

Stabilnost i optimizacija stuba dizalične staze

Goran Pavlović^{1*}, Mile Savković², Nebojša Zdravković², Goran Marković²

¹ Elektronski fakultet Niš, Univerziteta u Nišu, Niš (Srbija)

² Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Univerziteta u Kragujevcu, Kraljevo (Srbija)

U ovom istraživanju prikazana je analiza složenog dvodelnog štapa sa ispunom od spojnih limova, primenjena na primeru stuba dizalične staze, pri čemu je problem stabilnosti stavljen u prvi plan. Takođe, izvršena je i optimizacija svih bitnih geometrijskih parametara složenog štapa, na primeru jedne visine stuba dizalične staze i pri promeni nosivosti, pri čemu su pojasevi posmatrani kao zavareni I profili, umesto standardnih valjanih profila koji se inače promenjuju kod ovih struktura. Za funkciju cilja u ovom istraživanju uzeta je masa složenog štapa, koju čine masa profila pojaseva i masa spojnih limova. Kao funkcije ograničenja korišćeni su različiti uslovi stabilnosti i nosivosti, kao i određene konstruktivne preporuke. Postupak optimizacije je sproveden u Ms EXCEL softverskom paketu, primenom GRG2 algoritma, pri čemu je ovaj postupak izabran zbog određenih pogodnosti koji su značajni kod ovog problema optimizacije. Na ovaj način se pokazala opravdanost primene predloženog modela proračuna i optimizacije, jer sa na ovaj način može vrlo brzo doći do potrebnih geometrijskih parametara pri projektovanju ovih tipova struktura, s obzirom da je u pitanju veliki broj varijabli i funkcija ograničenja. Takođe, pokazano je kako se menja masa stuba, kao i optimalni geometrijski parametri pri povećanju sile pritiska na stub dizalične staze.

Ključne reči: Stub dizalične staze, Složeni štap, Optimalno projektovanje, Stabilnost

1. UVOD

Kao čelični stubovi dizalične staze često se primenjuju složeni štapovi, naročito kada se radi o većim nosivostima dizalica. Složeni štap se najčešće sastoji od dva ili više standardna toplo ili hladno valjana profila (samostalnih pojaseva) koji su mestimično spojeni ispunom, [1]. U zavisnosti od izvođenja, ispunu mogu činiti spojni limovi ili ispuna rešetkastog tipa. Za samostalne pojaseve se najčešće primenjuju U, C, I ili L profili, mada se mogu koristiti i drugi oblici, kao i kombinacije određenih oblika. Postoje i izvođenja gde su pojasevi složeni štapovi sa spojnim limovima koji su međusobno povezani rešetkastom ispunom.

Ovi tipovi struktura se široko koriste u građevinarstvu širom sveta. Njihova upotreba je porasla poslednjih godina, naročito kod lakih čeličnih konstrukcija, koje se primenjuju kod: industrijskih hala, fabrika, skladišta i niskih poslovnih zgrada, pre svega zbog svoje visoke čvrstoće u odnosu na težinu.

Kako obični otvoreni profili imaju malu torzionu krutost, kod složenih štapova je taj problem rešen, što je karakteristično za zatvorene dvoosno simetrične poprečne preseke. Takođe, moment inercije ovakvih složenih poprečnih preseka je veći i njegova vrednost zavisi od rastojanja između glavnih elemenata (pojaseva), pri čemu struktura stuba ima i veću savojnu krutost, a samim tim i veliku otpornost protiv globalnog izbočenja.

Zbog značaja i odgovornosti složenih štapova, postoji veliki broj objavljenih istraživanja i studija, gde je vršena analiza ovih tipova struktura kako analitički, tako i eksperimentalno, a takođe veliku primenu ima i MKE. Najčešće se ispituju čvrstoća ovih struktura, kao i stabilnost koja se ogleda u određivanju kritične sile pritiska na stub.

U radu [2] izvršena je MKE analiza maksimalne nosivosti za dva tipa modela složenog štapa, pri čemu je razmatran uticaj broja spojnih limova. Rezultati su

upoređivani sa poznatim eksperimentalnim rezultatima, kod prvog tipa modela, a kod drugog sa AISI kodom. U radu [3] je u ANSYS softverskom paketu izvršena analiza jedne rešetkaste strukture, gde su pojasevi složeni štapovi (dva C profila sa spojnim limovima), pri čemu su se posmatrali čelik i legura aluminijuma. Ovi rezultati su upoređivani sa analitičkim, dobijenim primenom eurokodova, pri čemu su izvedeni određeni zaključci i date smernice za projektante ovih tipova struktura.

U radovima [4] i [5] autori su vršili MKE analize složenih štapova sa stanovišta seizmike. U radu [4] analizira se uticaj veličine spojnog lima na ponašanje složenog štapa usled dejstva seizmičke sile, dok se u radu [5] ispituje način oslanjanja (veze) složenog štapa za podlogu, pri čemu su numerički rezultati iz MKE upoređivani sa eksperimentalnim.

Pored numeričkih analiza, često se kod ovih struktura koriste analitički postupci, kao i teorijska matematička istraživanja. U radu [6] je izvršena matematička analiza stabilnosti za dva tipa složenog štapa sa spojnim limovima, pri čemu su posmatrani slučajevi sa konstantnim i promenljivim poprečnog presekom duž ose štapa, dok se u radu [7] analizira uticaj broja spojnih limova na elastičnu stabilnost složenog štapa, pri čemu se posmatraju četiri načina njihovog izvođenja. Primena eurokodova kod ovih vrsta struktura pokazana je u radu [8] na konkretnom primeru jednog aluminijumskog složenog štapa.

Što se tiče primene analitičkih metoda, one se mogu uspešno koristiti uz pomoć različitih softverskih paketa. U zadnje vreme se za analize i optimizacije kod inženjerskih problema uspešno može primeniti Ms EXCEL, [9]. U radovima [10] i [11] se primenom ovog softvera uspešno izvršila višekriterijumska optimizacija geometrijskih parametara glavnih nosača jednogrednih mosnih dizalica.

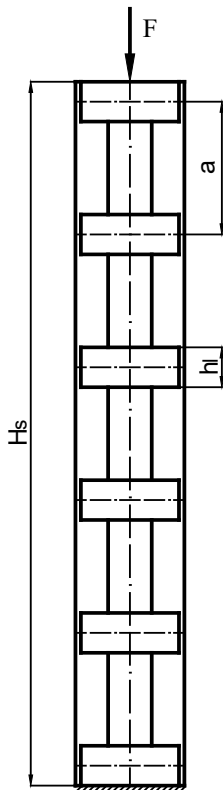
Kao što se može videti na osnovu pomenutih radova, najčešće su vršene MKE analize, a u određenim

*Kontakt adresa autora: Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija, goran.pavlovic@elfak.ni.ac.rs

slučajevima i eksperimentalna istraživanja. Takođe, primenjivane su i teorijske matematičke analize ovih oblika struktura, kao i primena određenih standarda, kodova, kao analitičkih postupaka. Cilj ovog istraživanja je da se izvrši analiza jednog načina izvođenja složenog štapa, odnosno da se struktura sagleda parametarski i izvrši optimizacija geometrijskih veličina njenih članova. Za razliku od dosadašnjeg načina izvođenja, neće se koristiti standardni valjani profili, nego će se posmatrati u analizi zavareni I profil jednog dvodelnog štapa. Za vezu su korišćeni spojni limovi. Takođe, posmatraće se kako se menja masa složenog štapa, kao i njegovi geometrijski parametri sa povećanjem sile pritiska, na primeru stuba dizalične staze.

