

Primljen / Received: 4.3.2020.

Ispravljen / Corrected: 7.7.2020.

Prihvaćen / Accepted: 12.8.2021.

Dostupno online / Available online: 10.3.2022.

Optimalni projekt drvenih konstrukcija izloženih djelovanju požara uporabom metaheurističkog algoritma

Autor:



Doc.dr.sc. **Serdar Ulusoy**, dipl.ing.građ.
Tursko-njemačko sveučilište, Istanbul, Turska
Odjel za građevinarstvo
serdar.ulusoy@tau.edu.tr
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Serdar Ulusoy

Optimalni projekt drvenih konstrukcija izloženih djelovanju požara uporabom metaheurističkog algoritma

Jedan je od glavnih zadataka konstrukcijskih inženjera smanjiti troškove građenja. Zato je svakim danom sve važnija učinkovita optimizacija konstrukcijskih elemenata. U ovom istraživanju predlaže se optimizacija koja se temelji na podučavanju i učenju (TLBO), a koja je jedan od metaheurističkih algoritama za optimalno projektiranje drvenih konstrukcija izloženih djelovanju požara koji su u skladu s normom EN 1995 1-2 (Eurocode 5: Projekt drvenih konstrukcija - Dio 1-2 Opći projekt konstrukcije izložene djelovanju požara). Objektivna je funkcija u ovom algoritmu trošak građenja drvenih konstrukcija izloženih djelovanju požara, uzimajući u obzir preuranjeni krah konstrukcije te granice širenja vatre. Proučava se drvena konstrukcija s različitim vremenom trajanja izloženosti požaru kako bi se odredio poprečni presjek i vrsta konstrukcijskih elemenata. Zaključak je da TLBO omogućava da se u kratkom vremenu učinkovito optimizira poprečni presjek i čvrstoća konstrukcijskih drvenih elemenata prema normi EN 1995 1-2.

Ključne riječi:

drvene konstrukcije, projekt požara, metaheuristički algoritmi, Eurocode 5

Research Paper

Serdar Ulusoy

Optimum design of timber structures under fire using metaheuristic algorithm

One of the major tasks of structural engineers is to reduce the building cost. Thus, an effective optimization of structural elements is gaining in importance every day. The teaching-learning-based optimization (TLBO), which is one of metaheuristic algorithms, for an optimum design and analysis of timber structures under fire in accordance with EN 1995 1-2 (Eurocode 5: Design of Timber structures - Part 1- 2 General structural fire design), is proposed in this study. The objective function in this algorithm is the building cost of timber structures under fire, considering premature collapse of the structure and limitation of fire spread. A structure made of wood is investigated under different times of fire exposure in order to determine the cross-section and wood type of structural elements. In conclusion, the cross section and strength of structural elements made of wood can be effectively and rapidly optimized with TLBO according to EN 1995 1-2.

Key words:

timber structures, fire design, metaheuristic algorithms, Eurocode 5

1. Uvod

Posljednjih godina, umjesto tradicionalnih matematičkih metoda, u inženjerstvu se razvijaju primjene i pojednostavljenja kako bi se prevladale poteškoće u rješavanju složenih problema. Među svim tim primjenama najvažnije prednosti metaheurističkih algoritama kojima se računa maksimalna i minimalna vrijednost objektivne funkcije jesu u tome da one oblikuju učinkovita rješenja inženjerskih problema uzimajući u obzir ravnotežu između sigurnosti i troška u kratkom vremenu. Metaheuristički algoritmi inspirirani događajima u prirodi dijele se u tri skupine i to kao evolucijski algoritmi, inteligencija roja te drugi metaheuristički algoritmi. Najvažniji predstavnici tih algoritama su genetski algoritam [1] iz evolucijskih algoritama, optimizacija roja čestica (eng. *particle swarm optimization* - PSO) [2], optimizacija kolonije mrava (eng. *ant colony optimization* - ACO) [3], algoritam šišmiša [4] i algoritam oprašivanja cvijeća (eng. *flower pollination algorithm* - FPA) [5], algoritam kolonije umjetnih pčela (eng. *artificial bee colony* - ABC) [6] iz roj inteligencije te podučavanje optimizacije temeljene na učenju (eng. *teaching-learning-based optimization* - TLBO) [7], Jaya algoritam (eng. *Jaya algorithm* - JA) [8], algoritam traženja harmonije (eng. *harmony search algorithm* - HS) [9] iz ostalih metaheurističkih algoritama. Jednako tako, svi metaheuristički algoritmi imaju različite karakteristične značajke u svojim matematičkim izrazima, a slučajni odabir projektnih varijabli te odabir najbolje objektivne funkcije zajednička su obilježja svih algoritama [4].

Postojeće ili nove generacije metaheurističkih algoritama široko se primjenjuju u konstrukcijskom inženjerstvu kao što su tankostijeni nosači, konzolni potporni zidovi, kontrolni uređaj konstrukcije (pasivna, aktivna ili temeljna izolacija) i čelični i armiranobetonski elementi. Optimalno projektiranje za aksijalno simetrično i cilindrično naknadno prednapete betonske zidove, rezultat je algoritma za traženje harmonije [10] i optimalno projektiranje novih hibridnih metaheurističkih metoda (Jaya koja koristi Lévy letove, Jaya koja koristi Lévy letove s probabilističkom učeničkom fazom (JALS), JA koji koristi Lévy letove s dosljednom učeničkom fazom (JALS2) i to u slučajevima različite visine i opterećenja [11] te projektiranje konzolnih potpornih zidova i pilota uz pomoć algoritma za traženje harmonije [12]. Optimalni parametri prigušivača prilagođene mase za seizmički pobuđene konstrukcije određuju se uz pomoć nekoliko metaheurističkih algoritama poput optimizacije kolonije mrava, algoritma za traženje harmonije, algoritma za oprašivanje cvijeća i algoritma šišmiša [13-16]. Široko rasprostranjena upotreba metaheurističkih algoritama ne predlaže se samo u pasivno kontroliranim konstrukcijama, već i u aktivno kontroliranim konstrukcijama (određenje parametara na proporcionalno-integralno-derivacijskom regulatoru, pri čemu se koristi optimizacija podučavanja utemeljenog na učenju [17, 18] te traženje harmonije [19]). Jednako tako, postupno raste i broj metaheurističkih algoritama kojima se postiže optimalno projektiranje armiranobetonskih konstrukcija. Primjerice, optimalno projektiranje armiranobetonskog temelja [20], optimalno projektiranje armiranobetonskih kontinuiranih greda te armiranobetonskih višekatnih i višerasponskih okvirnih

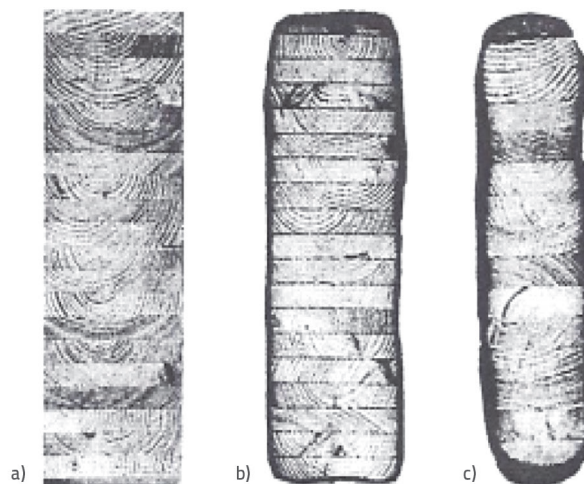
konstrukcija [21, 22], optimizacija armiranobetonskih stupova koji imaju dvoosno opterećenje [23], projektiranje čeličnog okvira s polukrutim spojevima [24, 25], optimalno projektiranje čeličnih plošnih nosača [26], analiza rešetkaste čelične konstrukcije [27] te elemente u ravninskom stanju naprezanja [28, 29].

