

VPLIV POŽARA NA STABILNOST LESENIH STEBROV

INFLUENCE OF FIRE ON THE STABILITY OF TIMBER COLUMNS

izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.

simon.schnabl@fkkt.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in
kemijsko tehnologijo,

Večna pot 113, 1000 Ljubljana

dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.

bojan.cas@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo,

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 614.841.3:624.011.1(078.9)

Povzetek | V članku je predstavljen matematični model in njegova semi-analitična rešitev za račun kritičnih uklonskih sil lesenih stebrov, ki, izpostavljeni požaru, oglenijo. Matematični model upošteva temperaturno odvisne termomehanske lastnosti lesa in oglja. Pri določitvi temperaturnega in vlažnostnega polja po prečnem prerezu lesenega stebra je upoštevan povezan prehod toplote in vlage. Z razvitim matematičnim modelom je bila izvedena parametrična analiza, s katero smo analizirali vpliv vitkosti, nivoja obtežbe in začetne vlažnosti na kritične uklonske sile lesenega stebra. Izkaže se, da se z naraščanjem vitkosti kritična uklonska sila lesenega stebra zmanjšuje, medtem ko se z višanjem začetne vlažnosti lesa ta povečuje. Kritični čas izpostavljenosti lesenega stebra požarni obtežbi se zmanjšuje z višanjem nivoja njegove začetne obtežbe.

Ključne besede: uklon, leseni steber, požar

Summary | A mathematical model for the structural behavior of timber columns under fire was proposed. A semi-analytical study was carried out to evaluate the load carrying capacity of timber columns under fire exposure. Special attention was paid to the critical buckling loads. For this purpose, a parametric study was conducted to investigate the effect of slenderness ratio, load level and water content on the critical buckling loads of timber columns. The results of this preliminary study showed that with increasing exposure time, slenderness ratio and load ratio significantly decrease the critical buckling load. On the other hand, the critical buckling load increases with the increase of the initial water content of timber. Moreover, the critical time decreases with the increase of load ratio.

Key words: buckling, timber column, fire

1 • UVOD

Les je zelo pogosto uporabljen konstrukcijski material. Uporablja se pri gradnji hiš, športnih objektov, mostov, zadnje čase pa se vse več uporablja tudi pri gradnji visokih stanovanjskih in poslovnih objektov. Zaradi majhnega ogljičnega odtisa lesenih elementov je priča-

kovati, da bo njegova uporaba v prihodnosti še naraščala. Ker pa je les gorljiv material, je s strani nekaterih investitorjev in projektantov njegova uporaba še vedno zapostavljena. V resnici pa se izkaže ravno nasprotno. Lesene konstrukcije so v pogledu požarne varnosti

v primerjavi z nekaterimi drugimi vrstami gradbenih konstrukcij razmeroma varne. To je v največji meri pogojeno z relativno slabo toplotno prevodnostjo lesa in nastankom oglja ob gorenju lesa. Poznavanje obnašanja lesa in oglja oziroma lesene konstrukcije pri visokih temperaturah je zato bistveno za zagotavljanje ustrezne požarne odpornosti lesenih konstrukcij.

Rezultate eksperimentalnih analiz požarne odpornosti lesenih konstrukcij so med številnimi drugimi avtorji predstavili Ali s sodelavci (Ali, 2005) in Lie (Lie, 1977). Uporaba naprednih računskih postopkov je predmet obsežnega seznama znanstvenih raziskav ((Benichou, 2000), (Cachim, 2009), (Fredlund, 1993), (Janssens, 2004), (König, 2005) in (Takeda 2009)). Ker so eksperimenti običajno izredno zahtevni in dragi, največkrat uporabljamo matematične modele za opis obnašanja konstrukcije med požarom. Matematično modeliranje pogosto poenostavimo tako, da ga v primeru, da poznamo časovno razporeditev temperature

in vlage po požarnem prostoru, razdelimo v dve ločeni fazi.

V prvi fazi izračunamo časovno razporeditev temperature in vlage po obravnavani konstrukciji, ki jo potem v drugi fazi uporabimo za določitev mehanskega odziva obravnavane konstrukcije na sočasen vpliv zunanje statične mehanske obtežbe in požara. Pri določitvi temperaturnega in vlažnostnega polja je treba upoštevati, da se toplota in vlaga med požarom prenašata na različne načine (konvekcija, kondukcija, radiacija). Poleg tega moramo upoštevati izhlapevanje, izparevanje in kondenziranje vode ter oglenenje lesa. Uspešnost analize odziva lesenih konstrukcij pri požaru

je v veliki meri odvisna od ustrezne izbire temperaturno odvisnih materialnih, reoloških in termičnih lastnosti lesa.