2. DEFINISANJE OPTIMIZACIONOG PROBLEMA SLOŽENOG ŠTAPA

Na Slici 1 prikazan je složeni štap sa spojnim limovima, što ujedno predstavlja i stub dizalične staze, koji je predmet ove analize i optimizacije.

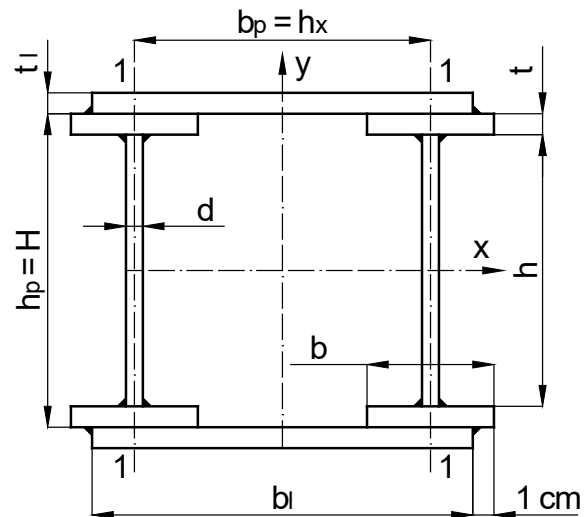


Slika 1: Složeni štap

Na Slici 2 je prikazan poprečni presek složenog štapa, gde se vide zavareni I profili pojasa i spojni limovi sa svim potrebnim dimenzijama.

Kao što se može videti (Slika 1), posmatra se složeni štap kao stub dizalične staze koji je na dnu uklješten za podlogu, dok na vrhu stuba deluje sila pritiska F . Vezne ploče i ojačanja u ovoj analizi se neće razmatrati, jer nisu od značaja za postupak optimizacije. Takođe, zavarene veze i spojevi neće biti razmatrani u ovom optimizacionom problemu.

Optimizacioni problem se matematički definiše tako što je potrebno naći minimum funkcije cilja sa ozbirom na funkcije ograničenja, kao i na osnovu donjih i gornjih vrednosti varijabli.



Slika 2: Poprečni presek složenog štapa sa spojnima limovima

Varijable u ovom slučaju su sledeće:

- n_l - broj spojnih limova u jednom nizu na međusobnim rastojanjim a (Slika 1),
- t_l - debljina spojnog lima,
- h_l - visina spojnog lima,
- b_p - osno rastojanje između profila pojaseva složenog štapa,
- h_p - visina profila pojasa složenog štapa,
- b - širina pojasnog lima I profila,
- t - debljina pojasnog lima I profila,
- d - debljina vertikalnog lima I profila.

U daljem tekstu će biti detaljno prikazane funkcija cilja i kao i sve funkcije ograničenja.

3. FUNKCIJA CILJA

Za ovako postavljen problem, funkcija cilja je masa stuba dizalične staze, odnosno složenog štapa, koju čine kako masa pojaseva (zavarenih I profila), tako i masa spojnih limova (Slika 1 i Slika 2).

Matematički, funkcija cilja se može iskazati na sledeći način:

$$m = 2 \cdot \rho \cdot [n_l \cdot b_l \cdot h_l \cdot t_l + (2 \cdot b \cdot t + h \cdot d) \cdot H_s] \quad (1)$$

$$b_l = b_p + b - 2 \cdot 1 \text{ (cm)} \quad (2)$$

$$h = H - 2 \cdot t \quad (3)$$

gde su:

$\rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ - gustina materijala složenog štapa,

b_l - širina spojnog lima,

h - visina vertikalnog lima I profila,

H_s - visina stuba dizalične staze.

4. FUNKCIJE OGRANIČENJA

Funkcije ograničenja čine kako stabilnost složenog štapa i provere nosivosti oko određenih osa (na osnovu standarda [12], [13] i [14]), tako i provere nosivosti određenih elemenata složenog štapa. Pored ovih ograničenja postoje i određene konstruktivne preporuke i uslovi, [1].

Ono što je neophodno napomenuti pre detaljnog definisanja svih kriterijuma i potrebnih uslova za postupak optimizacije, da je stub dizalične staze (Slika 1) vezan za dizaličnu stazu (u x pravcu), dok stub nije poprečno vezan (u y pravcu). Ovo su bitni uslovi za određivanje dužina izvijanja u pomenutim pravcima, [13]:

$$l_{i,x} = 1 \cdot H_s \quad (4)$$

$$l_{i,y} = 2 \cdot H_s \quad (5)$$

Visina i širina profila pojaseva se određuju na sledeći način:

$$h_p = \frac{l_{i,x}}{\alpha_x \cdot \lambda_x} \quad (6)$$

$$b_p = \frac{l_{i,y}}{\alpha_y \cdot \lambda_y} \quad (7)$$

gde su:

$\alpha_x = 0.33$, $\alpha_y = 0.6$ - vrednosti koeficijenta, prema [1],

λ_x , $\lambda_y = 60 \div 80$ - vrednosti za vitkosti za stubove dizaličnih staza, prema [1].

4.1. Kriterijum stabilnosti složenog štapa

Kod provere stabilnosti složenog štapa mora biti zadovoljen uslov prema standardu [14]:

$$N_s \leq N_{E,Q} \quad (8)$$

pri čemu su:

$$N_s = \nu_1 \cdot F \quad (9)$$

$$N_{E,Q} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\lambda_{yi}^2} \quad (10)$$

$$A = 2 \cdot A_l \quad (11)$$

$$A_l = 2 \cdot b \cdot t + h \cdot d \quad (12)$$

$$\lambda_{yi} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2} \quad (13)$$

$$\lambda_y = \frac{l_{i,y}}{i_y} \quad (14)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (15)$$

$$I_y = 2 \cdot \left(I_{y1} + A_l \cdot \frac{h_x^2}{4} \right) \quad (16)$$

$$I_{y1} = \frac{1}{12} \cdot h \cdot d^3 + \frac{1}{6} \cdot t \cdot b^3 \quad (17)$$

$$\lambda_1 = \frac{a}{i_1} \leq 50 \quad (18)$$

$$a = \frac{H_s - h_l}{n_1 - 1} \quad (19)$$

$$i_1 = i_{y1} = \sqrt{\frac{I_{y1}}{A_l}} \quad (20)$$

gde su:

$\nu_1 = 1.5$ - koeficijent sigurnosti za prvi slučaj opterećenja, prema [1]

$E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$ - modul elastičnosti materijala složenog štapa,

a - rastojanje između spojnih limova (Slika 1).

4.2. Kriterijum nosivosti složenog štapa oko materijalne ose

Provera ovog kriterijuma se vrši na osnovu standarda [12], gde mora biti ispunjeno sledeće:

$$\sigma_N \leq \sigma_{im,d} \quad (21)$$

pri čemu su:

$$\sigma_N = \frac{F}{A} \quad (22)$$

$$\sigma_{im,d} = \chi_m \cdot \sigma_{dop} \quad (23)$$

$$\chi_m = \frac{2}{\beta_m + \sqrt{\beta_m^2 - 4 \cdot \overline{\lambda}_x^2}} \text{ za } \overline{\lambda}_x > 0.2 \quad (24)$$

$$\chi_m = 1 \text{ za } \overline{\lambda}_x \leq 0.2$$

$$\beta_m = 1 + \alpha_m \cdot (\overline{\lambda}_x - 0.2) + \overline{\lambda}_x^2 \quad (25)$$

$$\overline{\lambda}_x = \frac{\lambda_{i,x}}{\lambda_y} \quad (26)$$

$$\lambda_{i,x} = \frac{l_{i,x}}{i_x} \quad (27)$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_l}} \quad (28)$$

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot d \cdot h^3 + \frac{1}{6} \cdot b \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t \cdot (h+t)^2 \quad (29)$$

$$\lambda_y = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{R_e}} \quad (30)$$

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{\nu_1} \quad (31)$$

gde su:

$\alpha_m = 0.339$ - koeficijent za krivu izvijanja B (za zavareni I profil za osu x),

R_e - napon na granici tečenja materijala složenog štapa.