Drvo je jedan od najstarijih građevnih materijala koje čovjek koristi i široko se primjenjuje na zadnjem katu zgrada kao krovni nosač koji štiti konstrukciju od vanjskih utjecaja poput kiše i snijega. Danas se drvene konstrukcije mogu projektirati na velikom rasponu, u skladu s inženjerskim propisima. Određivanje poprečnog presjeka i čvrstoće drvenih konstrukcija općenito se temelji na iskustvu inženjera da bi se zadovoljili uvjeti nosivosti i uporabivosti greda i stupova. Zato se trošak građenja koji je u skladu s odgovarajućim propisima razlikuje kod svakog inženjera. U ovom istraživanju predlaže se optimizacija učenja kako bi se postigla ravnoteža između sigurnosti i troška izvedbe drvene konstrukcije izložene djelovanju požara 30 i 60 minuta. Projekt te konstrukcije napravljen je u skladu s Eurokodom 5: Projekt drvenih konstrukcija - Dio 1-2 Opći projekt konstrukcije izložene djelovanju požara.

Ovaj rad pokazuje da se povećava vrijeme požarne otpornosti povećanjem poprečnog presjeka i povećanjem čvrstoće konstrukcijskih elemenata, ali ne i koliko bi trebalo biti to povećanje presjeka te koja bi trebala biti čvrstoća konstrukcijskih elemenata kako bi se postigli optimalni rezultati za različito vrijeme izloženosti požaru poput 30 ili 60 minuta, odnosno, koji su poprečni presjek i čvrstoća elementa donose optimalne rezultate.

2. Projekt drvenih konstrukcija izloženih djelovanju požara

Iako su drvene konstrukcije zapaljiv materijal, pružaju velik otpor požaru ako poprečni presjek ima dostatne dimenzije. Uzrok pogodnog ponašanja prilikom izloženosti požaru su odlična svojstva drva, tj. svojstvo da pougljenizira vanjsko područje i tako stvara zaštitni sloj koji ima nisku toplinsku provodljivost usporavajući daljnje gorenja [30]. Na slici 1. prikazani su vanjski rubovi drvenog elementa izloženog djelovanju požara u različito vrijeme.



Slika 1. Drvena konstrukcija: a) prije testa; b) nakon 30 minuta; c) nakon 60 minuta

Pri požarnom opterećenju, svojstvo koje ima definiranu požarnu otpornost elementa jest vrijeme, tj. koliko dugo elementi pružaju otpor, poput F30-B (otpor vatri u trajanju duljem od 30 minuta), F60-B (otpor vatri u trajanju duljem od 60 minuta) te F90-B (otpor vatri u trajanju duljem od 90 minuta.) [31].

Prilikom projektiranja zaštićenih drvenih konstrukcija osnovno je opterećenje dano izrazom (1), koji je u skladu s pravilima kombinacije iz norme EN 1990:2002 (Eurocode: Osnove konstrukcijskog projekta) [32] i opisan u skladu s normom EN 1995-1-2 (Eurocode 5: Projekt drvenih konstrukcija - Dio 1-2 Projekt opće konstrukcije izložene djelovanju požara) kojom se razlikuju direktno i indirektno djelovanje [33]. Ne trebaju se uzeti u obzir indirektna djelovanja ako imaju blagi utjecaj na nosivost ili se taj utjecaj može uzeti u obzir prikladnim projektiranjem ležajeva [34].

$$E_{d,fi} = \sum \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (1)$$

gdje: $E_{d,fi}$ predstavlja projektnu vrijednost djelovanja u slučaju izloženosti požaru, γ_{GA} je parcijalni koeficijent stalnog djelovanja u izvanrednoj kombinaciji te je jednak 1,0, G_k je karakteristična vrijednost stalnog djelovanja, $\psi_{1,1}$ je kombinacijski faktor za učestalu kombinaciju djelovanja, $Q_{k,1}$ je karakteristična vrijednost vodećeg varijabilnog djelovanja, $\psi_{2,i}$ je kombinacijski faktor za kvazistalnu vrijednost promjenjivog djelovanja, $Q_{k,i}$ je karakteristična vrijednost dodatnog promjenjivog djelovanja i $A_d(t)$ je projektna vrijednost indirektnih djelovanja.

Projektne vrijednosti koje pokazuju svojstva čvrstoće i krutosti u slučaju izloženosti djelovanju požara odredit će se izrazom (2). 20 % fraktila čvrstoće na normalnoj temperaturi računa se tako da se pomnoži karakteristična čvrstoća s faktorom koji je u skladu s EC 1995-1-2. Tablica 1. prikazuje taj faktor za različite materijale.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2)$$

gdje: $F_{d,fi}$ je projektna čvrstoća tijekom izloženosti požaru, $k_{mod,fi}$ je modifikacijski faktor za požar, f_{20} je 20 % fraktila čvrstoće na normalnoj temperaturi i $\gamma_{M,fi}$ je parcijalni faktor sigurnosti za drvo izloženo požaru te je jednako 1,0.

EC 1995-1-2 nudi dvije metode za dimenzioniranje greda i stupova u slučaju izloženosti požaru. Jedna metoda, koja se zove metoda smanjenog poprečnog presjeka, omogućava dimenzioniranje s učinkovitim poprečnim presjekom, a druga je poznata kao metoda reducirane čvrstoće i krutosti. U ovom istraživanju primjenjuje se metoda reducirane čvrstoće i krutosti za dimenzioniranje greda i stupova u slučaju djelovanja požara, što je prikazano u izrazima (3) do (8).

$$k_{mod,m,fi} = 1 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r} \quad (3)$$

$$k_{mod,c,0,fi} = 1 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r} \quad (4)$$

$$k_{mod,E,fi} = 1 - \frac{1}{330} \frac{p}{A_r} \quad (5)$$

$$f_{m,d,fi} = \frac{k_{fi} \cdot k_{mod,m,fi} \cdot f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6)$$

$$f_{c,0,d,fi} = \frac{k_{fi} \cdot k_{mod,c,0,fi} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_{M,fi}} \quad (7)$$

$$E_{fi} = \frac{k_{fi} \cdot k_{mod,E,fi} \cdot E_{005}}{\gamma_{M,fi}} \quad (8)$$

U tim izrazima, p je opseg ostataka poprečnog presjeka izloženog požaru, A_r je površina ostataka poprečnog presjeka, $f_{m,k}$ je karakteristična čvrstoća na savijanje, $f_{c,0,k}$ je karakteristična tlačna čvrstoća, E_{005} je modul elastičnosti, $f_{m,d,fi}$ je projektna vrijednost čvrstoće na savijanje, $f_{c,0,d,fi}$ je tlačna čvrstoća, a E_{fi} je modul elastičnosti u slučaju djelovanja požara.

