



ANALIZA I OPTIMIZACIJA GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA ČEONOG NOSAČA DVOGREDNE MOSNE DIZALICE

Goran Pavlović¹, Mile Savković², Nebojša B. Zdravković³, Goran Marković⁴

Rezime: U ovom istraživanju prikazan je postupak optimalnog projektovanja čeonog nosača dvogredne mosne dizalice, za varijantu kada su glavni nosači mosne dizalice iznad čeonih nosača. Pored velike pažnje koja se posvećuje dizajnu glavnih nosača, veoma važnu ulogu i odgovornost imaju i čeonih nosači, koji obezbeđuju stabilno kretanje celokupne strukture mosne dizalice duž dizalične staze. Iz tog razloga imaju i veću odgovornost u celoj strukturi mosne dizalice, tako da je izbor geometrijskih karakteristika poprečnog preseka čeonih nosača od velikog značaja koji se ogleda kako u pogledu krutosti, tako i vezi ovih nosača sa glavnim nosačem mosne dizalice. U ovom istraživanju izvršene su analiza i optimizacija kutijastog poprečnog preseka zavarenog čeonog nosača u dve varijante i pokazana je opravdanost ovakvog pristupa projektovanja, u pogledu uštede materijala. Kao primer korišćena je jedna dvogredna mosna dizalice koje se nalaze u eksploataciji. Kao metodologija za postupak optimizacije primenjen je jedan metaheuristički algoritam, s obzirom da ovakve metode u poslednje vreme imaju sve veću primenu za najrazličitije inženjerske probleme.

Ključne riječi: Metaheuristika, Noseća struktura, Optimalni dizajn, Stabilnost limova

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF GEOMETRIC PROPERTIES OF A CRANE END TRUCK OF A TOP RUNNING DOUBLE-GIRDER OVERHEAD CRANE

Abstract: In this research, the procedure of optimal design of an end truck of a double-girder overhead crane is presented for the variant when the main girders of an overhead crane are above end trucks. In addition to the great attention paid to the design of the main girders, end trucks also have a very important role and

¹ Naučni saradnik dr Goran Pavlović, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Niš, Srbija, goran.pavlovic@elfak.ni.ac.rs

² Redovni profesor dr Mile Savković, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija, savkovic.m@mfv.kg.ac.rs

³ Vanredni profesor dr Nebojša B. Zdravković, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija, zdravkovic.n@mfv.kg.ac.rs

⁴ Vanredni profesor dr Goran Marković, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija, markovic.g@mfv.kg.ac.rs

responsibility, ensuring the stable movement of the entire structure of an overhead crane along the crane runways. For that reason, they have a greater responsibility in the entire structure of the bridge crane, so the choice of geometric characteristics of the cross-section of end trucks is of great importance, which is reflected in terms of rigidity and connection of these girders with the main girders of the bridge crane. In this research, the analysis and optimization of the box cross-section of the welded end trucks in two variants were performed. The justification of this design approach was shown in terms of material savings. For example, one double-girder overhead crane was used, which is in operation. One metaheuristic algorithm has been applied as a methodology for the optimization procedure, considering that such methods have recently been increasingly used for various engineering problems.

Key words: Carrying structure, Metaheuristics, Optimal design, Plate stability

1 UVOD

Čeoni nosači su sastavni delovi noseće strukture mosne dizalice i predstavljaju njene vrlo odgovorne segmente. Pored obezbeđivanja kretanja cele konstrukcije mosne dizalice duž dizalične staze, neophodno je da zadovoljavaju i uslove čvrstoće, krutosti i stabilnosti. Iz ovih razloga, čeoni nosači imaju veliku odgovornost, pa je izbor geometrijskih karakteristika poprečnog preseka ovih nosača od velikog značaja. Za strukturu čeonih nosača najčešće se koristi kutijasti oblik poprečnog preseka (standardni ili zavareni profili, u zavisnosti od nosivosti).