4.3. Kriterijum nosivosti složenog štapa oko nematerijalne ose

Slično prethodnom kriterijumu, na osnovu standarda [12], mora biti ispunjeno sledeće:

$$\sigma_N \leq \sigma_{in,d} \quad (32)$$

pri čemu su:

$$\sigma_{in,d} = \chi_n \cdot \sigma_{dop} \quad (33)$$

$$\chi_n = \frac{2}{\beta_n + \sqrt{\beta_n^2 - 4 \cdot \overline{\lambda}_{yi}^2}} \text{ za } \overline{\lambda}_{yi} > 0.2 \quad (34)$$

$$\chi_n = 1 \text{ za } \overline{\lambda}_{yi} \leq 0.2$$

$$\beta_n = 1 + \alpha_n \cdot (\overline{\lambda}_{yi} - 0.2) + \overline{\lambda}_{yi}^2 \quad (35)$$

$$\overline{\lambda}_{yi} = \frac{\lambda_{yi}}{\lambda_y} \quad (36)$$

gde je:

$\alpha_n = 0.489$ - koeficijent za krivu izvijanja C (za zavareni I profil za osu y).

4.4. Kriterijum nosivosti samostalnog elementa pojasa

Kod ovog kriterijuma vrši se provera nosivosti samostalnog elementa pojasa na izvijanje upravno na osu

I-I (Slika 2), pri čemu mora da bude zadovoljen sledeći uslov:

$$\sigma_{N1} \leq \sigma_{i,d} \quad (37)$$

pri čemu su:

$$\sigma_{N1} = \frac{N_1}{A_I} \quad (38)$$

$$\sigma_{i,d} = \chi \cdot \sigma_{dop} \quad (39)$$

$$N_1 = \frac{F}{r} + \frac{M_y \cdot A_I}{W_y} \quad (40)$$

$$M_y = \frac{F \cdot W_0}{1 - \frac{N_s}{N_v} \cdot \lambda_{yi}^2} \quad (41)$$

$$W_0 = \frac{H_s}{500} \quad (42)$$

$$N_v = A \cdot R_e \quad (43)$$

$$W_y = \frac{I_y}{x_{1,max}} \quad (44)$$

$$x_{1,max} = \frac{h_x}{2} \quad (45)$$

$$\chi = \frac{2}{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4 \cdot \bar{\lambda}^2}} \text{ za } \bar{\lambda} > 0.2 \quad (46)$$

$$\chi = 1 \text{ za } \bar{\lambda} \leq 0.2$$

$$\beta = 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \quad (47)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_v} \quad (48)$$

gde su:

W_0 - početna geometrijska nesavršenost složenog štapa,

$r = 2$ - ukupan broj samostalnih elemenata u preseku,

$\alpha = 0.489$ - koeficijent za krivu izvijanja C (za zavareni I profil za osu I-I).

4.5. Kriterijum nosivosti samostalnog elementa u krajnjem polju

Za ovaj kriterijum neophodno je da bude ispunjen sledeći uslov, prema [1]:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{dop} \quad (49)$$

pri čemu su:

$$\sigma_{max} = \frac{N_p}{A_I} + \frac{M_p}{W_{y1}} \quad (50)$$

$$N_p = \frac{F}{r} \quad (51)$$

$$M_p = \frac{Q_{max} \cdot a}{2 \cdot r} \quad (52)$$

$$Q_{max} = \frac{\pi}{H_s} \cdot M_y \quad (53)$$

$$W_{y1} = \frac{I_{y1}}{x_{max}} \quad (54)$$

$$x_{max} = \frac{b}{2} \quad (55)$$

gde je:

$\alpha_n = 0.489$ - koeficijent za krivu izvijanja C (za zavareni I profil za osu y).

4.6. Kriterijum nosivosti spojnih limova

Pri proveru nosivosti spojnih limova, vrši se provera čvrstoće usled pojave momenta savijanja, pri čemu se spojni lim posmatra kao štap dužine h_x . Za ovaj kriterijum neophodno je bude ispunjen sledeći uslov:

$$\sigma_s \leq \sigma_{dop} \quad (56)$$

pri čemu su:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W_s} \quad (57)$$

$$M_s = \frac{1}{2} \cdot M \quad (58)$$

$$M = 2 \cdot M_p \quad (59)$$

$$W_s = \frac{t_l \cdot h_l^2}{6} \quad (60)$$

Model opterećenja, kao i način kako je definisano opterećenje od momenta savijanja i njegovo prenošenje na elemente složenog štapa je definisano prema [1].

4.7. Dodatni kriterijumi

Što se tiče dodatnih kriterijuma, pre svega se misli na određene uslove koji moraju biti ispunjeni (neki su spomenuti u okviru prethodnih kriterijuma), kao i na određene konstruktivne preporuke koje će dalje biti prikazane.

Za spojne limove, što se tiče geometrijskih parametara, postoje sledeći konstruktivne preporuke, prema [1]:

$$h_l = (0.5 \div 0.7) \cdot b_p \quad (61)$$

$$t_l \geq \frac{h_l}{30}, \quad t_l = 6 \div 12 \text{ mm} \quad (62)$$

Što se tiče osnovnog rastojanja između pojasa složenog stuba b_p , potrebno je da važi sledeće, prema [1], što je preporuka za izvođenje složenih štapova gde se kao ispuna koriste spojni limovi:

$$b_p \leq 60 \text{ cm} \quad (63)$$

Takođe, usvojena je i preporuka što se tiče zavarenog I profila, da pojasni limovi bude debljine najmanje 6 mm, a vertikalni lim 5 mm.

5. REZULTATI OPTIMIZACIJE

Postupak optimizacija je izvršen primenom algoritma optimizacije GRG2 u Ms EXCEL softveru, primenom alata Solver, pri čemu su korišćeni standardni parametri za optimizaciju koji su podešeni u pomenutom softverskom paketu.

Ulazni parametri za optimizaciju su: $F=300 \text{ kN}$, $R_e=23.5 \text{ kN/cm}^2$ (materijal čelik S235) i $H_s=5 \text{ m}$. Takođe, sila F biće povećavana (od $300 \div 600 \text{ kN}$) i pratiće se kako ova promena utiče na optimalne vrednosti i promeni mase stuba dizalične staze. Ostali potrebni ulazni podaci su dati u prethodnom poglavlju.

Varijable u procesu optimizacije su n_l , t_l , h_l , b_p , h_p , b , d i t (Slika 1 i Slika 2). Ostale bitne geometrijske veličine su u funkciji od ovih vrednosti. Kao što se može videti, ovde je usvojeno da je broj spojnih limova u jednom nizu, n_l , varijabla, a ne ulazna veličina. Ovo je

usvojeno iz razloga što predloženi metod optimizacije omogućava da se određene varijable tretiraju kao celi brojevi, i isto tako je ovo usvojeno i za sve debljine limova (t_i , d i t), koje se u ovom optimizacionom problemu tretiraju kao varijable. To je bio glavni razlog za izbor pomenutog postupka optimizacije.