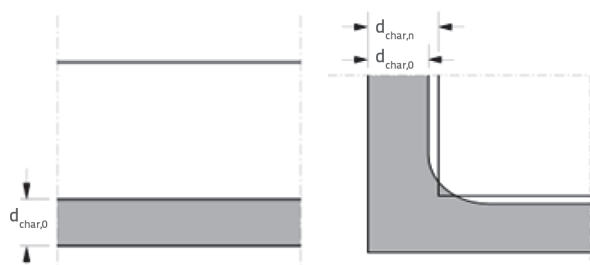
Tablica 1. Vrijednosti k_{fi}

Materijal	k_{fi}
Puno drvo	1,25
Lijepljeno lamelirano drvo	1,15
Drvene ploče	1,15
LVL	1,10
Spojna sredstva s bočnim drvenim elementima i drvenim pločama	1,15
Spojna sredstva s bočnim čeličnim elementima	1,05
Aksijalno opterećena spojna sredstva	1,05

Dubina pougljenja je udaljenost između izvorne vanjske površine presjeka i položaja na kojem se nalazi linija pougljavanja, prikazana na slici 2., te je glavni parametar za izračun opsega ostatka poprečnog presjeka izloženog djelovanju požara i površine preostalog poprečnog presjeka. Računa se kao funkcija vremena izloženosti djelovanju požara i odgovarajuće brzine izgaranja koja je prikazana u tablici 2. Jednako tako, jednodimenzionalna i višestrana dubina pougljenja prikazuje izraz (9), odnosno izraz (10). To je vrijeme izloženosti požaru, β_0 je jednodimenzionalna brzina izgaranja, a β_n je brzina izgaranja za višestrani požar koja uključuje učinak zaobljenja rubova i pukotine.

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (9)$$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (10)$$



Slika 2. Dubina pougljenja jednostrano $d_{char,0}$ i višestranu $d_{char,n}$ požarno djelovanje

Tablica 2. Projektne stope pougljavanja drva β_0 i β_n , LVL, lamperija i drvene ploče

Materijal	β_0	β_n
a) Crnogorično drvo i bukva		
Lijepljeno lamelirano drvo karakteristične gustoće $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Puno drvo karakteristične gustoće $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,80
b) Bjelogorično drvo		
Puno ili lijepljeno lamelirano bjelogorično drvo karakteristične gustoće $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Puno ili lijepljeno lamelirano bjelogorično drvo karakteristične gustoće $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL		
karakteristične gustoće $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
d) Ploče		
Drvene ploče	0,90	-
Šperploče	1,00	-
Drvene ploče koje nisu šperploče	0,90	-

Maksimalna vrijednost naprezanja pri savijanju, vlačnog i tlačnog naprezanja mora biti manja od vrijednosti čvrstoće nasavijanja, vlačne i tlačne čvrstoće kako bi osigurala sigurno projektiranje u slučaju požara. Te matematičke izraze prikazuju izrazi (11) do (13). U slučaju kombiniranog vlačnog naprezanja i naprezanja pri savijanju koristi se izraz (14), a u slučaju kombiniranog tlačnog naprezanja i naprezanja pri savijanju koristi se izraz (15). k_m je faktor redukcije i jednak je 0,7 za poprečni presjek u obliku pravokutnika.

$$\sigma_{m,d,fi} \leq f_{m,d,fi} \tag{11}$$

$$\sigma_{c,0,d,fi} \leq f_{c,0,d,fi} \tag{12}$$

$$\sigma_{t,0,d,fi} \leq f_{t,0,d,fi} \tag{13}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d,fi}}{f_{t,0,d,fi}} + \frac{\sigma_{m,y,d,fi}}{f_{m,y,d,fi}} + k_m \left(\frac{\sigma_{m,z,d,fi}}{f_{m,z,d,fi}} \right) \leq 1 \tag{14}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d,fi}}{f_{c,0,d,fi}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d,fi}}{f_{m,y,d,fi}} + k_m \left(\frac{\sigma_{m,z,d,fi}}{f_{m,z,d,fi}} \right) \leq 1 \tag{15}$$

Koeficijent izvijanja $k_{c,y,fi}$ oko y osi koji je podložan tlačnom naprezanju i naprezanju pri savijanju u slučaju požara određuje se na sljedeći način:

$$\lambda_{y,fi} = \frac{l_{ef,fi}}{i_{y,fi}} \tag{16}$$

$$\lambda_{rel,y,fi} = \frac{\lambda_{y,fi}}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{005}}} \tag{17}$$

$$k_{y,fi} = 0,5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y,fi} - 0,3) + \lambda_{rel,y,fi}^2 \right] \tag{18}$$

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{za puno drvo} \\ 0,1 & \text{za lijepljeno lamelirano drvo} \end{cases}$$

$$k_{c,y,fi} = \min \left\{ \frac{1}{k_{y,fi} + \sqrt{k_{y,fi}^2 - \lambda_{rel,y,fi}^2}}; 1 \right\} \tag{19}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d,fi}}{k_{c,y,fi} * f_{c,0,d,fi}} + \frac{\sigma_{m,y,d,fi}}{f_{m,y,d,fi}} + k_m \left(\frac{\sigma_{m,z,d,fi}}{f_{m,z,d,fi}} \right) \leq 1 \tag{20}$$

$i_{y,fi}$ je radijus elipse tromosti oko y -osi, $\lambda_{y,fi}$ je koeficijent izvijanja oko y -osi, a $l_{ef,fi}$ je duljina izvijanja tlačnog dijela oko y -osi. Eulerovi slučajevi izvijanja grednog nosača obično se koriste kako bi se izračunala $l_{ef,fi}$ duljina izvijanja konstrukcijskog elementa poput grede ili stupa.

