

Požarna odpornost lesenih elementov

Robert Pečenko

14. junij 2012

Kazalo

1	POSTOPKI PROJEKTIRANJA POŽARNOVARNIH LESENIH KONSTRUKCIJ	4
1.1	Zahteve	4
1.2	Metode dokazovanj	4
1.3	Kombinacija vplivov	4
1.4	Projektne vrednosti lastnosti materialov	5
2	POENOSTAVLJENE RAČUNSKÉ METODE	5
2.1	Mehanska analiza	6
2.1.1	Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom	6
2.1.2	Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami	6
2.1.3	Rezidualni in efektivni prečni prerez	6
	DODATEK A: PARAMETRIČNA POŽARNA IZPOSTAVLJENOST	13
	PRIMERI	14
	PRIMER 1: Špirovec - standardna požarna izpostavljenost	14
	PRIMER 2: Špirovec - parametrična požarna izpostavljenost	16
	PRIMER 3: Špirovec - zavarovan z mavčno kartonastimi ploščami	17
	PRIMER 4: Uklon stebra pri standardni požarni izpostavljenosti	19

1 POSTOPKI PROJEKTIRANJA POŽARNOVARNIH LESENIH KONSTRUKCIJ

1.1 Zahteve

Največji problem pri požarni izpostavljenosti konstrukcij nedvomno predstavlja mehanska odpornost le-te. Zgradbe morajo biti zasnovane na ta način, da za določen čas požarni izpostavljenosti ohranijo nosilno funkcijo. Da se požar ne širi po zgradbi, je potrebno njene dele omejiti na posamezne požarne sektorje. Pri tem morajo elementi, ki tvorijo meje sektorja, vključno s stiki, ohraniti ločevalno funkcijo med ustrezno požarno izpostavljenostjo. Elementi morajo tako ohraniti celovitost in izolativnost, na neizpostavljeni strani pa mora biti omejeno tudi toplotno sevanje.

1.2 Metode dokazovanj

Dokaz požarne varnosti temelji na uporabi računskega modela konstrukcije, ki mora odražati pričakovano obnašanje le-te med požarom. Pri tem moramo dokazati, da za določen čas požarni izpostavljenosti konstrukcije velja:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}. \quad (1)$$

Pri tem je $E_{d,fi}$ projektni učinek vplivov v požarnem projektnem stanju, določen v skladu s SIST EN 1991-1-2:2004, $R_{d,t,fi}$ pa je pripadajoča projektna odpornost, prav tako v požarnem projektnem stanju. Zahtevo (1) lahko zapišemo tudi v časovnem območju in sicer:

$$t_{fi,requ} \leq t_{d,fi}, \quad (2)$$

kjer je $t_{fi,requ}$ zahtevan čas požarne odpornosti, $t_{d,fi}$ pa je projektni čas požarne odpornosti. Za zadostitev zahtev (1) in (2) so v standardih Evrokod dovoljene naslednje metode projektiranja:

- Poenostavljene računske metode za določene vrste konstrukcijskih elementov (metoda zmanjšanega prečnega prereza, metoda zmanjšanih materialnih karakteristik)
- Napredne računske metode za analizo odziva konstrukcije ali njenega dela med požarom. Napredne računske metode morajo omogočiti realno oceno obnašanja konstrukcije med požarom. Takšna ocena pa je mogoča samo v primeru, če ti modeli vsebujejo vse bistvene fizikalne in kemijske procese obnašanja konstrukcije in njenih sestavnih delov med požarom.

V nadaljevanju bomo podrobneje predstavili poenostavljene računske metode, ki jih določa SIST EN 1995-1-2:2005.

1.3 Kombinacija vplivov

Projektni učinek vplivov v požarnem projektnem stanju, skladno s SIST EN 1990:2004 zapišemo na naslednji način:

$$\sum_{j=1} G_{k,j} + A_d + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (3)$$

kjer predstavljajo $G_{k,j}$ stalne vplive, A_d vpliv požara, $Q_{k,1}$ predstavlja prevladujoči spremenljivi vpliv in $Q_{k,i}$ ($i > 1$) predstavlja druge spremenljive vplive zunanjih obtežb. Vrednosti faktorja za navidezno stalno vrednost spremenljivega vpliva ψ_2 so za vplive v stavbah podani v standardu SIST EN 1990:2004 v obliki preglednice.

1.4 Projektne vrednosti lastnosti materialov

Projektna vrednost trdnostnih in togostnih karakteristik je določena kot:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (4)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (5)$$

kjer je $f_{d,fi}$ projektna trdnost, $S_{d,fi}$ pa projektna togost v požaru, f_{20} je 20% fraktila trdnosti pri sobni temperaturi, S_{20} je 20% fraktila togosti pri sobni temperaturi, $\gamma_{M,fi}$ je delni varnostni faktor za les v požaru.

Projektna vrednost mehanske odpornosti (nosilnost) je določena kot:

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (6)$$

kjer je $R_{d,t,fi}$ projektna vrednost nosilnosti v požarnem scenariju, pri času t , R_{20} je 20% fraktila nosilnosti pri sobni temperaturi, brez upoštevanja trajanja obtežbe in vlage ($k_{mod} = 1$), η pa je pretvorbeni faktor zaradi zmanjšanja odpornosti pri požarnem scenariju.

Vrednosti 20% fraktil določimo na naslednje načine:

$$f_{20} = k_{fi} f_k, \quad (7)$$

$$S_{20} = k_{fi} S_{05}, \quad (8)$$

$$R_{20} = k_{fi} R_k. \quad (9)$$

V enačbah (7)-(9) predstavlja f_k karakteristično trdnost pri sobni temperaturi, S_{20} je 5% fraktila modula elastičnosti oz. strižnega modula, R_k je karakteristična mehanska odpornost pri normalni temperaturi, brez upoštevanja vpliva trajanja obtežbe in vlage, k_{fi} pa je faktor podan v preglednici 1

Tabela 1: Vrednosti faktorja k_{fi}

	k_{fi}
masiven les	1.25
lameliran lepljen les	1.15
leseni paneli	1.15
lepljeni furnir	1.1

2 POENOSTAVLJENE RAČUNSKE METODE

Poenostavljene računske metode projektiranja so namenjene oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov. Z njimi torej določimo mehansko odpornost lesenega elementa pri požarni izpostavljenosti. Pri tem je potrebno poznati požarni scenarij (krivulja temperatura-čas) ter čas izpostavljenosti le temu. V okviru poenostavljenih postopkov ločimo dve metodi dokazovanja požarne varnosti in sicer metodo zmanjšanega prečnega prereza ter metodo zmanjšanih trdnostnih karakteristik materiala. V nadaljevanju predstavimo obe metodi, še pred tem pa različne požarne scenarije.

