

**PRORAČUN ČELIČNOG SANDUČASTOG MOSTA RASPONA 70+100+70M I
UPOREDNA ANALIZA VERTIKALNOG SAOBRAĆAJNOG OPTEREĆENJA****CALCULATION OF 70+100+70M STEEL BOX BRIDGE AND COMPARATIVE
ANALYSIS OF VERTICAL TRAFFIC LOAD**

Milan Nikolić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – GRAĐEVINARSTVO

Kratka sadržaj – U radu je prikazan statički i dinamički proračun mosta raspona 70+100+70m, kao i dimenzionisanje elemenata. Most je čelični, kvaliteta S355 i sastoji se od elemenata, kolovozne grede sandučastog poprečnog preseka sa dva srednja oslonca, čelične rešetke sastavljene od I-profila i CHS-profila. Proračun je sproveden u softveru AxisVM X6 sa usvojenim linijskim elementima. Provere nosivosti preseka i stabilnosti ploča sandučastog preseka urađeni su „ručnim“ putem. Rezultati provere upoređeni su sa rezultatima „softverskog“ proračuna. Takođe je odrađena provera nosivosti i krutosti veza i upoređena sa „softverom“ IDEA StatiCA. Prikazani su i radionički crteži i sklopovi urađeni u softveru Advance Steel.

Ključne reči: Čelični most, AxisVM, Advance Steel, Dlubal RFEM

Abstract – This paper presents the static and dynamic calculation of the bridge with a span of 70+100+70m, and the dimensioning of the elements. The bridge is made of steel, quality S355, and consists of elements, road beams with a box cross-section, and the two middle supports are steel gratings made of I-profiles and CHS-profiles. The calculation was performed in AxisVM X6 software, in which line elements were adopted. The load-bearing capacity of the section was checked "manually", including the stability check of the slabs of the box section. That check was compared to a "software" calculation. The bearing capacity and stiffness of the connections were also checked and compared with IDEA StatiCA "software". Workshop drawings and assemblies made in Advance Steel software are also shown.

Keywords: Steel bridge, AxisVM, Advance Steel, Dlubal RFEM

1. UVOD

Projektni zadatak podrazumevao je premošćavanje prirodne prepreke, doline 60m, na trasi E-761 koja se izmešta zbog izgradnje autoputa. Kao rešenje premošćavanja izabran je čelični sandučasti nosač zbog svoje efikasnosti u prenosu opterećenja spram utroška materijala i lakoće montaže.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Andrija Rašeta, vanr. prof.

Preliminarno usvajanje veličine i oblika sandučastog nosača kolovozne grede sprovedeno je prema dosadašnjim preporukama iz literature [1,2]. Ostatak elemenata je usvojen na osnovu buduće približne statičke analize i uticaja koji utiču na izvijanje elemenata.

Posle usvojenih preseka, urađeno je modeliranje mosta u softveru AxisVM, a nanošenje opterećenja prema Evrokodu 1990 i Aneksu A1 i A2. Kombinacije opterećenja podrazmevale su i uključivanje imperfekcija u obliku opterećenja.

Zatim je odrađena provera nosivosti, uz dokaz stabilnosti, najopterećenijih stubova rešetke i grede na koju naleže most srednjim osloncima na dužini 70m od oporaca.

Dokaz nosivosti poprečenog preseka kolovozne grede urađeni su proverom izbočavanja limova prema 1993-1-5.

Poračun je podrazumevao i proračun nosivosti par karakterističnih veza, u zavarenoj izvedbi i izvedbi sa zavrtnjevima prema 1993-1-8.

Obimnost broja elemenata za izradu, predstavljen je sklopom na koji naleže kolovozna greda i njegovim radioničkim crtežima. Kolovozna greda predstavljena je karakterističnim segmentom koji se ponavlja, i razlikuje se ukrućenjem na osloncu.