3. Predložena metodologija

Metaheuristički algoritmi razvijaju se kako bi optimizirali objektivnu funkciju složenih problema koji se mogu naći u inženjerstvu i to upotrebom projektnih varijabli. Jednom kad se nasumično odrede inicijalne projektne varijable, tada te vrijednosti dosegnu svoje optimalne vrijednosti uzimajući u obzir projektne ograničenja tijekom procesa optimizacije. U ovom istraživanju koristi se algoritam koji se temelji na učenju i podučavanju, a razvili su ga Rao i dr. [7], kako bi optimizirali poprečne presjeke i vrstu drva konstrukcijskih sustava izloženih djelovanju požara. U tom algoritmu smatra se da je rješenje objektivne funkcije poput učitelja koji u razredu ima najviše znanja o predmetu. Nakon što učitelj prosljedi predmet učenicima, oni to nastavljaju među sobom razvijati, a učenik koji ima bolje vladanje predmetom imenovan je novim učiteljem. Na taj način postiže se optimalna funkcija za taj predmet. Algoritam koji se temelji na učenju i podučavanju sastoji se od dviju etapa (etapa podučavanja i etapa učenja). Matematički izrazi objiju etapa prikazuju izrazi (21) i (22).

$$x_{new} = x_{old} + rnd(1)(x_{teacher} - TFx_{mean}) \tag{21}$$

$$x_{new} = \begin{cases} x_{old} + rnd(1)(x_j - x_k) & \text{if } f(x_j) < f(x_k) \\ x_{old} + rnd(1)(x_k - x_j) & \text{if } f(x_k) < f(x_j) \end{cases} \quad (22)$$

x_{new} je novo rješenje, x_{old} je postojeće rješenje, $rnd(1)$ je nasumični broj između 0 i 1, $x_{teacher}$ je najbolje rješenje koje određuje učitelj, TF je faktor podučavanja za koji se uzima vrijednost 1 ili 2, x_{mean} je prosjek svih rješenja, a x_j i x_k su dva nasumično odabrana rješenja koja se određuju kao učenici. Slika 3. prikazuje dijagram toka optimizacije koja koristi TLBO.

Kod za optimizaciju drvenih konstrukcija izloženih djelovanju požara napisan je u Matlabu [35] uz pomoć algoritma koji se temelji na učenju i podučavanju. U procesu optimizacije, a s ciljem da se izračuna objektivna funkcija (jedinični trošak za drvenu konstrukciju), uzima se 16 projektnih varijabli s 10 brojeva populacije (projektna varijable stvaraju set rješenja koji se skupljaju u matricu) i projektnih ograničenja s funkcijom kazne koju prikazuju tablice 3. i 4. Nakon izračuna prve nasumične objektivne funkcije, proces optimizacije nastavlja do 100000 ponavljanja kako bi se postigli optimalni rezultati. Objektivna se funkcija može napisati kako je danu u izrazu (23):

Tablica 3. Projektna varijabla drvene konstrukcije izložene djelovanju požara

Konstrukcija	Opis	Projektna varijable [mm]	
Konstrukcija krova	širina konstrukcijskog elementa 1	$80 \leq b_1 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq b_1 \leq 240$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 1	$80 \leq h_1 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq h_1 \leq 240$ slučaj 2
	širina konstrukcijskog elementa 2	$80 \leq b_2 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq b_2 \leq 240$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 2	$80 \leq h_2 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq h_2 \leq 240$ slučaj 2
Grede s jednim rasponom i stupovi	širina konstrukcijskog elementa 3	$80 \leq b_3 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq b_3 \leq 240$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 3	$80 \leq h_3 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq h_3 \leq 240$ slučaj 2
	širina konstrukcijskog elementa 4	$80 \leq b_4 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq b_4 \leq 240$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 4	$80 \leq h_4 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq h_4 \leq 240$ slučaj 2
	širina konstrukcijskog elementa 5	$80 \leq b_5 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq b_5 \leq 240$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 5	$80 \leq h_5 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq h_5 \leq 240$ slučaj 2
	širina konstrukcijskog elementa 6	$80 \leq b_6 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq b_6 \leq 240$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 6	$80 \leq h_6 \leq 240$ slučaj 1	$130 \leq h_6 \leq 240$ slučaj 2
Konstrukcija okvira	širina konstrukcijskog elementa 7	$120 \leq b_7 \leq 1000$ slučaj 1	$120 \leq b_7 \leq 1000$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 7	$120 \leq h_7 \leq 1000$ slučaj 1	$120 \leq h_7 \leq 1000$ slučaj 2
	širina konstrukcijskog elementa 8	$120 \leq b_8 \leq 1000$ slučaj 1	$120 \leq b_8 \leq 1000$ slučaj 2
	visina konstrukcijskog elementa 8	$120 \leq h_8 \leq 1000$ slučaj 1	$120 \leq h_8 \leq 1000$ slučaj 2

Tablica 4. Projektna ograničenja drvenih konstrukcija

Element	Opis	Projektna ograničenja
Svi konstrukcijski elementi	Faktor sigurnosti kod normalnog naprezanja pri vlaku i savijanju	Vidi izraz (14)
	Faktor sigurnosti kod normalnog naprezanja pri tlaku i savijanju	Vidi izraz (15)
	Faktor sigurnosti kod izvijanja	Vidi izraz (20)

Tablica 5. Duljina i djelovanja svih konstrukcijskih elemenata

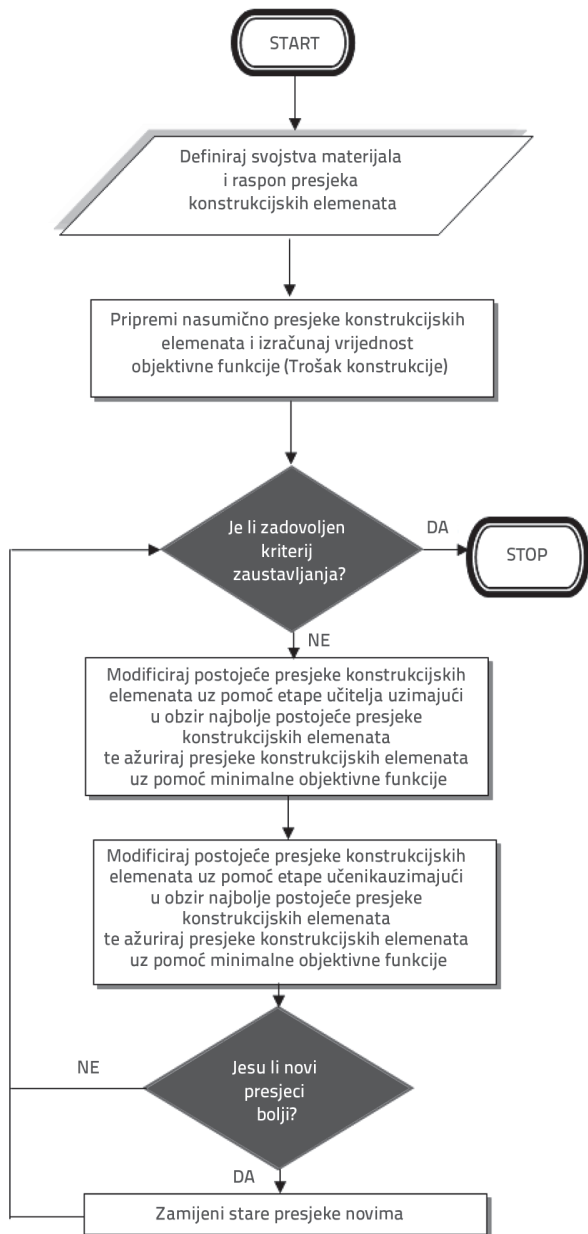
Elementi	1	2	3	4	5	6	7	8	Jedinica
l_s	6,43	4,00	3,00	2,00	4,00	2,00	4,00	10,24	[m]
G_k	0,75	0,20	1,00	1,00	-	-	-	3,00	[kN/m]
Q_k (snijeg)	0,85	-	0,85	0,85	-	-	-	-	[kN/m]
Q_k (pokretno opt.)	-	0,35	1,5	1,5	-	-	-	4,5	[kN/m]