Što se tiče funkcija ograničenja neophodnih za postupak optimizacije, posmatrani su svi uslovi stabilnosti i nosivosti, definisani u prethodnom poglavlju, kao i određeni uslovi i konstruktivne preporuke.

Tabela 1: Rezultati optimizacije za silu pritiska $F=300$ kN

n_i (kom)	t_i (mm)	h_i (mm)	b_i (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_1 (cm^2)	m (kg)
9	6	124	293	249	216	204	65	5	6	17.98	172.09

Tabela 2: Rezultati dokaza stabilnosti i nosivosti za silu pritiska $F=300$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm^2)	σ_{NI} (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{1,dop}$ (kN/cm^2) ≥	σ_{max} (kN/cm^2)	σ_s (kN/cm^2)
450	841.9	8.34	12.73	8.46	9.76	12.97	15.67	15.67	3.99

Tabela 3: Rezultati optimizacije za silu pritiska $F=400$ kN

n_i (kom)	t_i (mm)	h_i (mm)	b_i (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_1 (cm^2)	m (kg)
8	6	131	323	262	216	204	82	6	6	22.06	205.02

Tabela 4: Rezultati dokaza stabilnosti i nosivosti za silu pritiska $F=400$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm^2)	σ_{NI} (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{1,dop}$ (kN/cm^2) ≥	σ_{max} (kN/cm^2)	σ_s (kN/cm^2)
600	1185.4	9.07	12.77	9.07	10.45	13.47	15.67	15.67	5.17

Tabela 5: Rezultati optimizacije za silu pritiska $F=500$ kN

n_i (kom)	t_i (mm)	h_i (mm)	b_i (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_1 (cm^2)	m (kg)
8	6	141	355	283	216	204	93	7	6	25.43	237.44

Tabela 6: Rezultati dokaza stabilnosti i nosivosti za silu pritiska $F=500$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm^2)	σ_{NI} (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{1,dop}$ (kN/cm^2) ≥	σ_{max} (kN/cm^2)	σ_s (kN/cm^2)
750	1631.7	9.83	12.75	9.83	11.10	13.92	15.67	15.67	5.05

Tabela 7: Rezultati optimizacije za silu pritiska $F=600$ kN

n_i (kom)	t_i (mm)	h_i (mm)	b_i (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_1 (cm^2)	m (kg)
8	6	151	385	301	216	204	103	8	6	28.76	269.44

Tabela 8: Rezultati dokaza stabilnosti i nosivosti za silu pritiska $F=600$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm^2)	σ_{NI} (kN/cm^2) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm^2)	$\sigma_{1,dop}$ (kN/cm^2) ≥	σ_{max} (kN/cm^2)	σ_s (kN/cm^2)
900	2140.6	10.43	12.73	10.43	11.61	14.27	15.67	15.67	4.96

6. ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju predstavljen je model proračuna i optimizacije složenog štapa na primeru stuba dizalične staze, gde je kod dvodelnog štapa sa ispunom od spojnog lima korišćen zavareni I profil, umesto valjanog standardnog I profila, i pokazano je da se ovo uspešno može primeniti prilikom određivanja svih potrebnih geometrijskih veličina koje su bitne za strukturu stuba dizalične staze. Kao funkcija cilja posmatrana je masa stuba dizalične staze, pri čemu se posmatralo kako se ova masa menja sa povećanjem sile pritiska na vrhu stuba, kao i promena ostalih geometrijskih parametara (Tabela 1, Tabela 3, Tabela 5 i Tabela 7). Optimizacija je sprovedena u Ms EXCEL softverskom paketu, primenom GRG2

U narednim tabelama (Tabela 1÷Tabela 8) su prikazani rezultati optimizacije (optimalni geometrijski parametri spojnih limova, optimalan broj spojnih limova u jednom nizu, optimalni geometrijski parametri zavarenog I profila, optimalna površina poprečnog preseka zavarenog I profila, masa stuba, kao i stvarne i granične vrednosti za sile i naprezanja na osnovu kojih je izvršen postupak optimizacije) za promenu vrednosti sile pritiska $F=300÷600$ kN.

algorithm. Svi kriterijumi vezani za stabilnost i nosivost u procesu optimizacije su ovom prilikom zadovoljeni (Tabela 2, Tabela 4, Tabela 6 i Tabela 8).

Ono što je bitno u ovom istraživanju, pokazano je da se predstavljena procedura može uspešno primeniti za ove tipove struktura, gde se umesto toplo ili hladno valjanih standardnih profila primenjuju zavareni I profili, konkretno na primeru dvodelnog složenog štapa sa spojnimi limovima koji je primenjen na stubu dizalične staze. Primenom predloženog načina optimizacije se vrlo brzo može doći do svih potrebnih geometrijskih parametara neophodnih kod projektovanja ovih vrsta struktura, s obzirom da ima ukupno 8 varijabli i jako veliko broj funkcija ograničenja, kako onih vezanih za

stabilnost i nosivost, tako i raznih drugih uslova i konstruktivnih preporuka.

Na osnovu tabela sa rezultatima optimizacije (Tabela 2, Tabela 4, Tabela 6 i Tabela 8), može se primetiti da je u sva 4 slučaja kod spojnih limova dobijeno da su maksimalne vrednosti napona dosta manje od granične vrednosti. Takođe, kod spojnih limova je dobijeno i da je optimalna debljina (Tabela 1, Tabela 3, Tabela 5 i Tabela 7) u svim slučajevima donja preporučena vrednost (6 mm). U prvom slučaju ($F=300$ kN) je dobijeno da je optimalan broj spojnih limova u jednom nizu 9, a u ostalim slučajevima 8.

Kod nosivosti zavarenog I profila (pojas složenog štapa), primećuje se da u sva 4 slučaja kriterijum nosivosti samostalnog elementa u krajnjem polju uzima graničnu vrednost (Tabela 2, Tabela 4, Tabela 6 i Tabela 8) i da je taj kriterijum najkritičniji u ovoj analizi, a takođe je i kriterijum nosivosti složenog štapa oko nematerijalne ose važan, jer u većini slučajeva ova nosivost dostiže graničnu vrednost (Tabela 4, Tabela 6 i Tabela 8), osim u prvom slučaju gde je ta vrednost bliska graničnoj vrednosti (Tabela 2). Takođe, u svim slučajevima je dobijeno da optimalna visina lima zavarenog I profila h i optimalna debljina pojasnog lima zavarenog I profila t imaju iste vrednosti (Tabela 1, Tabela 3, Tabela 5 i Tabela 7). Sa porastom sile pritiska u svim slučajevima rastu vrednosti za širinu pojasnog lima zavarenog I profila b , kao i debljina vertikalnog lima zavarenog I profila d . Osno rastojanje b_p se takođe povećava sa povećanjem sile pritiska (Tabela 1, Tabela 3, Tabela 5 i Tabela 7).

Verifikacija opravdanosti korišćenja ove metode se može izvršiti i poređenjem stvarnog rešenja jednog složenog štapa čiji su glavni pojasevi standardni valjani profili, kako bi se pokazala stvarna ušteda u masi.

Za dalja istraživanja, u cilju dobijanja preciznijih rezultata, neophodno je uključiti što više kriterijuma, konstruktivni preporuka i svih ostalih ograničenja: nosivost zavarene veze spojnih elemenata sa pojasevima složenog štapa, tipove čelika, zamor materijala, tehologičnost, ekonomičnost, itd. Takođe, potrebno je uzeti u obzir sve moguće oblike profila pojaseva koji se mogu primeniti, kao i načine konstruktivnog izvođenja ove vrste struktura.

