

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo

Jamova c. 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon 01 4768 500  
faks 01 4250 683



24.10.2013

**PROJEKTIRANJE ENOSTAVNIH POŽARNOVARNIH  
ARMIRANOBETONSKIH ELEMENTOV**



## KAZALO VSEBINE:

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. UVOD</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>2. Postopki projektiranja požarnovarnih konstrukcij</b> .....                                   | <b>5</b>  |
| <b>2.1 Metode dokazovanja</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>2.2 Kombinacija vplivov</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>2.3 Projektne vrednosti lastnosti materialov</b> .....  | <b>6</b>  |
| 2.3.1 Mehanske lastnosti .....   | 6         |
| 2.3.2 Toplotne lastnosti .....   | 6         |
| <b>3. Poenostavljene računske metode</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>3.1 Požarni scenarij</b> .....  | <b>7</b>  |
| 3.1.1 Standardna krivulja temperatura-čas (nominalna) .....  | 7         |
| 3.1.2 Požarna krivulja zunanjega požara (nominalna) .....  | 8         |
| 3.1.3 Ogljikovodikova krivulja (nominalna) .....   | 8         |
| 3.1.4 Parametrična krivulja (modelirana) .....   | 8         |
| <b>3.2 Temperaturna analiza</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>3.3 Mehanska analiza</b> .....  | <b>14</b> |
| 3.3.1 Metoda izoterme 500°C .....  | 15        |
| 3.3.2 Toplotne in mehanske lastnosti betona in jekla za armiranje pri povišanih temperaturah ..... | 17        |
| <b>4. ZAKLJUČEK</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>5. LITERATURA</b> .....   | <b>20</b> |
| <br>   |           |
| <b>A. DODATEK: RAČUN PARAMETRIČNE KRIVULJE TEMPERATURA-ČAS</b> .....                               | <b>21</b> |
| <b>A.1 Primer učilnice s površino 140m<sup>2</sup></b> .....                                       | <b>21</b> |
| A.1.1 Osnovni podatki požarnega sektorja .....   | 21        |
| A.1.2 Karakteristična in projektna gostota požarne obremenitve glede na površino tal .....         | 21        |
| A.1.3 Parametrična požarna krivulja .....  | 21        |
| A.1.4 Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru .....                                   | 22        |
| <b>A.2 Primer knjižnice s površino 280m<sup>2</sup></b> .....                                      | <b>23</b> |
| A.2.1 Osnovni podatki požarnega sektorja .....   | 23        |
| A.2.2 Karakteristična in projektna gostota požarne obremenitve glede na površino tal .....         | 23        |
| A.2.3 Parametrična požarna krivulja .....  | 24        |
| A.2.4 Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru .....                                   | 25        |
| <br>   |           |
| <b>B. DODATEK: TEMPERATURNI PROFILI</b> .....  | <b>26</b> |
| <b>B.1 Standardna krivulja temperatura-čas, prerez izpostavljen s treh strani</b> .....            | <b>26</b> |
| B.1.1 Pravokotni prečni prerez $b = 15, h \geq 15$ cm: .....                                       | 27        |
| B.1.2 Pravokotni prečni prerez $b = 20, h \geq 20$ cm: .....                                       | 28        |
| B.1.3 Pravokotni prečni prerez $b = 25, h \geq 25$ cm: .....                                       | 29        |
| B.1.4 Pravokotni prečni prerez $b = 30, h \geq 30$ cm: .....                                       | 30        |
| B.1.5 Pravokotni prečni prerez $b = 40, h \geq 40$ cm: .....                                       | 31        |
| <b>B.2 Standardna krivulja temperatura-čas, prerez izpostavljen s štirih strani</b> .....          | <b>32</b> |
| B.2.1 Kvadratni prečni prerez $b = 15$ cm: .....   | 32        |
| B.2.2 Kvadratni prečni prerez $b = 20$ cm: .....   | 33        |
| B.2.3 Kvadratni prečni prerez $b = 25$ cm: .....   | 34        |
| B.2.4 Kvadratni prečni prerez $b = 30$ cm: .....   | 35        |
| B.2.5 Kvadratni prečni prerez $b = 40$ cm: .....   | 36        |
| B.2.6 Kvadratni prečni prerez $b = 50$ cm: .....   | 37        |
| B.2.7 Kvadratni prečni prerez $b = 60$ cm: .....   | 38        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>B.3 Ogljikovodikova krivulja temperatura-čas, prerez izpostavljen s treh strani.....</b> | <b>39</b> |
| B.3.1 Pravokotni prečni prerez $b = 20, h \geq 20$ cm: .....                                | 40        |
| B.3.2 Pravokotni prečni prerez $b = 30, h \geq 30$ cm: .....                                | 41        |
| B.3.3 Pravokotni prečni prerez $b = 40, h \geq 40$ cm: .....                                | 42        |
| <br>  |           |
| <b>C. DODATEK: REDUKCIJSKI FAKTORJI TRDNOSTI JEKLA ZA ARMIRANJE .....</b>                   | <b>43</b> |
| <br>  |           |
| <b>D. DODATEK: RAČUN POŽARNE ODPORNOSTI AB ELEMENTOV .....</b>                              | <b>45</b> |
| <b>D.1 AB nosilec.....</b>  | <b>45</b> |