$$\text{Min } F(x) = C_T \cdot V_T \quad (23)$$

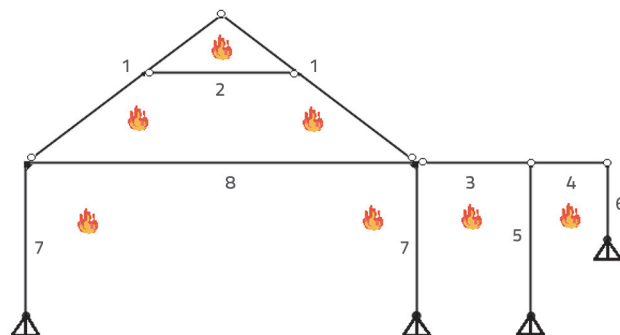
C_T je trošak komada drva, a je V_T volumen drva.

4. Numerički primjeri

U ovom istraživanju drvena konstrukcija prikazana na slici 4. proučavase u dva različita slučaja, a to su 30-minutna izloženost djelovanju požara (slučaj 1) i 60-minutna izloženost djelovanju požara (slučaj 2). Geometrija simetrične krovne konstrukcije uzima se iz knjige 'Holzbau 2: Dach- und Hallentragwerke nach DIN 1052 (neu 2004) und Eurocode 5 [36]. Tablica 5. prikazuje duljinu konstrukcijskih elemenata l_{gr} , stalno djelovanje G_k i promjenjivo djelovanje $Q_{k,i}$ (opterećenje od snijega). Pomoću izraza (1) izračunava se projektno opterećenje konstrukcijskih elemenata izloženih djelovanju požara. Koristi se različita vrsta drva kako bi se optimalno projektirali konstrukcijski elementi. U slučaju požara pretpostavlja se četverostrana izloženost požaru konstrukcijskih elemenata 2, 5, 7 i 8, a drugi su konstrukcijski elementi izloženi trostranom djelovanju požara. Tablica 6. prikazuje jedinični trošak EUR/m³, modul elastičnosti $E_{0,05}$, karakterističnu tlačnu čvrstoću $f_{c,0,k}$, karakterističnu vlačnu čvrstoću $f_{t,0,k}$, čvrstoću pri savijanju $f_{m,k}$ i vlastitu težinu različitih vrsta drva. U procesu optimizacije koristi se puno drvo na krovnoj konstrukciji (konstrukcijski elementi 1 i 2) te proste grede i stupovi (konstrukcijski elementi 3, 4, 5 i 6), a lijepljeno lamelirano drvo služi za konstrukciju okvira (konstrukcijski element 7 i 8).



Slika 3. Dijagram toka procesa optimizacije



Slika 4. Geometrija drvene konstrukcije

Tablica 7. prikazuje optimalni poprečni presjek i vrstu drva konstrukcijskih elemenata izloženih 30-minutnom i 60-minutnom djelovanju požara. Jednako tako, slike 5. do 8. prikazuju faktor iskorištenosti pri normalnom naprezanju i izvijanju ovisno o vremenu i to za svaki slučaj posebno.

Tablica 6. Karakteristične vrijednosti različitih vrsta drva [N/mm²]

Razred čvrstoće		C24	C30	C35	C40	GL24h	GL28h	GL32h
Savijanje	$f_{m,k}$	24	30	35	40	24	28	40
Modul elastičnosti	$E_{0,05}$	7400	8000	8700	9400	9500	10200	11100
Vlačno naprezanje paralele	$f_{t,0,k}$	14	18	21	24	16,5	19,5	22,5
Tlačno naprezanje paralele	$f_{c,0,k}$	21	23	25	26	24	26,5	29
Vlastita težina [kN/m ³]	g_k	4,2	4,6	4,8	5,0	3,7	4,0	4,2
Trošak [EUR/m ³]	-	230	240	250	260	230	240	250

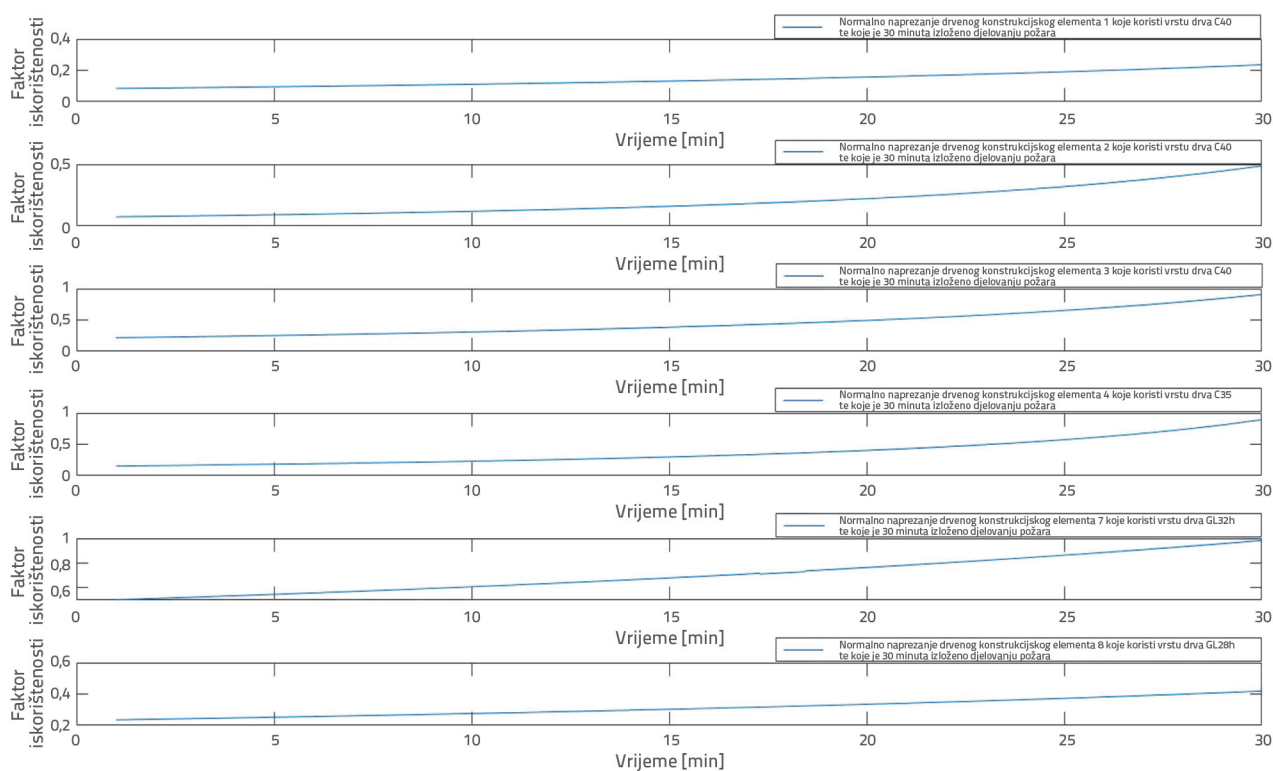
Tablica 7. Optimalni poprečni presjek i vrsta drva konstrukcijskih elemenata izloženih 30-minutnom i 60-minutnom djelovanju požara

