



OPTIMIZACIJA MASE GLAVNOG NOSAČA KUTIJASTOG POPREČNOG PRESEKA DVOGREDNE MOSNE DIZALICE SA ŠINOM POSTAVLJENOM NA SREDINI GORNJE LAMELE

Goran Pavlović¹, Mile Savković², Goran Marković³, Nebojša Zdravković⁴

Rezime: U ovom istraživanju izvršena je analiza i optimizacija kutijastog poprečnog preseka glavnog nosača dvogredne mosne dizalice sa šinom na sredini gornje lamele. Smanjenje mase glavnog nosača postavljeno je kao funkcija cilja. Kao metode za određivanje optimalnih geometrijskih parametara kutijastog poprečnog preseka korišćeni su metaheuristički algoritmi optimizacije primenom MATLAB softverskog paketa. Kao funkcije ograničenja uzeti su kriterijumi čvrstoće u karakterističnim tačkama preseka, kao i uticaj lokalnih naprezanja usled pritiska točka na šinu, ugibi u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, period prigušenja oscilacija, kao i određena tehnološka ograničenja i preporuke. Opravdanost primene ovog postupka prikazana je na numeričkim primerima dvogrednih mosnih dizalica, gde se vidi ostvarena ušteda materijala glavnih nosača.

Ključne riječi: dvogredna mosna dizalica, kutijasti poprečni presek, metaheuristički algoritmi, optimalno projektovanje

MASS-OPTIMIZED DESIGN OF THE MAIN GIRDER WITH BOX-SECTION OF THE DOUBLE-GIRDER BRIDGE CRANE WITH THE RAIL PLACED IN THE MIDDLE OF THE TOP FLANGE

Abstract: In this research, the analysis and optimization design of the box-section of the main girder of the double-girder bridge crane with the rail in the middle of the top flange was performed. The reduction of the mass of the girder is set as the objective function. Metaheuristic algorithms of optimization were used as methods for determining of optimal geometric parameters of the box-section using by MATLAB software package. The constraint functions include the strength criteria in the characteristic points of the box-section, as well as the influence of local stresses due to the action of trolley wheels on the rail, deflections in the vertical and horizontal plane,

¹ dr maš.inž., Goran Pavlović, Istraživačko-razvojni centar Alfatec, Niš, Srbija, goran.pavlovic@alfatec.rs

² prof. dr Mile Savković, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija, savkovic.m@mfkv.kg.ac.rs

³ doc. dr Goran Marković, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija, markovic.g@mfkv.kg.ac.rs

⁴ doc. dr Nebojša Zdravković, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija, zdravkovic.n@mfkv.kg.ac.rs

the period of the girder oscillation, as well as some technological limitations and technical recommendations. The justification of application of this procedure is shown on numerical examples of the double-girder bridge cranes, where savings in material of the main girders are evident.

Key words: Box-section, Double-girder bridge crane, Metaheuristic algorithms, Optimal design

1 UVOD

Glavni zadatak u procesu projektovanja noseće konstrukcije dvogredne mosne dizalice jeste određivanje optimalnih geometrijskih parametara poprečnog preseka glavnog nosača.

Najveći broj radova i publikacija se bavi problemom analize naponskih stanja i deformacija glavnih nosača dizalica, kao i njihovom optimizacijom. Analiza i optimizacija konstrukcije dvogredne dizalice sa šinom na sredini nosača izvršena je u radu [1] primenom ANSYS softverskog paketa, pri čemu se ukazalo na značaj veza između glavnih i čeonih nosača. MKE ima veliku primenu kod ovih analiza, što je pokazano i u radovima [2, 3]. U radu [2], primenom programa ANSYS i ABACUS softverskih paketa, izvršena je optimizacija kutijastih nosača mosnih dizalica u zavisnosti od različitih industrijskih ograničenja. U radu [3] je analiziran glavni nosač dvogredne mosne dizalice primenom softverskog paketa SOLIDWORKS, pri čemu su rezultati poređeni sa analitičkim rezultatima.

Pored primene MKE, sve češće se koriste različite numeričke metode optimizacije koje su naročito pogodne kod višekriterijumskih optimizacija, a sve više se primenjuju metaheuristički algoritmi optimizacije [4-6, 8]. U radu [4], primenjen je NBA metod na konstrukciji dvogredne mosne dizalice, dok je u [5] korišćen ICA metod. U radu [6], primenjeni su biološko-inspirisani algoritmi na konstrukciji mosne dizalice.

