

## ANALIZA METODELOR UTILIZATE ÎN SCOPUL OPTIMIZĂRII SECȚIUNILOR TRANSVERSALE ALE BRAȚELOR PENTRU AUTOMACARALE

### ANALYSIS OF THE METHODS USED TO OPTIMIZE CROSS-SECTION ARMS OF THE SELF-CRANES

Cristina SESCU-GAL<sup>1</sup>, Cătălin FRÂNCU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitatea Tehnică de Construcții, București, România, Facultatea de Utilaj Tehnologic  
[cristina.sescu-gal@utcb.ro](mailto:cristina.sescu-gal@utcb.ro); [francu@utcb.ro](mailto:francu@utcb.ro)

**Rezumat:** Lucrarea prezintă unele metode utilizate pentru optimizarea structurală a secțiunilor închise a brațelor automacaralelor. Brațele automacaralelor sunt construcții metalice de tip cheson închis, realizate prin asamblări sudate. Fiind necesară obținerea dimensiunilor de transport, brațele sunt alcătuite din tronsoane, de regulă telescopabile, acționate cu cilindri hidraulici. Pentru macaralele montate pe autocamioane, secțiunea transversală a brațelor poate fi și de tipul cheson deschis. Cercetările pentru optimizarea secțiunilor acestor construcții sunt multiple, deoarece se caută atât obținerea celei mai optime forme care să reziste solicitărilor, concomitent cu reducerea masei și implicit a costurilor pe unitatea de lungime.

**Cuvinte cheie:** automacarale, construcții chesonate, optimizare, secțiune transversală

**Abstract:** The paper presents some methods used for the structural optimization of the closed sections of the crane arms. The arms of the cranes are metallic constructions of closed caisson type, made by welded assemblies. Being necessary to obtain the transport dimensions, the arms are made up of sections, usually telescopic, operated with hydraulic cylinders. For truck mounted cranes, the cross section of the arms can also be of the open drawer type. The researches for the optimization of the sections of these constructions are multiple, as they seek both to obtain the best form that can withstand the demands, while reducing the mass and implicitly the costs per unit length.

**Keywords:** cranes, caisson construction, optimization, cross section

## 1. INTRODUCERE

Conceptul general de „optimizare” constă în elaborarea și selecționarea sistematică a soluțiilor posibile pentru o temă analizată, scopul final fiind acela de a selecta cea mai bună soluție care, în limitele unor date de referință definite prin condițiile impuse, conduce la utilizarea cea mai avantajoasă a resurselor necesare pentru concretizarea temei. Brațele automacaralelor au o construcție metalică de tip cheson, secțiune închisă, realizată prin sudură, care sunt formate din tronsoane telescopabile acționate cu cilindri hidraulici. O preocupare a producătorilor de pe mapamond este reprezentată de obținerea formei optime a secțiunii transversale care să ofere aceeași rezistență la solicitările date concomitent cu scăderea

greutății dar și a costurilor cu fabricația. Pentru a realiza optimizarea unei structuri se elaborează un model de calcul pentru o variantă “inițială” a structurii. Pentru acest model se definesc unul sau mai mulți parametri de proiectare – denumiți și variabile de proiectare - și valori și (sau) intervale de valori posibile ale acestora denumite restricții, sub forma unor egalități sau inegalități.

## 2. OPTIMIZAREA STRUCTURALĂ A SECȚIUNILOR TRANSVERSALE ALE BRAȚELOR AUTOMACARALELOR

Obiectivul optimizării structurale este maximizarea performanței structurii brațului, în principal din condiția obținerii unor structuri ușoare, ieftine și de înaltă performanță. Problema tipică de optimizare structurală este formulată ca minimizarea unei funcții obiectiv, de obicei reprezentând greutatea structurii sau volumul acesteia. Optimizarea structurală este o metodă prin care se caută cele mai bune soluții și care care îndeplinesc mai bine cerințele tehnice. Principalele cerințe ale brațelor de automacarale sunt rezistența la solicitări în timpul exploatarei, ergonomia formei, productivitatea și ușurința execuției concomitent cu realizarea economisirii resurselor. Aceste deziderate sunt garantate prin restricții de proiectare și fabricație, iar economia poate fi obținută prin minimizarea unei funcții de cost.

