

**PRORAČUN ČELIČNE HALE PREMA EVROKODU I UPOREDNA ANALIZA  
KRANSKE STAZE PREMA EVROKODU I SRPS-U****STRUCTURAL DESIGN OF STEEL HALL ACCORDING TO EUROCODE AND  
COMPARATIVE ANALYSIS OF RUNWAY BEAM TO EUROCODE AND SRPS**Slavenko Krstić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAĐEVINARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Tema rada je proračun čelične proizvodne hale preme Evrokod propisima sa uporednom analizom kranske staze prema Evrokodu i SRPS-u. Urađen je kompletan statički proračun i dimenzionisanje sa potrebnim grafičkim priložima (dispozicionim crtežima, detaljima čelika i detaljima veza).

**Ključne reči:** Čelična hala, kranska staza, Evrokod, detalji čelika, detalji veza

**Abstract** – The topic of the paper is the structural design of the steel hall according to Eurocode standards with a comparative analysis of the crane supporting beam according to Eurocode and SRPS. A complete static calculation and structural design were done with the necessary graphic attachments (disposition, steel details, and connections details).

**Keywords:** Steel hall, crane supporting beam, Eurocode, steel details, connections details

**1. UVOD**

Projektnim zadatkom definisani su ulazni podaci potrebni za projektovanje proizvodne čelične hale sa unutrašnjim transportom koji je obezbeđen kranskom dizalicom nosivosti 20t. Hala je jednobrodna sa rasponom od 30,0m. Objekat je u osnovi dimenzija 30,0x60,0m. Ukupna visina objekta je 13,15m. Proračun sila i dimenzionisanje hale neophodno je uraditi u skladu sa važećim evropskim normama. Lokacija objekta je Novi Sad.

**2. ANALIZA OPTEREĆENJA**

Analizom opterećenja obuhvaćena su sva relevantna opterećenja koja će se javiti za vreme eksploatacionog veka konstrukcijeprema Evrokod EN 1990.

**2.1. Stalno opterećenje**

Ovo opterećenje obuhvata sopstvene težine konstruktivnih i nekonstruktivnih elemeneta. U nekonstruktivne elemente ubrajaju se obloge, odnosno zidni i krovni paneli, zatim elektro i mašinske instalacije i sl. Sopstvena težina konstruktivnih elemenata uračunata je automatizmom samog softvera koji je korišćen za proračun a to je Tower 8.

**NAPOMENA:**

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

**2.2. Povremeno opterećenje**

Opterećenje od snega definisano je Evrokodom EN 1991-1-3. Osnovni parametar za definisanje inteziteta ovog dejstva je opterećenje od snega na tlo  $s_k = 1,00\text{kN/m}^2$ . Ovaj intezitet se očitava sa karti u zavisnosti od lokacije objekta. Pored ove vrednosti na intezitet opterećenja od snega utiču još i koeficijent oblika  $m_i$ , koji je funkcija oblika krova, koeficijent izloženosti  $C_e$  i toplotni koeficijent  $C_t$ . Konačno intezitet opterećenja od snega dobija se prema izrazu (1):

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k \quad (1)$$

Opterećenje od vetra definisano je Evrokodom EN 1991-1-4. Deluje pritiskajuće ili sišuće na zidne i krovne površine. Osnovni parametar za definisanje dejstva vetra je osnovna fundamentalna brzina vetra koja se takođe u zavisnosti od lokacije objekta očitava sa karti i za ovaj objekat iznosi  $V_{b,0} = 19$  m/s. Na osnovu ove brzine računa se udarni pritisak vetra koji se množi sa koeficijentima pritiska na spoljašnje ili unutrašnje površine i na taj način dobija konačno opterećenje koj se nanosi na objekat. Korigovanjem ove brzine sa direkcionim  $C_{dir}$  i sezonskim koeficijentom  $C_{season}$  dobija se osnovna brzina vetra prema izrazu (2), a korigovanjem osnovne brzine vetra koeficijentom hrapavosti  $C_{r(z)}$  i koeficijentom topografije  $C_{0(z)}$  dobija se srednja brzina vetra prema izrazu (3):

$$V_b = V_{b,0} * C_{dir} * C_{season} \quad (2)$$

$$V_{m(z)} = V_b * C_{r(z)} * C_{0(z)} \quad (3)$$

U formuli za računanje udarnog pritiska vetra prema izrazu (4) figurišu koeficijent turbulencije  $I_{v(z)}$ , gustina vazduha  $\rho$  i srednja brzina vetra  $V_{m(z)}$ .