## 1. UVOD

Požarna varnost gradbenih konstrukcij predstavlja pomemben del njihove varnosti. Z naraščanjem temperatur v konstrukcijah med požarom se njihova nosilnost zmanjšuje, deformabilnost pa povečuje. Z ustreznim projektiranjem požarne odpornosti konstrukcij zagotavljamo ustrezno varnost le teh med požarom.

Požarno odpornost konstrukcij določimo oziroma ocenimo s preskusi ali s pomočjo računskih metod. Eksperimentalno ocenjevanje požarne odpornosti gradbenih konstrukcij poteka v požarnih laboratorijih, izjemoma pa tudi na objektu. V teh primerih moramo iz eksperimentalnih rezultatov na relativno maloštevilnih vzorcih sklepati na požarno odpornost gradbenih konstrukcij v celoti, kar pa je dokaj nezanesljivo. Splošnejši način je ocena požarne odpornosti konstrukcij s pomočjo ustreznih matematičnih modelov oziroma računskih metod. Z razvojem računalnikov postajajo te metode (požarne analize) vse bolj natančne in zanesljive, a hkrati tudi vse bolj zahtevne. S požarnimi analizami običajnih gradbenih konstrukcij obravnavamo kemijske, vlažnostne, toplotne in mehanske procese v konstrukcijah med požarom najpogosteje ločeno, kar pomeni, da časovno razporeditev temperatur gradbenih konstrukcij med požarom določimo s temperaturno analizo, ki je le posredno odvisna od preostalih kemijskih in fizikalnih procesov v konstrukcij med požarom. Taka stopenjska oziroma postopna požarna analiza je pri standardnih gradbenih materialih fizikalno upravičena, saj med požarom delo zunanjih sil prispeva bistveno manj k povečanju notranje energije konstrukcije kot dovedena toplota [Bažant, 1996]. Kljub relativno veliki poenostavitvi pa so take požarne analize, ki jih Evropski standardi Evrokod imenujejo napredne računske metode, še vedno matematično zelo zahtevne in jih pri projektiranju požarne odpornosti gradbenih konstrukcij uporabljamo le izjemoma. Pogosteje uporabljamo poenostavljene računske metode, ki pa so namenjene le približni oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov, kot so to nosilci in stebri. Takšne metode zasledimo v strokovni literaturi in v številnih tehničnih predpisih, tudi Evrokodih. Vse te metode se razlikujejo predvsem v optimiziranju razmerja med natančnostjo metode in njihovo preprostostjo.

V tem prispevku podrobneje predstavimo poenostavljene računske metode za oceno požarne odpornosti enostavnih armiranobetonskih konstrukcijskih elementov, kot jih predpisujejo standardi Evrokod. Analiza natančnosti teh metod glede upoštevanja značilnih fizikalnih in kemijskih pojavov gradbenih konstrukcij med požarom, kot so eksplozivno luščenje betona, viskozno lezenje jekla, pa ni predmet tega prispevka.