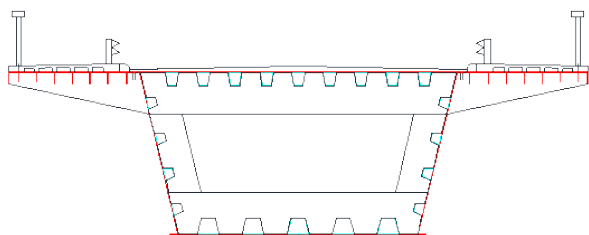
2. OPIS, MODEL KOSNTRUKCIJE I OPTEREĆENJA

Statički sistem mosta je kontinualna greda preko tri polja 70+100m+70m, zglobno oslonjena na oporce, krajnje betonske oslonce dok su srednji oslonci vertikalne rešetke.

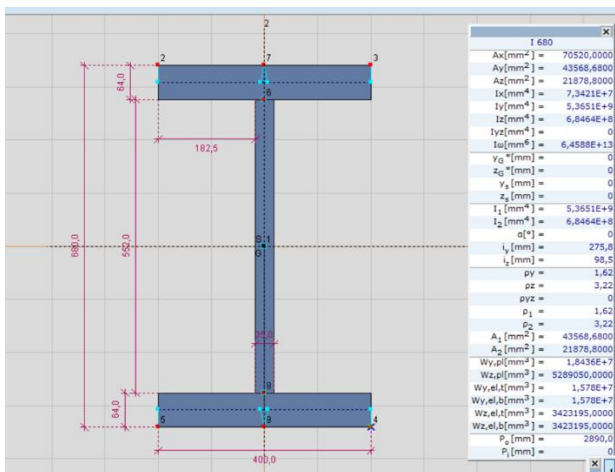
Prema vrsti pravca most je klasifikovan kao most u pravcu.

Kolovozna greda je sandučasti segment koji se ponavlja na svakih 4m, dok na osloncima taj segment ima vertikalno ukrućenje na 2m, Slika 1. Most je konstantnog poprečnog preseka. Gornja ploča je ortotropna ploča sa trapeznim ukrućenjima, torziona kruta. Donja ploča je takođe istog tipa, kao i bočne. Konzole kao pešačke staze su takođe ortotropne ploče ali sa torziona mekim ukrućenjima, u obliku pravih flakova. Debljine gornjih limova su 22mm, a bočnih 16mm. Ukrućenja donje ploče su debljine 9mm, a gornjih 8mm. Vertikalni limovi, ukrućenja, su debljine 12mm.

Greda na koju se oslanja greda sa tri poprečna oslonca je I profila, 680x400 i kruto je vezana na zakošene, vertikalne stubove, Slika 2.