2.1 Mehanska analiza

Požarno odpornosti lesenih elementov lahko skladno s SIST EN 1995-1-2:2005 ocenimo z dvema metodama. Prva od teh je metoda z zmanjšanim prečnim prerezom, kjer določamo odpornost elementa ob upoštevanju zmanjšane prečne preseže, ki je posledica oglečenja lesa. Pri tem upoštevamo trdnostne in togostne karakteristike lesa pri sobni temperaturi. Druga je metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami, ki ob zmanjšanem rezidualnem prečnem prerezu upošteva zmanjšane togostne ter trdnostne karakteristike lesa. V skladu z Evrokodi je možna tudi ocena požarne odpornosti povezav.

2.1.1 Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom

Kot je že omenjeno, se požarno odpornost lesenih elementov računa ob upoštevanju efektivnega prečnega preseže. Nosilni del prečnega preseže se med požarno izpostavljenostjo zmanjšuje, saj začne les ogleneti, zoglenela plast pa sama po sebi nima nobene trdnosti, zato se je v računu odpornosti preseže ne upošteva. Dodatno se predpostavi, da je tudi material blizu cone oglečenja brez togosti in trdnosti, tako da ne prispeva k nosilnosti preseže. Za preostali del preseže pa predpostavimo, da se trdnostne in togostne karakteristike ne spreminjajo in so enake kot pri sobni temperaturi.

2.1.2 Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami

Metoda se v skladu s SIST EN 1995-1-2:2005 uporablja za pravokotne prečne preseže, ki so požaru izpostavljeni iz treh ali štirih smeri ter za okrogle prečne preseže, ki so požaru izpostavljeni po celotnem obodu. Upošteva se zmanjšani rezidualni prečni presez, tako kot je razvidno iz slike 1 ter zmanjšane togostne in trdnostne karakteristike lesa tako kot nam to podajata enačbi (4) in (5).

Za požar, ki traja več kot 20 minut, se faktor $k_{mod,fi}$ izračuna na naslednje načine:

- Za upogibno trdnost:

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{p}{A_r}, \quad (10)$$

- za tlačno trdnost:

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_r}, \quad (11)$$

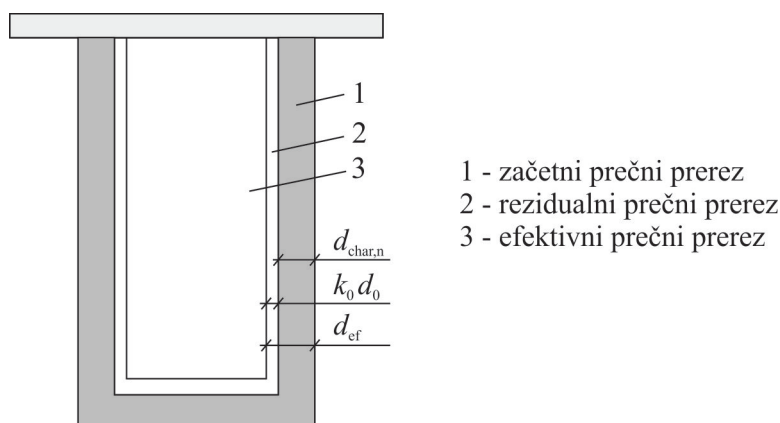
- za natezno trdnost in modul elastičnosti:

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r}. \quad (12)$$

V enačbah (10)-(12), p predstavlja obseg ognju izpostavljenega rezidualnega prečnega preseže v metrih, A_r pa predstavlja ploščino rezidualnega prečnega preseže v m^2 .

Za nezaščitene in zaščitene elemente je pri času $t = 0$ vrednost faktorja enaka 1. Za čase $0 \leq t \leq 20$ se vrednost faktorja določi z linearno interpolacijo.

2.1.3 Rezidualni in efektivni prečni presez



Slika 1: Rezidualni ter efektivni prečni prerez v skladu s SIST EN 1995-1-2:2005

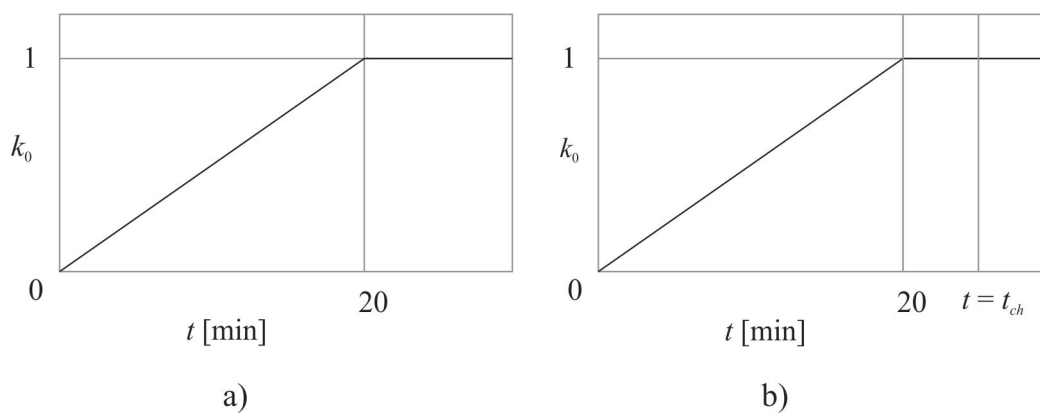
Efektivni prečni prerez se izračuna z zmanjšanjem začetnega prečnega prereza za vrednost efektivne debeline zoglenele plasti d_{ef} .

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0. \quad (13)$$

V zgornji enačbi $d_{char,n}$ predstavlja nominalno debelino zoglenele plasti in vključuje vpliv vokalnega oglenenja, faktorja $k_0 d_0$ pa predstavlja del prereza ob zogleneli plasti, ki nič ne prispeva k odpornosti prečnega prereza.

Vrednost faktorja d_0 je v skladu z Evrokodi enaka 7mm.

Vrednost faktorja k_0 je v skladu s SIST EN 1995-1-2:2005 razvidna iz slike 2.



Slika 2: a) vrednost faktorja k_0 za zaščitene in nezaščitene elemente, $t_{ch} \leq 20$ min, b) za zaščitene elemente, $t_{ch} \geq 20$ min

Določitev globine zoglenele plasti $d_{char,0}$ oz. $d_{char,n}$

- Površine, ki so nezaščitene
 - Enodimenzijsko oglenenje

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t, \quad (14)$$

kjer je $d_{char,0}$ debelina zoglenele plasti pri enodimenzijskem oglenenju, β_0 je enodimenzijska hitrost oglenenja pri standardni izpostavljenosti požaru, podana je v preglednici 2, t je čas požarne izpostavljenosti.