## 2. POSTOPKI PROJEKTIRANJA POŽARNOVARNIH KONSTRUKCIJ

### 2.1 Metode dokazovanja

Študija za dokaz požarne varnosti konstrukcije oziroma njenega dela je osnovana na uporabi računskega modela konstrukcijskega sistema, ki mora skladno s standardom SIST EN 1992-1-2:2005 odražati pričakovano obnašanje konstrukcije oziroma njenega dela med požarom. Pri tem je potrebno dokazati, da v celotnem času  $t$  izpostavljenosti konstrukcije oziroma njenega dela požaru velja:

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

kjer je  $E_{d,t,fi}$  projektni učinek vplivov v požarnem projektnejem stanju,  $R_{d,t,fi}$  pa pripadajoča projektna odpornost v požarnem projektnejem stanju. Požarna odpornost elementa gradbene konstrukcije je sposobnost, da določen čas izpolnjuje zahteve glede stabilnosti (nosilnosti), celovitosti in/ali toplotne izolativnosti.

Zahtevo (1) lahko zapišemo tudi v časovnem območju:

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

kjer je  $t_{d,fi}$  projektna vrednost požarne odpornosti,  $t_{fi,requ}$  pa zahtevan čas požarne odpornosti.

Za zadostitev zahteve (1) oziroma (2) so v standardih Evrokod dovoljene naslednje metode projektiranja:

- **detajliranje** v skladu s priznanimi projektnimi rešitvami (s tabeliranimi podatki oziroma s preizkušanjem),
- **poenostavljene računske metode** za določene vrste konstrukcijskih elementov in
- **napredne računske metode** za simulacijo mehanskega obnašanja konstrukcijskih elementov, delov konstrukcij ali celotnih konstrukcij 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.

### 2.2 Kombinacija vplivov

Kombinirani učinek zunanjih vplivov v požarnem projektnejem stanju  $E_{d,t,fi}$  formalno zapišemo v skladu s standardom SIST EN 1990: 2004 z enačbo:

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

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  $\psi_2$  so za vplive v stavbah podani v standardu SIST EN 1990: 2004 v obliki preglednice. Tako je za bivalne površine (kategorija uporabe A) in pisarne (kategorija B) faktor  $\psi_2$  enak 0.3.

## 2.3 Projektne vrednosti lastnosti materialov

### 2.3.1 Mehanske lastnosti

Projektne vrednosti mehanskih (trdnostnih in deformacijskih) lastnosti materiala izračunamo na naslednji način:

$$X_{d,fi} = k_T \cdot \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}}, \quad (4)$$

kjer je  $k_T$  redukcijski faktor trdnosti,  $X_k$  je karakteristična vrednost mehanske lastnosti materiala za projektiranje pri običajni temperaturi,  $\gamma_{M,fi}$  pa je delni varnostni faktor za ustrezno lastnost materiala v požarnem projektnem stanju. Skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 je  $\gamma_{m,fi}$  za mehanske lastnosti betona, jekla za armiranje in jekla za prednapenjanje enak 1.

### 2.3.2 Toplotne lastnosti

Projektne vrednosti toplotnih lastnosti materiala izračunamo na naslednji način:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,T}}{\gamma_{M,fi}} \text{ oziroma } X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,T}. \quad (5)$$

Pri tem enačbo (5) uporabimo glede na ugoden oziroma neugoden vpliv povečanja lastnosti na varnost. V enačbi (5) je  $X_{k,T}$  vrednost toplotne lastnosti materiala v požarnem projektnem stanju, ki je v splošnem odvisna od temperature,  $\gamma_{m,fi}$  pa je delni varnostni faktor za ustrezno lastnost materiala v požarnem projektnem stanju. Skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 je  $\gamma_{m,fi}$  za toplotne lastnosti betona, jekla za armiranje in jekla za prednapenjanje enak 1.

### 3. POENOSTAVLJENE RAČUNSKÉ METODE

Kot smo že v uvodu omenili, so poenostavljene računske metode projektiranja, ki so namenjene le približni oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov gradbenih konstrukcij, razdeljene v dva nepovezana dela. To sta:

- **temperaturna analiza:** pri temperaturni analizi glede na toplotni vpliv določimo časovno razporeditev temperatur obravnavanega konstrukcijskega elementa (v nadaljevanju nosilca),
- **mehanska analiza:** v mehanski analizi preverjamo požarno varnost nosilca skladno z zahtevo (1) oziroma (2). Pri tem lahko uporabimo poenostavljeno metodo z upoštevanjem zmanjšanega prečnega prereza ter zmanjšane trdnosti materiala.