Navedeni radovi ukazuju na značaj optimizacije kako glavnih nosača dvogrednih mosnih dizalica, tako i za rešavanje sličnih inženjerskih problema primenom najrazličitijih algoritama i metoda optimizacija.

Imajući u vidu napred navedene rezultate istraživanja, cilj ovog rada jeste da se definišu optimalne vrednosti parametara geometrije poprečnog preseka kutijastog nosača dvogredne mosne dizalice koje će dovesti do smanjenja njegove mase.

2 MATEMATIČKA FORMULACIJA PROBLEMA OPTIMIZACIJE

Zadatak optimizacije je određivanje geometrijskih parametara poprečnog preseka nosača koji daju njegovu minimalnu površinu (funkcija cilja), pri čemu moraju biti zadovoljeni svi zadati uslovi (funkcije ograničenja).

Opšta matematička formulacija problema optimizacije glasi:

minimizacija funkcije cilja $f(X)$,

u odnosu na funkcije ograničenja $g_i(X) \leq 0, i = 1, \dots, m$,

pri čemu važi i sledeće: $l_j \leq x_j \leq u_j, u_j > l_j, x_j > 0, j = 1, \dots, n$.

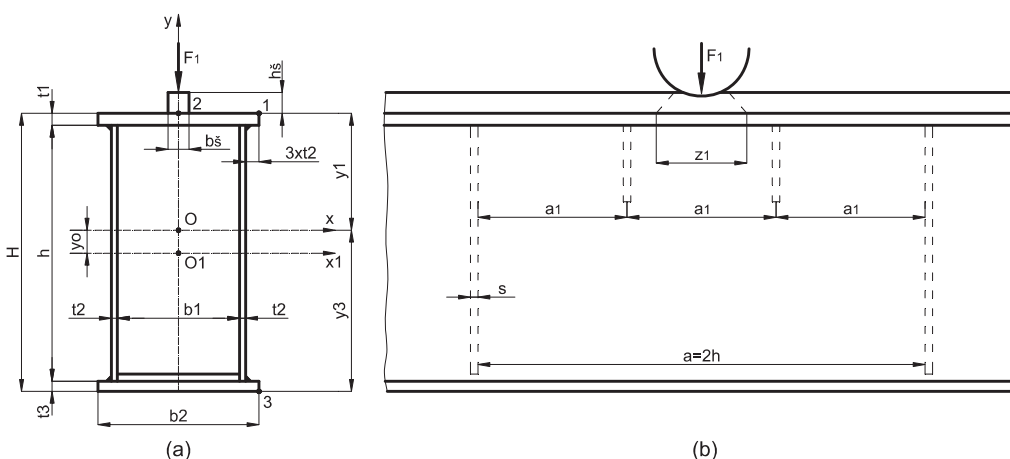
Za optimizaciju su primenjena dva algoritma optimizacije, algoritam simulacije kaljenja (Simulated Annealing - SA) i algoritam harmonijskog pretraživanja (Harmony Search - HS).

SA spada u metaheuristički metod optimizacije i zasniva se na postupku kaljenja materijala, [7]. Ovaj algoritam imitira proces kristalizacije za vreme zagrevanja ili hlađenja. Kada je materijal topao, čestice imaju visoku kinetičku energiju i kreću se slučajno u odnosu na svoje ili pozicije drugih čestica, a hlađenjem materijala se dobija da se više čestica usmeri prema pravcima koji minimiziraju energetski balans.

HS spada takođe u grupu metaheurističkih metoda optimizacije i zasniva se na principu na kojem džez muzičari improvizuju nove melodije tražeći savršenu melodiju (harmoniju), [8].

3 FUNKCIJA CILJA

Funkciju cilja predstavlja površinu poprečnog preseka kutijastog nosača (Slika 1a), bez površine šine. Sledeće geometrijske veličine su predmet optimizacije: h , b_1 , t_1 , t_2 i t_3 .