Zvog svog značaja, ovi segmenti mosne dizalice su predmet istraživanja u brojnim publikacijama. Metod konačnih elemenata (MKE) ima veliki značaj kod analize struktura dizalica. Istraživanje [1] se bavi primenom metode podmodela, koja je visoke efikasnosti i preciznosti u rešavanju složenih problema napona i deformacija, na nosećoj strukturi mosne dizalice. Dobijeni rezultati su bili od velikog značaja za konačni dizajn proizvoda. U radu [2] analizirana je promena naponskih stanja, kako na glavnom nosaču, tako i na čeonim nosačima jednogredne mosne dizalice, u zavisnosti od promene nosivosti dizalice. MKE analiza celokupne noseće strukture dvogredne mosne dizalice izvršena je u radu [3], kako bi se utvrdila najkritičnija mesta na čeonim i glavnim nosačima mosne dizalice. Uticaj iskošenja, kao i uticaj uzdužnih sila koje nastaju pri kretanju mosnih dizalica duž dizalične staze, i njihovo dejstvo na točkove čeonih nosača, takođe je predmet istraživanja, što je prikazano u [4].

Pored MKE, često se kod nosećih struktura primenjuje i analički pristup. U radu [5] su izvršene analiza i optimizacija čeonog nosača dvogredne mosne dizalice, primenom Matlab softverskog paketa, dok je u [6] primenjen jedan metaheuristički algoritam optimizacije na čeonom nosaču jednogredne mosne dizalice.

Metaheuristički algoritmi optimizacije zadnjih godina imaju sve veću primenu kod najrazličitijih inženjerskih problema, što se može videti i u istraživanjima [7,8].

Cilj ovog istraživanja je da se izvrše analiza i optimizacija mase zavarene strukture čeonog nosača sa kutijastim poprečnim presekom, za dve varijante izvođenja, i dva tipa materijala, kako bi se pokazala ostvarena ušteda u materijalu i opravdanost takvog pristupa analizi i optimizaciji.

2 MATEMATIČKI MODEL OPTIMIZACIONOG PROBLEMA

Optimizacija mase čeonog nosača dvogredne mosne dizalice i geometrijskih parametara kutijastog poprečnog preseka jesu tema ovog istraživanja.

Struktura noseće čelične konstrukcije dvogredne mosne dizalice, kao i statički

model čeonog nosača prikazani su u radu [5]. Takođe, svi izrazi neophodni za izračunavanje potrebnih statičkih veličina prikazani su u pomenutom istraživanju.

Matematička formulacija za ovaj jednociljni višekriterijumski problem optimizacije definiše se na sledeći način:

$$\min [f_{obj}(X)], \quad (1)$$

prema

$$g_i(X) \leq 0, \quad d_j \leq x_j \leq u_j, \quad (2)$$

gde su: $f_{obj}(X)$ funkcija cilja, $g_i(X)$ funkcije ograničenja, $i=1, \dots, m$ broj funkcija ograničenja, $j=1, \dots, n$ broj varijabli, X vektor od n varijabli, d_j donja granica j -te varijable i u_j gornja granica j -te varijable.

Ulazni podaci za ovaj optimizacioni problem su sledeći:

$$Q, L, l_c, l, m_G, m_k, b_k, A_p, D_t, b_t, b_{ts}, b_s, R_e, v_1, \gamma, \psi, k_a, x_2, y_2, a_1, a_2, h_2, h_3, K, \quad (3)$$

