

PROJEKAT KONSTRUKCIJE ČELIČNE HALE PREMA EVROKODU PROJECT OF THE STEEL STRUCTURE OF WAREHOUSE ACCORDING TO EUROCODE

Aleksandar Tramošljanin, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast - GRAĐEVINARSTVO

Kratak sadržaj – Rad se sastoji iz dve celine. Prvi deo se sastoji iz kompletnog projekta konstrukcije u svemu sprovedenog prema EN1993-1-1, EN1993-1-8, EN1998-1-1, a drugi deo, koji je istraživački, sastoji se od uporedne analize stabilnosti linijskih elemenata (izvijanje) prema Evrokodu i SRPS propisima.

Ključne reči: Čelična hala, Evrokod, statički proračun, modalna analiza, dimenzionisanje, proračun detalja.

Abstract – Thesis consist of two parts. First part consist of complete project of steel structure according to EN1993-1-1, EN1993-1-8, EN1998-1-1 and second part, research, which consists of comparative analysis of stability (buckling) according to Eurocode and SRPS standards.

Key words: Steel warehouse, Eurocode, statical design, modal analysis, structural design and designing of details.

1. UVOD

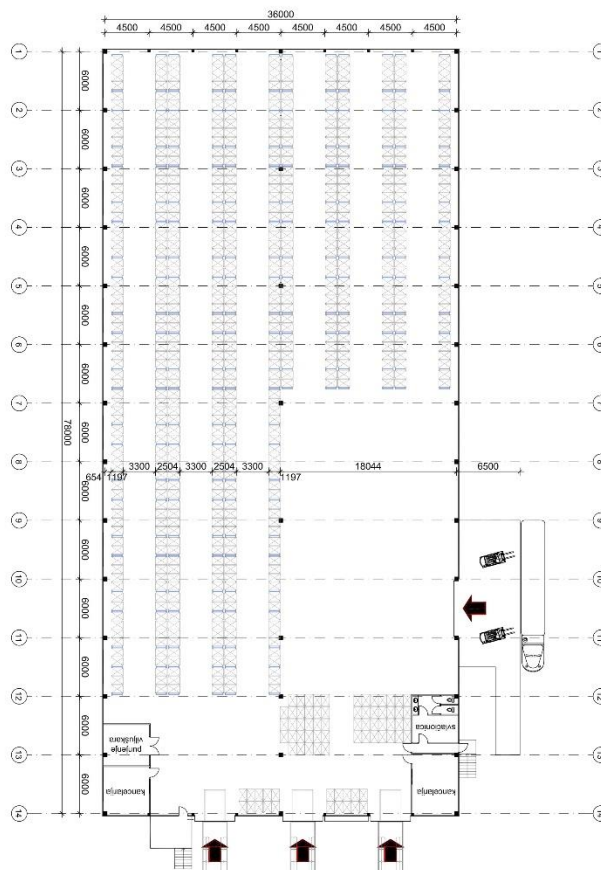
Projektnim zadatkom su definisani ulazni podaci potrebni za projektovanje skladišne čelične hale na teritoriji opštine Ruma. Objekat se sastoji od velikog skladišnog prostora, dve kancelarije, svlačionice i posebne prostorije za punjenje viljuškara. Sa spoljašnje strane se nalazi, pored stepenica za ulaz u objekat, betonski plato koji služi za istovar pomoću viljuškara.

2. OPIS PROJEKTA

2.1 Konstrukcijski sistem

Čelična hala je gabarita 36.0x78.0m. Krovna obloga je sendvič panel 8cm, kao i fasadna obloga, s tim da je njegova debljina 6cm. Krov je na dve vode i neprohodan. Hala je dvobrodna, sa centralnim stubom na koji se oslanja ravanska rešetka. Za rožnjače su usvojene IPB200 kao i IPBv180. Dimenzije krovnog vezača su ■180x180x6 (donji pojas), ■180x180x10 (gornji pojas), ■150x150x4 (vertikalna) i ■150x150x5 (dijagonala). U podužnom pravcu, se nalazi vertikalna podužna rešetka, koja pored stabilitetnih prednosti, služi da se na njih osloni rešetka koja ispod sebe nema centralni stub.