V članku se omejimo na lesene stebre. Pri teh vrstah elementov konstrukcij, ki so izpostavljeni požaru, ni nujno, da je za porušitev merodajna nosilnost prečnih prereзов lesenih elementov. Zaradi slabšanja materialnih lastnosti lesa med požarom, oglenjenja lesa in s tem manjšanja prečnega prereza lesenega elementa lahko nastopi porušitev lesenih stebrov kot posledica izgube njihove stabilnosti. Naveden je tudi poglobilni razlog, da v nadaljevanju obravnavamo uklon lesenih stebrov pri požaru.

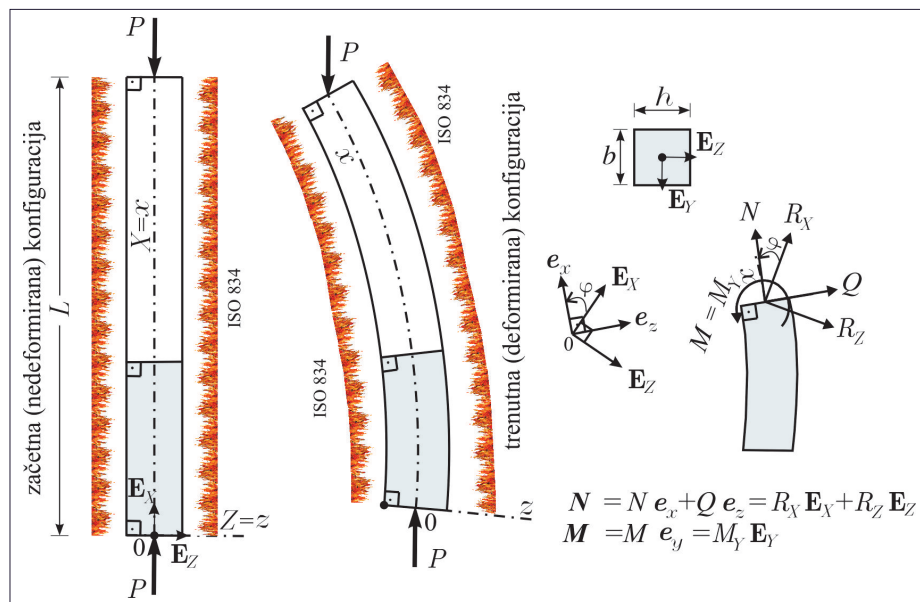
2 • POŽARNA ANALIZA LESENIH STEBROV

2.1 Teoretične osnove

Obravnavamo raven leseni stebel začetne dolžine L , ki ga prikazujemo na sliki 1. Stebel obravnavamo v ravnini X, Z kartezijskega koordinatnega sistema s prostorskimi koordinatami X, Y, Z in enotnimi baznimi vektorji $\mathbf{E}_x$, $\mathbf{E}_y$ in $\mathbf{E}_z = \mathbf{E}_x \times \mathbf{E}_y$. Nedeformirana referenčna os stebra sovpada z njegovo težiščno osjo. Lokalni koordinatni sistem, ki ga opišemo s koordinatami x, y, z v nedeformirani legi sovpada s prostorskim koordinatnim sistemom X, Y, Z , ob deformiranju pa sledi obliki lesenega stebra. Stebel je obremenjen centrično s konservativno točkovno silo P . Poleg tega je stebel izpostavljen prostorsko enakomerno

porazdeljenemu požaru, ki so mu izpostavljene vse obodne površine stebra.

Analiza obnašanja lesenih stebrov med požarom je v splošnem sestavljena iz treh nepovezanih korakov. Prvi korak je določitev požarnega scenarija oziroma projektnega požara. Drugi korak je določitev temperaturno vlažnostnega stanja v obravnavanem stebri, tretji korak pa predstavlja določitev mehanskega stanja požaru izpostavljenega lesenega stebra. V prispevku upoštevamo projektni požar skladno s standardom ISO 834 (ISO 834-1, 1999), ki ga določa standardna požarna krivulja. Za izračun temperaturno vlažnostnega polja v stebri uporabimo matematični model,



Slika 1 • Geometrija in oznake ravnega lesenega stebra, ki je obremenjen s tlačno osno silo P ter izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 (ISO 834-1, 1999).

ki sta ga predstavila Schnabl in Turk (Schnabl, 2019). Iz navedenega znanstvenega dela povzamemo rezultate temperaturno vlažnostne analize, ki jih uporabimo pri izračunu mehanskega odziva lesenega stebra med požarom. Slednje je sistematično predstavljeno v nadaljevanju pričujočega prispevka.