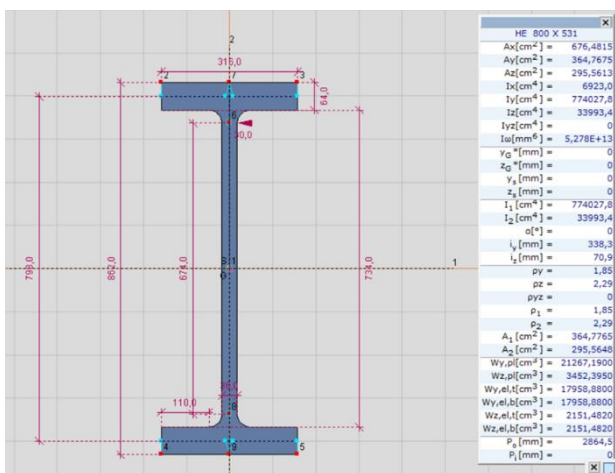


Slika 1. Poprečni presek mosta



Slika 2. Greda za oslanjanje

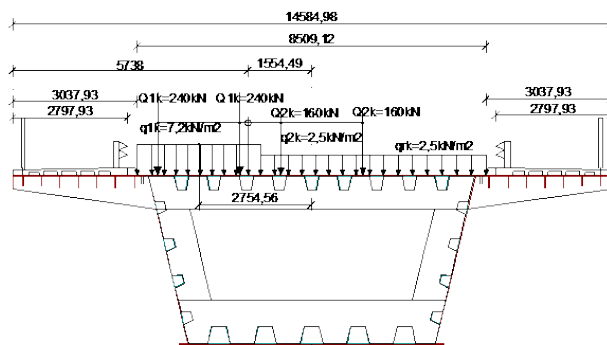
Stubovi su HE I profili 800x531. Spajani su vertikalnim limovima u rebro i nožici da bi se omogućila montaža i nastavak rešetke, Slika 3.



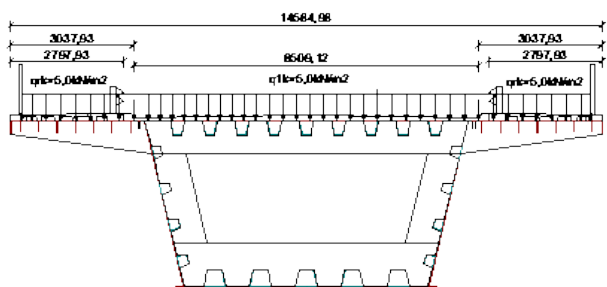
Slika 3. Stubovi

Analiza opterećenja urađena je u skladu sa standardom Evrokod 1990/A2 i 1991: sopstvena težina, automatski generisana u softveru AxisVM x6, dodatno stalno opterećenje od asfaltne zastora i instalacija, sneg, vetar, sile kočenja. Saobraćajno opterećenje je modelirano kao linijsko rezultat je raspodele iz standarda, LM1 Slika 4. Zatim, opterećenje od pešačke navale, LM4 Slika 5. Ta opterećenja su uvrštena u grupe saobraćajnih opterećenja prema 1991-2, 4.5.1. Grupe saobraćajnih opterećenja su komponente kombinacija opterećenja prema EN 1990/A2.

Seizmičko opterećenje je zadato preko elastičnog spektra odgovora faktora ponašanja $q=3,5$ i $a_{gR}=0,2g$. Razmatrana su dva horizontalna i vertikalni pravac. Prethodno je urađena modalna analiza za vrednost mase $G+0,2 \cdot LM1$.

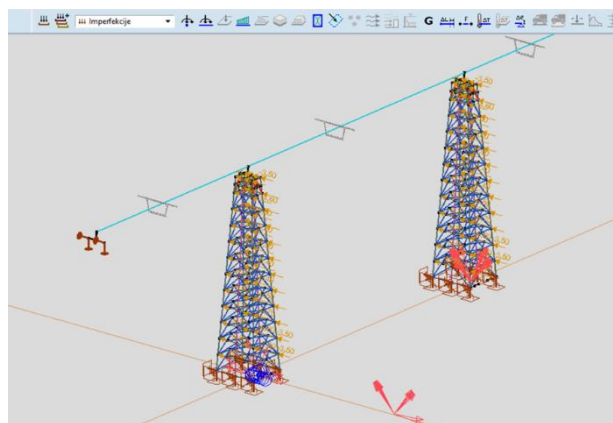


Slika 4. LM1 opterećenje



Slika 5. LM4 opterećenje

Kako čelična kosnrukcija poseduje nesavršenosti izvođenja i proizvodnje, njih standard prepoznaje kao imperfekcije, globalne i lokalne, Slika 6. Globalne imperfekcije zakošenja su razmatrane kao opterećenje horizontalnim silama u nivoima horizontalnih spregova a sve prema standardu Evrokod 3 i uslovu $\alpha_{cr}=F_{cr}/F_{Ed}>15$. U slučaju posmatrane konstrukcije mosta $\alpha_{cr}=10,21$.



Slika 6. Imperfekcije

Prema zahtevu standarda, most je podvrgnut dinamičkom opterećenju preko Time history analize, tj. zadavanju pomeranja oslonaca putem akcelorograma veštački generisanog od Evrokod spektra i tri realna zemljotresa.