Conform [1] optimizarea structurală are patru componente principale:

- constrângerile de proiectare - se referă la solicitări, stabilitate, deformare, frecvență proprie, amortizare;
- constrângerile de fabricație - formulează limitarea distorsiunilor reziduale de sudură, cerințe pentru tehnologia de sudare, limitări ale grosimilor plăcii și ale principalelor dimensiuni ale secțiunii, definirea tipodimensiunilor de profile disponibile;
- funcția de cost - este formulată în funcție de secvența de fabricație și conține costul materialelor, asamblării, sudurii, tăierii și protecției anticorozive;
- metode matematice utilizate.

Constrângerile de proiectare pot fi: limitarea tensiunii maxime corespunzător momentului maxim de încovoiere, limitarea zvelteții plăcilor până la limita de apariție a voalărilor atât în tălpile cât și în inimile grinzilor. Dacă se iau ca parametri de optimizare minimizarea volumului și a costului, se determină dimensiuni diferite ale secțiunilor brațelor, dar diferența de cost între cele două variante optime este mică.

Funcția de costuri cuprinde costul materialului, asamblării, sudării și protecției anticorozive. Această funcție cuprinde parametrii structurali principali care trebuie optimizați, cum ar fi: dimensiuni principale ale secțiunii transversale, precum și dimensiunile sudurilor. Întrucât costul de sudare este proporțional cu pătratul dimensiunii sudurii, această dimensiune trebuie minimizată pentru a realiza structuri economice. Prin adoptarea dimensiunilor constante ale secțiunii transversale pentru întreg tronsonul telescopabil, pentru optimizare este suficient obținerea volumului minim.

Relația dintre tensiuni (uneori eforturi) și forma structurii este factorul fundamental atât în proiectarea curentă, cât și în cea optimală, această dependență folosindu-se fie pentru determinarea tensiunilor când se cunoaște configurația structurii, fie pentru determinarea formei structurii când se cunosc (sau se impun) valorile maxime ale tensiunilor. Criteriul de alegere a formei structurii depinde de condițiile care trebuie satisfăcute de structură, fiecare criteriu având o importanță decisivă asupra rezultatului optimizării. Criterii “absolute” de optimizare nu există și nici sunt de dorit.

### 3. FORMULAREA PROBLEMELOR DE OPTIMIZARE. METODE MATEMATICE UTILIZATE

Modelul matematic al oricarei probleme de optimizare presupune minimizarea sau maximizarea unei funcții  $f: X \rightarrow R$  numită funcție obiectiv. Algoritmul matematic al procesului de optimizare este, de regulă, o “strategie euristică” de găsire a celei mai bune soluții din mulțimea celor posibile. Problemele de optimizare care se întâlnesc deseori în practică se caracterizează prin necesitatea de a optimiza simultan mai multe criterii. Aceste probleme sunt denumite probleme de optimizare multicriterială [2].

Problema de optimizare definită în acest mod poate fi dată de următoarea formulare matematică generală: dacă  $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  este vectorul dat și  $\vec{y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]$  este vectorul parametrilor variabili, atunci funcția obiectivă este exprimată ca  $F = F(\vec{x}, \vec{y})$ . Parametrii căutați trebuie să satisfacă și ecuațiile de limitare:  $g_s(\vec{x}, \vec{y}) \leq 0, s = 1, \dots, m$ .

În figura 1 sunt prezentate cele mai utilizate secțiuni transversale pentru construcția brațelor de automacarale.