Elementi	1	2	3	4	5	6	7	8	6
Slučaj	b1/h1 vrsta drva	b2/h2 vrsta drva	b3/h3 vrsta drva	b4/h4 vrsta drva	b5/h5 vrsta drva	b6/h6 vrsta drva	b7/h7 vrsta drva	b8/h8 vrsta drva	Trošak [EUR/m ³]
Slučaj 1	120/120 C40	110/110 C40	90/110 C40	80/100 C35	100/120 C24	80/90 C24	180/180 GL32h	120/350 GL28h	254,83
Slučaj 2	170/170 C24	160/160 C24	130/150 C35	130/130 C30	150/170 C24	130/130 C24	230/230 GL32h	120/480 GL28h	410,36

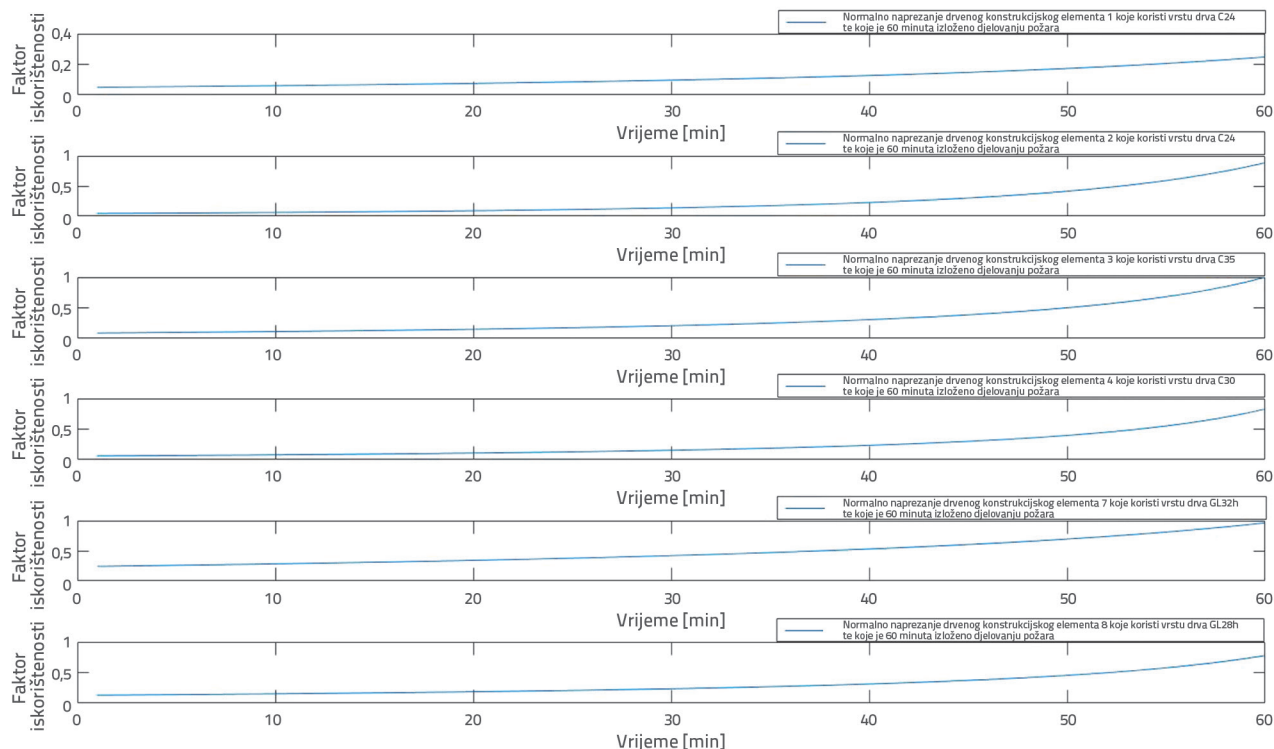
Prikladna je upotreba punog drva C40 i C24 s optimalnim poprečnim presjekom kako bi se dobili najpovoljniji rezultati za krovnu konstrukciju izloženu 30-minutnom i 60-minutnom djelovanju požara. U oba slučaja, upotreba različitih vrsta drva (C30, C35 i C40) s optimalnim poprečnim presjekom u sustavu proste grede daje najpovoljnije rezultate, a promjena poprečnog presjeka drva C24 u stupovima daje također najpovoljnije rezultate. Jednako tako, lijepljeno lamelirano drvo poput GL32h i GL28h, koja imaju veće čvrstoće nego GL24h, koriste

se za optimalno projektiranje okvirnih konstrukcija izloženih djelovanju požara.

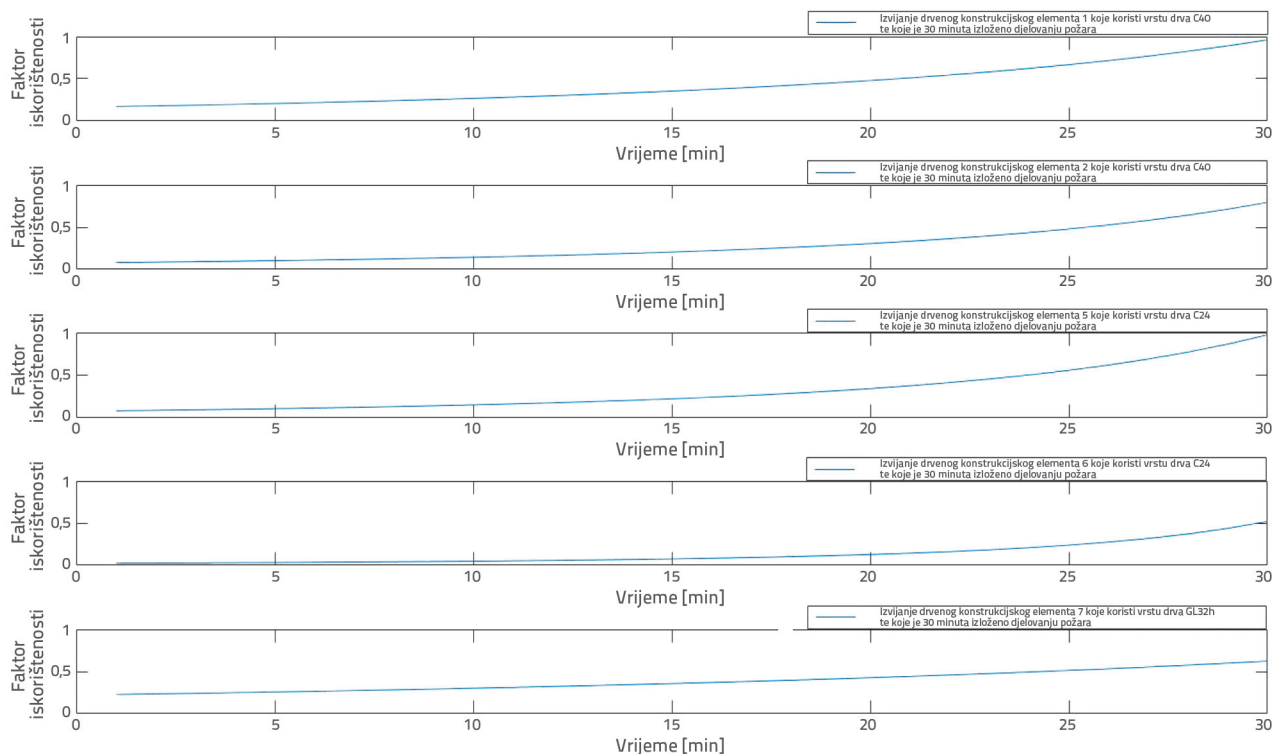
Optimalni poprečni presjek i vrsta drva određuju se uzimajući u obzir normalno naprezanje i izvijanje konstrukcijskih elemenata. U oba slučaja, normalno naprezanje odlučujući je faktor za konstrukcijske elemente 2, 3, 4, 7 i 8. U slučaju 1 značajno povećanje faktora iskoristivosti u slučaju oba normalna naprezanja i izvijanja događa se nakon 25 minuta. To se događa nakon 50 minuta u slučaju 2.