gde su: $Q=20$ t nosivost dizalice, $L=18,75$ m raspon mosta dizalice; $l_c=4$ m dužina čeonog nosača, $l=2$ m rastojanje između glavnih nosača mosne dizalice, $m_G=5,28$ t masa glavnog nosača, $m_k=0,85$ t masa kolica sa vitlom, $b_k=100$ cm rastojanje između točkova kolica, $A_p=134,36$ cm² površina poprečnog preseka standardnog čeonog nosača, $D_t=25$ cm prečnik točka čeonog nosača, $b_t=11,5$ cm širina točka čeonog nosača, $b_{ts}=7,9$ cm unutrašnja širina točka čeonog nosača, $b_s=6$ cm širina šine dizalične staze, $R_e=23,5$ kN/cm² za S235 i $R_e=35,5$ kN/cm² za S355 naponi na granici tečenja materijala čeonog nosača, $v_1=1,5$ faktor sigurnosti, $\gamma=1,05$, $\psi=1,15$, $k_a=0,1$ koeficijenti dizalice, [9], $x_2=15,3$ cm, $y_2=48,5$ cm geometrijski parametri glavnog nosača dizalice, $a_1=5$ cm, $a_2=5$ cm, $h_2=1,5$ cm, $h_3=1,5$ cm geometrijske vrednosti čeonog nosača (Slika 1) i $K=1/1000$ koeficijent krutosti čeonog nosača. Ovi se podaci odnose na primer čeonog nosača jedne dvogredne mosne dizalice.

2.1 Funkcija cilja i varijable optimizacije

Smanjenje mase čeonog nosača podrazumeva smanjenje površine kutijastog poprečnog preseka čeonog nosača (Slika 1), koja predstavlja funkciju cilja f_{obj} .

Matematička formulacija funkcije cilja je sledeća:

$$f_{obj}(X) = A_c(x_1, \dots, x_n) = A_c(b_1, h, t_1, t_2, s), \quad (4)$$

gde su: A_c površina kutijastog poprečnog preseka, b_1, h, t_1, t_2, s varijable optimizacije (Slika 1).

Površina poprečnog preseka A_c (Varijanta 1) čeonog nosača se računa prema:

$$A_c = b \cdot (t_1 + t_2) + 2 \cdot h \cdot s. \quad (5)$$

Širina pojasnog lima b se određuje prema (Slika 1):

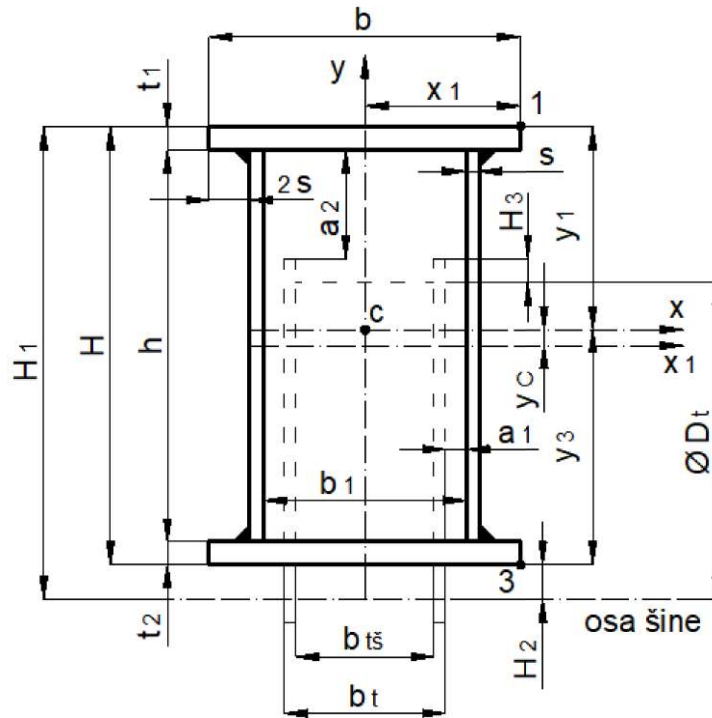
$$b = b_1 + 6 \cdot s, \quad (6)$$

dok se za specijalni slučaj (Varijanta 2), kada se širina gornjeg pojasa poklapa sa vertikalnim limom (b'), računa prema:

$$b' = b_1 + 2 \cdot s, \quad (7)$$

a površina A'_c se u tom slučaju određuje na sledeći način:

