост и крутост конзолног стуба, као ону најмању од упоређених комбинација димензионисаних сагласно различитим класама дуктилности.

### 4. ЛИТЕРАТУРА

[1] Ercolino, M., Petrone, C., Magliulo, G., Manfredi, G.: Seismic design of single-story precast structures for P-Δ effects, ACI Structural journal, 115(4):943-955, 2018.

[2] Brujić, Z.: Betonske konstrukcije, Deo 1: Armiranobetonski elementi i Deo 2: Višespratne zgrade, FTN Novi Sad, 2023.

[3] CEN: 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, 2004.

[4] CEN: 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, 2004.

[5] CEN: EN 1998-3: Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, European Standard, CEN – European Committee for Standardization, 2004.

[6] CSI Analysis Reference Manual: SAP2000, Computers and Structures, Inc. (CSI), Version 19, 2016

[7] Radimpex Tower 8: Application for static and dynamic structural analysis, concrete, steel and timber design, An instruction manual for operating with the program, update for build 8419.

[8] Fardis, M., N.: Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings, Based on EN-Eurocode 8, Springer, 2009.

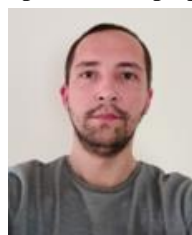
[9] Avramidis, I., et al.: Eurocode-Compliant Seismic Analysis and Design of R/C Buildings: Concepts, Commentary and Worked Examples with Flowcharts, Springer, 2016.

[10] Fardis, M. et al.: Designers’ Guide to EN 1998-1 and EN 1998-5 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. General rules, seismic actions, design rules for buildings, foundations and retaining structures, Thomas Telford, 2005.

[11] Norme tecniche per le costruzioni: Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 42 del 20 febbraio 2018, Repubblica Italiana.

[12] Терзић Т.: Сеизмичко пројектовање стубова монтажних једносратних конструкција хала према ЕВРО-КОДУ 8, Мастер рад, Факултет техничких наука, Нови Сад.

### Кратка биографија:



**Томислав Терзић** рођен је у Краљеву 1991.год. Основне академске студије завршио је 2020 год. на Факултегу техничких наука у Новом Саду. Мастер рад из области Сеизмичка анализа конструкција одбранио је 2023 год. под менторством др.Зорана Брујића.

контакт: [terzictt@gmail.com](mailto:terzictt@gmail.com)