- Oglenenje pri požarni izpostavljenosti iz večih strani

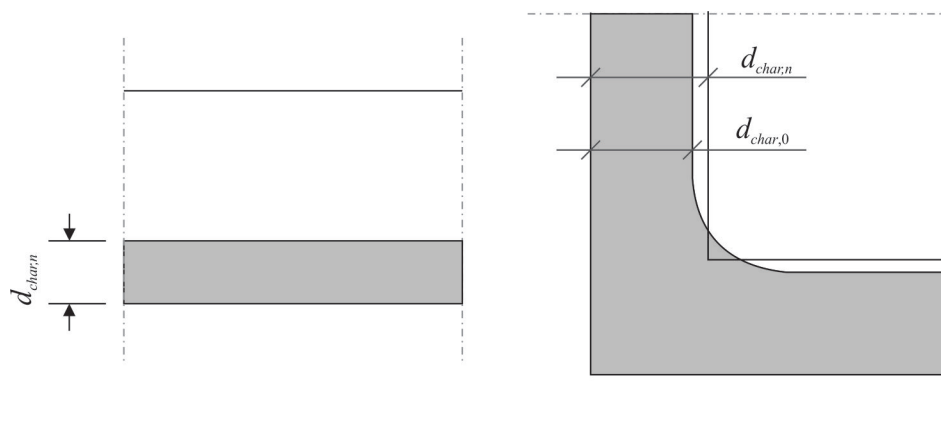
$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t. \quad (15)$$

$d_{char,n}$ predstavlja projektno debelino zoglenele plasti in vključuje vpliv vogalnega oglečenja, β_n predstavlja hitrost oglečenja in vključuje vpliv oglečenja vogalov ter vpliv razpok, podan je v preglednici 2.

Običajno se uporablja nominalno debelino zoglenele plasti, izjemoma pa se lahko uporablja eno-dimenzijsko oglečenje t.j. v primeru, ko upoštevamo povečano oglečenja ob vogalih najmanjša širina elementa b_{min} pa mora biti enaka:

$$b_{min} = \begin{cases} 2 d_{char,0} + 80; & \text{za } d_{char,0} \geq 13\text{mm}, \\ 8.15 d_{char,0}; & \text{za } d_{char,0} < 13\text{mm}. \end{cases} \quad (16)$$

V primeru, da je širina elementa manjša od b_{min} , se uporabi nominalna debelina oglene plasti. Za prečne prereze računane z eno-dimenzionalno stopnjo oglečenja, je radij vogalnega oglečenja enak debelini $d_{char,0}$.



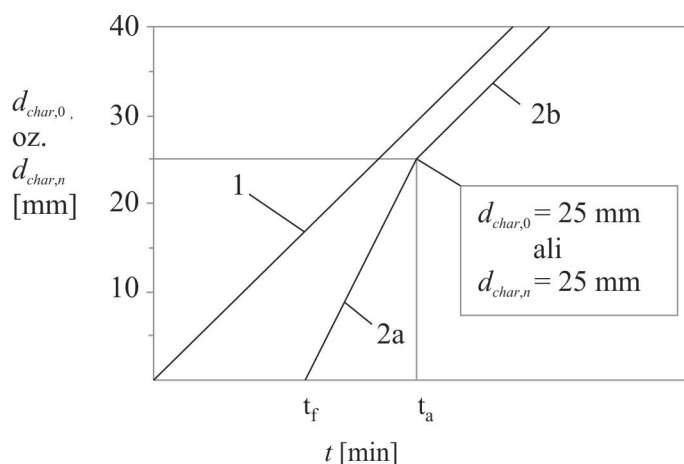
Slika 3: Debelina oglene plasti $d_{char,0}$ za eno-dimenzijsko oglečenje ter nominalna debelina oglene plasti $d_{char,n}$

Tabela 2: Stopnje oglenjenja β_0, β_n , za različne tipe lesa

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Mehak les in bukev lameliran lepljen les, $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$ masiven les, $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65 0.65	0.7 0.8
b) Trdi les masiven ali lepljen les, $\rho_k = 290 \text{ kg/m}^3$ masiven ali lepljen les, $\rho_k \geq 450 \text{ kg/m}^3$	0.65 0.5	0.7 0.55
c) LVL - lepljen furnir $\rho_k \geq 480 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
d) Paneli leseni paneli vezane plošče	0.9* 1.0*	- -
* vrednost so podane za $\rho_k = 450 \text{ kg/m}^3$ in panele debeline 20 mm, za različne debeline in gostote glej točko 3.4.2(9) v SIST EN 1995-1-2:2005		

- Površine stebrov in nosilcev, ki so na začetku požara zavarovani pred ognjem

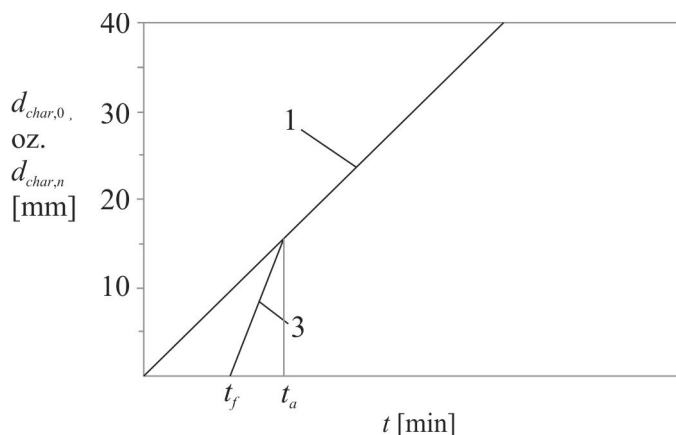
Za površine, ki so zaščitene s protipožarnimi oblogami, ali z drugimi materiali, se upošteva, da je začetek oglenjenja zamaknjen na čas t_{ch} . Oglenenje se lahko prične preden odpove požarna zaščita, vendar je pri tem stopnja le-tega manjša kot v primeru, da je element nezaščiten. Ko požarna zaščita odpove, t.j. pri času t_f , se stopnja oglenjenja spremeni in les začne ogneti z večjo stopnjo. Pospešeno oglenenje se dogaja do časa t_a , pri katerem se stopnja zmanjša in je enaka tisti, ki je podana v preglednici 2. Pri času t_a debelina oglene plasti doseže enako debelino, kot če je element nezaščiten in je zato stopnja normalna. Čas t_a dosežemo tudi, ko zoglenela plast preseže debelino 25 mm. S tem je zagotovljena zadostna izolativnost prereza, da je stopnja oglenjenja normalna. Na naslednjih slikah prikazujemo različne poteke oglenjenja.