$$q_{p(z)} = (1 + 7 * I_{v(z)} * \frac{1}{2} * \rho * V_{m(z)}^2) \quad (4)$$

Na kraju, intezitet pritiska vetra na spoljašnje površine dobija se prema izrazu (5) na osnovu koeficijenata pritiska koji zavise od karakteristika površine na koju vetar deluje.

$$w_e = q_{p(z)} * C_{pe} \quad (5)$$

**2.3. Seizmičko opterećenje**

Seizmičko opterećenje definisano je Evrokodom EN 1998 i podrazumeva najpre proračun modalne analize konstrukcije koja nam daje uvid u dinamičke karakteristike same konstrukcije. Ti podaci, tačnije periodi oscilovanja, osnova su za dalji proračun seizmičkog opterećenja. U tabeli 1 dati su, za prvih deset

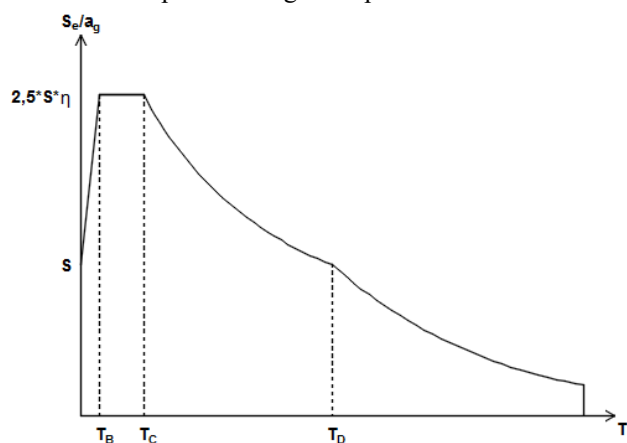
tonova, periodi oscilovanja sa odgovarajućim frekvencijama oscilovanja konstrukcije.

$$E_E = \sqrt{E_{Ex^2} + E_{Ey^2}} \quad (8)$$

Tabela 1. Rezultati modalne analize

No	T [s]	F [Hz]
1	1.4261	0.7012
2	0.7045	1.4194
3	0.5734	1.7440
4	0.5467	1.8292
5	0.4561	2.1925
6	0.3659	2.7330
7	0.3032	3.2982
8	0.2437	4.1035
9	0.2294	4.3592
10	0.2258	4.4285

Lokacija objekta definisala je maksimalno referentno ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.15g$  koje je još jedan od osnovnih parametara za dalji proračun. Bitni parametri su još karakteristike tla, za ovaj objekat izabrano je tlo kategorije B, klasa duktilnosti DCM i klasa značaja objekta, ovde izabrana II. Izabrana je multimodalna spektralna analiza za proračun seizmičkih sila. Zemljotresno kretanje neke tačke na površini tla opisuje se elastičnim spektrom odgovora prikazanim na slici 1.



Slika 1. Elastični spektar odgovora

Redukovanjem elastičnog spektra odgovora faktorom ponašanja dobija se projektni spektar odgovora  $S_d(T_k)$ . Ukupna horizontalna seizmička sila za k-ti ton dobija se prema izrazu (6) gde je  $m_k$  efektivna modalna masa za k-ti ton oscilovanja.

$$F_{bk} = S_d(T_k) * m_k \quad (6)$$

Svatom tonu oscilovanja odgovara određena bazna sila a samim tim i uticaji od seizmičkog dejstva za taj ton. Maksimalna vrednost nekog uticaja od seizmičkog dejstva određena je primenom CQC metode (kompletna kvadratna kombinacija) prema izrazu (7).

$$E_E = \sqrt{\sum_n \sum_m E_{E,n} * \rho_{n,m} E_{E,m}} \quad (7)$$

Za ovaj objekat računata su seizmičke sile za globalni x i y pravac. Ove dve komponente seizmičkog dejstva smatra se da deluju istovremeno. Maksimalna vrednost nekog uticaja u konstrukciji može se konzervativno uzeti kao srednja kvadratna vrednost (SRSS) prema izrazu (8).