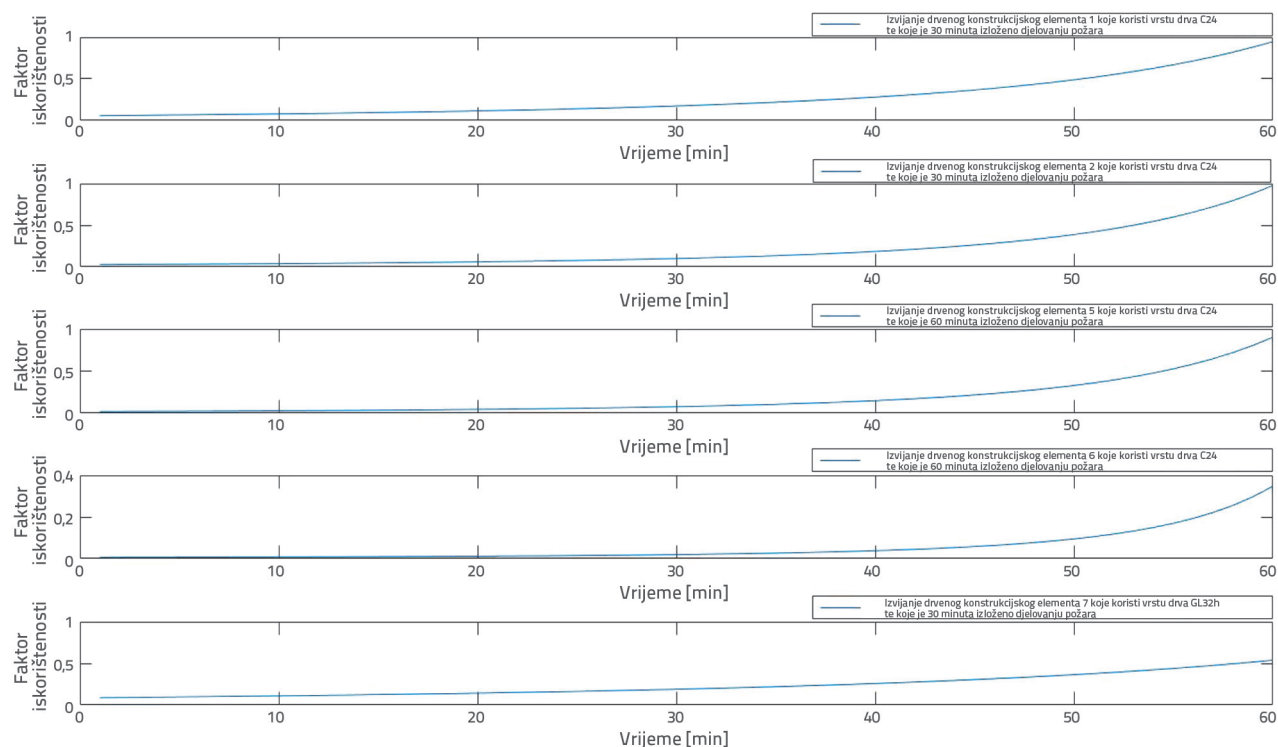
Slika 5. Faktor iskoristivosti ovisan o vremenu u slučaju normalnog naprezanja nakon 30-minutne izloženosti požaru koji koristi optimalnu vrstu drva i presjek



Slika 6. Faktor iskoristivosti ovisan o vremenu u slučaju normalnog naprezanja nakon 60-minutne izloženosti požaru koji koristi optimalnu vrstu drva i presjek



Slika 7. Faktor iskoristivosti ovisan o vremenu u slučaju izvijanja nakon 30-minutne izloženosti požaru koji koristi optimalnu vrstu drva i presjek



Slika 8. Faktor iskoristivosti ovisan o vremenu u slučaju izvijanja nakon 60-minutne izloženosti požaru koji koristi optimalnu vrstu drva i presjek

5. Zaključak

Važnu ulogu u troškovima građenja imaju slučajevi opterećenja, konstrukcijski sustav, cijena drva, poprečni presjek i materijalne karakteristike drva. Ne postoji optimalno matematičko rješenje kako bi se izračunali troškovi građenja. Iz tog razloga potreban je numerički algoritam poput TBLO-a kako bi optimalno projektirao drvenu konstrukciju koja ima različita mehanička svojstva u svakom vremenskom koraku prilikom požarnog djelovanja.

U ovom istraživanju predlaže se TBLO za projekt i analizu drvene konstrukcije koja je izložena 30-minutnom i 60-minutnom djelovanju požara. Pri tome su doneseni sljedeći zaključci:

- U usporedbi s tradicionalnom metodom, upotreba algoritma temeljenog na učenju i podučavanju u kratkom vremenu daje optimalne presjeka konstrukcijskih elemenata i materijalne karakteristike.
- Preko omjera kapaciteta ovisnih o vremenu uočava se promjena u izvianju i normalnom naprežanju konstrukcijskih elemenata, koja je izazvana smanjenjem poprečnog presjeka u slučaju izloženosti djelovanja požara.
- Ovo istraživanje koje uključuje različite vrste presjeka, slučajevne opterećenja i materijala nije samo teoretsko, već je korisno i u praksi gdje može pomoći u odabiru kriterija za optimalno projektiranje i balans između troška građenja i sigurnosti konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Holland, J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [2] Kennedy, J., Eberhart, R.C.: Particle swarm optimization, In: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks No. IV*, November 27-December 1 (1995), pp. 1942–1948, Perth Australia.
- [3] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colnari, A.: The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernet*, B 26 (1996), pp. 29–41. doi:10.1109/3477.484436
- [4] Yang, X.S.: A new metaheuristic bat-inspired algorithm, *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*, pp. 65–74, 2010.
- [5] Yang, X.S.: Flower pollination algorithm for global optimization, in: *Unconventional Computation and Natural Computation 2012*, *Lecture Notes in Computer Science*, 7445 (2012), pp. 240–249.
- [6] Karaboga, D., Basturk, B.: On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm, *Applied soft computing*, 8 (2008) 1, pp. 687–697, doi:10.1016/j.asoc.2007.05.007