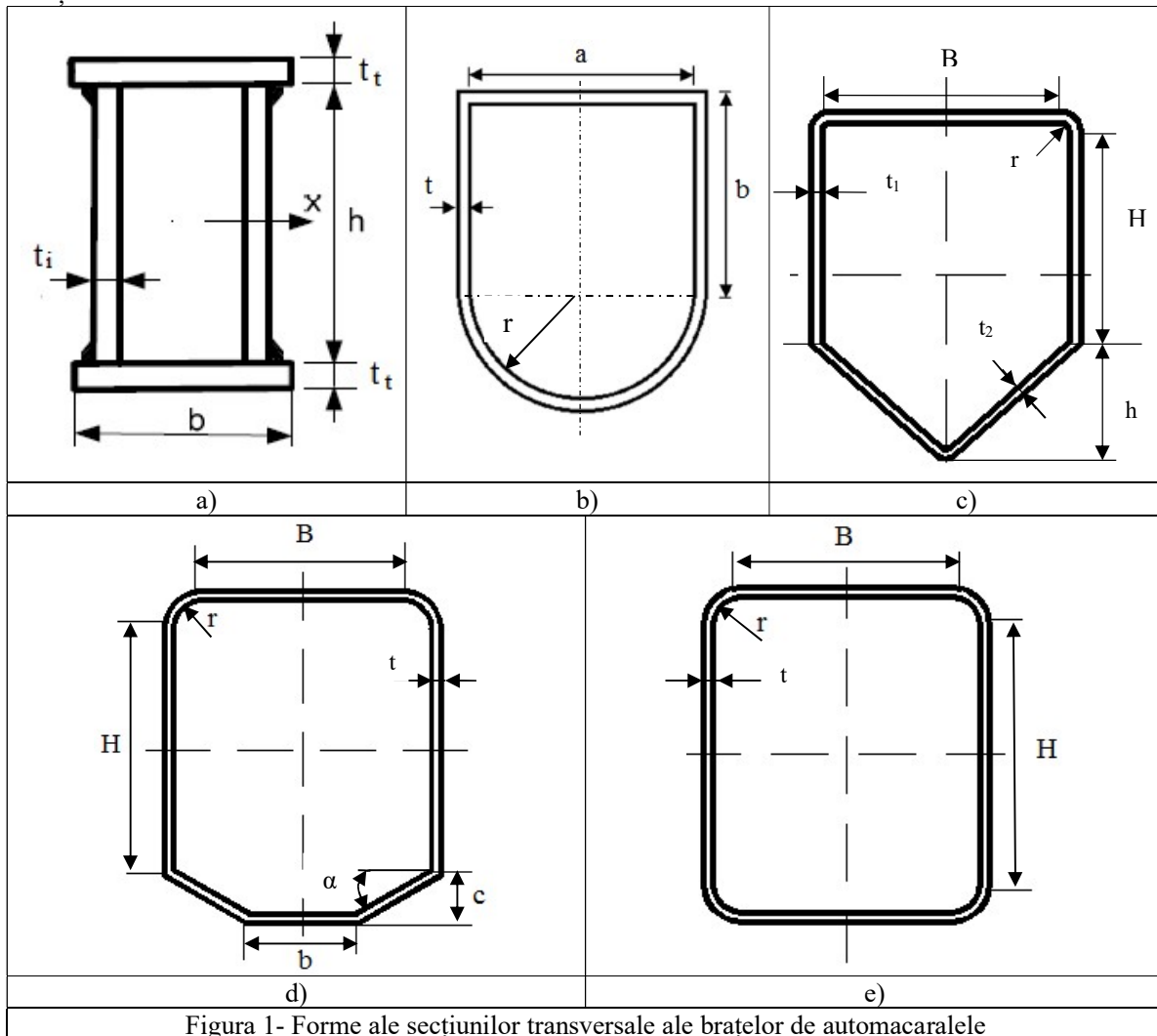


Figura 1- Forme ale secțiunilor transversale ale brațelor de automacarale

În optimizarea structurală, cercetătorii folosesc cu preponderență volumul ca funcție obiectivă. Pentru a proiecta structuri economice și concurențiale, ar trebui formulată și redusă la minimum și o funcție de costuri. Conform metodelor utilizate în proiectare, specificate în literatura de specialitate, [3] [4], există relații aproximative cu ajutorul cărora se pot stabili apriori, cât mai optim secțiunile transversale ale brațelor chesonate respectând următoarele recomandări:

- forma secțiunii să fie simetrică față de planul de acțiune al forțelor, astfel se evită solicitările de răsucire;
- utilizarea metodei coeficientului de profil, bazată pe constatarea că raportul  $\frac{A^2}{I} = k$  numit *coeficient de profil*, este aproximativ constant pentru o anumită formă a secțiunii și nu depinde de mărimea ei;
- utilizarea metodei razelor de girație aproximative, care se bazează pe constatarea că pentru o anumită formă a secțiunii există rapoarte cu valori aproximativ constante între lățimea  $b$  și înălțimea  $h$  secțiunii și razele de girație  $i_x$  respectiv  $i_y$ :  $\alpha_x = \frac{i_x}{h}$  și  $\alpha_y = \frac{i_y}{b}$ .