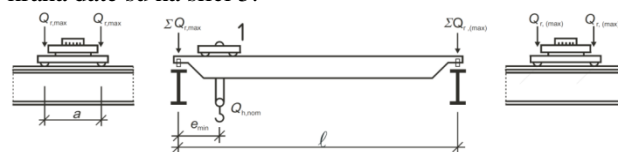
## 2.4. Opterećenje od kranske staze

Mosna dizalica je raspona 28,3m sistema proste grede oslonjene na kranske staze koje se protežu celom dužinom hale. Nosivost kрана je 20t. Tabelom 2 date su karakteristike kрана koji opslužuje halu.

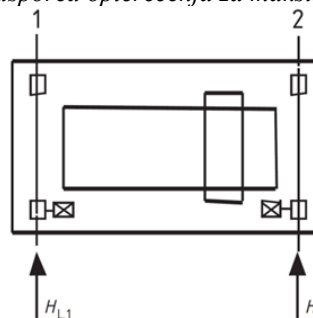
Tabela 2. Karakteristike kрана

Dvogrednamosnadizalicasajednomkukom	
Nosivost	20t = 200 kN
Raspon	28,3 m
Sopstvena težina kрана	200,00 kN
Težina mačke	10,00 kN
Brzina dizanja tereta	4,00m/min
Razmak točkova	4,0m
Klasa dizanja	HC4
Klasa zamora	S6

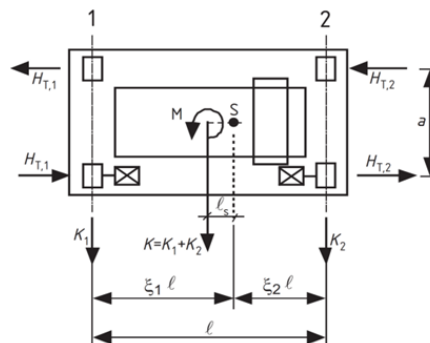
Opterećenje od kрана definisano je Evrokodom 1991-3. Podrazumeva analizu opterećenja koja deluju u vertikalnom, podužnom i poprečnom pravcu. Klasifikuju se kao promenljiva dejstva i incidentna dejstva. Na slici 2 prikazan je raspored vertikalnog opterećenja od kрана za dobijanje maksimalnih uticaja na kranskoj stazi. Na slici 3 prikazane su podužne horizontalne sile usled ubrzanja i kočenja kрана a na slici 4 poprečne horizontalne sile usled istog dejstva. Horizontalne sile uzrokovane zakošenjem kрана date su na slici 5.



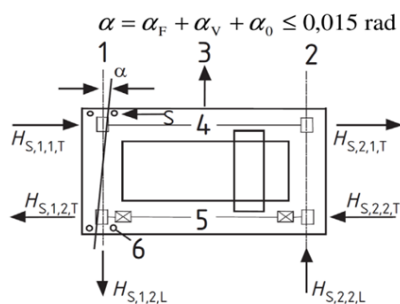
Slika 2. Raspored opterećenja za maksimalne uticaje



Slika 3. Podužne horizontalne sile



Slika 4. Poprečne horizontalne sile

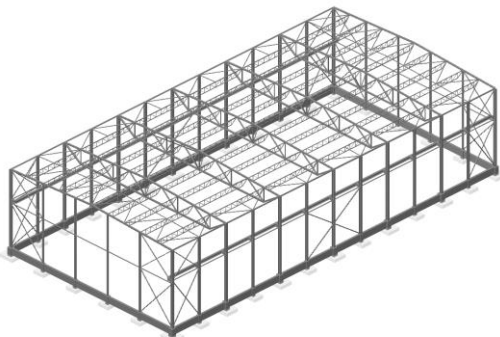


Slika 5. Horizontalne sile usled zakošenja kрана

Kako je opterećenje od kрана izrazito dinamičkog karaktera u proračun se uvode dinamički koeficijenti kojima se uvećavaju dejstva u zavisnosti od vrste samog opterećenja. Ukupno ima sedam različitih dinamičkih koeficijenata koji se koriste pri proračunu. Evrokod propisuje sedam grupa opterećenja od kojih se sve moraju proveriti a one merodavne koristiti za proračun. U ovom radu nisu analizirana incidentna dejstva od kрана.