2. DIMENZIONISANJE ELEMENATA

Kako je konstrukcija zahtevala uvođenje imperfekcija, sa linearno elastičnom analizom koja zanemaruje materijalnu nelinearnost i zasniva se na idealno elastičnoj vezi između napona i dilatacija, korišćena je Globalna analiza II reda, koja uzima u obzir globalne imperfekcije

(P-Δ), dok se lokalne imperfekcije ne uvode ali se kontrolišu preko kontrole pojedinačnih elemenata na izvijanje, Slika 7.

Model i imperfekcije		
Globalne i lokalne imperfekcije	Samo globalne imperfekcije	Bez imperfekcija*
Metoda analize		
Globalna analiza II reda	Globalna analiza II reda	Globalna analiza I reda
Kontrole nosivosti		
Kontrola nosivosti preseka	Kontrola nosivosti stubova na izvijanje Dužina izvijanja: $L_{cr} = h$	Kontrola nosivosti stubova na izvijanje Dužina izvijanja: $L_{cr} = \beta h; \beta > 1$
* Imperfekcije se ne uzimaju u obzir samo pri proračunu stabilnosti stubova. Kada se određuju uticaji u gredama i vezama greda-stub globalne imperfekcije treba da se uzmu u obzir (na primer preko ekvivalentnih horizontalnih sila) kada kriterijum dat izrazom (4.2) to nalaže.		

Slika 7. Tip analize [3]

Urađen je proračun i kontrola nad najopterećenijim stubom u dnu rešetke kao i najvišem stubu u poslednjem segmentu za montažu koji kombinuje normalnu silu i momenat savijanja prenet sa grede na koju se oslanja kolovozna greda. Nosivost na pojedinačne otpornosti je zadovoljena, M_{Rd} , N_{Rd} , V_{Rd} .

Svi elementi su pretpostavljeni kao klase 1, što je i potvrđeno prilikom proračuna, Slika 8. Time se omogućava plastifikacija preseka za seizmičke kombinacije. Takođe, sve vrste izvijanja su u dozvoljenim granicama, fleksiono, torziono, bočno torziono izvijanje i interakcija normalna sila-savijanje-fleksiono izvijanje. Proračun je upoređen i sa proračunom softvera, Slika 9.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{L1} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{L1} \cdot M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{L1} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{L1} \cdot M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{676}{1,0 \cdot 2,50E + 04/1,0} + 0,35069 \cdot \frac{2293 + 0,0}{1,0 \cdot \frac{6532,00}{1,0}} + 0,54038 \cdot \frac{79 + 0,0}{1,0 \cdot 1877,61/1,0} \leq 1$$

$$\frac{676}{1,0 \cdot 2,50E + 04/1,0} + 0,35069 \cdot \frac{2293 + 0,0}{1,0 \cdot \frac{6532,00}{1,0}} + 0,79884 \cdot \frac{79 + 0,0}{1,0 \cdot 1877,61/1,0} \leq 1$$

$$0,284 < 1$$

$$0,184 < 1$$

Slika 8. Zadovoljenje prema Globalnoj analizi II reda

Kontrola nosivosti kolovozne grede odrađena je za dva preseka, na srednjem osloncu i u sredini srednjeg polja, uz kontrolu dejstva na poprečne sile od uticaja koji se dobijaju prilikom lansiranja prednjeg dela mosta, na dužini od 30m.

Kontrola je vršena tako što se svi pritisnuti delovi ploča proveravaju na izbočavanje. Vitkost svakog dela ploče, ukrućenja je upoređivana sa kriterijumom SRPS EN 1993-1-5, 4.4(2).