### 3.1. OPTIMIZAREA CU MULTIPLICATORII LAGRANGE

Metoda multiplicatorilor lui Lagrange se aplică la diferite moduri deterministe și stocastice de căutare a minimumului sau maximumului unei funcții. Funcția Lagrange este definită astfel (1).

$$\Phi(X) = f(X) + \lambda \cdot g(X) \quad (1)$$

unde:

$\lambda$  – multiplicatorul Lagrange;

$g(X)$  - funcția de constrângere.

Trebuie îndeplinite următoarele condiții, astfel încât funcția obiectiv să atingă nivelul de minim:

$$\frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_i} = 0, \text{ unde } i = 1, \dots, D \quad (2)$$

Înlocuind relația (2) în relația (1), rezultă:

$$\frac{\partial f(X)}{\partial x_i} + \lambda \cdot \frac{\partial g(X)}{\partial x_i} = 0, \text{ unde } i = 1, \dots, D \quad (3)$$

Pentru secțiunile transversale ale brațelor arătate în figura (1), funcția obiectiv căutată cu

Analiza metodelor utilizate în scopul optimizării secțiunilor transversale ale brațelor pentru automacarale

multiplicatorul Lagrange se referă la optimizarea ariei secțiunii, adică găsirea valorilor optime ale dimensiunilor pentru a minimiza întreaga secțiune transversală. În tabelul 1, se prezintă relațiile ariilor secțiunilor din figura 1.

Nr. crt.	Tipul secțiunii din figura 1	Funcția obiectiv (aria secțiunii)
1.	Figura 1.a	$A = 2 \cdot h \cdot t_i + 2 \cdot b \cdot t_i$
2.	Figura 1.b.	$A = a \cdot t + 2 \cdot b \cdot t + \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot t \cdot (a + t)$
3.	Figura 1.c.	$A = B \cdot t + 2 \cdot H \cdot t + \pi \cdot r \cdot t + \frac{t \cdot (B + 2 \cdot t)}{2}$
4.	Figura 1.d.	$A = B \cdot t + 2 \cdot H \cdot t + b \cdot t + 2 \cdot [(B - b) \cdot \cos \alpha] \cdot t + \pi \cdot t \cdot \left(r + \frac{1}{2} \cdot t\right)$
5.	Figura 1.e.	$A = 2 \cdot B \cdot t + 2 \cdot H \cdot t + \pi \cdot t \cdot (2 \cdot r + t)$

Formularea funcției de constrângere trebuie să țin cont de criteriile de rezistență, rigiditate și deformabilitate pe care trebuie să le satisfacă brațele de automacarale.

Utilizând criteriul tensiunilor, având în vedere că există o solicitare axială și un moment de încovoiere, figura 2, ceea ce este specific tuturor brațelor de macarale și automacarale, formulăm funcția de constrângere ca fiind funcția generală de rigiditate și stabilitate definită de relația (4) [2], [5], [6], [7]:

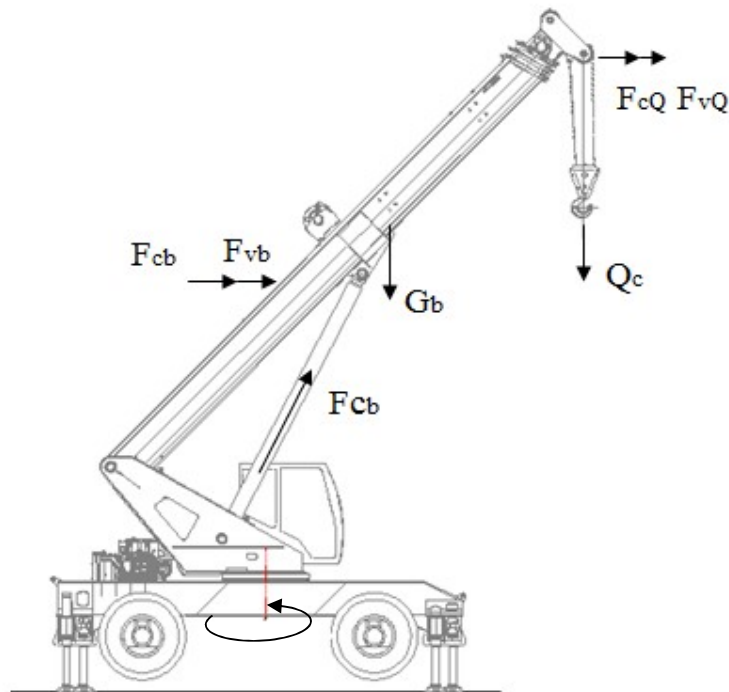
$$\varphi = \left( \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \right)^2 - [\sigma_a]^2 = 0 \text{ sau } \varphi = \sigma_e - \sigma_a = 0 \quad (4)$$