Rezultate dobijene na ovaj način je potrebno verifikovati i primenom MKE, pravilnim izborom modela i tipova konačnih elemenata, kako bi se pored čvrstoće proverila i stabilnost, kao i eksperimentalnim putem. Na ovaj način bi se mogli izvesti određeni zaključci koji bi bili od značaja kako za istraživače, tako i za projektante ovih tipova struktura.

ZAHVALNICA

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz Ugovor o realizaciji i finansiranju naučno-istraživačkog rada u 2020. godini, čiji je evidencioni broj 451-03-68-/2020-14/200108.

LITERATURA

[1] Z. Petković and D. Ostrić, "Metalne konstrukcije u mašingradnji 1", Institut za mehanizaciju Mašinskog Fakulteta Univerziteta u Beogradu (Srbija), (1996).

[2] M. Anbarasu, P.B. Kumar and S. Sukumar, "Study on the Capacity of Cold-formes Steel Built-up Battered Columns Under Axial Compression", Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 11, pp. 2271-2283, (2014).

[3] I. Baláž, Y. Koleková and L. Moroczová, "Built-up CFS column with lacings and battens", MATEC Web of Conferences, Vol. 310, 00025, (2020).

[4] S.C. Alih, M. Vafaei, F.R. Mansour and N.F.H.A. Halim, "A Numerical Study on the Seismic Performance of Built-Up Battered Columns", International Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 11(5), pp. 671-674, (2017).

[5] G.D. Corte, G. Cantisani and R. Landolfo, "Battered Steel Columns with Semi-Continuous Base Plate Connections: Experimental Results vs. Theoretical Predictions", Key Engineering Materials, Vol. 763, pp. 243-250, (2018).

[6] J.C. Ermopoulos, S.S. Ioannidis and A.N. Kounadis, "Stability of battered columns with and without tape", Eng. Struct., Vol. 13, pp. 237-241, (1991).

[7] J. Chen and L. Li, "Elastic axially compressed buckling of battered columns", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 77, pp. 1-7, (2013).

[8] I. Baláž, Y. Koleková and L. Moroczová, "Aluminium Battered Built-up Column", AIP Conference Proceedings, Vol. 2116, 120011, (2019).

[9] J.S. Arora, "Introduction to Optimum Design", Elsevier, Oxford (UK), (2016).

[10] G. Pavlović, A. Stepanović, J. Vidaković, M. Savković and N. Zdravković, "Design optimization of the box section of the single-girder bridge crane by generalized reduced gradient algorithm", IMK – 14, Research&Development in Heavy Machinery, Vol. 21(3), pp. EN79-EN86, (2015).

[11] G. Pavlović, V. Kvrđić, M. Savković, M. Gašić and N. Zdravković, "The influence of the position of longitudinal stiffeners to the optimum dimensions of the box section of the single-girder bridge crane", 3rd Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications "COMETA 2016", East Sarajevo – Jahorina, (B&H, Republic of Srpska), 07–09 December, pp. 131-138, (2016).

[12] SRPS U.E7.081, "Provera stabilnosti nosećih čeličnih konstrukcija. Centrično pritisnuti štapovi konstantnog jednodelnog preseka", Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd (Srbija), (1986).

[13] SRPS U.E7.086, "Provera stabilnosti nosećih čeličnih konstrukcija. Određivanje dužine izvijanja štapova", Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd (Srbija), (1986).

[14] SRPS U.E7.091, "Provera stabilnosti nosećih čeličnih konstrukcija. Centrično pritisnuti štapovi konstantnog višedelnog preseka", Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd (Srbija), (1986).

Stability and Optimization of the Crane Runaway Support Column

Goran Pavlović^{1*}, Mile Savković², Nebojša Zdravković², Goran Marković²

¹ Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, Niš (Serbia)

² Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, University of Kragujevac, Kraljevo (Serbia)

This research has presented the built-up column analysis with batten, applied to crane runaway support, where stability is put in the foreground. Also, optimization of all essential geometrical parameters of the built-up column was performed for a given height of the crane column and changing the load capacity. The chord members were composed of as-welded I-sections instead of fabricated hot rolled sections which are commonly used in these constructions. The mass of the built-up columns, which consists of the chord and web members (battens) members, was taken as the goal function in this research. Additional stability and load capacity conditions were used as constraint functions, as well as specific design recommendations. The optimization procedure was performed in the Ms. EXCEL software package, using the GRG2 algorithm because certain benefits are essential in this optimization problem. In this way, the justification of applying the proposed model of calculation and optimization was shown because the necessary geometrical parameters can be reached very quickly when designing these types of structures, considering that there are a large number of variables and constraint functions. It is also shown how the mass of the column changes and the optimal geometric parameters when the compression force on the column of the runaway crane support increases.

Keywords: Crane column, Built-up column, Optimal design, Stability

1. INTRODUCTION

Typical built-up columns are used as supports a crane girder, especially in case of high load capacities. The built-up columns are composed of two or more fabricated hot or cold rolled sections (chords members) connected by web members [1]. Depending on the design, the web members usually involve lacings and batten. Fabricated U, C, I, or L-sections are most often used for chords members, although other shapes and combinations of specific forms can be used. There are also column types where the chords are complex, battened columns interconnected by lacings.

These types of structures are widely used in construction around the world. Their use has increased in recent years, especially in light steel weight structures used in industrial buildings, warehouses and low office buildings, primarily due to their high strength concerning weight.

As ordinary open sections have low torsional stiffness, this problem is solved with built-up columns, which are characteristic of closed biaxially symmetrical cross-sections. Also, the inertia of such complex cross-sections is higher. Its value depends on the chord's position, where the structure of the column has a higher flexural stiffness, and thus excellent resistance to global protrusion.

Due to the importance and responsibility of built-up columns, many published research and studies where the analysis of these structures was performed analytically and experimentally, and FEM is also widely used. These structures' strength is most often examined, and the stability is reflected in determining the critical compressive force on the column.

The FEM analysis [2] of the maximum load capacity for two types of built-up column models was

performed, where the influence of the number of battens was considered. The results were compared with the known experimental results in the first type of model and the second with the AISI code. In [3], an analysis of a truss system was performed in the ANSYS software package. The chord member is designed with two C profiles interconnecting with flat bars, whereby steel and aluminum alloys were observed. These results were compared with the analytical, obtained by Eurocodes, where certain conclusions were drawn, and guidelines were given for these structures' designers.

In [4] and [5], the authors performed FEM analyzes of the built-up column from the seismic perspective. The influence of flat bar size on the column behavior due to the action of the seismic force is analyzed[4], while in [5], the method of column support (connection) is examined.

In addition to numerical analyzes, these procedures often use analytical techniques as well as theoretical mathematical research. In [6], a mathematical analysis of stability was performed for two types of a battened column, where cases with a constant and variable section cut along the column axis were observed, while in [7] the influence of the batten number on elastic stability, following four ways of performing them. The Eurocodes application in these structures is shown in [8] on a real example of a built-up aluminum column.

Various software packages can observe the application of analytical methods. Recently, Ms EXCEL, [9], can be successfully applied for the analysis and optimization of engineering problems. In papers [10] and [11], this software application successfully performed multi-criteria optimization of the main girders' geometric parameters of single girder overhead cranes.