Delovi koji imaju veću vitkost, uklanjani su iz poprečnog preseka korišćenjem koeficijenta redukcije ρ . Zatim je vršena provera čistog izbočavanja (površinsko ponašanje izbočavanja ploče), stubno ponašanje, i interakcija površinskog i stubnog ponašanja. Korišćen je kriterijum za ortotropne ploče jer sve ploče imaju više od dva ukrućenja u pritisnutom pojasu.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + f_{yy} \cdot \frac{|N_{Ed}|}{\chi_y \cdot N_{pl,Rd}} \right) = 0,4 \cdot \left(1 + 0 \cdot \frac{|(-6,1616 \cdot 10^5)|}{1,00 \cdot 2,3624 \cdot 10^7} \right) = 0,4$$

$$k_{zz} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,4 = 0,24 \quad \text{Table Annex B.1}$$

$$k_{zz} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,601 = 0,361$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + f_{zz} \cdot \frac{|N_{Ed}|}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd}} \right) = 0,601 \cdot \left(1 + 0 \cdot \frac{|(-6,1616 \cdot 10^5)|}{0,95 \cdot 2,3624 \cdot 10^7} \right) = 0,601 \quad \text{Table Annex B.1}$$

$$\chi_y = \min \left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^2}}; 1 \right) = 1,00 \quad (6.49)$$

$$\chi_z = \min \left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}}; 1 \right) = 0,95 \quad (6.49)$$

$$\eta_{NMBuck1} = \frac{|N_{Ed}|}{\chi_y \cdot A \cdot f_y} + k_{yy} \cdot \frac{|M_{y,Ed}|}{W_{pl,y} \cdot f_y} + k_{yz} \cdot \frac{|M_{z,Ed}|}{W_{pl,z} \cdot f_y} =$$

$$= \frac{|(-6,1616 \cdot 10^5)|}{1,00 \cdot 7,052 \cdot 10^4 \cdot 335} + 0,4 \cdot \frac{|2,1494 \cdot 10^9|}{1,8436 \cdot 10^7 \cdot 335} + 0,361 \cdot \frac{|(-8,079 \cdot 10^7)|}{5,2891 \cdot 10^6 \cdot 335} = 18,2 \% \quad (6.61)$$

$$\eta_{NMBuck2} = \frac{|N_{Ed}|}{\chi_z \cdot A \cdot f_y} + k_{zy} \cdot \frac{|M_{y,Ed}|}{W_{pl,y} \cdot f_y} + k_{zz} \cdot \frac{|M_{z,Ed}|}{W_{pl,z} \cdot f_y} =$$

$$= \frac{|(-6,1616 \cdot 10^5)|}{0,95 \cdot 7,052 \cdot 10^4 \cdot 335} + 0,24 \cdot \frac{|2,1494 \cdot 10^9|}{1,8436 \cdot 10^7 \cdot 335} + 0,601 \cdot \frac{|(-8,079 \cdot 10^7)|}{5,2891 \cdot 10^6 \cdot 335} = 13,8 \% \quad (6.62)$$

$\eta_{NMBuck} = 18,2 \% \quad \text{passed}$

3. Axial force-Bending-Lateral torsional buckling

EN 1993-1-1: 6.3.3, Annex B: Method 2

Critical section: $x = 0,000$ - $L = 0,000$ - $2000 = 0$ mm

$C_{my} = \max(0,2 + 0,8 \cdot \alpha_{m,0,4}) = \max(0,2 + 0,8 \cdot 0,244,0,4) = 0,4 \geq 0,4 \quad \text{Table B.3}$

$C_{mz} = \max(0,2 + 0,8 \cdot \alpha_{m,0,4}) = \max(0,2 + 0,8 \cdot 0,501,0,4) = 0,601 \geq 0,4 \quad \text{Table B.3}$

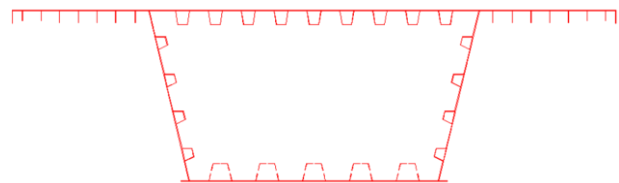
$C_{mLT} = \max(0,2 + 0,8 \cdot \alpha_{mLT,0,4}) = \max(0,2 + 0,8 \cdot 0,244,0,4) = 0,4 \geq 0,4 \quad \text{Table B.3}$

$f_{yy} = \min(\lambda_y^* - 0,2; 0,8) = \min(0,09 - 0,2; 0,8) = 0$

Slika 9. Zadovoljenje prema Globalnoj analizi II reda, softer

Tako su dobijene efektivne površine poprečnih ploča.