Slika 4: Debelina oglene plasti v odvisnosti od časa, $t_{ch} = t_f$, debelina oglene plasti pri času t_a je najmanj 25 mm

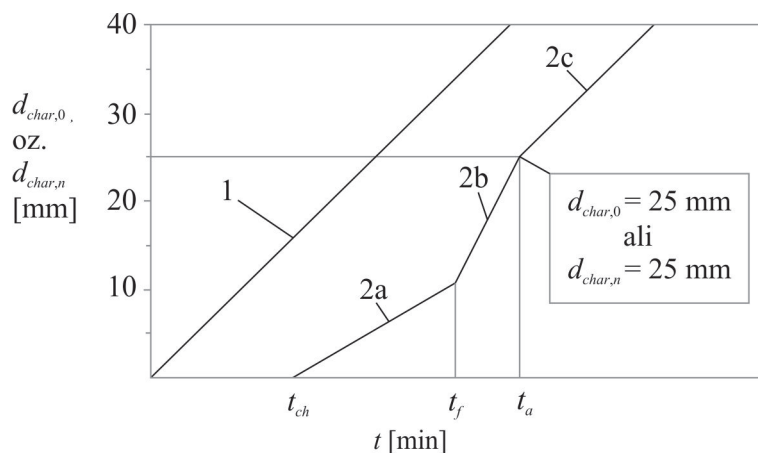
Na sliki 4, krivulja z oznako 1 prikazuje potek oglenjenja za nezaščiten prerez, stopnjo oglenjenja določimo v skladu s preglednico 2. Krivulja 2a prikazuje potek oglenjenja za zaščiten prerez, pri tem se oglenenje prične ko odpove požarna zaščita, stopnja pa je večja kot pri nezaščitem prerezu. Krivulja 2b prikazuje stanje, ko debelina zoglenele plasti doseže 25 mm ali več. Stopnja

oglenenja se pri tem zmanjša in je enaka kot pri nezaščitenem prerezu. Slika 5 je zelo podobna



Slika 5: Debelina oglene plasti v odvisnosti od časa, $t_{ch} = t_f$, debelina oglene plasti pri času t_a je manjša od 25 mm

sliki 4. Razlika je v tem, da čas t_a nastopi, ko debelina zoglenele plasti doseže enako debelino, kot če prerez ne bi bil zaščiten. Slika 6 prikazuje primer, ko se oglenenje prične preden odpove



Slika 6: Debelina oglene plasti v odvisnosti od časa, $t_{ch} \leq t_f$

požarna zaščita, $t_{ch} < t_f$. Stopnja oglenenja je pri tem manjša vse do časa t_f , kar prikazuje krivulja 2a. Po tem času je nadaljnji razvoj oglenenja enak tistemu, kot je prikazan na sliki 4.

- Stopnja oglenenja

(1) Za $t_{ch} \leq t \leq t_f$ stopnjo oglenenja izračunamo tako, da vrednosti iz preglednice 2 pomnožimo za faktor k_2 .

V primeru zaščite z enojno plastjo mavčno-kartonastih plošč tipa F, se k_2 izračuna:

$$k_2 = 1 - 0.018 h_p, \quad (17)$$

kjer je debelina h_p plošče, podajamo jo v milimetrih.

Ko je element zaščiten s plastjo kamene volne debeline vsaj 20 mm in gostote vsaj 26 kg/m^3 , lahko k_2 dobimo iz preglednice 3. Vrednosti med 20 in 45 mm se linearno interpolira.

(2) Za čas $t_f \leq t \leq t_a$ je stopnja oglenjenja enaka tisti iz preglednice 2, pomnoženi s faktorjem $k_3 = 2$.

(3) Za čas $t \geq t_a$ se vzame vrednosti iz preglednice 2.

Tabela 3: Vrednost faktorja k_2 za zaščito iz kamene volne

Debelina h_{ins} [mm]	k_2
20	1
≥ 45	0.6

- Določitev časa t_a

(1) Ko velja, da je $t_{ch} = t_f$, potem t_a zapišemo:

$$t_a = \min \left\{ \begin{array}{l} 2t_f \\ \frac{25}{k_3\beta_n} + t_f \end{array} \right. \quad (18)$$

(2) V primeru da velja $t_{ch} < t_f$, potem je:

$$t_a = \frac{25 - (t_f - t_{ch})k_2\beta_n}{k_3\beta_n} + t_f \quad (19)$$

- Začetek oglenjenja

V primeru da imamo požarno zaščito iz lesenih panelov, je začetek oglenjenja t_{ch} določen na naslednji način:

$$t_{ch} = \frac{h_p}{\beta_0}, \quad (20)$$

kjer je h_p debelina lesenega panela.

Za zaščito iz mavčno-kartonastih plošč tipov A, F ali H je v skladu z EN 520, na notranjih delih, na delih ob zapolnjenih stikih ter ob nezapolnjenih stikih s širino odprtine manjšo od 2 mm, začetek oglenjenja t_{ch} določen kot:

$$t_{ch} = 2.8 h_p - 14, \quad (21)$$

kjer je h_p debelina plošče.

Na delih v bližini stikov, kjer je širina odprtine večja od 2 mm, pa čas začetka oglenjenja izračunamo po naslednjem izrazu:

$$t_{ch} = 2.8h_p - 23. \quad (22)$$

V kolikor imamo oblogo, ki vsebuje dve plasti mavčno-kartonastih plošč tipov A ali H, je čas začetka določen z izrazom (21), debelina h_p pa je določena kot seštevek debeline zunanje plasti in 50% debeline notranje plasti. Za mavčno-kartonaste plošče tipa F, se debelina h_p določi kot

seštevek debeline zunanje plasti ter 80% debeline notranje plasti.

Elementom zaščitenim s kameno volno, čas t_{ch} določimo na naslednji način:

$$t_{ch} = 0.07(h_{ins} - 20) \cdot \sqrt{\rho_{ins}}, \quad (23)$$

kjer je h_{ins} debelina izolacije v mm, ρ_{ins} pa je gostota izolacije v kg/m^3 , izračunani čas t_{ch} je v minutah.

- Čas odpovedi ognje-zaščitnih oblog

Porušitev ognje-zaščitnih oblog lahko nastopi zaradi oglenenja ali mehanske degradacije, zaradi nezadostne penetracije pritrdilnih elementov ter zaradi neprimerne razdalje le-teh.

Za zaščito na bazi lesa velja, da je $t_f = t_{ch}$, kjer je t_{ch} izračunan po izrazu (20).

Za mavčno-kartonaste plošče tipa A in H je $t_f = t_{ch}$, pri čemer t_{ch} določimo po izrazih (21) in (22).