Slika 1. Kutijasti poprečni presek dvoogredne mosne dizalice (a) sa prikazanim položajem vertikalnih ukrućenja (b)

Površina kutijastog poprečnog preseka, odnosno funkcija cilja, glasi:

$$f(X) = A = 2 \cdot h \cdot t_2 + (t_1 + t_3) \cdot b_2. \quad (1)$$

4 FUNKCIJE OGRANIČENJA

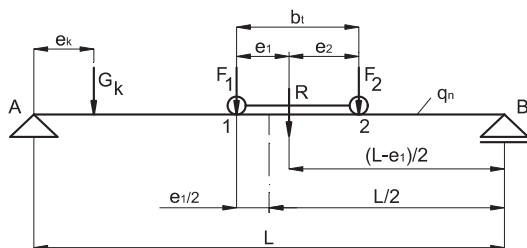
4.1 Maksimalni naponi u karakterističnim tačkama kutijastog poprečnog preseka

Provera napona se vrši u karakterističnim tačkama nosača (Slika 1a), koji moraju biti manji od graničnog napona. Kako tangencijalni naponi nisu od značaja kod ovog tipa nosača, pošto su im vrednosti reda veličine niže od normalnih napona, biće zanemareni u daljoj analizi. Posmatraju se naponi u tačkama 1 i 3 (Slika 1a), dok se naponi u tački 2 razmatraju kao poseban kriterijum.

Granični napon se određuje prema izrazu (2):

$$\sigma_{dop} = R_e / \nu_1. \quad (2)$$

Statički model po kome se vrši određivanje momenta savijanja u vertikalnoj i horizontalnoj ravni prikazan je šematski na narednoj slici (Slika 2).



Slika 2. Model opterećenja glavnog nosača dvogredne mosne dizalice

Veličine neophodne za proračun napona u karakterističnim tačkama poprečnog preseka određuju se na osnovu sledećih izraza:

$$R = \gamma \cdot (\psi \cdot Q + m_t) \cdot g / 2, \quad (3)$$

$$F_1 = R \cdot (b_t - e_1) / b_t, \quad (4)$$

$$M_V = \frac{R}{4 \cdot L} \cdot (L - e_1)^2 + \gamma \cdot \left[\frac{q_m \cdot L^2}{8} + G_k \cdot \frac{e_k}{2 \cdot L} \cdot (L + e_1) \right], \quad (5)$$

$$q_m = 1,1 \cdot \rho \cdot g \cdot A, \quad (6)$$

$$R_H = k_a \cdot (\psi \cdot Q + m_t) \cdot g / 2, \quad (7)$$

$$F_{1H} = R_H \cdot (b_t - e_1) / b_t, \quad (8)$$

$$M_H = \gamma \cdot \left\{ \frac{R_H}{4 \cdot L} \cdot (L - e_1)^2 + k_a \cdot \left[\frac{q_m \cdot L^2}{8} + G_k \cdot \frac{e_k}{2 \cdot L} \cdot (L + e_1) \right] \right\}. \quad (9)$$

Geometrijske karakteristike (glavni momenti inercije, otporni momenti inercije za x i y osu) poprečnog preseka (Slika 1a), određuju se prema poznatim izrazima.

Maksimalni napon u tački 1:

$$\sigma_{u,1} = M_V / W_{x1} + M_H / W_{y1}. \quad (10)$$

Maksimalni napon u tački 3:

$$\sigma_{u,3} = M_V / W_{x3} + M_H / W_{y3}. \quad (11)$$

4.2 Maksimalni naponi na sredini gornje lamele nosača usled lokalnog savijanja

Usled kontakta šine i pojasnog lima pri prolasku točka kolica (Slika 1b) javlja se lokalno savijanje lima i pojava dvoosnog naponskog stanja, pri čemu se normalni naponi u podužnom i poprečnom pravcu određuju prema [9]:

$$\sigma_{zM} = 6 \cdot K_3 \cdot N / t_1^2, \quad (12)$$

$$\sigma_{xM} = 6 \cdot K_2 \cdot N / t_1^2 \leq \sigma_{dop}. \quad (13)$$

Raspored položaja glavnih vertikalnih ukrućenja i kratkih ukrućenja je prikazan na slici (Slika 1b). Usvojeno je da je debljina ovih ukrućenja s jednaka debljini vertikalnih limova glavnog nosača. Horizontalno ukrućenje nije razmatrano u ovoj analizi.