Kako tankozidni preseki imaju efekat koncentracije napona u flanšama usled smičućih sila u rebrima, Evrokod predviđa i uvođenje shear lag efekta. Određuje se koeficijent redukcije za pritisnute i zategnute delove ploča. Na taj način se dobija konačni poprečni presek sa redukovanim dužinama ploča koje se izbočavaju i stanjenim delovima ploča koje potiču od shear lag efekta, Slika 10.



Slika 10. Efektivne geometrijske karakteristike kompletnog poprečnog preseka

Sledi provera nosivosti kompletnog poprečnog preseka sa dobijenim geometrijskim karakteristikama, moment inercije i površina:

$$M_{c,Rd} = \frac{f_y \cdot I_{eff}}{\gamma_{M0} \cdot h_{T,eff}} = \frac{355 \text{ MPa} \cdot 1,658 \text{ m}^4}{1,0 \cdot 2,5649} = 228,37 \text{ MNm}$$

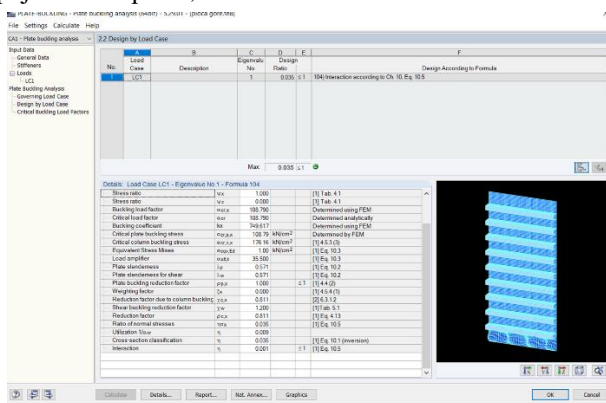
$$\eta_1 = \frac{176,27 \text{ MNm}}{228,37 \text{ MNm}} = 0,772$$

Urađena je i provera smičuće nosivosti sa ili bez doprinosa nožica u zavisnosti od iskorišćenja nosivosti kod nosivosti na savijanje:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 =$$

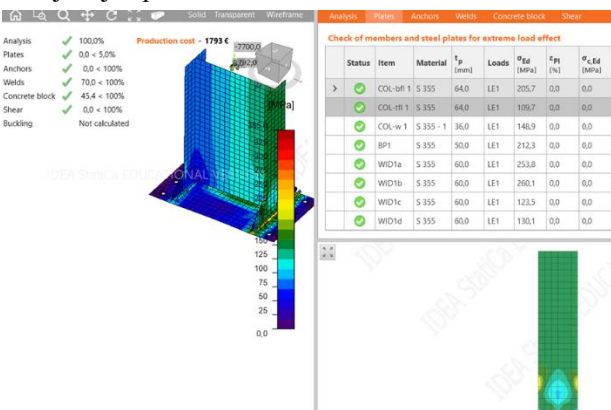
$$= 0,669 + (1 - 0,769)(2 \cdot 0,36 - 1)^2 = 0,687$$

Presek u polju upoređen je sa softverskim proračunom u programu Dlubal RFEM i njegovim modulom za pojedinačne ploče, Slika 11.



Slika 11. Provera karakteristika ploča – Dlubal RFEM

Proračun veza urađen je prema EN 1993-1-8, dve momentne veze i jedna zglobova, a momentna veza sa temeljom je upoređena sa softverom Idea StatiCA.