Dolžina penetracije pritrdilnega elementa l_a v še ne zoglenel les, mora biti najmanj 10 mm. Potrebno dolžino penetracije pritrdilnega elementa $t_{f,req}$ tako izračunamo:

$$l_{f,req} = h_p + d_{char,0} + l_a, \quad (24)$$

kjer je h_p debelina lesenega zaščitnega panela, $d_{char,0}$ je debelina zoglenele plasti, l_a pa je minimalna globina penetracije v nezoglenel les.

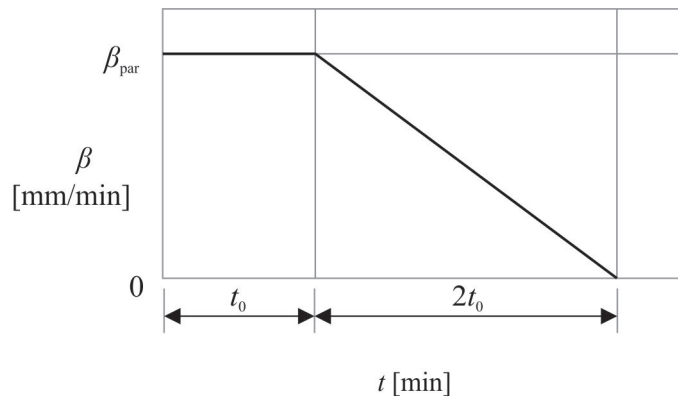
DODATEK A: PARAMETRIČNA POŽARNA IZPOSTAVLJENOST

Stopnja oglenenja ter globina oglene plasti je drugačna kot pri standardni požarni izpostavljenosti.

Stopnja oglenenja:

$$\beta_{par} = 1.5 \beta_n \frac{0.2\sqrt{\Gamma} - 0.04}{0.16\sqrt{\Gamma} + 0.08}, \quad (25)$$

kjer Γ predstavlja brezdimenzijski parameter in ga določimo v skladu s točko 3.1.4, β_n pa določimo v skladu s preglednico 2.



Slika 7: Povezava med časom in stopnjo oglenenja

Globino zoglenele plasti določimo po naslednji enačbi:

$$d_{char} = \begin{cases} \beta_{par} \cdot t; & \text{za } t \leq t_0, \\ \beta_{par} \left(1.5 t - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4}\right); & \text{za } t_0 \leq t \leq 3t_0, \\ 2\beta_{par} \cdot t_0; & \text{za } 3t_0 \leq t \leq 5t_0, \end{cases} \quad (26)$$

kjer je t_0 časovna perioda pri konstantni stopnji oglenenja, določimo jo z naslednjim izrazom:

$$t_0 = 0.009 \frac{q_{t,d}}{O}. \quad (27)$$

$q_{t,d}$ predstavlja projektno vrednost gostote požarne obtežbe po celotnem prostoru, podan je v MJ/m².

$$q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t}, \quad (28)$$

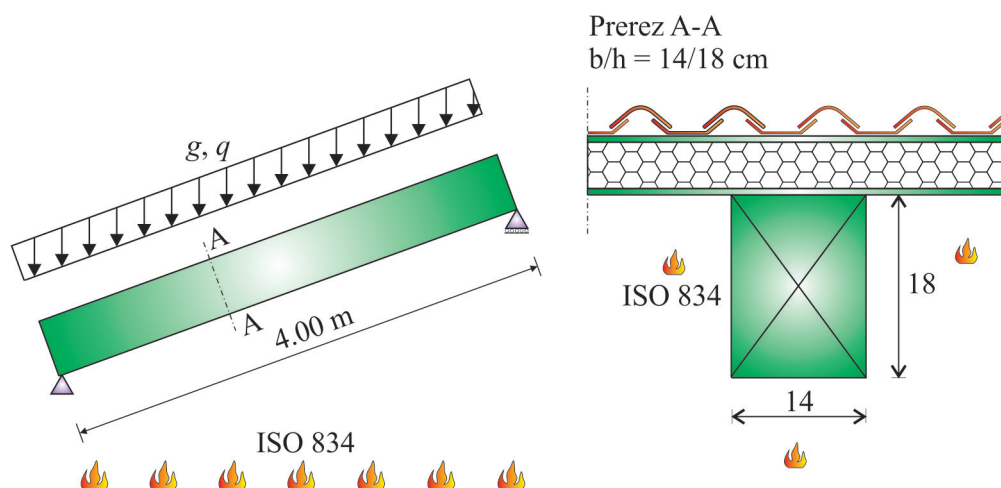
kjer je A_f talna površina prostora, A_t pa površina celotnega oboda obravnavanega prostora. Pravila v dodatku veljajo v primeru, ko:

- $t_0 \leq 40$ min,
- $d_{char} \leq \frac{b}{4}$,
- $d_{char} \leq \frac{h}{4}$.

PRIMERI

PRIMER 1: Špirovec - standardna požarna izpostavljenost

Obravnavamo špirovec, ki je del strešne konstrukcije. Glede na mejno stanje nosilnosti in uporabnosti njegove dimenzije znašajo $b/h = 14/18$ cm. Razpon znaša 4m, poleg lastne teže pa nanj deluje še stalna obtežba strešne konstrukcije, obtežba snega ter obtežba vetra (faktor $\Psi_2 = 0$ za obe spremenljivi obtežbi). Špirovec je požaru izpostavljen iz treh strani in je pred njim nezaščiten. Zahtevana požarna odpornost je 60 minut. Pri računu upoštevamo model prostoležečega nosilca.



Slika 8: Računski model ter prečni prerez špirovca

PODATKI:

$$l = 4 \text{ m}$$

Les C30

$$f_{m,k} = 3 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{v,k} = 0.3 \text{ kN/cm}^2$$

OBTEŽBA:

$$g_{l,t} = 0.15 \text{ kN/m}$$

$$g_{st} = 1.0 \text{ kN/m}$$

$$q_s = 1.4 \text{ kN/m}$$

$$q_v = 0.4 \text{ kN/m}$$

Kombinacijska obtežba v požarnem projektnejem scenariju:

$$q_{Ed,fi} = 1.0G + 1.0\Psi_2Q = 1.0(g_{l,t} + g_{st}) + 0 = 1.15 \text{ kN/m}$$

Obremenitev v požarnem projektnejem scenariju:

$$M_{Ed,fi} = \frac{q_{Ed,fi} l^2}{8} = 2.3 \text{ kN/m}$$

METODA EFEKTIVNEGA PREČNEGA PREREZA

Debeline zogljenega sloja po 60 minutah (upoštevamo vpliv robnega oglenenja):