V nadaljevanju podrobneje predstavimo oba dela analize. Pred temperaturno analizo moramo najprej določiti ustrezni požarni scenarij.

#### 3.1 Požarni scenarij

Požarni scenarij predstavlja kvalitativen opis poteka požara s časovno opredeljenimi ključnimi dogodki, ki označujejo požar in ga razlikujejo od drugih možnih požarov. Navadno definira proces vžiga in širjenja (rasti) požara, stopnjo polno razvitega požara ter stopnjo pojecanja požara upoštevajoč lastnosti okolice in sistema zgradbe, ki vplivajo na potek požara.

S spoznanjem, da je potrebno zadovoljivo oceniti obnašanje konstrukcije oziroma njenega dela med požarom in zaradi potrebe po čim večji ekonomičnosti, so bile razvite poenostavljene metode za opisovanje jakosti požara v obliki požarnih krivulj. Te podajajo spreminjanje temperature plinov v okolici površine elementa kot funkcijo časa. Ločimo med:

- **nominalnimi požarnimi krivuljami** (npr. standardna krivulja temperatura-čas, zunanja požarna krivulja, požarna krivulja ogljikovodikov): to so konvencionalne krivulje, ki so prilagojene razvrščanju ali ugotavljanju (potrjevanju) požarne odpornosti in
- **modeliranimi požarnimi krivuljami**, to so poenostavljeni modeli naravnih požarov, ki temeljijo na specifičnih fizikalnih parametrih z omejeno možnostjo uporabe. Parametri, ki določajo pogoje v požarnem sektorju so: površina sektorja, prezračevanje, toplotne lastnosti materiala oboda, gostota požarne obremenitve, hitrost razvoja požara, uporaba različnih aktivnih ukrepov gašenja in drugi.

Poznamo tudi točnejše požarne modele. Ti temeljijo na osnovi ohranjanja mase in energije. V nadaljevanju predstavimo značilne požarne krivulje za stavbe.

##### 3.1.1 Standardna krivulja temperatura-čas (nominalna)

Standardna krivulja temperatura-čas predstavlja model polno razvitega požara v sektorju v primeru celuloznega tipa požarne obtežbe in je:

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1), \quad (6)$$

kjer je  $T_g$  temperatura plinov v okolici elementa v °C,  $t$  pa je čas v minutah.

### 3.1.2 Požarna krivulja zunanjega požara (nominalna)

Zunanja požarna krivulja predstavlja model požara za zunanji del ločilnih zunanjih sten, ki so lahko izpostavljene požaru iz različnih delov fasade in je:

$$T_g = 660 \left( 1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t} \right) + 20. \quad (7)$$

### 3.1.3 Ogljikovodikova krivulja (nominalna)

Ogljikovodikova krivulja temperatura-čas predstavlja model polno razvitega požara v sektorju v primeru gorenja ogljikovodikov in je:

$$T_g = 1080 \left( 1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t} \right) + 20. \quad (8)$$

### 3.1.4 Parametrična krivulja (modelirana)

Parametrična krivulja kot poenostavljen model naravnega požara predstavlja temperaturo plinov v sektorju, ki jo določimo na podlagi fizikalnih parametrov. Veljavna je za požarne sektorje talne površine do 500 m<sup>2</sup> brez odprtih v stropu in z maksimalno višino sektorja 4 m. Predpostavljeno je, da požarna obremenitev sektorja v celoti zgore. Krivulja temperatura-čas v fazi segrevanja je podana z enačbo:

$$T_g = 20 + 1325 \left( 1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*} \right), \quad (9)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma, \quad (10)$$

kjer je  $T_g$  temperatura plinov v požarnem sektorju v °C,  $\Gamma$  je brezdimenzijski parameter,  $t$  pa je čas v urah.