As can be seen based on the mentioned works, FEM analyzes were most often performed and experimental research in some instances. Furthermore,

theoretical mathematical analyzes of these structures were applied and applying specific standards, codes, and analytical procedures. This research aims to analyze certain types of a built-up column, i.e., parametrically analyzing the structure and optimizing its members' geometric quantities. Unlike the previous method of design, fabricated rolled profiles will not be used. The welded I-section of the two-part column will be observed in the analysis. Flat bars are used as the batten. It will also be observed how the built-up column supporting a crane girder mass and its geometrical parameters will be changed by increasing compressive force.

2. DEFINING OF OPTIMIZATION PROBLEM OF BUILT-UP COLUMN

Figure 1 shows a battened built-up column supporting the crane girder and is subject to this analysis and optimization.

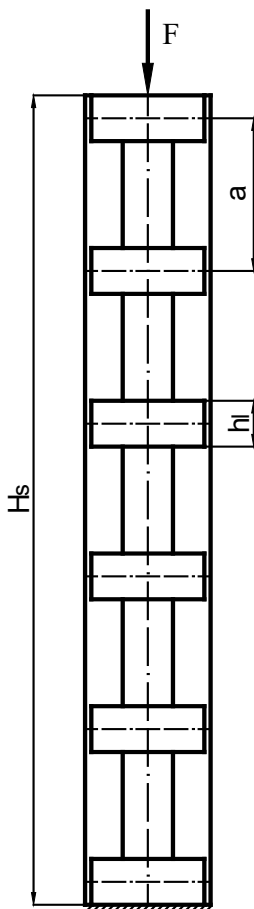


Figure 1: Battened built-up column

Figure 2 shows a cross-section of the built-up column, i.e., the built-up members (welded channels or I-section is used as chords, and flat bars are used as battens).

A typical built-up column that supports a crane girder is shown in Figure 1. These columns usually have a fixed base and are designed for resistance to compressive force F. Flat interconnecting bars, struts, welded joints will not be considered in this optimization problem.

The optimization problem is mathematically defined by finding the minimum objective function

concerning the constraint functions and the variables' lower and upper values.

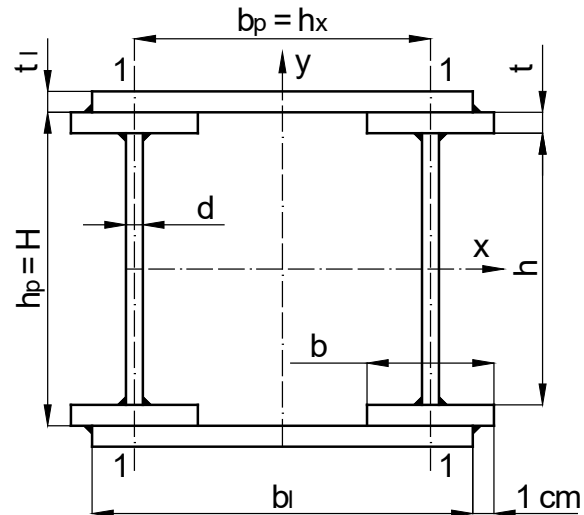


Figure 2: Cross-section of the battened built-up column

The variables observed in this case study are as follows:

- n_l - number of battens in one row at a mutual distance a (Figure 1),
- t_l - thickness of the batten,
- h_l - height of the batten,
- b_p - is the distance between the centroids of chords,
- h_p - height of the chords,
- b - width of section,
- t - flange thickness,
- d - web thickness.

The objective function and constraint functions will be shown in detail below.

3. THE OBJECTIVE FUNCTION

For this optimization problem, the objective function is the mass of the built-up column supporting a crane girder, consisting of both the chords mass (welded I-section) and the battens (Figure 1 and Figure 2). Mathematically, the objective function can be expressed as follows:

$$m = 2 \cdot \rho \cdot [n_l \cdot b_l \cdot h_l \cdot t_l + (2 \cdot b \cdot t + h \cdot d) \cdot H_s] \tag{1}$$

$$b_l = b_p + b - 2 \cdot 1 \text{ (cm)} \tag{2}$$

$$h = H - 2 \cdot t \tag{3}$$

where are:

$$\rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ - material density,}$$

b_l - width of the batten,

h - web height of the I-section,

H_s - height of built-up column supporting a crane girder.

4. CONSTRAINT FUNCTION

The constraint functions include the stability of the built-up column and the bearing capacity check around specific axes (based on the standards [12], [13] and [14]), as well as the bearing capacity check of specific built-up column members. In addition to these constraints, there are specific constructive recommendations and conditions [1].

It is necessary to mention that before defining in detail all the criteria and necessary conditions for the optimization procedure, the built-up column, which supporting a crane girder (Figure 1), is connected to the crane track (in the x-direction). In contrast, the column is not transversely connected (in the y-direction). These are the necessary conditions for determining the buckling lengths in the mentioned directions [13]:

$$l_{i,x} = 1 \cdot H_s \quad (4)$$

$$l_{i,y} = 2 \cdot H_s \quad (5)$$

The height and width of the chords are determined as follows:

$$h_p = \frac{l_{i,x}}{\alpha_x \cdot \lambda_x} \quad (6)$$

$$b_p = \frac{l_{i,y}}{\alpha_y \cdot \lambda_y} \quad (7)$$

where are:

$\alpha_x = 0.33$, $\alpha_y = 0.6$ - coefficient [1],

λ_x , $\lambda_y = 60 \div 80$ - slenderness of a built-up column supporting a crane girder [1].

4.1. Stability criterion of built-up column

The stability verification of the built-up column is given by [14]:

$$N_s \leq N_{E,Q} \quad (8)$$

where are:

$$N_s = \nu_1 \cdot F \quad (9)$$

$$N_{E,Q} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\lambda_{yi}^2} \quad (10)$$

$$A = 2 \cdot A_l \quad (11)$$

$$A_l = 2 \cdot b \cdot t + h \cdot d \quad (12)$$

$$\lambda_{yi} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2} \quad (13)$$

$$\lambda_y = \frac{l_{i,y}}{i_y} \quad (14)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (15)$$

$$I_y = 2 \cdot \left(I_{y1} + A_l \cdot \frac{h_x^2}{4} \right) \quad (16)$$

$$I_{y1} = \frac{1}{12} \cdot h \cdot d^3 + \frac{1}{6} \cdot t \cdot b^3 \quad (17)$$

$$\lambda_1 = \frac{a}{i_1} \leq 50 \quad (18)$$

$$a = \frac{H_s - h_l}{n_l - 1} \quad (19)$$

$$i_1 = i_{y1} = \sqrt{\frac{I_{y1}}{A_l}} \quad (20)$$

i.e.:

$\nu_1 = 1.5$ - safety coefficient for first case of load [1]

$E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$ - Young's modulus,

a - distance between the battens (Fig. 1).

4.2. Critical load criterion of built-up column

According to [12], the critical load verification of built-up column is given by:

$$\sigma_N \leq \sigma_{im,d} \quad (21)$$

where are:

$$\sigma_N = \frac{F}{A} \quad (22)$$

$$\sigma_{im,d} = \chi_m \cdot \sigma_{dop} \quad (23)$$

$$\chi_m = \frac{2}{\beta_m + \sqrt{\beta_m^2 - 4 \cdot \overline{\lambda}_x^2}} \quad za \quad \overline{\lambda}_x > 0.2 \quad (24)$$

$$\chi_m = 1 \quad za \quad \overline{\lambda}_x \leq 0.2$$

$$\beta_m = 1 + \alpha_m \cdot (\overline{\lambda}_x - 0.2) + \overline{\lambda}_x^2 \quad (25)$$

$$\overline{\lambda}_x = \frac{\lambda_{i,x}}{\lambda_y} \quad (26)$$

$$\lambda_{i,x} = \frac{l_{i,x}}{i_x} \quad (27)$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_l}} \quad (28)$$

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot d \cdot h^3 + \frac{1}{6} \cdot b \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t \cdot (h+t)^2 \quad (29)$$

$$\lambda_y = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{R_e}} \quad (30)$$

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{\nu_1} \quad (31)$$

i.e.:

$\alpha_m = 0.339$ - coefficient for buckling curve B (welded I-section for axis x),

R_e - flow stress of the built-up material.