Sila N koja je merodavna za proračun ovih komponenti normalnih napona, i predstavlja deo sile pritiska točka koji usled krutosti šine otpada na ploču:

$$N = \frac{F_1}{1 + \frac{96 \cdot b_1^2 \cdot I_{s1} \cdot K_1}{a_1^3 \cdot t_1^3} \cdot \frac{1}{c_o}}, \quad a_1 \geq b_1, \quad (14)$$

$$N = \frac{F_1}{1 + \frac{96 \cdot I_{s1} \cdot K_1}{a_1 \cdot t_1^3} \cdot \frac{1}{c_o}}, \quad a_1 < b_1, \quad (15)$$

$$a_1 = a/3 = 2 \cdot h/3. \quad (16)$$

Koeficijenti K_1 , K_2 i K_3 zavise od odnosa a_1/b_1 , b_s/b_1 i z_1/b_1 , i određuju se prema [9], pri čemu je:

$$z_1 = 2 \cdot h_s + 5, \quad \text{cm}. \quad (17)$$

Ukupni napon na sredini gornje lamele (tačka 2) iznosi:

$$\sigma_{u,2} = \sqrt{(\sigma_{z_2} + \sigma_{z_M})^2 + \sigma_{x_M}^2 - (\sigma_{z_2} + \sigma_{z_M}) \cdot \sigma_{x_M}} \leq 1,1 \cdot \sigma_{dop}, \quad (18)$$

pri čemu mora biti ispunjen i sledeći uslov:

$$\sigma_{z_{2u}} = \sigma_{z_2} + \sigma_{z_M} = M_V / W_{x1} + 6 \cdot K_3 \cdot N / t_1^2 \leq \sigma_{dop}. \quad (19)$$

Pored ovih uslova, mora biti ispunjeno i da napon u ukrućenjima (vertikalnih dijafragmi i pomoćna kratka među-ukrućenja) bude u dopuštenim granicama:

$$\sigma_p = \frac{F_1}{(b_s + 2 \cdot t_2) \cdot s} \leq R_{e,p}. \quad (20)$$

4.3 Maksimalni ugibi u vertikalnoj i horizontalnoj ravni

Za ove uslove, posmatraju se ugibi glavnog nosača na sredini raspona u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, usled dejstva točkova kolica na glavnom nosaču, preko šine, pri čemu se uzima i uticaj horizontalnih sila (kod ugiba u horizontalnoj ravni). Takođe, uzeta je u obzir i spostvena težina nosača, kao i težina kabine, ukoliko postoji (kod ugiba u vertikalnoj ravni):

$$f_V = \frac{F_1 \cdot L^3}{48 \cdot B_x} \cdot [1 + \alpha \cdot (1 - 6 \cdot \beta^2)] + \frac{5 \cdot q_n \cdot L^4}{384 \cdot B_x} + \frac{G_k \cdot L^3}{6 \cdot B_x} \cdot \left\{ \frac{L - e_k}{2 \cdot L} \cdot \left[\frac{3}{4} - \left(\frac{L - e_k}{L} \right)^2 \right] + \left(\frac{L - 2 \cdot e_k}{2 \cdot L} \right)^3 \right\} \leq f_{V,d} = K_V \cdot L, \quad (21)$$

$$f_H = \frac{F_{1H} \cdot L^3}{48 \cdot B_y} \cdot [1 + \alpha \cdot (1 - 6 \cdot \beta^2)] \leq f_{H,d} = K_H \cdot L, \quad (22)$$

Ostale veličine su definisane prema [9].

4.4 Vreme gašenja oscilovanja tereta na nosaču

Kod ovog kriterijuma posmatra se oscilovanje glavnog nosača sa teretom u vertikalnoj ravni, pri čemu se posmatra jedan nosač kao prosta greda sa polovinom mase tereta i kolica sa vitlom, prema [9].

Period gašenja određuje se na osnovu izraza (23):

$$T = 6\pi \cdot \sqrt{\delta_{11} \cdot m_1} / \gamma_d \leq T_d, \quad (23)$$

pri čemu specifična masa koja osciluje na sredini proste grede obuhvata i redukovanu masu nosača i određuje se prema sledećem izrazu:

$$m_1 = (Q + m_t) / 2 + 35 \cdot m_n / 72. \quad (24)$$

Ostale veličine se određuju prema [9].

5 NUMERIČKI PRIKAZ REZULTATA OPTIMIZACIJE

Problem optimizacije je rešen primenom programskog paketa MATLAB. Korišćeni su pomenuti metaheuristički algoritmi optimizacije HS i SA. Takođe, optimizacija je izvršena i primenom poznatih MATLAB funkcija *fmincon* i *pattern search*, kako bi se izvršilo poređenje rezultata. Primena ovih algoritama optimizacije izvršena je na primerima dve dvogredne mosne dizalice, pri čemu jedna predstavlja izvedeno rešenje, dok je primer druge korišćen iz [9].