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0$$

$$k_0 = 1$$

$$\begin{aligned}
d_0 &= 7 \text{ mm} \\
d_{char,n} &= \beta_n t = 42 \text{ mm} \\
\beta_n &= 0.7 \text{ mm/min (za mehak masiven les, glej preglednico 2)} \\
t &= 60 \text{ min}
\end{aligned}$$

$$d_{ef} = 49 \text{ mm} = 4.9 \text{ cm}$$

Efektivna širina in višina prereza po 60 min:

$$b_{ef} = b - 2d_{ef} = 14 - 2 \cdot 4.9 = 4.2 \text{ cm}$$

$$h_{ef} = b - d_{ef} = 18 - 4.9 = 13.1 \text{ cm}$$

Materialne karakteristike:

$$\begin{aligned}
f_{m,d,fi} &= k_{mod,fi} \frac{f_{m,20}}{\gamma_{M,fi}} \\
k_{mod,fi} &= 1.0 \\
\gamma_{M,fi} &= 1.0 \\
f_{m,20} &= k_{fi} f_{m,k} = 3.75 \text{ kN/cm}^2 \\
f_{m,k} &= 3.0 \text{ kN/cm}^2 \\
k_{fi} &= 1.25 \text{ (za masiven les)}
\end{aligned}$$

$$f_{m,d,fi} = 3.75 \text{ kN/cm}^2$$

Kontrola upogibnih napetosti:

$$\frac{M_{ed,fi}}{W_{ef}} \leq f_{m,d,fi}$$

$$\frac{6M_{ed,fi}}{b_{ef}h_{ef}^2} = \frac{6 \cdot 230}{4.2 \cdot 13.1^2} = 1.91 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{m,d,fi} = 3.75 \text{ kN/cm}^2$$

METODA ZMANJŠANIH MATERIALNIH KARAKTERISTIK

Upoštevamo rezidualni prečni prerez (glej sliko 2) ter zmanjšane trdnostne karakteristike.

Zmanjšane trdnostne karakteristike

$$\begin{aligned}
f_{m,d,fi} &= k_{mod,fi} \frac{f_{m,20}}{\gamma_{M,fi}} \\
f_{m,20} &= 3.75 \text{ kN/cm}^2 \\
\gamma_{M,fi} &= 1.0 \\
k_{mod,fi} &= 1.0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r}, p \text{ in } A_r \text{ podajamo v m oz m}^2 \\
p &= b_{rez} + 2h_{rez} = 0.332 \text{ m} \\
A_r &= b_{rez} \cdot h_{rez} = 0.00773 \text{ m} \\
b_{rez} &= b - 2d_{char,n} = 5.6 \text{ cm} = 0.056 \text{ m} \\
h_{rez} &= h - d_{char,n} = 13.8 \text{ cm} = 0.138 \text{ m} \\
k_{mod,fi} &= 1 - 1/200 \cdot 0.332/0.00773 = 0.785
\end{aligned}$$

$$f_{m,d,fi} = 2.94 \text{ kN/cm}^2$$

Kontrola upogibnih napetosti:

$$\frac{M_{ed,fi}}{W_{rez}} \leq f_{m,d,fi}$$

$$\frac{6M_{ed,fi}}{b_{rez}h_{rez}^2} = \frac{6 \cdot 230}{5.6 \cdot 13.8^2} = 1.294 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{m,d,fi} = 2.94 \text{ kN/cm}^2$$

PRIMER 2: Špirovec - parametrična požarna izpostavljenost

Obravnavamo isti špirovec kot pri prvem primeru, le da je sedaj izpostavljen modeliranemu parametričnemu požaru. Špirovec se nahaja v prostoru dimenzij $l_1/l_2/h = 5/7/2.8$ m, v katerem sta tudi dve okni dimenzij $b_1/h_1 = 1.1/1.5$ m ter $b_2/h_2 = 1.4/2.0$ m. Upoštevamo povprečne lastnosti oboda, ki znašajo $\rho = 2800$ kg/m³, $c = 1600$ J/kgK ter $\lambda = 0.3$ W/mK. Projektna obtežba gostote požarne obremenitve znaša 600 MJ/m².

PODATKI:

$$l_1 = 5 \text{ m}$$

$$l_2 = 7 \text{ m}$$

$$h = 2.8 \text{ m}$$

$$O_1 : b_1/h_1 = 1.1/1.5 \text{ m}$$

$$O_2 : b_2/h_2 = 1.4/2.1 \text{ m}$$

$$\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 1600 \text{ J/kgK}$$

$$\lambda = 0.3 \text{ W/mK}$$

$$q_{f,d} = 600 \text{ MJ/m}^2$$

STOPNJA OGLENENJA TER GLOBINA ZOGLENELE PLASTI:

Faktor odprtin:

$$O = \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h_{eq}}$$

$$A_v = 1.1 \cdot 1.5 + 1.4 \cdot 2.1 = 4.59 \text{ m}^2$$

$$A_t = 2(l_1 \cdot l_2 + l_1 \cdot h + l_2 \cdot h) = 137.2 \text{ m}^2$$

$$h_{eq} = \sum \frac{A_{ihi}}{A} = \frac{(1.1 \cdot 1.5)1.5 + (1.4 \cdot 2.1)2.1}{4.59} = 1.88 \text{ m}^2$$

$$O = 0.0459$$

Faktor b :

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = 1160$$

Brezdimenzijski faktor Γ :

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160}\right)^2} = 1.317$$

Projektna vrednost gostote požarne obtežbe za celotno površino oboda:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t} = 600 \frac{5 \cdot 7}{137.2} = 153 \text{ MJ/m}^2$$

Čas do katerega je stopnja oglenenja konstantna:

$$t_0 = 0.009 \frac{q_{t,d}}{O} = 30 \text{ min}$$

Stopnja oglenenja:

$$\beta_{par} = 1.5 \beta_n \frac{0.2\sqrt{\Gamma} - 0.04}{0.16\sqrt{\Gamma} + 0.08} = 0.755 \text{ mm/min}$$

Zanima nas, kolikšna je globina zoglenele plasti pri požarni izpostavljenosti večji od 60 minut.

Skladno z enačbo (26) lahko zapišemo:

$$d_{char} = 2 \beta_{par} \cdot t = 45.3 \text{ mm} = 4.53 \text{ cm}$$

METODA ZMANJŠANIH MATERIALNIH KARAKTERISTIK

$$b_{rez} = b - 2d_{char,n} = 4.94 \text{ cm} = 0.0494 \text{ m}$$

$$h_{rez} = h - d_{char,n} = 13.47 \text{ cm} = 0.1347 \text{ m}$$

$$p = b_{rez} + 2h_{rez} = 0.3143 \text{ m}$$

$$A_r = b_{rez} \cdot h_{rez} = 0.00605 \text{ m}^2$$

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r} = 0.74$$

$$f_{m,d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{m,20}}{\gamma_{M,fi}} = 2.775 \text{ kN/cm}^2$$

Kontrola upogibnih napetosti:

$$\frac{M_{ed,fi}}{W_{rez}} \leq f_{m,d,fi}$$

$$\frac{6M_{ed,fi}}{b_{rez}h_{rez}^2} = \frac{6 \cdot 230}{4.94 \cdot 13.47^2} = 1.54 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{m,d,fi} = 2.775 \text{ kN/cm}^2$$

PRIMER 3: Špirovec - zavarovan z mavčno kartonastimi ploščami

Obravnavamo enak špirovec kot v prvem primeru. Ta je sedaj zavarovan z MKP tipa A, debeline 1.8 cm. V tem primeru se bo proces oglenjenja pričel kasneje, zanima pa nas, če tako zavarovan špirovec prenese 90 minutno standardno požarno izpostavljenost.