2.2 Mehanski model

Osnovne algebrsko diferencialne enačbe, ki opisujejo mehanski odziv lesenih stebrov pri hkratnem delovanju zunanje mehanske obtežbe in požara, so: (i) kinematične, (ii) ravnotežne in (iii) konstitutivne enačbe ter (iv) pripadajoči statični in kinematični robni pogoji. Omenjene enačbe temeljijo na lineariziranih enačbah Reissnerjevega modela ravninskega nosilca (Reissner, 1972) in ravni primarni legi lesenega stebra v celotnem obdobju izpostavljenosti požaru. Uklonske sile lesenih stebrov pri požaru izračunamo iterativno z linearno stabilnostno analizo. V ta namen celotni časovni interval, v katerem analiziramo mehanski odziv stebra $(0, t)$, razdelimo na časovne podintervale (t^{i-1}, t^i) . Napetostno deformacijsko stanje je tako v vsakem časovnem koraku t^i določeno iterativno z reševanjem naslednjih enačb:

$$\frac{du^i}{dx} - \varepsilon_0^i = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dw^i}{dx} + (1 + \varepsilon_0^i)\varphi^i = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi^i}{dx} - \kappa^i = 0, \quad (3)$$

$$\frac{dR_x^i}{dx} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dR_z^i}{dx} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dM_y^i}{dx} - (1 + \varepsilon_0^i)Q^i = 0, \quad (6)$$

$$N^i - R_x^i = 0, \quad (7)$$

$$Q^i - R_x^i \phi^i - R_z^i = 0, \quad (8)$$

$$N^i - C_{11}^i \varepsilon_0^i - C_{12}^i \kappa^i = 0, \quad (9)$$

$$M^i - C_{21}^i \varepsilon_0^i - C_{22}^i \kappa^i = 0, \quad (10)$$

kjer smo z u^i , w^i in ϕ^i označili pomike in zasuke, medtem ko smo z ε_0^i in κ^i označili deformacijske količine referenčne osi stebra. Vse količine v enačbah (1)–(10), razen C_{11}^i , C_{12}^i , C_{21}^i in C_{22}^i so funkcije samo vzdolžne koordinate x . Poleg tega smo z M_y^i označili upogibni moment v prečnem prerezu, ravnotežni sili v prečnem prerezu stebra pa z R_x^i in R_z^i . N^i in M^i predstavljata konstitutivno osno silo ter upogibni moment. Komponente konstitutivne matrike prečnega prereza stebra smo označili s C_{11}^i , C_{12}^i , C_{21}^i in C_{22}^i . Te v primeru simetričnega prečnega prereza določimo na naslednji način:

$$C_{11}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = \int_A \frac{\partial \sigma_c^i}{\partial \varepsilon^i} dA, \quad (11)$$

$$C_{12}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = C_{21}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = \int_A z \frac{\partial \sigma_c^i}{\partial \varepsilon^i} dA = 0, \quad (12)$$

$$C_{22}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = \int_A z^2 \frac{\partial \sigma_c^i}{\partial \varepsilon^i} dA. \quad (13)$$

Pri tem ε^i označuje vzdolžno deformacijo poljubnega vlakna prečnega prereza stebra ter T^i temperaturo v i -tem časovnem koraku v izbrani točki prečnega prereza. σ_c^i predstavlja normalno napetost v izbrani točki prečnega prereza v i -tem časovnem koraku in je funkcija mehanske deformacije ε_M^i . Sistem linearnih algebrsko diferencialnih enačb s konstantnimi koeficienti (1)–(10) sestavlja deset enačb za prav toliko neznanih funkcij, tj. ε_0^i , κ^i , u^i , w^i , ϕ^i , R_x^i , R_z^i , M_y^i , N^i in M^i . Enačbe (1)–(10) rešimo s pomočjo pripadajočih statičnih in kinematičnih robnih pogojev pri $x=0$ in $x=L$.