Pored gorenavedenih uslova (funkcija ograničenja) koji moraju biti zadovoljeni, korišćene su i određene konstruktivne i tehnološke preporuke, što predstavlja dodatne funkcije ograničenja. U narednoj tabeli (Tabela 1) date su karakteristike mosnih dizalice, što predstavlja ulazne podatke za proces optimizacije. Obe dizalice su pogonske klase 2, i ostali ulazni podaci su usvojeni za ovu pogonsku klasu, prema [9].

Table 1. Karakteristike dvogrednih mosnih dizalica sa šinom na sredini gornje lamele

Pr.	Q (t)	L (m)	m_t (t)	b_t (cm)	e_1 (cm)	G_K (kN)	e_K (m)	k_a	Materijal	$b_s \times h_s$ (cm x cm)	A_p (cm ²)
1	12,5	18	2,86	160	56,7	15	2,3	0,1	S355	4,5x4,5	171,68
2	10	7	4,49	186,6	78,3	/	/	0,05	S235	5x5	125,12

U narednim tabelama prikazani su rezultati optimizacije primenom navedenih metoda optimizacije, za date primere. Za primer 2 će biti prikazane dve varijante modela optimizacije, posmatraće se prvo slučaj kada ne postoje dodatna ukrućenja između vertikalnih dijafragmi (kao što je u izvedenom rešenju – Tabela 3) i slučaj kada se dodaju dodatna ukrućenja – Tabela 4. Takođe, treba napomenuti da su dobijene debljine limova zaokružene na prvi veći celi broj.

Table 2. Ušteda u materijalu (%) i rezultati optimizacije za Primer 1

Metod	h (cm)	b_1 (cm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	A_{opt} (cm ²)	Ušteda
fmincon	93,68	48,27	6	5	6	156,40	8,90%
pattern.search	88,50	45,99	6	5	9	163,49	4,77%
SA	93,68	48,28	6	5	6	156,42	8,89%
HS	90,62	45,16	8	5	7	164,36	4,26%

Table 3. Ušteda u materijalu (%) i rezultati optimizacije za Primer 2 – bez dodatnih ukrućenja

Metod	h (cm)	b_1 (cm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	A_{opt} (cm ²)	Ušteda
fmincon	40,00	25,00	6	5	6	74,80	40,22%
pattern.search	40,00	25,00	6	5	6	74,80	40,22%
SA	40,00	25,00	6	5	6	74,80	40,22%
HS	40,00	25,00	6	5	6	74,80	40,22%

Table 4. Ušteda u materijalu (%) i rezultati optimizacije za Primer 2 – sa dodatnim ukrućenjima

Metod	h (cm)	b_1 (cm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	A_{opt} (cm ²)	Ušteda
fmincon	40,00	47,67	6	5	6	102,00	18,48%
pattern.search	40,00	25,00	17	5	6	106,70	14,72%
SA	40,00	25,00	17	5	6	106,70	14,72%
HS	40,00	47,67	6	5	6	102,00	18,48%

6 ZAKLJUČCI

Primena predstavljenih metaheurističkih algoritama optimizacije se uspešno pokazala na prikazanom optimizacionom problemu, što se vidi na ostvarenim uštedama (Tabela 2, Tabela 3 i Tabela 4). Na osnovu numeričkih vrednosti prikazanih u navedenim tabelama, vidi se da se primenom funkcije *fmincon* dobijaju u svim slučajevima rezultati sa najvećom uštedom, dok je *pattern search* dala nešto slabije rezultate. Primenjeni algoritmi SA i HS u zavisnosti od slučaja, takođe daju rezultate sa najboljom uštedom.

Na Primeru 2 se vidi da sa uvođenjem dodatnih vertikalnih među-ukrućenja može znatno ostvariti ušteda u materijalu (povećenje uštede sa 14,72% odnosno 18,48% na 40,22%).