4.3. Buckling resistance of the built-up column about an intangible axis

Similar to the previous criterion, according to [12], the calculation is given by:

$$\sigma_N \leq \sigma_{in,d} \quad (32)$$

where are:

$$\sigma_{in,d} = \chi_n \cdot \sigma_{dop} \quad (33)$$

$$\chi_n = \frac{2}{\beta_n + \sqrt{\beta_n^2 - 4 \cdot \overline{\lambda}_{yi}^2}} \quad za \quad \overline{\lambda}_{yi} > 0.2 \quad (34)$$

$$\chi_n = 1 \quad za \quad \overline{\lambda}_{yi} \leq 0.2$$

$$\beta_n = 1 + \alpha_n \cdot (\overline{\lambda}_{yi} - 0.2) + \overline{\lambda}_{yi}^2 \quad (35)$$

$$\overline{\lambda}_{yi} = \frac{\lambda_{yi}}{\lambda_y} \quad (36)$$

i.e.:

$\alpha_n = 0.489$ - coefficient for buckling curve C (welded I-section for axis y).

4.4. Critical load criterion of a one chord

The critical load of a one chord perpendicular to 1-1 axis has to be verified (Figure 2), using the following criterion:

$$\sigma_{N1} \leq \sigma_{i,d} \quad (37)$$

where are:

$$\sigma_{N1} = \frac{N_1}{A_l} \quad (38)$$

$$\sigma_{i,d} = \chi \cdot \sigma_{dop} \quad (39)$$

$$N_1 = \frac{F}{r} + \frac{M_y \cdot A_l}{W_y} \quad (40)$$

$$M_y = \frac{F \cdot W_0}{1 - \frac{N_s}{N_v} \cdot \lambda_{yi}^2} \quad (41)$$

$$W_0 = \frac{H_s}{500} \quad (42)$$

$$N_v = A \cdot R_e \quad (43)$$

$$W_y = \frac{I_y}{x_{1,max}} \quad (44)$$

$$x_{1,max} = \frac{h_x}{2} \quad (45)$$

$$\chi = \frac{2}{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4 \cdot \bar{\lambda}^2}} \quad \text{za } \bar{\lambda} > 0.2 \quad (46)$$

$$\chi = 1 \quad \text{za } \bar{\lambda} \leq 0.2$$

$$\beta = 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \quad (47)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_v} \quad (48)$$

i.e.:

W_0 - initial geometric imperfection of built-up column,

$r = 2$ - number of chords memberin cross-section,

$\alpha = 0.489$ - coefficient for buckling curve C (welded I-section about 1-1 axis).

4.5. Critical load criterion of a chord for an end panel

The critical load verification is given by [1]:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{dop} \quad (49)$$

where are:

$$\sigma_{max} = \frac{N_p}{A_l} + \frac{M_p}{W_{y1}} \quad (50)$$

$$N_p = \frac{F}{r} \quad (51)$$

$$M_p = \frac{Q_{max} \cdot a}{2 \cdot r} \quad (52)$$

$$Q_{max} = \frac{\pi}{H_s} \cdot M_y \quad (53)$$

$$W_{y1} = \frac{I_{y1}}{x_{max}} \quad (54)$$

$$x_{max} = \frac{b}{2} \quad (55)$$

i.e.:

$\alpha_n = 0.489$ - coefficient for buckling curve C (welded I-section about the y-axis).

4.6. Critical load criterion of the battens

The battens' critical load must be verified due to the bending moment, whereby the batten is considered a column with length h_x . The following condition must be met for this criterion:

$$\sigma_s \leq \sigma_{dop} \quad (56)$$

where are:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W_s} \quad (57)$$

$$M_s = \frac{1}{2} \cdot M \quad (58)$$

$$M = 2 \cdot M_p \quad (59)$$

$$W_s = \frac{t_l \cdot h_l^2}{6} \quad (60)$$

The load model, the bending moment and its transfer to the built-up column members are defined according to [1].

4.7. Additional criteria

The additional criteria include the specific conditions that must be met (some are mentioned within the previous criteria) and specific design recommendations that will be presented below.

The geometric properties recommendations of battens were considered [1]:

$$h_l = (0.5 \div 0.7) \cdot b_p \quad (61)$$

$$t_l \geq \frac{h_l}{30}, \quad t_l = 6 \div 12 \text{ mm} \quad (62)$$

According to [1], the distance between the centroids of chords b_p is taken as:

$$b_p \leq 60 \text{ cm} \quad (63)$$

The thickness of the web and flange of welded I-section is at least 6 mm and 5 mm.

5. OPTIMIZATION RESULTS

The optimization procedure was performed using the GRG2 optimization algorithm in Ms EXCEL software, using the Solver tool with standard optimization parameters set.

The input parameters are: $F = 300 \text{ kN}$, $Re = 23.5 \text{ kN/cm}^2$ (steel S235) and $H_s = 5 \text{ m}$. Also, the force F will be increased (from 300 ÷ 600 kN), and it will be monitored how this change affects the optimal values and the column mass. Other necessary inputs are given in the previous chapter.

The optimization process variables are n_l , t_l , h_l , b_p , h_p , b , d and t (Figure 1 and Figure 2).

Other significant geometric quantities are a function of these values. As can be seen, it is accepted here that the number of battens in one-row n_l is a variable, not an input quantity. The reason is that the proposed optimization method allows certain variables to be treated as integers. It's the same for all sheet thicknesses (t_l , d and t), which are treated as variables in this optimization problem. Generally, that was a primary reason for choosing the mentioned optimization procedure.

Regarding the constraint functions necessary for the optimization process, all the conditions of stability and load-bearing capacity, defined in the previous chapter, and certain conditions and constructive recommendations are observed.

The following tables (Table 1 ÷ Table 8) show the optimization results for changing the value of pressure force $F = 300 \div 600$ kN.