$x=0$:

$$u^i(0) = 0, \quad (14)$$

$$w^i(0) = 0, \quad (15)$$

$$r_5^0 M_y^i(0) + r_6^0 \phi^i(0) = 0, \quad (16)$$

$x=L$:

$$r_1^L R_x^i(L) + r_2^L u^i(L) = 0, \quad (17)$$

$$r_3^L R_z^i(L) + r_4^L w^i(L) = 0, \quad (18)$$

$$r_5^L M_y^i(L) + r_6^L \phi^i(L) = 0, \quad (19)$$

kjer so $r_j \in (0,1)$ parametri, s katerimi opišemo različne kombinacije robnih pogojev Eulerjevih elastičnih stebrov, oznaki (0) in (L) določata količino pri $x=0$ oziroma $x=L$.

2.3 Mehanske lastnosti lesa pri visokih temperaturah

Mehanske lastnosti lesa, npr. njegova tlačna trdnost in elastični modul, so zelo odvisne od vsebnosti vlage ter temperature lesa. Te se z

višanjem vsebnosti vlage ter temperature v splošnem zmanjšujejo in so zelo odvisne od procesa izparevanja in kondenzacije vode, ki se pojavi pri približno 100 °C, od procesa pirolize lesa, ki se začne nad 200 °C, ter procesa oglenenja lesa, ki nastopi pri temperaturi okoli 300 °C. Običajno predpostavimo, da les izgubi vso svojo trdnost in togost na nivoju prečnega prereza, ko se spremeni v oglje. V pričujočih računskih analizah privzamemo, da se navedeno pojavi pri temperaturi 300 °C. Poznavanje zmanjševanja mehanskih lastnosti lesa je torej s stališča požarne analize lesenih stebrov ključnega pomena.

V mehanski analizi upoštevamo aditivnost vzdolžnih deformacij lesenega stebra. Vzdolžno deformacijo poljubnega vlakna prečnega prereza $\varepsilon^i = \varepsilon_0^i + z\kappa^i$ določimo z izrazom

$$\varepsilon^i = \varepsilon^{i-1} + \Delta \varepsilon^i. \quad (20)$$

$\Delta \varepsilon^i$ predstavlja prirastek celotne geometrijske deformacije pri času t^i in je sestavljen iz naslednjih dveh komponent:

$$\Delta \varepsilon^i = \Delta \varepsilon_M^i(\sigma_c^i, T^i) + \Delta \varepsilon_T^i(T^i), \quad (21)$$

kjer $\Delta \varepsilon_M^i$ označuje prirastek mehanske deformacije in $\Delta \varepsilon_T^i$ prirastek temperaturne deformacije.

2.4 Točna rešitev

Osnovni sistem algebrsko diferencialnih enačb (1)–(10) je linearen, zato lahko določimo njegovo analitično oziroma točno rešitev. Poiščemo jo s postopno eliminacijo osnovnih neznank in delnim odvajanjem. Sistem enačb (1)–(10) tako nadomestimo s sistemom dveh

nepovezanih linearnih homogenih diferencialnih enačb višjega reda za u^i in w^i :

$$\frac{d^2 u^i}{dx^2} = 0, \quad (22)$$

$$\frac{d^4 w^i}{dx^4} + (k^i)^2 \frac{d^2 w^i}{dx^2} = 0, \quad (23)$$

kjer k^i označuje uklonski koeficient, definiran kot

$$(k^i)^2 = \frac{(1 + \varepsilon_0^i) P_{kr}^i}{C_{22}^i - \frac{C_{21}^i C_{12}^i}{C_{11}^i}}. \quad (24)$$

Splošna rešitev enačb (22)–(23) je

$$u^i = C_1^i x + C_2^i, \quad (25)$$

$$w^i = C_3^i \cos(k^i x) + C_4^i \sin(k^i x) + C_5^i x + C_6^i, \quad (26)$$

kjer so C_1^i , C_2^i , C_3^i , C_4^i , C_5^i in C_6^i neznane integracijske konstante, ki jih določimo z vstavitvijo splošne rešitve (25)–(26) v izraze (14)–(19), ki predstavljajo robne pogoje lesenega stebra. Pri tem moramo rešiti homogeni sistem šestih linearnih algebrskih enačb za neznane integracijske konstante. Pogoji ničelne determinante matrike koeficientov $\mathbf{K}^i$, ki določa netrivialno rešitev sistema, skupaj z enačbo za določitev konstitutivne osne sile sestavlja nelinearni sistem dveh enačb za dve neznani količini P_{kr}^i in $\varepsilon_{0,kr}^i$:

$$f_1^i(P_{kr}^i, \varepsilon_{0,kr}^i) = \det \mathbf{K}^i = 0, \quad (27)$$

$$f_2^i(P_{kr}^i, \varepsilon_{0,kr}^i) = N - P_{kr}^i = 0. \quad (28)$$

Nelinearni sistem enačb (27)–(28) rešimo numerično z uporabo Newton-Raphsonove iteracijske metode za reševanje nelinearnih sistemov enačb. Pri tem smo s P_{kr}^i označili