### 3. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE I OPTEREĆENJA

Modeliranje konstrukcije rađeno je u programu Tower 8. Za proračun konstrukcije primenjena je metoda konačnih elemenata. Svi čelični konstruktivni elementi, a to su stubovi, grede, spregovi, rožnjače i kranska staza modelirani su linijskim konačnim elementima. Istim konačnim elementima modelirane su temeljne grede i temeljni stubovi. Temeljne stope su modelirane površinskim konačnim elementima. Na slici 6 prikazan je 3D model konstrukcije.



Slika 6. 3D model konstrukcije

Beton je klase C30/37 a čelik je kvaliteta S275. Modeliranje oslonaca odnosno interakcije tla i konstrukcije vršeno je primenom Winkler-ovog modela. Osnovni parametar za korišćenje ovog načina modeliranja oslonaca je koeficijent posteljice  $k$  koji se izražava u  $\text{kN/m}^2/\text{m}$ . U globalnom  $z$  pravcu iznosi  $k = 15000 \text{ kPa/m}$ . U horizontalnom pravcu je  $k = 1000 \text{ kPa/m}$ . Opterećenja su u zavisnosti od karaktera i samih propisa modelirana kao površinska odnosno linijska.

Sopstvena težina nekonstruktivnih elemenata, sneg i vetar naneti su kao površinska opterećenja koja deluju po linijskom rasporedu na konstruktivne elemente.

Opterećenje od kрана na kransku stazu modelirano je kao pokretno opterećenje dve koncentrisane sile. Seizmičko opterećenje je naneto na konstrukciju automatizmom programa.

## 4. STATIČKI PRORAČUN I DIMENZIONISANJE

Statički proračun je rađen linearnom teorijom prvog reda. Dimenzionisanje elemenata konstrukcije proverava se zadovoljenje graničnog stanja nosivosti i graničnog stanja upotrebljivosti koristeći Evrokod EN 1992 i EN 1993, za betonske i čelične elemente, respektivno.

### 4.1. Proračunske kontrole

Kontrola napona u tlu podrazumeva zadovoljenje zahteva propisanih standardom EN 1997 kao i maksimalnih projektnih napona koji se ne smeju prekoračiti a koji su deo geomehaničkog elaborata. Iz proračuna sledi da je maksimalni proračunski napon manji od projektne nosivosti tla što je dato izrazom (9)

$$E_{Ed} = 143,39 \text{ kPa} < R_d = 150,00 \text{ kPa} \quad (9)$$

Kontrola normalnih napona u stubovima je zahtev Evrokoda 8. Aksijalnu silu pritiska potrebno je ograničiti na 30 % proračunske nosivosti stuba. Ovo ograničenje za uzrok ima potrebu za obezbeđenjem dovoljnog duktilnog rada kritičnih preseka pri seizmičkim uticajima imajući u vidu da sa porastom aksijalne sile pritiska opada duktilnost preseka. Uslov koji mora biti zadovoljen dat je izrazom (10). Proračunska vrednost plastične nosivosti bruto poprečnog preseka označena je sa  $N_{pl,Rd}$ .

$$N_{Ed} = 0,3 * N_{pl,Rd} \quad (10)$$

Kontrola obuhvatanja efekata drugog reda je još jedan od zahteva Evrokoda 8. Potrebno je uporediti odnos između momenta drugog reda koje pravi aksijalna sila u stubu i momenta prvog reda koje pravi horizontalna seizmička sila. Ukoliko ovi odnosi nisu u granici dozvoljenih potrebno je efekte drugog reda obuhvatiti na neki od načina koje propisuje Evrokod. Parametar koji određuje uvođenje efekata drugog reda je koeficijent osetljivosti  $\theta$ . Izrazom (11) dat je način proračuna ovog koeficijenta. Vrednosti koeficijenta većeg od 0,3 nisu dozvoljene. Od 0,2 do 0,3 zahteva nelinearna analiza konstrukcije. Vrednost koeficijenta od 0,1 do 0,2 podrazumeva uvećanje proračunskih momenata ali bez nelinearne analize, dok za vrednosti manje od 0,1 nije potrebno uvoditi efekte drugog reda u proračun.