Relația (4) este valabilă prin neglijarea solicitării de torsiune,  $\tau = \frac{M_t}{W_t}$ , a cărei valoare redusă influențează semnificativ calculul.

Considerând că volumul secțiunilor studiate pot fi optimizate prin optimizarea valorilor lățimii  $b$  și înălțimii  $h$  a secțiunii, reducând astfel optimizarea la o funcție de două criterii. Parametri caracteristici brațelor automacaralelor pot fi reprezentați de vectorul  $\vec{x} = (L, N, M_x, M_y, \sigma_a)$ , iar vectorul variabilelor de  $\vec{y} = (b, h)$ .

Pentru a minimiza sau maximiza funcția  $A = (b, h)$  la o anumită valoare, este necesară satisfacerea ecuațiilor (5):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial h} = 0 \quad (5)$$



**Figura 2 – Solicitări brațelor de automacarale**

$Q_c$  – greutatea de calcul a sarcinii, inclusiv a dispozitivului de prindere,  $F_{cQ}$  – forța centrifugă a sarcinii,  $F_{vQ}$  – forța vântului asupra sarcinii,  $G_b$  – greutatea de calcul a brațului (tronsoanelui),  $F_{cb}$  – forța centrifugă a brațului,  $F_{vb}$  – forța vântului asupra brațului

Așadar, funcția Lagrange poate fi scrisă conform relației (6):

$$\varphi(b, h, \lambda) = A(b, h) + \lambda \varphi(b, h) \quad (6)$$

în care  $\lambda$  este multiplicatorul necunoscut Lagrange. Derivatele ecuației (6) sunt exprimate astfel (7):

$$\frac{\partial A}{\partial b} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial A}{\partial h} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial h} = 0 \quad (7)$$

Din relațiile (7) rezultă expresia multiplicatorului Lagrange  $\lambda$  de forma (8):

$$\lambda = \frac{-(\partial A / \partial b)}{(\partial \varphi / \partial b)}; \quad \lambda = \frac{-(\partial A / \partial h)}{(\partial \varphi / \partial h)} \quad (8)$$

sau

$$\left( \frac{\partial A}{\partial h} \right) \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial b} \right) = \left( \frac{\partial A}{\partial b} \right) \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial h} \right) \quad (9)$$

### 3.2. OPTIMIZAREA CU METODA EVOLUȚIEI DIFERENȚIALE - DE

Metoda Diferențial Evolution – DE, este un algoritm evolutiv eficient, conceput pentru a rezolva problemele de optimizare cu parametri valorici reali. Metoda a fost dezvoltată de Storn, R. Și Price, K. în 1997 [8] în lucrarea [9]. În general, sarcina de rezolvat este de a optimiza anumite proprietăți ale unui sistem prin alegerea pertinentă a parametrilor sistemului. Aplicarea metodei la calculul de optimizare a brațelor telescopabile de autoacarale se regăsește în lucrările [2] și [10]. Metoda DE nu oferă dependența funcției obiective sub formă analitică, dar oferă utilizarea unui număr mai mare de limite, a unei game mai largi de variabile de proiectare inițiale și a unui număr mai mare de soluții, care îndeplinesc limitele definite. Conform (wikipedia), metoda DE utilizează ca parametri de control:

- populația soluțiilor candidate NP;
- constanta de încrucișare CR;
- factorul de ponderare sau mutația constantă F.