Prikazani optimizacioni problem se može dalje nadograđivati u cilju smanjivanja površine poprečnog preseka, odnosno smanjenje ukupne mase glavnog nosača. U daljim istraživanjima treba posvetiti pažnju uticaju lokalnog savijanja, odnosno pravilnom izboru i postavljanju vertikalnih ukrućenja. Predstavljene algoritmi optimizacije mogu se uspešno koristiti i kod sličnih inženjerskih problema, pri čemu se precizniji rezultati mogu dobiti uvođenjem dodatnih ograničenja, kao što su u ovom slučaju elastična stabilnost elemenata nosača, zamor materijala i sl.

ZAHVALNOST

Deo ovog istraživanja predstavlja doprinos projektima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Projekat III 44006 i Projekat TR 35038.

NOMENKLATURA

l_j, u_j donja, odnosno gornja vrednost promenjive x_j

Q nosivost dizalice, t

L raspon dizalice, m

q_n, m_n specifična težina, odnosno masa konstrukcije glavnog nosača, kN/cm, kg

m_t masa kolica, t

b_t rastojanje između točkova kolica, cm

e_1 položaj rezultujuće sile opterećenja u odnosu na točak 1 kolica, cm
 k_a dinamički koeficijent opterećenja dizalice u horizontalnoj ravni
 $R_e, R_{e,p}$ napon granice tečenja za osnovni material glavnog nosača i ukrućenja, kN/cm²
 G_k težina kabine, kN
 e_k položaj kabine u odnosu na početak mosta, m
 R, R_H rezultujuće sile u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, kN
 M_V, M_H momenti savijanja u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, kNcm
 F_1, F_{1H} sile točka 1 kolica u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, kN
 K_1, K_2, K_3 koeficijenti za proračun lokalnih napona savijanja
 z_1 dužina uticajne zone lokalnog pritiska, prema [9], cm
 c_o koeficijent koji zavisi od načina vezivanja šine za nosač, prema [9]
 K_V, K_H koeficijenti krutosti koji zavisi od načina upravljanja dizalicom i pogonske klase
 $f_{V,d}, f_{H,d}$ granični ugibi u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, cm
 I_x, I_y glavni moment inercije za x osu, cm⁴
 I_{S1} moment inercije šine za sopstvenu osu, cm⁴
 B_x, B_y savojne krutosti za x i y osu, kNcm²
 W_x, W_y otporni momenti inercije za karakteristične tačke za x i y osu, cm³
 T_d granični period oscilovanja, s
 α, β koeficijenti za proračun ugiba, prema [9]
 γ, ψ koeficijenti za proračun opterećenja, prema [9]
 v_1 koeficijent sigurnosti za 1. slučaj opterećenja
 δ_{11} pomeranje grede izazvano dejstvom jedinične sile, m
 γ_d logaritamski dekrement koji pokazuje brzinu gašenja oscilovanja (zavisi od odnosa visine nosača prema rasponu), prema [9]

LITERATURA

- [1] Sankar, V.V., Pravin, A.P., Suresh, P. (2018). Analysis and design optimisation in the structural member of a double girder overhead crane, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118 (11), p.p. 211–217.
- [2] Abid, M., Khan, S.M., Wajid, H.A. (2018). Optimization of box type girder with and without industrial constraints, *IJUM Engineering Journal*, vol. 19 (1), p.p. 289–306.
- [3] Sushma, K.B., Malviya, A. (2017). Study & design analysis on girder of EOT crane, *IJARIIIE*, vol. 3 (5), p.p. 1441–1445.
- [4] Chakri, A., Rabia, K., Benouaret, M. (2017). Optimization of the box-girder of overhead crane with constrained new bat algorithm, *Rev. Sci. Technol.*, vol. 35, p.p. 187–203.
- [5] Fan, X., Zhi, B. (2017). Design for a crane metallic structure based on imperialist competitive algorithm and inverse reliability strategy, *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 30, p.p. 900–912.
- [6] Savković, M., Bulatović, R., Gašić, M., Pavlović, G., Stepanović, A. (2017). Optimization of the box section of the main girder of the single-girder bridge crane by applying biologically inspired algorithms, *Engineering Structures*, vol. 148. p.p. 452-465.
- [7] Dreo, J., Petrowski, A., Siarry, P., Taillard, E. (2006). *Metaheuristics for Hard Optimization*, SPRINGER, Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [8] Zong, W.G. (2009). *Harmony Search Algorithms for Structural Design Optimization*, Studies in Computational Intelligence, vol. 239, SPRINGER, Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [9] Ostrić, D. (1992). *Dizalice*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.