$$A'_c = b \cdot (t_1 + t_2) + 2 \cdot h \cdot s. \quad (8)$$



Slika 1. Kutijasti poprečni presek čeonog nosača

Neophodne geometrijske karakteristike kutijastog poprečnog preseka se računaju po sledećim izrazima:

$$y_c = [b \cdot t_1 \cdot (h + t_1) - b \cdot t_2 \cdot (h + t_2)] / (2 \cdot A_c), \quad (9)$$

$$I_{x1} = s \cdot h^3 / 6 + b \cdot (t_1^3 + t_2^3) / 12 + b \cdot [t_1 \cdot (h + t_1)^2 + t_2 \cdot (h + t_2)^2] / 4, \quad (10)$$

$$I_x = I_{x1} - A_c \cdot y_c^2, \quad (11)$$

$$I_y = h \cdot s^3 / 6 + b^3 \cdot (t_1 + t_2) / 12 + h \cdot s \cdot (b_1 + s)^2 / 2, \quad (12)$$

gde su: y_c položaj glavne težišne ose poprečnog preseka (Slika 1), I_{x1} moment inercije za pomoćnu težišnu osu x_1 , I_x i I_y glavni momenti inercije.

2.2 Funkcije ograničenja

Kod ove vrste noseće strukture potrebno je da budu zadovoljeni uslovi čvrstoće, lokalne stabilnosti limova (gornji pojasni lim i vertikalni limovi), kao i određene geometrijske preporuke (Slika 1).

Kriterijumi čvrstoće u tačkama 1 i 3 kutijastog profila (Slika 1) se proveravaju na sledeći način:

$$\sigma_{u1} = M_V / W_{x1} + M_H / W_y \leq \sigma_{dop} = R_e / \nu_1, \quad (13)$$

$$\sigma_{u3} = M_V / W_{x3} + M_H / W_y \leq \sigma_{dop}, \quad (14)$$

$$W_{x1} = I_x / y_1, W_{x3} = I_x / y_3, W_y = I_y / x_1, \quad (15)$$

$$y_1 = H/2 - y_c, y_3 = H/2 + y_c, x_1 = b/2, \quad (16)$$

$$H = h + t_1 + t_2, \quad (17)$$

gde su: σ_{u1} , σ_{u3} maksimalni naponi u tačakama 1 i 3, respektivno, σ_{dop} dopušteni napon, M_V , M_H momenti savijanja u obe ravni, prema [5], W_{x1} , W_{x3} , W_y otporni momenti inercije, y_1 , y_3 , x_1 i H geometrijski parametri (Slika 1).

Provera lokalne stabilnosti gornjeg pojasnog lima se vrši prema standardu [10]:

$$\sigma_f = \nu_1 \cdot (M_V / W_{x1} + M_{H,f} / W_y) \leq \min(\sigma_{dop,f}, R_e), \quad (18)$$

$$M_{H,f} = M_H \cdot (b_1 + s) / b, \quad (19)$$

$$\sigma_{dop,f} = \nu_1 \cdot \chi_f \cdot C_f \cdot R_e, \quad (20)$$

gde su: σ_f maksimalna vrednost napona za gornji pojasni lim, $\sigma_{dop,f}$ dopušteni napon gornjeg pojasnog lima, i χ_f , C_f , koeficijenti, prema [10].

Provera lokalne stabilnosti vertikalnih limova se vrši prema standardu [10]:

$$\sigma_w = \nu_1 \cdot (M_{V,w} / W_{x1} + M_{H,f} / W_y) \leq \min(\sigma_{dop,w}, R_e), \quad (21)$$

$$M_{V,w} = M_V \cdot (h - 2 \cdot y_c) / (H - 2 \cdot y_c), \quad (22)$$

$$\sigma_{dop,w} = \nu_1 \cdot \chi_w \cdot C_w \cdot R_e, \quad (23)$$

gde su: σ_w maksimalna vrednost napona za vertikalni lim, $\sigma_{dop,w}$ dopušteni napon vertikalnog lima, i χ_w , C_w koeficijenti, prema [10].