Dimenzije podužine rešetke su ■180x180x10 (dijagonale), ■180x180x5 (pojasevi) i ■150x150x4 (vertikale). Stubovi su kvadratnog poprečnog preseka ■280x280x16 (centralni) kao i ■250x250x10. Fasadni sendvič paneli imaju fasadne rigle dimenzija ■80x80x4. Podkonstrukcije prozora i vrata su istih dimenzija.



Slika 1. Dispozicija objekta

Kao temelji središnjih stubova koriste se temelji samci čije su dimenzije 3.5x2.5x0.5 m sa stubcima dimenzija 0.8x0.8x0.7 m. Ostali temelji su dimenzija 1.2x1.8x0.5 sa stubcima dimenzija 0.6x0.6x0.7 m.

Poprečni krovni spreg ima dimenzije L200x200x28, a podužni L160x160x17. Horizontalni krovni spreg u kalkanu ima dimenzije ■80x80x4 (dijagonale, vertikale i donji pojas), ■80x80x6 (gornji pojas) kao i ■80x80x5 (kosnik koji podupire spreg). Vertikalni spreg u podužnom zidu ima dimenzije L180x180x18 kao i vertikalni spreg u kalkanu.

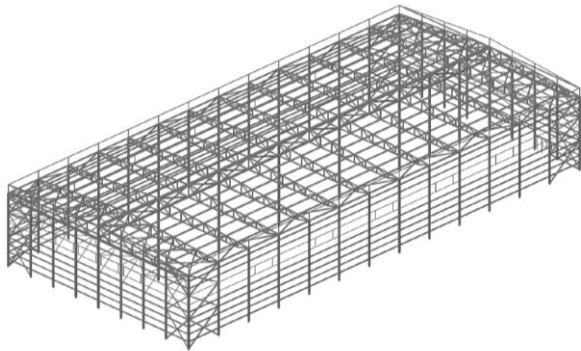
NAPOMENA:

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

2.2 Modeliranje konstrukcije

Konstrukcija je modelirana kao prostorni model u programskom paketu Tower 8.0 tako što su u modelu definisane geometrijske i fizičke karakteristike elemenata konstrukcije. Proračun se vrši pomoću metode konačnih elemenata (MKE) koji se zasniva na diskretizaciji a realnu konstrukciju opisuje elementima konačnih dimenzija. Statički proračun je sproveden prema teoriji prvog reda (linearna teorija elastičnosti).

Interakcija konstrukcije i tla je modelirana pomoću Winker-ovog modela tla, gde tačkasti oslonac ima krutost u sva tri pravca od 15.000 kN, što ga čini jednoparametarskim modelom tla. Na slici 2 je prikazan 3D proračunski model konstrukcije:



Slika 2. 3D model konstrukcije

2.3 Analiza opterećenja

Analizom opterećenja se određuju vrednosti merodavnih opterećenja koje dejstvuju na konstrukciju. Proračun uticaja u konstrukciji određen je za sledeća opterećenja:

- stalno opterećenje (sopstvena težina konstrukcije i dodatno stalno opterećenje),
- promenljiva dejstva (korisno opterećenje, sneg i vetar),
- seizmičko dejstvo.

Pod stalnim opterećenjem se smatra sopstvena težina konstrukcije, kao i dodatno stalno opterećenje u vidu sopstvenih težina nekonstruktivnih elemenata kao što su krovne i fasadne obloge, težina prozora i vrata itd.

Dodatno stalno opterećenje je modelirano kao površinsko, konvertirano na linijsko.

Korisno opterećenje intenziteta 0.4 kN/m² prema Evrokodu 1, naneto je na neprohodni krov.

Dejstvo vetra je određeno takođe prema Evrokodu 1. Za analizu opterećenja su uzeta 4 slučaja opterećenja gde za svaki slučaj opterećenja vetar duva u jednom pravcu (od moguća 4 ortogonalna pravca). Proračun vetra se sastoji od proračuna osnovne brzine vetra, srednje brzine vetra, udarnog pritiska, kao i pritiska na površine.