Oglenenje se prične pri času $t_{ch} = t_f$, t.j., ko odpove mavčno kartonasta plošča. Do časa t_a je nato stopnja oglenjenja 2x višja kot pri običajnem oglenjenju, po času t_a pa je stopnja običajna in jo določimo v skladu s preglednico 2.

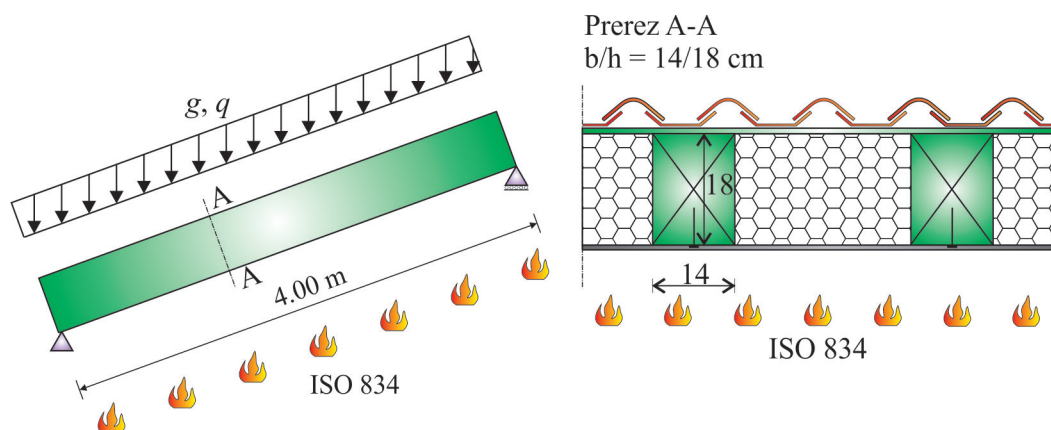
PODATKI:

Les C30

Špirovec $b/h = 14/18 \text{ cm}$

MKP tip A

$h_p = 18 \text{ mm}$



Slika 9: Računski model ter prečni prerez špirovca zavarovanega z MKP

ZAČETEK TER STOPNJA OGLENENJA:

$$t_{ch} = 2.8h_p - 14 = 2.8 \cdot - 14 = 35.4 \text{ min}$$

$$t_a = \min \begin{cases} 2t_f = 72.8 \text{ min} \\ \frac{25}{k_3\beta_n} + t_f = 54.2 \text{ min} \end{cases}$$

Stopnja oglenenja do časa t_a :

$$\beta_{n,ta} = k_2 \beta_n = 2 \cdot 0.7 = 1.4 \text{ mm/min}$$

Stopnja oglenenja po času t_a :

$$\beta_n = 0.7 \text{ mm/min}$$

GLOBINA ZOGLENELE PLASTI:

Do časa t_{ch} :

$$d_{char,0} = 0 \text{ mm}$$

Do časa t_a :

$$d_{char,ta} = \beta_{n,ta}(t_a - t_{ch}) = 25 \text{ mm}$$

Do časa 90 min:

$$d_{char,90} = d_{char,ta} + \beta_n(t_{90} - t_a) = 50 \text{ mm}$$

METODA ZMANJŠANIH MATERIALNIH KARAKTERISTIK

$$b_{rez} = b - 2d_{char,90} = 4 \text{ cm} = 0.04 \text{ m}$$

$$h_{rez} = h - d_{char,90} = 13 \text{ cm} = 0.13 \text{ m}$$

$$p = b_{rez} + 2h_{rez} = 0.3 \text{ m}$$

$$A_r = b_{rez} \cdot h_{rez} = 0.0052 \text{ m}^2$$

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r} = 0.726$$

$$f_{m,d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{m,20}}{\gamma_{M,fi}} = 2.72 \text{ kN/cm}^2$$

Kontrola upogibnih napetosti:

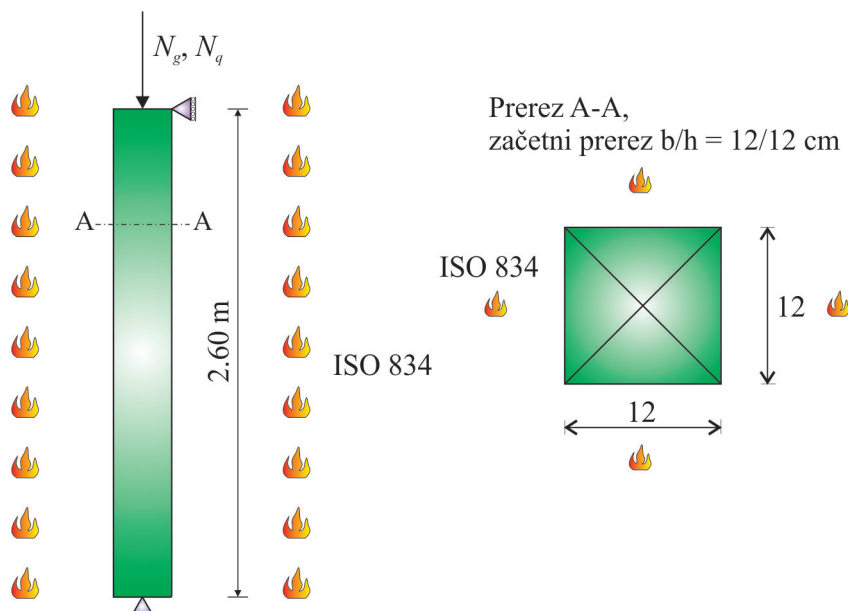
$$\frac{M_{ed,fi}}{W_{rez}} \leq f_{m,d,fi}$$

$$\frac{6M_{ed,fi}}{b_{rez}h_{rez}^2} = \frac{6 \cdot 230}{4 \cdot 13^2} = 2.04 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{m,d,fi} = 2.72 \text{ kN/cm}^2$$

Ob dodatni zaščiti špirovca z mavčno kartonasto ploščo, je ta sposoben kljubovati 90 minutnemu standardnemu požaru.