Oznaka stebra	P-P	C-F	C-P	C-C
Neničelne vrednosti parametrov r_j	$r_5^0 = r_4^L = 1$ $r_5^L = 1$ $r_6^0 = r_3^L = 0$ $r_6^L = 0$	$r_6^0 = r_3^L = 1$ $r_5^L = 1$ $r_5^0 = r_4^L = 0$ $r_6^L = 0$	$r_6^0 = r_4^L = 1$ $r_5^L = 1$ $r_5^0 = r_3^L = 0$ $r_6^L = 0$	$r_6^0 = r_4^L = 1$ $r_5^L = 1$ $r_5^0 = r_3^L = 0$ $r_5^L = 0$
Uklonska oblika				

C = vpeto; F = prosto; P = vrtljivo podprto

Preglednica 1 • Robni pogoji in pripadajoče uklonske oblike lesenih stebrov.

najmanjšo lastno vrednost, ki predstavlja tudi najmanjšo uklonsko silo stebra v časovnem koraku t^i . Eksplicitne izraze pogoja netrivialne

rešitve sistema enačb (27)–(28) in izraze za uklonske sile lesenih stebrov pri času t^i prikazujemo v preglednici 2. Te prikazujemo

skladno s preglednico 1, kjer predstavimo različne robne pogoje oziroma različne načine podpiranja lesenih stebrov.

Oznaka stebra	$\det \mathbf{K}^i = 0$	P_{kr}^i
P-P	$\frac{(C_{22}^i)^2 (k^i)^4 L \sin(k^i L)}{(1 + \varepsilon_0^i)^2} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) L^2}$
C-F	$\frac{(C_{22}^i)^2 (k^i)^5 \cos(k^i L)}{(1 + \varepsilon_0^i)^4} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) (2L)^2}$
C-P	$\frac{C_{22}^i (k^i)^2 (k^i L \cos(k^i L) - \sin(k^i L))}{(1 + \varepsilon_0^i)^2} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) (0.69915565L)^2}$
C-C	$\frac{k^i (k^i L \sin(k^i L) + 2 \cos(k^i L) - 2)}{(1 + \varepsilon_0^i)^2} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) (0.5L)^2}$

Preglednica 2 • Eksplicitni izrazi za pogoje ničelne vrednosti determinante matrike koeficientov $\mathbf{K}^i$ in izrazi za kritično osno silo P_{kr}^i za različne načine podpiranja lesenega stebra.

3 • NUMERIČNI PRIMER

Z naslednjim računskim primerom prikažemo uporabnost predlaganega matematičnega modela za račun kritičnih uklonskih sil lesenih stebrov pri požaru. V ta namen obravnavamo leseni stebel z začetno temperaturo $T_0 = 20^\circ\text{C}$ in začetno vlažnostjo $W_0 = 13\%$. Steber je obremenjen s konservativno tlačno osno silo P in izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 (ISO 834-1, 1999) po vseh obodnih površinah. Pri tem predpostavimo, da je temperaturno stanje nosilca in okolice vzdolž osi stebra konstantno. Nadalje, poleg mehanskih deformacij stebra upoštevamo tudi temperaturne deformacije. Geometrijski in materialni podatki ter podatki o obtežbi lesenega stebra so podani na sliki 2.

Pri računu uklonskih sil lesenega stebra pri požaru upoštevamo temperaturno polje, ki ga prikazujemo na sliki 3 in ga povzemamo po znanstvenem prispevku (Schnabl, 2019).