Osnovna brzina vetra:

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0}$$

c_{dir} – koeficijent pravca

c_{season} – koeficijent sezonskog delovanja

$V_{b,0}$ – fundamentalna vrednost osnovne brzine vetra

Srednja brzina vetra:

$$V_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot V_b$$

$c_r(z)$ – koeficijent hrapavosti

$c_o(z)$ – koeficijent topografije

V_b – osnovna brzina vetra

Udarni pritisak vetra:

$$q_p(z) = (1 + 7 \cdot I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2(z)$$

Pritisak vetra na površine:

$$w_e = q_p(z) \cdot c_{pe}$$

$$w_i = q_p(z) \cdot c_{pi}$$

Seizmička analiza je sprovedena prema algoritmu implementiranom u programskom paketu Tower 8.0, koji omogućava proračun konstrukcije prema Evrokodu 8 primenom multimodalne spektralne analize. Ulazni podaci za seizmički proračun su sledeći:

- Tlo kategorije B
- Maksimalno referentno ubrzanje tla $a_{gR} = 0.2g$
- Koeficijent prigušenja 5%
- Faktor ponašanja $q = 4.0$

2.4 Statički proračun i proračunske kontrole

Statički proračun je sproveden pomoću programskog paketa Tower 8.0 primenom teorije prvog reda. Kombinovanjem prethodno definisanih opterećenja pomoću parcijalnih koeficijenta sigurnosti, formiraju se kombinacije za stalne i proračunske situacije i seizmičke proračunske situacije opterećenja. Softver automatski generiše moguće kombinacije, a za razmatrani objekat postojale su 92 kombinacije za 9 slučaja opterećenja.

Prema odredbama Evrokoda 8 potrebno je sprovesti sledeće računске kontrole:

- Elementi dijagonalnih spregova se postavljaju tako da konstrukcija na svakom spratu ima slična pomeranja u oba smera u pravcu ukrućivanja, usled promene znaka opterećenja.

U tom cilju, na svakom spratu mora biti zadovoljen sledeći uslov:

$$\frac{|A^+ - A^-|}{A^+ + A^-} \leq 0.05$$

gde su A^+ i A^- površine horizontalnih projekcija poprečnih preseka zategnutih dijagonala, kada horizontalna seizmička dejstva pozitivna ili negativna smer, respektivno (slika 3).

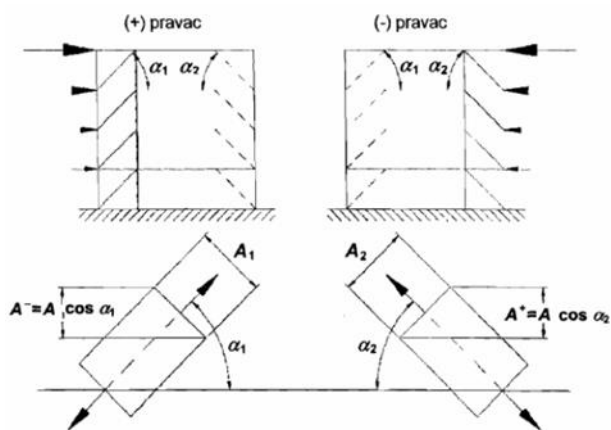
- Sledeći uslov koji se mora proveriti je bezdimenzionalna vitkost $\bar{\lambda}$ pošto su spregovi X oblika. Bezdimenzionalna vitkost treba da bude u granicama:

$$1,3 < \bar{\lambda} < 2,0.$$

Međutim, pošto spregovi nemaju sprat, ovaj deo je *apriori* zadovoljen i nije bio razmatran.

- Aksijalno napregnut stub mora ispuniti sledeći uslov u pogledu minimalne nosivosti:

$$N_{pl,Rd}(M_{Ed}) \geq N_{Ed,G} + 1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot N_{Ed,E}$$



Slika 3. Primer primene uslova

gde je $N_{Ed,G}$ aksijalna sila u stubu od neseizmičkih dejstva koji ulaze u kombinaciju dejstava za seizmičku proračunsku kombinaciju, $N_{Ed,E}$ aksijalna sila u stubu od seizmičkog dejstva, γ_{ov} faktor rezerve nosivosti ($\gamma_{ov} = 1.25$), $\Omega = 0.0174$, a $N_{pl,Rd}(M_{Ed})$ proračunska vrednost nosivosti stuba na izvijanje u skladu sa EN1993, uzimajući u obzir interakciju između izvijanja i momenta savijanja M_{Ed} , definisanog kao njena proračunska vrednost u seizmičkoj proračunskoj situaciji