Definirea funcției obiectiv al metodei DE (10):

$$f : R^n \rightarrow R \quad (10)$$

Reprezentând funcția obiectiv ce trebuie minimizată. Pentru probleme de maxim, expresia are forma (11):

$$h := -f \quad (11)$$

Funcția ia drept argument o soluție candidată sub forma unui vector de numere reale și produce ca rezultat un număr real care indică potrivirea soluției candidate respective. Parametri utilizați în proiectarea brațelor telescopabile se exprimă sub forma unui vector de tipul (12) iar funcția de constrângere este de forma relației (4):

$$X = (b, h, t) \quad (12)$$

Metoda DE este dezvoltată continuu în scopul îmbunătățirii performanțelor de optimizare, tendința actuală fiind realizarea unei metode de optimizare hibridă, folosind metoda DE în combinație cu alte metode cum ar fi algoritm evolutivi, optimizarea multiobiectivă Pareto (art. Comparative)

## 4. CONCLUZII

Proiectarea structurilor metalice ale brațelor telescopabile tip cheson închis este intens cercetată. Scopul este obținerea unor structuri cât mai optime din punct de vedere al comportării la solicitări. Prin reducerea volumului de material, se obține o reducere a masei totale ceea ce oferă posibilitatea creșterii parametrilor tehnologici ai instalației de ridicat.

În ce privește forma secțiunii transversale, proiectanții au limite impuse cu privire la

adoptarea geometriei, limitări datorate formelor de protejare sau al geometriei. Pentru obținerea unor rezultate concludente, este important adoptarea celei mai bune topologii structurale posibile, în contextul obiectivelor urmărite și a constrângerilor ce sunt necesare a fi impuse.

Criteriile funcției obiectiv pentru optimizarea structurilor metalice ale bratelor telescopabile pot fi:

- greutatea minimă;
- rezistență maximă;
- rigiditate maximă;
- cost minim.

Obținerea celor mai bune rezultate în urma unui proces de optimizare aplicat unei structuri metalice pentru braț depinde de algoritmul prin care proiectantul adoptă cei mai buni parametri pentru funcția obiectiv și constrângerile obligatorii de rezistență și rigiditate pentru ca structura să ofere aceeași siguranță în exploatare.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] **J. Farkas, K. Jármai** - *Optimum Design of Steel Structures*, 2013, ISBN 978-3-642-36868-4
- [2] **M. M. Gašić, M. M. Savković, R. R. Bulatović** - *Optimization of Trapezoidal Cross Section of the Truck Crane Boom by Lagrange's Multipliers and by Differential Evolution Algorithm (DE)*, Journal of Mechanical Engineering 57(2011)4, 304-312;
- [3] **M. Alămoreanu, T. Tișea** - *Mașini de ridicat, vol. II, Editura Tehnică, București, 2000, ISBN: 973-31-0827-8*
- [4] **D. Mateescu, I. Caraba** - *Construcții metalice. Editura Tehnică, București, 1980;*
- [5] **D. Glad Stephen, A. Banerjee, A. Lahiri, I. Mehta** – *Optimization of cross section of mobile crane boom using lagrange multiplier's method*, Materials Science and Engineering 402 (2018) 012134 doi:10.1088/1757-899X/402/1/012134.
- [6] **R. Selmic, P. Cvetkovic, R. Mijailovic, G. Kastratovic** - *Optimum Dimensions of Triangular Cross-Section in Lattice Structures*, Meccanica (2006) 41:391–406.
- [7] **R. Selmic, R. Mijailovic**, - *Optimum dimensions of trapezium cross-section in structures*, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering Vol.1, No 5, 1998 pp. 555 – 564;
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Differential\\_evolution](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_evolution);
- [9] **Storn, R.; Price, K. (1997)** - *Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces*. Journal of Global Optimization. 11 (4): 341–359. doi:10.1023/A:1008202821328;
- [10] **M. M. Gašić, M. M. Savkovic, R. R. Bulatovic, R. S. Petrovic** - *Optimization of a pentagonal cross section of the truck crane boom using Lagrange's multipliers and differential evolution algorithm*, Meccanica (2011) 46:845–853 DOI 10.1007/s11012-010-9343-7
- [11] **D.P. Bertsekas** – *Constrained Optimization and lagrange Multiplier Methods*, 1996, ISBN 1-886529-04-3;
- [12] **S. Kukkonen, J. Lampinen** - *Comparison of generalized differential evolution to other multi-objective evolutionary algorithms*, <https://pdfs.semanticscholar.org/2f53/7ff640639da7d0382c8331d92d36825f524d.pdf>, accesat octombrie 2019.