Provera krutosti čeonog nosača se određuje na sledeći način:

$$f_{max} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_q \leq f_{dop} = K \cdot l_c, \quad (24)$$

$$f_1 = F_A \cdot l_c^3 \cdot [b_A / (2 \cdot l_c)] \cdot \left\{ 0,75 - (b_A / l_c)^2 + [(l_c / 2 - a_A) / l_c]^3 \right\} / (6 \cdot B_x), \quad (25)$$

$$f_2 = F_C \cdot l_c^3 \cdot [b_C / (2 \cdot l_c)] \cdot \left[0,75 - (b_C / l_c)^2 \right] / (6 \cdot B_x), \quad (26)$$

$$f_3 = -M_A \cdot l_c^2 \cdot \left\{ 0,5 \cdot \left[0,75 - 3 \cdot (b_A / l_c)^2 \right] + 3 \cdot [(l_c / 2 - a_A) / l_c]^2 \right\} / (6 \cdot B_x), \quad (27)$$

$$f_4 = M_C \cdot l_c^2 \cdot \left[0,75 - 3 \cdot (b_C / l_c)^2 \right] / (12 \cdot B_x), \quad (28)$$

$$f_q = 5 \cdot \gamma \cdot q_c \cdot l_c^4 / (384 \cdot B_x), \quad (29)$$

gde su: f_{max} maksimalni ugib na sredini čeonog nosača, f_1 ugib od opterećenja F_A , [5], f_2 ugib od opterećenja F_C , [5], f_3 ugib od opterećenja M_A , [5], f_4 ugib od opterećenja M_C , [5], f_5 ugib od sopstvene težine čeonog nosača q_c , [5], f_{dop} dozvoljeni ugib čeonog nosača, B_x savojna krutost čeonog nosača i b_A , a_A , b_C rastojanja, [5].

Takođe, neophodno je da budu zadovoljeni i sledeći uslovi (Slika 1):

$$b_1 \geq b_t + 2 \cdot a_1, \quad (30)$$

$$H + H_2 \geq D_t + H_3 + a_2 + t_1. \quad (31)$$

3 REZULTATI OPTIMIZACIJE

U ovom istraživanju problema optimizacije kutijastog poprečnog preseka čeonog nosača dvogredne mosne dizalice primenjen je algoritam vilihog konjica, Dragonfly Algorithm (DA), [11]. Detaljan opis ovog algoritma prikazan je u pomenutoj literaturi. Varijable postupka optimizacije su: b_1 , h , t_1 , t_2 , s (Slika 1). Optimizacija je izvršena u Matlab softverskom paketu, primenom DA koda.

Na primeru čeonog nosača jedne postojeće dvogredne mosne dizalice posmatraće se predloženi optimizacioni model.

Funkcija cilja optimizacionog problema je predstavljena u relaciji (4), dok funkcije ograničenja čine izrazi: (13), (14), (18), (21), (24), (30) i (31).

Kontrolni parametri postupka optimizacije: $N_{pop}=100$ – veličina populacije, $Max_It=500$ – maksimalni broj iteracija.

Donje i gornje granične vrednosti varijabli su: $b_t \leq b \leq 30$, $D_t \leq h \leq 70$, $0,6 \leq t_1 \leq 3$, $0,6 \leq t_2 \leq 3$, $0,5 \leq s \leq 2$.

Izvršeno je ukupno po deset simulacija za svaku varijantu i materijal, pri čemu su odabrana najbolja rešenja (Tabele 1-4). Takođe, posmatrano je i ograničenje visine nosača, pri čemu je usvojeno da visina nosača H mora biti manja od maksimalne dozvoljene visine $H_{max}=50$ cm. Tabele 1-4 prikazuju optimalne vrednosti geometrijskih parametara čeonog nosača, optimalne površine poprečnog preseka čeonog nosača, kao i uštedu u materijalu. Sve optimalne vrednosti su zaokružene na četiri decimale.