2.5 Dimenzionisanje i izrada detalja

U softverskom paketu su dimenzionisani elementi konstrukcije prema Evrokodu 3 [1]. Pri dimenzionisanju je vođeno računa o zadovoljenju napona i stabilnosti elemenata. Kontrola se sprovodi za normalne, smičuće i uporedne napone. Izrazi implementirani u programu glase:

$$\sigma_{stv} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{M_z}{W_z} \rightarrow \text{normalni napon}$$

$$\tau_{stv} = \frac{T_y}{A_y} \rightarrow \text{smičući napon}$$

$$\sigma_u = (\sigma_{stv}^2 + 3 \cdot \tau_{stv}^2)^{0.5} \rightarrow \text{uporedni napon}$$

Maksimalna iskorišćenost napona iznosi 1.0, dok štapovi koji ne zadovoljavaju vrednost iznose manje od 1.0, a oni koji zadovoljavaju iznose više od 1.0.

Detalji su proračunati prema EN1993-1-8 [6], a računati su detalji strehe, slemena, centralnog stuba i rešetke (gornji i donji pojas), kao i detalj stuba i temelja.

3. UPOREĐIVANJE STABILNOSTI LINIJSKIH ELEMENATA (IZVIJANJE) PREMA EVROKODU I SRPS STANDARDU

3.1 Fleksiono izvijanje

Problem fleksionog izvijanja ili "izvijanja savijanjem" datira još od 1744. godine kada je ovaj problem obradio Ojler (Euler). Osnovne pretpostavke Ojlerove teorije linearno elastičnog izvijanja glase:

- materijal je homogen, izotropan i elastičan
- element je idealno prav (nema geometrijskih imperfekcija)
- element je zglobo oslonjen na oba kraja
- element je opterećen koncentrisanim aksijalnim silama na krajevima
- poprečni presek je konstantan i jedanodelan

- sprečene su torzione deformacije

Uslov koji treba da se ispuni:

- prema EC3:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1} \text{ (klasa 1)}$$

- prema SRPS:

$$\frac{N}{N_c} \leq 1.0$$

$$N_c = \chi \cdot \sigma_{dop} \cdot A_{eff}$$

3.2 Torziono izvijanje

Pritisnuti elementi centralno simetričnog otvorenog poprečnog elementa krstastog oblika imaju značajne krutosti na savijanje oko obe glavne ose inercije a mala im je torziona krutost, pa bi se zbog toga trebala proveriti nosivost na torziono izvijanje. Ova provera bi trebala da se radi kod elemenata male dužine tj. male vitkosti. Rešavanjem diferencijalne jednačine dobija se izraz:

- EC3

Proračun je isti kao i kod fleksionog izvijanja, samo što se pri proračunu $N_{b,Rd}$ koristi izraz za kritičnu silu torzionog izvijanja $N_{cr,T}$.

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot (G \cdot I_t + \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_w}{L_T^2})$$

- SRPS

Isti je slučaj i kod ovog standarda.

$$N_{cr,\phi} = \frac{1}{i_R^2} \cdot (G \cdot I_t + \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_w}{L_\phi^2})$$

3.3 Fleksiono-torziono izvijanje

Kod nesimetričnih i monosimetričnih otvorenih poprečnih preseka, kod kojih se težište ne poklapa sa centrom smicanja, do izvijanja može doći do usled kombinacije torzionog i fleksionog izvijanja. Ovakav vid je izvijanja je posebno izražen kod hladnooblikovanih profila.

Kritična sila fleksionog-torzionog izvijanja ($N_{cr,TF}$) može da bude značajno manja od kritičnih sila za fleksiono ($N_{cr,y}$ i $N_{cr,z}$) i torziono izvijanje ($N_{cr,T}$), posebno u oblasti manjih vitkosti. Kritična sila usled ove interakcije može biti manja i od fleksione i od torzione kritične sile, pa se zato u oba standarda uzima minimalna kritična sila od pomenute 3:

$$N_{cr} = \min(N_{cr,F}, N_{cr,T}, N_{cr,TF})$$

3.4 Bočno torziono-torziono izvijanje

Kod nosača otvorenog poprečnog preseka koji nisu bočno pridržani, a usled momenta savijanja oko jače ose inercije dolazi do otkaza pre dostizanja granične nosivosti poprečnog preseka na savijanje. Kada opterećenje dostigne graničnu vrednost, dolazi do deformacije nosača van ravni opterećenja, praćeno torzionom rotacijom. Ova pojava gubitka stabilnosti čeličnih nosača se naziva **bočno-torziono izvijanje**.