$$\theta = \frac{P_{tot} * dr}{V_{tot} * h} = \frac{M_{Ireda}}{M_{Ireda}} \quad (11)$$

Kao i prethodni zahtevi kontrola dopuštenih pomeranja vrha stuba je zahtev Evrokoda 8. U ovom slučaju proveravaju se relativna pomeranja koja nastaju pri seizmičkom dejstvu na konstrukciju. Pomeranje vrha stuba  $d_{r,k}$  mora se zadovoljiti prema izrazu (12). Redukcionim faktorom  $v$ , koji zavisi od klase značaja objekta, umanjuje se ova vrednost. Dozvoljeno pomeranje zavisi od visine stuba  $h_k$ , koja je redukovana faktorom  $\omega$ , koji zavise od vrste nekonstruktivnih elemenata.

$$d_{r,k} * v < \omega * h_k \quad (12)$$

### 4.2. Kombinovanje opterećenja

Prilikom projektovanja razmatraju se najnepovoljnije kombinacije opterećenja koje mogu istovremeno opterećivati konstrukciju. U tim kombinacijama razlikovaćemo dejstva koja u posmatranim presjecima imaju povoljan efekat (deluju povoljno), odnosno ne formiraju merodavnu kombinaciju opterećenja (izostaju iz

kombinacije) ili se obračunavaju sa svojim minimumom (stalna dejstva). Prilikom kombinovanja, dejstva se, za proračun prema graničnom stanju loma, uvećavaju parcijalnim koeficijentima sigurnosti, što omogućava rezervu nosivosti elemenata i konstrukcije. To znači da su proračunska dejstva veća od stvarnih inteziteta dejstava, što upravo daje pomenutu rezervu nosivosti odnosno stepen sigurnosti. Za svaki kritičan slučaj opterećenja, proračunske vrednosti uticaja od dejstava, moraju da budu određene kombinovanjem vrednosti dejstava za koja se smatra da mogu da se pojave istovremeno. Pravilo za kombinovanje za stalne i prolazne proračunske situacije prikazano je izrazom (13), a pravilo kombinovanja za seizmičke proračunske situacije izrazom (14).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * G_{k,j} + \gamma_p * P + \gamma_{Q,1} * Q_{k,j} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (13)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{E,d} + \sum_{i > 1} \psi_{z,i} * Q_{k,i} \quad (14)$$

### 4.3. Proračun konstruktivnih elemenata

Ovom proračunu prethodi kombinovanje opterećenja. Ove kombinacije su korišćene za proveru graničnog stanja nosivosti. Za proveru graničnog stanja upotrebljivosti korišćene su karakteristične kombinacije opterećenja.

Pri proračunu elemenata konstrukcije, u zavisnosti od uticaja koji se javljaju na njima, proveravano je sledeće: kontrola napona, računaska otpornost na pritisak, računaska otpornost na zatezanje, računaska otpornost na savijanje, proračunska nosivost na smicanje, proračunska nosivost na savijanje i aksijalnu silu, proračunska nosivost na savijanje i smicanje, proračunska nosivost na savijanje, smicanje i aksijalnu silu, nosivost na fleksiono izvijanje, nosivost na bočno-torziono izvijanje. Proveravani su i vertikalni i horizontalni ugibi u zavisnosti od položaja konstruktivnog elementa u konstrukciji. U okviru proračuna detaljno je obrađena kranska staza prema Evrokodu i prema domaćim SRPS propisima što je istraživački deo rada.

Pored gore pomenutih kontrola za kransku stazu proveravana je i nosivost na dejstvo smicanja i torzije. Torzija na kranskoj stazi nastaje usled slučajnog ekscentriciteta koji pravi točak kрана na šini po kojoj se kreće usled horizontalnih bočnih sila.