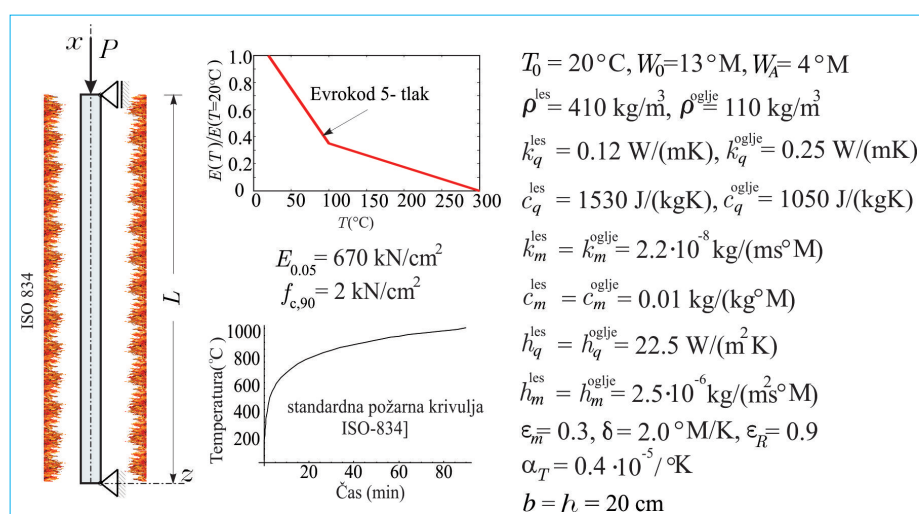
Celotno požarno analizo trajanja $t = 60$ min smo izvedli v časovnih korakih dolžine $\Delta t = 3$ s. Pri tem smo upoštevali zmanjšanje mehanskih lastnosti lesa, elastičnega modula in tlačne trdnosti, pri visokih temperaturah, kot je to predvideno v prispevku avtorja König (König, 2005).

Kritične uklonske sile lesenega stebra, vitkosti

$$\lambda = \frac{L\sqrt{A}}{\sqrt{J}} = 62, \text{ prikazujemo v preglednici 3}$$

za različne načine podpiranja in pri različnih

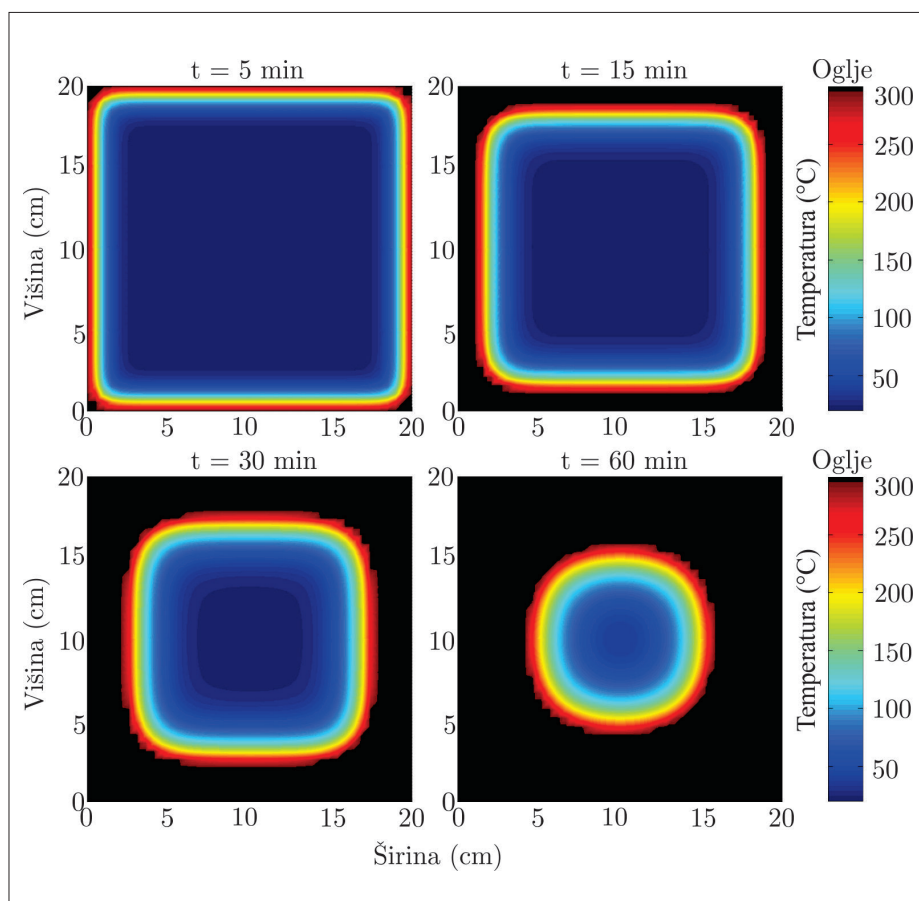
časih. Ker lahko pri tlačni obremenitvi vitkih stebrov pride do prekoračitve tlačne nosilnosti prečnega prereza stebra, preden pride do



Slika 2 • Geometrijski in materialni podatki lesenega stebra in ogilja ter podatki o obtežbi lesenega stebra.