- [7] Venkata Rao, R., Savsani, V.J., Vakharia, D.P.: Teaching–learning–based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems, *Computer-Aided Design*, 43 (2011) 3, pp. 303–315, doi:10.1016/j.cad.2010.12.015
- [8] Venkata Rao, R., Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7 (2016), 1, pp. 19–34, doi:10.5267/j.ijiec.2015.8.004
- [9] Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V.: A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation*, 76 (2001), pp. 60–68, doi:10.1177/003754970107600201
- [10] Bekdaş, G.: Harmony search algorithm approach for optimum design of post-tensioned axially symmetric cylindrical reinforced concrete walls, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 164 (2015) 1, pp. 342–358, doi:10.1007/s10957-014-0562-2
- [11] Bekdaş, G.: Optimum design of post-tensioned axially symmetric cylindrical walls using novel hybrid metaheuristic methods, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28 (2019) 1, pp. 1550, doi:10.1002/tal.1550
- [12] Bekdaş, G., Arama, Z.A., Kayabekir, A.E., Geem, Z.W.: Optimal Design of Cantilever Soldier Pile Retaining Walls Embedded in Frictional Soils with Harmony Search Algorithm, *Applied Sciences*, 10 (2020) 9, pp. 3232, doi:10.3390/app10093232
- [13] Farshidianfar, A., Soheili, S.: Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil–structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 51 (2013), pp. 14–22, doi:10.1016/j.soildyn.2013.04.002
- [14] Bekdaş, G., Kayabekir, A.E., Nigdeli, S.M., Toklu, Y.C.: Transfer function amplitude minimization for structures with tuned mass dampers considering soil–structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116 (2019), pp. 552–562, doi:10.1016/j.soildyn.2018.10.035
- [15] Nigdeli, S.M., Bekdaş, G.: Optimum design of multiple positioned tuned mass dampers for structures constrained with axial force capacity, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28 (2019) 5, pp. 1593, doi:10.1002/tal.1593
- [16] Yücel, M., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Sevgen, S.: Estimation of optimum tuned mass damper parameters via machine learning, *Journal of Building Engineering*, 26 (2019), pp. 100847, doi:10.1016/j.jobbe.2019.100847
- [17] Ulusoy, S., Nigdeli, S.M., Bekdaş, G.: Time delay factor of structural control systems for excitations with and without pulses, *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 3 (2018).
- [18] Ulusoy, S., Nigdeli, S.M., Bekdaş, G.: Optimization of PID controller parameters for active control of single degree of freedom structures, *CHALLENGE*, 5 (2019) 4, pp. 130–140, doi:10.20528/cjsmec.2019.04.002
- [19] Kayabekir, A.E., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Geem, Z.W.: Optimum Design of PID Controlled Active Tuned Mass Damper via Modified Harmony Search, *Applied Sciences*, 10 (2020) 8, pp. 2976, doi:10.3390/app10082976
- [20] Nigdeli, S.M., Bekdaş, G., Yang, X.S.: Metaheuristic optimization of reinforced concrete footings, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (2018) 11, pp. 4555–4563, doi:10.1007/s12205-018-2010-6
- [21] Nigdeli, S.M., Bekdaş, G.: Optimum design of RC continuous beams considering unfavourable live-load distributions, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (2017) 4, pp. 1410–1416, doi:10.1007/s12205-016-2045-5
- [22] Ulusoy, S., Kayabekir, A.E., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M.: Optimum Design of Reinforced Concrete Multi-Story Multi-Span Frame Structures under Static Loads. *International Journal of Engineering and Technology*, 10 (2018) 5, doi:10.7763/ijet.2018.v10.1092
- [23] Nigdeli, S.M., Bekdaş, G., Kim, S., Geem, Z.W.: A novel harmony search based optimization of reinforced concrete biaxially loaded columns, *Structural Engineering and Mechanics*, 54 (2015) 6, pp. 1097–1109, doi:10.12989/sem.2015.54.6.1097
- [24] Artar, M., Daloğlu, A.T.: Optimum weight design of steel space frames with semi-rigid connections using harmony search and genetic algorithms, *Neural Computing and Applications*, 29 (2018) 11, pp. 1089–1100, doi:10.1007/s00521-016-2634-8
- [25] Camp, C.V., Bichon, B.J., Stovall, S.P.: Design of steel frames using ant colony optimization, *Journal of Structural Engineering*, 131 (2005) 3, pp. 369–379, doi:10.1061/(asce)0733-9445(2005)131:3(369)
- [26] Cakiroglu, C., Bekdaş, G., Kim, S., Geem, Z.W.: Optimisation of Shear and Lateral–Torsional Buckling of Steel Plate Girders Using Metaheuristic Algorithms. *Applied Sciences*, 10(10), 3639. doi:10.3390/app10103639
- [27] Bekdaş, G., Kayabekir, A.E., Nigdeli, S.M., Toklu, Y.C.: Advanced energy-based analyses of trusses employing hybrid metaheuristics, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28 (2020) 9, pp. 1609, doi:10.1002/tal.1609
- [28] Kayabekir, A.E., Toklu, Y.C., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Yücel, M., Geem, Z.W.: A Novel Hybrid Harmony Search Approach for the Analysis of Plane Stress Systems via Total Potential Optimization, *Applied Sciences*, 10 (2020) 7, pp. 2301, doi:10.3390/app10072301
- [29] Toklu, Y.C., Kayabekir, A.E., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Yücel, M.: Analysis of Plane Stress Systems via Total Potential Optimization method considering non-linear behavior, *Journal of Structural Engineering*, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002808
- [30] Werner, G., Zimmer, K., Lißner, K.: *Holzbau 1, Grundlagen DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5, 2008.*
- [31] Nebgen, N., Peterson, L.A.: *Holzbau kompakt nach Eurocode 5, 2015.*
- [32] BSI: *BS EN 1990: 2002: Eurocode–Basis of structural design, 2002.*
- [33] European Committee for Standardization (CEN). (2004). *Eurocode 5-Design of timber structures, Part 1–2: General-Structural fire design.*
- [34] Dietmar, H.: *Brandschutz in Europa- Bemessung nach Eurocodes, 2012.*
- [35] MathWorks Inc.: *MATLAB R2015b.* Natick, MA, USA, 2015.
- [36] Werner, G.: *Holzbau 2: Dach- und Hallentragwerke nach DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5, 2 (2010), Springer-Verlag.*