Proveravano je i ulubljenje (cripling) što predstavlja izbočavanje i plastifikaciju rebra neposredno ispod nožice usled koncentrisane sile.

Analiza opterećenja prema SRPS obuhvatila je vertikalne sile od točkova kрана, podužne sile od ubrzanja i kočenja kрана i poprečne sile od bočnih udara Intezitet vertikalnih sila izračunat je na osnovu sopstvene težine kрана i nosivosti kрана za najnepovoljniji položaj opterećenja. Dobijeni inteziteti su pomnoženi dinamičkim koeficijentom  $\varphi$ . Sile kočenja prema SRPS-u iznose 1/7 vertikalnog opterećenja točka. Intezitet poprečnih sila od bočnih udara uzima se kao 1/10 vertikalnog opterećenja točka.

Opterećenja su svrstana na osnovna opterećenja (stalno opterećenje, vertikalne sile) i dopunska opterećenja (bočni udari i sile kočenja).

## 5. ZAKLJUČAK

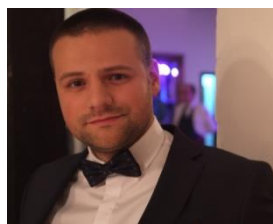
U delu zaključak rekapitulirane su osnovne činjenice i rezultati koji su proistekli iz uporedne analize proračuna kranske staze preme Evrokodu i SRPS standardu, što je i istraživački deo ovog rada. Evrokod propisi imaju za osnovni cilj racionalizaciju poprečnih preseka dostižući granična stanja nosivosti, nasuprot ranijem pristupu koji se temelji na metodi dopuštenih napona gde su elementi korišćeni u linearnom radu dostižući maksimalno granicu razvlačenja. Imajući to na umu, za očekivati je da jedan isti poprečni presek veća proračunska iskorišćenost koristeći SRPS standard. Ipak kako se u Evrokodu za opterećenja koriste parcijalni koeficijenti sigurnosti tako su ona znatno veća u odnosu na opterećenja kranske staze prema SRPS-u što uzrokuje veću procentualnu iskorišćenost preseka pri kontroli napona i stabilnosti prema Evrokodu. Provera ugiba je pokazala suprotno.

Uzrok toga je jedinični parcijalni koeficijent za opterećenje pri zadovoljenju graničnog stanja upotrebljivosti.

## 6. LITERATURA

- [1] EN 1991-1-1 Дејства на конструкције (Запреминске тежине, сопствене тежине, корисна оптерећења за зграде)
- [2] EN 1991-1-3 Дејства на конструкције (Дејства снега)
- [3] EN 1991-1-4 Дејства на конструкције (Дејства ветра)
- [4] EN 1991-3 Actions on structures – Part 3: Actions induced by cranes and mashinery
- [5] EN 1992-1-1 Прорачун бетонских конструкција (Општа правила и правила за зграде)
- [6] EN 1993-1-1 Прорачун челичних конструкција (Општа правила и правила за зграде)
- [7] EN 1993-6 Design of steel structures – Part 6: Crane supporting structures
- [8] EN 1997-1 Геотехнички прорачун (Општа правила)
- [9] EN 1998-1 Прорачун сеизмички отпорних конструкција (Општа правила, сеизмичка дејства и правила за зграде)
- [10] Гранична стања челичних конструкција према Еврокodu, Златко Марковић
- [11] Металне конструкције, Основе прорачуна и конструисања, Др Драган Буђевац, Мр Златко Марковић, Мр Драгана Богавац, Мр Драгослав Тошић
- [12] Металне конструкције у зградарству, Др Драган Буђевац
- [13] Челичне конструкције у грађевинарству, Др. Бранко Зарић, Др Драган Буђевац, Др Братислав Стипанић

### Kratka biografija:



**Slavenko Krstić** rođen je 19.06.1989. godine u Sarajevu, Bosna i Hercegovina. Osnovne akademske studije završio je 2018. godine. Na Fakultetu tehničkih nauka na studijskom programu Građevinarstvo. 2019. godine upisuje Master akademske studije iz oblasti Građevinarstva, Konstrukcije.