PRIMER 4: Uklon stebra pri standardni požarni izpostavljenosti

Obravnavamo steber višine 2.6 m, ki je na koncih vrtljivo podprt. Steber je iz lesa trdnostnega razreda C30, obremenjen pa je z osno tlačno silo, zaradi delovanja stalne in koristne obtežbe (kategorija C - $\Psi_2 = 0.6$). Začetne dimenzije stebra za mejno stanje nosilnosti in uporabnosti znašajo $b/h = 12/12$ cm. Steber je izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih strani, preverjamo pa potrebne dimenzije, da prenese 60 minuten požar.



Slika 10: Računski model ter prečni prerez lesenega stebra

PODATKI:

$$l = l_u = 2.6 \text{ m}$$

Steber $b/h = 12/12$ cm

$$f_{c,0,k} = 2.3 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{0,05} = 800 \text{ kN/cm}^2$$

$$N_g = 20 \text{ kN}$$

$$N_q = 15 \text{ kN}$$

OBREMENITEV:

Požarni projektni scenarij:

$$N_{Ed,fi} = 1.0N_g + 1.0\Psi_2N_q = 29 \text{ kN}$$

METODA ZMANJŠANEGA PREČNEGA PREREZA

Efektivna debelina zoglenele plasti je enaka kot pri prvem primeru, zato lahko zapišemo:

$$d_{ef} = 49 \text{ mm} = 4.9 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = h_{ef} = b - 2d_{ef} = 2.2 \text{ cm}$$

Takoj vidimo, da celoten prerez skorajda zogleni, tako da brez nadaljnega računa povečamo dimenzije prereza na $b/h = 16/16$ cm.

Prečni prerez $b/h = 16/16$ cm

$$b_{ef} = h_{ef} = b - 2d_{ef} = 6.2 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = b_{ef} \cdot h_{ef} = 38.44 \text{ cm}^2$$

Redukcijski koeficient k_c :

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = 1.79$$

$$\lambda_z = \lambda_y = \lambda = \frac{l_u}{i} = 145.25$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.48$$

$$k_c(\text{odčitamo iz preglednice 4}) = 0.150$$

Kontrola napetosti:

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{c,20}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$k_{mod,fi} = 1.0$$

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$

$$f_{c,20} = k_{fi} f_{c,0,k} = 1.25 \cdot 2.3 = 2.875 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{c,d,fi} = 2.875 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{c,fi,d} = \frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} = 0.754 \text{ kN/cm}^2 \geq k_c f_{c,d,fi} = 0.431 \text{ kN/cm}^2$$

Kontrola napetosti se ne izide, zato povečam prerez na $b/h = 18/18$ cm.

Prečni prerez $b/h = 18/18$ cm

$$b_{ef} = 8.2 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = 67.24 \text{ cm}^2$$

Redukcijski koeficient k_c :

$$i = 2.37$$

$$\lambda = 109.7$$

$$\lambda_{rel} = 1.87$$

$$k_c(\text{odčitamo iz preglednice 4}) = 0.255$$

Kontrola napetosti:

$$\sigma_{c,fi,d} = \frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} = 0.431 \text{ kN/cm}^2 \leq k_c f_{c,d,fi} = 0.733 \text{ kN/cm}^2$$

Iz pogoja mejnih stanj je zadostna dimenzija prečnega prereza stebra enaka $b/h = 12/12$ cm. Izkaže se, da je omenjeni prečni prerez premajhen da bi bil sposoben kljubovati 60 minutni standardni požarni izpostavljenosti. Zadosten prerez tako znaša $b/h = 18/18$ cm.

Tabela 4: *Uklonski koeficient k_c*

uklonski koeficient k_c										
λ_{rel}	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.30	1.000	0.998	0.996	0.993	0.991	0.989	0.986	0.984	0.982	0.979
0.40	0.977	0.974	0.972	0.969	0.967	0.964	0.961	0.959	0.956	0.953
0.50	0.95	0.947	0.944	0.941	0.938	0.935	0.932	0.928	0.925	0.921
0.60	0.918	0.914	0.910	0.907	0.903	0.899	0.894	0.890	0.886	0.882
0.70	0.877	0.872	0.868	0.863	0.858	0.853	0.874	0.842	0.836	0.831
0.80	0.825	0.819	0.813	0.807	0.801	0.795	0.788	0.782	0.775	0.768
0.90	0.762	0.755	0.748	0.740	0.733	0.726	0.719	0.712	0.704	0.697
1.00	0.689	0.682	0.674	0.667	0.660	0.652	0.645	0.637	0.630	0.622
1.10	0.615	0.608	0.601	0.593	0.586	0.579	0.572	0.565	0.558	0.552
1.20	0.545	0.538	0.532	0.525	0.519	0.512	0.506	0.500	0.494	0.488
1.30	0.482	0.476	0.470	0.464	0.459	0.453	0.448	0.442	0.437	0.432
1.40	0.427	0.422	0.417	0.412	0.407	0.402	0.397	0.393	0.388	0.384
1.50	0.379	0.375	0.371	0.366	0.362	0.358	0.354	0.350	0.346	0.342
1.60	0.339	0.335	0.331	0.328	0.324	0.321	0.317	0.314	0.310	0.307
1.70	0.304	0.301	0.297	0.294	0.291	0.288	0.285	0.282	0.279	0.277
1.80	0.274	0.271	0.268	0.266	0.263	0.260	0.258	0.255	0.253	0.250
1.90	0.248	0.245	0.243	0.241	0.238	0.236	0.234	0.232	0.230	0.277
2.00	0.225	0.223	0.221	0.219	0.217	0.215	0.213	0.211	0.209	0.207
2.10	0.206	0.204	0.202	0.200	0.198	0.197	0.195	0.193	0.192	0.190
2.20	0.188	0.187	0.185	0.184	0.182	0.181	0.179	0.178	0.176	0.175
2.30	0.173	0.172	0.170	0.169	0.168	0.166	0.165	0.164	0.162	0.161
2.40	0.160	0.158	0.157	0.156	0.155	0.154	0.152	0.151	0.150	0.149
2.50	0.148	0.147	0.146	0.144	0.143	0.142	0.141	0.140	0.139	0.138
2.60	0.137	0.136	0.135	0.134	0.133	0.132	0.131	0.130	0.129	0.128
2.70	0.128	0.127	0.126	0.125	0.124	0.123	0.122	0.121	0.121	0.120
2.80	0.119	0.118	0.117	0.117	0.116	0.115	0.114	0.113	0.113	0.112
2.90	0.111	0.110	0.110	0.109	0.108	0.108	0.107	0.106	0.105	0.105