Table 1. Rezultati optimizacije za Varijantu 1

Materijal	b_1 (cm)	h (cm)	t_1 (cm)	t_2 (cm)	s (cm)	A_{co} (cm ²)	Ušteda (%)
S235	21,6763	53,5444	0,6596	0,6000	0,5000	84,6260	37,02
S355	21,5000	54,3530	0,6000	0,6000	0,5000	83,7530	37,67

Table 2. Rezultati optimizacije za Varijantu 1 (sa ograničenjem visine nosača)

Materijal	b_1 (cm)	h (cm)	t_1 (cm)	t_2 (cm)	s (cm)	A_{co} (cm ²)	Ušteda (%)
S235	30,0000	48,7041	0,6959	0,6000	0,5000	91,4681	31,92
S355	30,0000	48,7041	0,6959	0,6000	0,5000	91,4681	31,92

Table 3. Rezultati optimizacije za Varijantu 2

Materijal	b_1 (cm)	h (cm)	t_1 (cm)	t_2 (cm)	s (cm)	A'_{co} (cm ²)	Ušteda (%)
S235	21,8329	54,1371	0,7076	0,6000	0,5000	83,9925	37,49
S355	21,5000	55,5543	0,6000	0,6000	0,5000	82,5543	38,56

Table 4. Rezultati optimizacije za Varijantu 2 (sa ograničenjem visine nosača)

Materijal	b_1 (cm)	h (cm)	t_1 (cm)	t_2 (cm)	s (cm)	A'_{co} (cm ²)	Ušteda (%)
S235	27,0327	48,4300	0,7917	0,7494	0,5000	91,6327	31,80
S355	30,0000	48,6143	0,7448	0,6402	0,5000	91,5492	31,86

gde su A_{co} i A'_{co} optimalne površine za Varijantu 1 i Varijantu 2, respektivno.

4 ZAKLJUČCI

U ovom istraživanju problema optimizacije kutijastog poprečnog preseka čeonog nosača dvogredne mosne dizalice primenjen je algoritam vilinog konjica (DA).

Cilj istraživanja je bilo smanjiti masu, odnosno površinu poprečnog preseka čeonog nosača. Kao kriterijumi optimizacije posmatrani su čvrstoća nosača, lokalna stabilnost limova nosača, ugib nosača, kao i određena geometrijska ograničenja.

Na osnovu Tabela 1-4 se vidi da je ostvarena velika ušteda u materijalu, naročito za slučaj kada nema ograničenja visine nosača (Tabela 1 i Tabela 3). Takođe, primećuje se da izbor materijala ima mali uticaj na rešenja, pri čemu S355 postiže bolje rezultate u odnosu na S235, osim za slučaj prikazan u Tabeli 2. Za posmatrane zadate uslove može se primetiti da Varijanta 2 daje bolju uštedu u odnosu na Varijantu 1, kada nema ograničenja visine nosača (Tabela 1 i Tabela 3), dok u slučaju ograničenja visine nosača Varijanta 1 ostvaruje bolje rezultate (Tabela 2 i Tabela 4).

Na osnovu ovoga se dokazala opravdanost primene predstavljenog pristupa analizi i optimizaciji mase čeonog nosača, kao i primenjenog metoda optimizacije.

Za dalja istraživanja je neophodno primenjivati slične metaheurističke algoritme optimizacije, kako bi se izvršila njihova komparacija i dale preporuke u izboru algoritama koje se odnose na ove vrste nosećih struktura. Neophodno je u optimizacioni proces uvesti i dodatne funkcije ograničenja, koje se odnose na vrstu materijala, zamor, čvrstoću zavarenih veza, tehnologičnost, i sl. Takođe, od značaja su i ekonomski i zeleni aspekt projektovanja i proizvodnje.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz Ugovor o realizaciji i finansiranju naučno-istraživačkog rada u 2022. godini, čiji je evidencioni brojevi 451-03-68/2022-14/200102 i 451-03-68/2022-14/200108.