Slika 12. Provera karakteristika ukleštenja – Dlubal RFEM

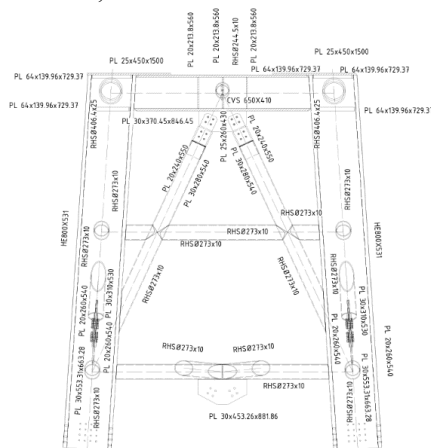
3. POREĐENJE REZULTATA

Rad sadrži i poređenje rezultata uticaja od saobraćanog opterećenja V600 po starim propisima i LM1 po novim propisima EC1. Poređenje rezultata momenta savijanja i transferzalne sile, izvršeno je za srednji oslonac i „naglavnu gredu“ na koju se oslanja. Normalna sila je poređena u najopterećenijem stubu. Kombinacije opterećenja su sadržale sopstvenu težinu, dodatno stalno opterećenje i korisno opterećenje, za kombinaciju 1. Kombinacija 2 je seizmička kombinacija sa stalnim opterećenjem, a mase za modalnu analizu su od sopstvene težine, dodatnog stalnog opterećenja i 0,2 vrednosti LM1 i V600.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu dat je primer implementacije prevashodno EC3, tj proračun čeličnih elemenata, pločastih, linijskih, i njihovih veza. Želja autora bila je, da se primena izvrši na objektu višeg značaja od objekata zgradarstva, te je primeni EC3 prethodila primena EC0 i EC1 za analizu opterećenja mostova, a kasnije i konstruisanje istih. Takođe, pružen je i uporedni proračun omogućen standardom i proračun softverom(AxisVM, Dlubal RFEM, Idea StatiCA, gde je to bilo moguće.

Proračunati elementi dati su kao crteži za sklopove i radioničku izradu, Slika 13.



Slika 13. Radionički sklop

Poređenje rezultata uticaja od saobraćanog opterećenja V600 po starim propisima i LM1 po EC1, prikazuje da nema značajne razlike u vrednostima koje bi uticale na nosivost i dimenzionisanje konstrukcije, Slika 14.

Linear - ec	
x[m]	= 50,000
Nx [kN]	= -133,75
Vy [kN]	= -5,23
Vz [kN]	= 170,15
Tx [kNm]	= 749,942
My [kNm]	= -78088,520
Mz [kNm]	= -521,017

Linear - V600 nad osloncem	
x[m]	= 50,000
Nx [kN]	= -138,14
Vy [kN]	= -2,10
Vz [kN]	= 71,85
Tx [kNm]	= 701,446
My [kNm]	= -80327,210
Mz [kNm]	= -287,057

Slika 14. Poređenje rezultata uticaja od saobraćanog opterećenja LM1 po EC1 i V600 po starim propisima

5. LITERATURA

- [1] Rašeta A., Džolev I., 2018, Predavanje iz predmeta: Mostovi i projektovanje betonskih i metalnih mostova
- [2] Mr Bratislav Stipanić, dipl. inž., Mr Dragan Buđevac, dipl inž., „Čelični mostovi“, Beograd, 1989.
- [3] Marković, Zlatko „Granična stanja čeličnih konstrukcija prema Evrokodu“, 2014
- [4] Jovanović Đorđe, Živaljević Vladimir, “Projektovanje betonskih i čeličnih mostova” 2021, materijal za vežbe

Kratka biografija:



Milan Nikolić rođen je u Kraljevu. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Građevinarstvo - Konstrukcije odbranio je 2023.god.
Kontakt: milan.nikolic@yahoo.com