$\lambda=62$	$P_{kr} [\text{kN}]$			
Oznaka stebra	P-P	C-F	C-P	C-C
$P_{ult} (T=20^\circ\text{C})$	806,9	201,4	1000,0*	1000,0*
$t = 1 \text{ min}$	771,6	192,6	977,3*	977,3*
$t = 5 \text{ min}$	577,2	144,1	842,5*	842,5*
$t = 15 \text{ min}$	307,3	76,73	611,2*	611,2*
$t = 30 \text{ min}$	134,8	33,69	275,5	398,9*
$t = 60 \text{ min}$	23,56	5,889	48,11	94,39

Preglednica 3 • Mejna tlačna nosilnost (bodisi porušitev prečnega prereza bodisi uklonska nosilnost) lesenega stebra za različne načine podpiranja in različne čase izpostavljenosti standardnemu požaru.



Slika 3 • Porazdelitev temperature in območja oglenenja po prečnem prerezu lesenega stebra pri $t = 5, 15, 30$ in 60 minut.

izgube njegove stabilnosti oziroma njegovega uklona, smo primere, kjer je merodajna tlačna nosilnost prečnega prereza, vrednosti v preglednici 3, označili z nadpisanim in-

deksom – zvezdico. Vidimo, da uklonska nosilnost stebra pri požaru pada relativno hitro v odvisnosti od trajanja požara. Tako znaša uklonska nosilnost obojestransko vrtljivo

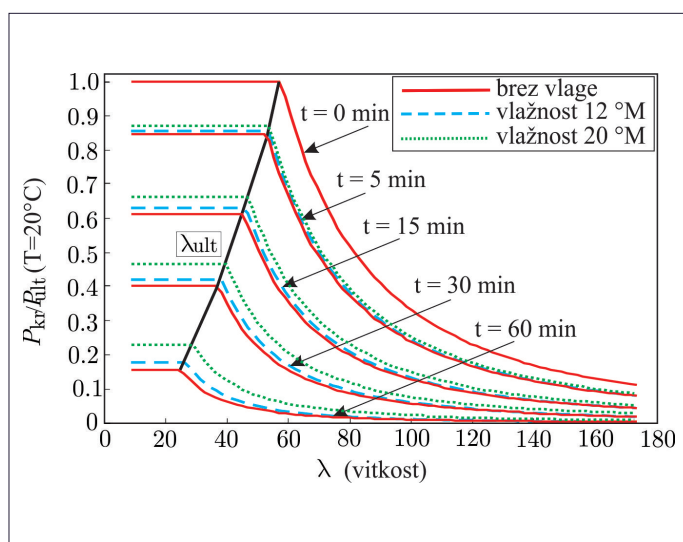
podprtega lesenega stebra po 30 minutah požara le še približno 16 % začetne nosilnosti stebra.

Kritične uklonske sile lesenega stebra, izpostavljenega požaru, lahko prikažemo tudi z normirano brezdimenzijsko krivuljo, ki prikazuje kritično uklonsko ali mejno tlačno silo za primere različnih vitkosti. V ta namen je kritična uklonska sila P_{kr} normirana z mejno osno tlačno nosilnostjo stebra pri sobni temperaturi P_{ult} ($T=20^\circ\text{C}$). Rezultati za različne čase izpostavljenosti standardnemu požaru ISO 834 (ISO 834-1, 1999) in različne začetne vlažnosti so prikazani na sliki 4.

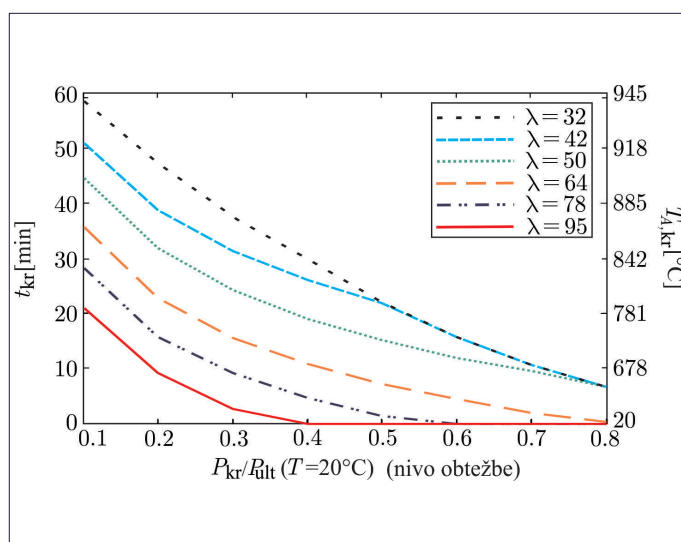
K sliki 4 podajamo tudi pomembno ugotovitev, da je normirana uklonska sila neodvisna od načina podpiranja. Poleg tega opazimo, da se z večanjem časa izpostavljenosti požaru in manjšanjem začetne vlažnosti lesa normirana kritična uklonska sila zmanjšuje.