Table 1: Optimization results for compression force $F=300$ kN

n_l (kom)	t_l (mm)	h_l (mm)	b_l (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_l (cm ²)	m (kg)
9	6	124	293	249	216	204	65	5	6	17.98	172.09

Table 2: Resistance and stability verification results for compression force $F=300$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm ²)	σ_{Nl} (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{l,dop}$ (kN/cm ²) ≥	σ_{max} (kN/cm ²)	σ_s (kN/cm ²)
450	841.9	8.34	12.73	8.46	9.76	12.97	15.67	15.67	3.99

Table 3: Optimization results for compression force $F=400$ kN

n_l (kom)	t_l (mm)	h_l (mm)	b_l (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_l (cm ²)	m (kg)
8	6	131	323	262	216	204	82	6	6	22.06	205.02

Table 4: Resistance and stability verification results for compression force $F=400$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm ²)	σ_{Nl} (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{l,dop}$ (kN/cm ²) ≥	σ_{max} (kN/cm ²)	σ_s (kN/cm ²)
600	1185.4	9.07	12.77	9.07	10.45	13.47	15.67	15.67	5.17

Table 5: Optimization results for compression force $F=500$ kN

n_l (kom)	t_l (mm)	h_l (mm)	b_l (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_l (cm ²)	m (kg)
8	6	141	355	283	216	204	93	7	6	25.43	237.44

Table 6: Resistance and stability verification results for compression force $F=500$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm ²)	σ_{Nl} (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{l,dop}$ (kN/cm ²) ≥	σ_{max} (kN/cm ²)	σ_s (kN/cm ²)
750	1631.7	9.83	12.75	9.83	11.10	13.92	15.67	15.67	5.05

Table 7: Optimization results for compression force $F=600$ kN

n_l (kom)	t_l (mm)	h_l (mm)	b_l (mm)	b_p (mm)	$h_p = H$ (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	A_l (cm ²)	m (kg)
8	6	151	385	301	216	204	103	8	6	28.76	269.44

Table 8: Resistance and stability verification results for compression force $F=600$ kN

N_s (kN) ≤	$N_{E,Q}$	σ_N (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{im,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{in,d}$ (kN/cm ²)	σ_{Nl} (kN/cm ²) ≤	$\sigma_{i,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{l,dop}$ (kN/cm ²) ≥	σ_{max} (kN/cm ²)	σ_s (kN/cm ²)
900	2140.6	10.43	12.73	10.43	11.61	14.27	15.67	15.67	4.96

6. CONCLUSION

This research presents a model of calculation and optimization of the built-up column supporting a crane girder. The welded I-section was used instead of a cold-rolled fabricated I-section for the design of the battened built-up column. It was shown that this could be successfully applied in determining all required geometric parameters that are essential for the built-up column supporting a crane girder.

The column mass was observed as an objective function, and it was observed how this mass changes with increasing compressive force at the top of the column and changes in other geometric parameters (Table 1, Table 3, Table 5 and Table 7). The optimization was performed in the Ms EXCEL software package, using the GRG2

algorithm. All criteria related to stability and load-bearing capacity in the optimization process were met on this occasion (Table 2, Table 4, Table 6 and Table 8). It is shown that the presented procedure can be successfully applied to these types of structures, where instead of hot or cold rolled fabricated sections, welded I-sections are used. By applying the proposed optimization method, all the necessary geometrical parameters necessary for designing these structures can be reached quickly. There are a total of 8 variables and a considerable number of constraint functions, both those related to stability and load-bearing capacity recommendation.

Based on the tables with the optimization (Table 2, Table 4, Table 6 and Table 8), it can be noticed that in all 4 cases for the battens, the maximum stresses are much less than the limit value. It was also obtained that the

optimal thickness of battens (Table 1, Table 3, Table 5 and Table 7) is, in all cases, the lower recommended value (6 mm). In the first case ($F = 300 \text{ kN}$), the battens' optimal number in one row is 9, and in other cases, 8.

In the case of the load-bearing capacity of the welded I-section (web members), it is noticed that in all 4 cases, the load-bearing capacity criterion of the independent element in the end field takes the limit value (Table 2, Table 4, Table 6 and Table 8). That criterion is the most critical in this analysis. Also, the criterion of bearing capacity of a battened built-up column about an intangible axis is essential, because in most cases, this bearing capacity reaches the limit value (Table 4, Table 6 and Table 8), except in the first case where this value is close to the limit value (Table 2).

Also, in all cases, it was obtained that the optimal height of the welded I-section - h and the optimal flange thickness t have the same values (Table 1, Table 3, Table 5 and Table 7). By increasing the compressive force in all cases, the values of section width b and the flange thickness d increase. The distance between the centroid of chords member b_p also increases with increasing pressure (Table 1, Table 3, Table 5 and Table 7).

Verification of the justification of this method's use can also be done by comparing the actual solution of a built-up column design with rolled fabricated sections.

For further research, to obtain more accurate results, it is necessary to increase the number of criteria, design recommendations and all other constraints: the load-bearing capacity of the welded connection of interconnection elements with battens, steel types, material fatigue, technology, economy, etc.

It is also necessary to consider all possible forms of sections that can be applied and constructing this type of structure.

The results obtained in this way need to be verified by applying FEM and experimentally, the appropriate selection of models and types of finite elements, to stability and resistance verification. Certain conclusions could be drawn and necessary for both researchers and designers of these structures.

ACKNOWLEDGMENT

This paper was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia through the Contract for the scientific-research activity realization and financing in 2020, ID 451-03-68/2020-14/200108.

REFERENCES

- [1] Z. Petković and D. Ostrić, "Metalne konstrukcije u mašingradnji 1", Institut za mehanizaciju Mašinskog Fakulteta Univerziteta u Beogradu (Srbija), (1996).
- [2] M. Anbarasu, P.B. Kumar and S. Sukumar, "Study on the Capacity of Cold-formed Steel Built-up Battened Columns Under Axial Compression," Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 11, pp. 2271-2283, (2014).
- [3] I. Baláž, Y. Koleková and L. Moroczová, "Built-up CFS column with lacings and battens," MATEC Web of Conferences, Vol. 310, 00025, (2020).
- [4] S.C. Alih, M. Vafaei, F.R. Mansour and N.F.H.A. Halim, "A Numerical Study on the Seismic Performance of Built-Up Battened Columns," International Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 11(5), pp. 671-674, (2017).
- [5] G.D. Corte, G. Cantisani and R. Landolfo, "Battened Steel Columns with Semi-Continuous Base Plate Connections: Experimental Results vs. Theoretical Predictions," Key Engineering Materials, Vol. 763, pp. 243-250, (2018).
- [6] J.C. Ermopoulos, S.S. Ioannidis and A.N. Kounadis, "Stability of battened columns with and without tape," Eng. Struct., Vol. 13, pp. 237-241, (1991).
- [7] J. Chen and L. Li, "Elastic axially compressed buckling of battened columns," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 77, pp. 1-7, (2013).
- [8] I. Baláž, Y. Koleková and L. Moroczová, "Aluminium Battened Built-up Column," AIP Conference Proceedings, Vol. 2116, 120011, (2019).
- [9] J.S. Arora, "Introduction to Optimum Design," Elsevier, Oxford (UK), (2016).
- [10] G. Pavlović, A. Stepanović, J. Vidaković, M. Savković and N. Zdravković, "Design optimization of the box section of the single-girder bridge crane by generalized reduced gradient algorithm," IMK – 14, Research&Development in Heavy Machinery, Vol. 21(3), pp. EN79-EN86 (2015).
- [11] G. Pavlović, V. Kvrđić, M. Savković, M. Gašić and N. Zdravković, "The influence of the position of longitudinal stiffeners to the optimum dimensions of the box section of the single-girder bridge crane", 3rd Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications "COMETA 2016", East Sarajevo – Jahorina, (B&H, Republic of Srpska), 07–09 December, pp. 131-138, (2016).
- [12] SRPS U.E7.081, "Provera stabilnosti nosećih čeličnih konstrukcija. Centrično pritisnuti štapovi konstantnog jednodelnog preseka", Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd (Srbija), (1986).
- [13] SRPS U.E7.086, "Provera stabilnosti nosećih čeličnih konstrukcija. Određivanje dužine izvijanja štapova", Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd (Srbija), (1986).
- [14] SRPS U.E7.091, "Provera stabilnosti nosećih čeličnih konstrukcija. Centrično pritisnuti štapovi konstantnog višedelnog preseka", Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd (Srbija), (1986).