NOMENKLATURA

A površina poprečnog preseka, cm^2

a rastojanje, cm

B savojna krutost, kNcm^2

b širina, cm

C koeficijent, prema [10]

f ugib, cm

g_i funkcija ograničenja

H, h visina nosača, visina, respektivno, cm

I_x, I_y glavni moment inercije, cm^4

K koeficijent krutosti koji zavisi od načina upravljanja dizalicom i pogonske klase

k_a dinamički koeficijent opterećenja dizalice u horizontalnoj ravni, [9]

L raspon dizalice, m

l, l_c rastojanje između glavnih nosača, dužina čeonog nosača, respektivno, m

l_j, u_j donja, odnosno gornja vrednost promenjive x_j , cm

M_V, M_H momenti savijanja u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, kNcm

m masa, t

Q nosivost dizalice, t

q specifična težina, kN/cm

R_e , napon na granici tečenja za materijal čeonog nosača, kN/cm^2

s, t debljine limova, cm
 W otporni moment inercije, cm^3
 X, x_j vektor od n varijabli, varijable (promenljive), cm
 γ koeficijent koji zavisi od pogonske klase dizalice, prema [9]
 χ koeficijent izvijanja, prema [10]
 ν_1 koeficijent sigurnosti za 1. slučaj opterećenja
 σ napon, kN/cm^2
 ψ dinamički koeficijent oscilovanja, prema [9]
dop dozvoljena vrednost
f gornji pojasni lim
G glavni nosač
k kolica
š šina
t točak čeonog nosača
u ukupna vrednost
w vertikalni lim

LITERATURA

- [1] Yixiao, Q., Ji, J., Haiming, Y. (2016). High Precision Analysis of Stress Concentration in Girder High Precision Analysis of Stress Concentration in Girder Structure of Casting Crane, *International Journal of Science and Qualitative Analysis*, 2/2, p.p. 14-18.
- [2] Ling, Z., Wang, M., Xia, J., Wang, S., Guo, X. (2018). Stress Analysis for the Critical Metal Structure of Bridge Crane, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108, 022056.
- [3] Li, H., Wu, H. (2015). Study on bridge structure of bridge crane, *5th International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICCET 2015)*, Guangzhou, China, p.p. 1776-1779.
- [4] Hrabovsky, L. (2016). Action on Crane Runway Caused by Horizontal Forces due to Crane Skewing, *Key Engineering Materials*, 669, p.p. 391-399.
- [5] Pavlović, G., Savković M., Zdravković, B.N., Marković, G. (2021). Optimal design of end carriage structures, *XXV International Scientific Conference (TRANSPORT 2021)*, Sofia, Bulgaria, Vol. 19/3, 2114.
- [6] Pavlović, G., Savković, M., Zdravković, N., Marković, G. (2020). Optimization design of end carriage of the single-girder bridge crane structure, *MTC AJ*, 18/3, 1939.
- [7] Pavlović, G., Jerman, B., Savković, M., Zdravković, N., Marković, G. (2022). Metaheuristic applications in mechanical and structural design, *Engineering TODAY*, 1/1, p.p. 19-26.
- [8] Pavlović, G., Savković, M., Marković, G., Zdravković, N., Stanojković, J. (2018). Optimal design of welded I-beam of slewing pillar jib crane, *IMK – 14, Research&Development in Heavy Machinery*, 24/3, p.p. 77-84.
- [9] Ostrić, D., Tošić S. (2005). *Dizalice*, Institut za mehanizaciju Mašinskog Fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- [10] Jugoslovenski zavod za standardizaciju (1986). SRPS U.E7.121, *Proračun izbočavanja limova*, Beograd.
- [11] Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems, *Neural Comput & Applic*, 27, p.p. 1053–1073.