V nadaljevanju za različne vitkosti λ lesenega stebra obravnavamo tudi vpliv nivoja obtežbe P_{kr}/P_{ult} ($T=20^\circ\text{C}$) na kritični čas t_{kr} , pri katerem nastopi porušitev lesenega stebra, in na kritično temperaturo plinov $T_{a,kr}$ v okolici obravnavanega lesenega stebra. Rezultate prikazujemo na sliki 5.

S slike 5 je razvidno, da se z višanjem nivoja obtežbe požarna odpornost lesenega stebra hitro zmanjšuje. Podobno se z višanjem nivoja obtežbe zmanjšuje kritični čas oziroma kritična temperatura plinov v okolici lesenega stebra, kar je pričakovano.



Slika 4 • Normirana uklonska in tlačna nosilnost prečnega prereza lesenega stebra pri $t = 0, 5, 15, 30$ in 60 minut za različne vitkosti lesenega stebra in različne začetne vlažnosti lesa, to je $W_0 = 0, 12$ in 20°M .



Slika 5 • Kritični čas t_{kr} in kritična temperatura $T_{a,kr}$ v odvisnosti od nivoja obtežbe za različne vitkosti lesenega stebra.

4 • SKLEP

V članku smo predstavili nov semi-analitični matematični model za izračun kritične uklonske sile lesenega stebra, ki je izpostavljen požaru. Na osnovi razvitega matematičnega modela smo opravili parametrično študijo, s katero smo analizirali vpliv različnih parametrov na kritično uklonsko silo lesenega stebra. Prišli smo do naslednjih zaključkov:

1. Kritična uklonska sila lesenega stebra se zmanjšuje z večanjem časa njegove izpostavljenosti požaru.
2. Leseni stebri se porušijo bodisi zaradi tlačne porušitve prečnega prereza bodisi zaradi uklona lesenega stebra.
3. Začetna vlažnost lesa pomembno vpliva na kritično uklonsko silo lesenega stebra.

Z višanjem začetne vlažnosti lesa se povečuje tudi kritična uklonska sila lesenega stebra med požarom.

4. Nivo obtežbe lesenega stebra pomembno vpliva na kritični čas izpostavljenosti požaru pred porušitvijo oziroma izgubo stabilnosti lesenega stebra. Z višanjem nivoja obtežbe se kritični čas do porušitve lesenega stebra zmanjšuje, prav tako se zmanjšuje kritična temperatura okolnih plinov, ki jim je izpostavljen leseni steber v pogojih požara.

5 • ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v sklopu dela programske skupine Mehanika konstrukcij (P2-0260), ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Za finančno pomoč se ji iskreno zahvaljujemo.

6 • LITERATURA

- Ali F., Kavanagh S., Fire resistance of timber columns, *Journal of the Institute of Wood Science*, 17(2), 85–93, 2005/06.
- Benichou N., Sultan M. A., Fire resistance performance of lightweight wood-framed assemblies, *Fire Technology*, 36(3), 184–219, 2000.
- Cachim P. B., Assessment of Eurocode 5 for fire design of timber columns, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 162, 151–156, 2009.
- Fredlund B., Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire, *Fire Safety Journal*, 20, 39–69, 1993.
- ISO 834-1, Fire-resistance Tests – Elements of Building Constructions – Part 1: General Requirements, 1999.
- Janssens M. L., Modelling of thermal degradation of structural wood members exposed to fire, *Fire and Materials*, 28, 199–207, 2004.
- König J., Structural fire design according to Eurocode 5 – design rules and their background, *Fire and Materials*, 29, 147–163, 2005.
- Lie T. T., A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 4(2), 161–169, 1977.
- Reissner E., On one-dimensional finite-strain beam theory: The plane problem, *Journal of Applied Mechanics and Physics*, 23, 795–804, 1972.
- Schnabl S., Turk G., Temperaturno-vlažnostna požarna analiza lesenih prečnih prerezov z upoštevanjem oglenjenja – Temperature-moisture fire analysis of timber cross-sections exposed to fire, *Gradbeni vestnik*, 68, 78–85, marec 2019.
- Takeda H., An integrated model to predict fire resistance of wood floor assemblies, *Journal of Fire Protection Engineering*, 19, 133–150, 2009.