Pojava ovakvog tipa izvijanja se može objasniti pomoću delovanja koncentrisane sile na slobodnom kraju konzolnog nosača. Usled opterećenja koncentrisanom silom malog intenziteta dolazi do savijanja u ravni opterećenja, što izaziva ugibe u ravni nosača. Kada opterećenje dostigne graničnu vrednost, pored ugiba u ravni savijanja, dolazi do značajnih deformacija van ravni nosača, odnosno do bočnog pomeranja i torzionog uvijanja.

- EC3

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot M_{c,Rd} / \gamma_{M1}$$

- SRPS

$$\max \sigma \leq \alpha_p \cdot \chi_D \cdot \sigma_{dop}$$

3.5 Izvijanje ekscentrično pritisnutih elemenata

Elementi koji su opterećeni aksijalnom silom i momentima savijanja su problematični za proračun stabilnosti za razliku od pojedinačnih naprezanja. U opštem slučaju, kod otvorenih poprečnih preseka kakvi se najčešće javljaju u čeličnim konstrukcijama, prisutna je interakcija izvijanja, savijanja i bočno torzionog izvijanja. Pored svega toga, savijanje se može javiti oko obe ortogonalne ose.

Sa teorijskog aspekta, razlikuju se tri karakteristična slučaja izvijanja izvijanja ekscentrično pritisnutih elemenata:

- **izvijanje u ravni savijanja** koje se javlja kod elemenata koji su pored aksijalne sile pritiska opterećeni I momentom savijanja oko jače ose inercije i kod kojih je sprečeno bočno i bočno-torziono izvijanje. Takođe, ova pojava je moguća i kod momenata savijanja koji obrće oko slabije ose.

- **Izvijanje izvan ravni savijanja** koje nastaje, oko slabije ose inercije, usled delovanja aksijalne sile i momenata savijanja kod elemenata kod kojih nije sprečeno bočno i bočno-torziono izvijanje.

- **prostorno izvijanje** se javlja kod elemenata koji su opterećeni sa oba momenta savijanja i aksijalnom silom s tim da nije bočno kao ni bočno-torziono pridržana.

- EC3

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Ed}} + k_{yx} \cdot \frac{M_{x,Ed}}{M_{b,Ed}} \leq 1.0$$

- SRPS

$$k_n \cdot \sigma_N + k_{m_y} \cdot \theta \cdot \sigma_{M_y} + k_{m_x} \cdot \sigma_{M_x} \leq \sigma_{doz}$$

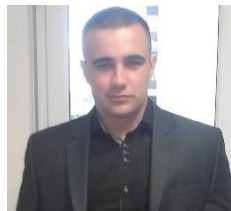
4. ZAKLJUČAK

Iz prethodnog poglavlja se može zaključiti da je Evrokod dosta strožiji sa aspekta stabilnosti, dok su naši SRPS propisi dosta nedorečeni i konzervativni. Takođe, bitna razlika ova dva standarda je da SRPS forsira granični napon, dok EC3 forsira graničnu vrednost uticaja.

5. LITERATURA

- [1] *Evrokod 0, Osnove proračuna konstrukcija.*
- [2] *Evrokod 1, Dejstva na konstrukcije, Deo 1-1: Zapreminske težine, sopstvene težine, korisna opterećenja za zgrade.*
- [3] *Evrokod 1, Dejstva na konstrukcije, Deo 1-2: Dejstvo snega.*
- [4] *Evrokod 1, Dejstva na konstrukcije, Deo 1-4: Dejstvo vetra*
- [5] *Evrokod 3, Proračun čeličnih Konstrukcija, Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade.*
- [6] *Evrokod 3, Proračun čeličnih Konstrukcija, Deo 1-8: Proračun veza.*

Kratka biografija:



Aleksandar Tramošljanin je rođen u Sremskoj Mitrovici 1994. godine. Master rad odbranio je 2019. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Građevinarstvo – Seizmička analiza konstrukcija.