Parameter  $\Gamma$  se izračuna z enačbo:

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0.04/1160)^2, \quad (11)$$

kjer je  $O$  faktor odprtih v m<sup>1/2</sup>,  $b$  pa upošteva toplotne lastnosti oboda. Izračunata se z enačbama:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t, \quad \text{z omejitvijo: } 0.02 \leq O \leq 0.2 \text{ m}^{1/2} \text{ in} \quad (12)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}. \quad \text{z omejitvijo: } 100 \leq b \leq 2000 \text{ J/(m}^2\text{s}^{1/2}\text{K)} \quad (13)$$

Pri tem je  $A_v$  celotna površina vertikalnih odprtih v vseh stenah v m<sup>2</sup>,  $h_{eq}$  je uteženo povprečje višin oken v vseh stenah v metrih,  $A_t$  je celotna površina oboda v m<sup>2</sup>, t.j. sten, stropov in tal vključno z odprtinami,  $\rho$  je gostota ločilnega oboda v kg/m<sup>3</sup>,  $c$  je specifična toplota v J/kgK,  $\lambda$  pa je toplotna prevodnost oboda v W/mK.

V fazi segrevanja nastopi najvišja temperatura plina  $T_{max}$  pri času  $t^* = t^*_{max}$ . Čas  $t^*_{max}$  izračunamo z enačbo:

$$t^*_{max} = t_{max} \cdot \Gamma = \max \left\{ \frac{0.0002 \cdot q_{t,d} / O}{t_{lim}} \right\} \cdot \Gamma, \quad (14)$$



kjer je  $q_{t,d}$  projektna vrednost gostote požarne obremenitve v  $\text{MJ/m}^2$ ,  $t_{\text{lim}}$  pa čas v urah, ki je odvisen od hitrosti razvoja požara. Določata ju naslednji enačbi:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t, \quad \text{z omejitvijo: } 50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ MJ/m}^2 \text{ in} \quad (15)$$

$$t_{\text{lim}} = \begin{cases} 25 \text{ min za počasi razvijajoči požar,} \\ 20 \text{ min za razvoj požara srednje hitrosti,} \\ 15 \text{ min za hitro razvijajoči požar.} \end{cases} \quad (16)$$

kjer je  $A_f$  površina tal sektorja v  $\text{m}^2$ . Kadar je  $t_{\text{max}} = t_{\text{lim}}$  se čas  $t^*$  v enačbi (10) nadomesti z:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\text{lim}}, \quad (17)$$

$$\Gamma_{\text{lim}} = [O_{\text{lim}} / b]^2 / (0.04 / 1160)^2 \text{ in} \quad (18)$$

$$O_{\text{lim}} = 0.0002 \cdot q_{t,d} / t_{\text{lim}}. \quad (19)$$

Parameter  $q_{f,d}$  v enačbi (15) je projektna vrednost gostote požarne obremenitve in se izračuna z enačbo:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n. \quad (20)$$

Pomen oznak v enačbi (20) je sledeč:  $m$  je faktor izgorevanja in za pretežno celulozne materiale lahko predpostavimo  $m = 0.8$ ,  $\delta_{q1}$  je faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja (preglednica 1),  $\delta_{q2}$  je faktor, ki upošteva nevarnost požara glede na rabo (za pisarne, stanovanja, hotele in papirno industrijo je  $\delta_{q2} = 1.0$ ),  $\delta_n$  je faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja (pršilci, detektorji, avtomatski prenos alarma, gasilci in drugi),  $q_{f,k}$  pa je karakteristična gostota požarne obtežbe na enoto ploščine tal v  $\text{MJ/m}^2$  (glej preglednico 2).

Preglednica 1: Faktor nevarnosti nastanka požara  $\delta_{q1}$

| Talna površina sektorja $A_f$ [ $\text{m}^2$ ] | $\delta_{q1}$ |
|--|---------------|
| 25   | 1.1           |
| 250  | 1.5           |
| 2500   | 1.9           |

Preglednica 2: Karakteristična gostota požarne obtežbe  $q_{f,k}$  v  $\text{MJ/m}^2$

| raba                       | Povprečje | 80% kvantil |
|----------------------------|-----------|-------------|
| Stanovanje                 | 780       | 948         |
| Bolnišnice (sobe)          | 230       | 280         |
| Hoteli (sobe)              | 310       | 377         |
| Knjižnice                  | 1500      | 1824        |
| Pisarne                    | 420       | 511         |
| Šolski razredi             | 285       | 347         |
| Nakupovalna središča       | 600       | 730         |
| Dvorane (kino)             | 300       | 365         |
| Transport (javni prostori) | 100       | 122         |

Krivulja temperatura-čas za fazo ohlajanja je podana z enačbo:

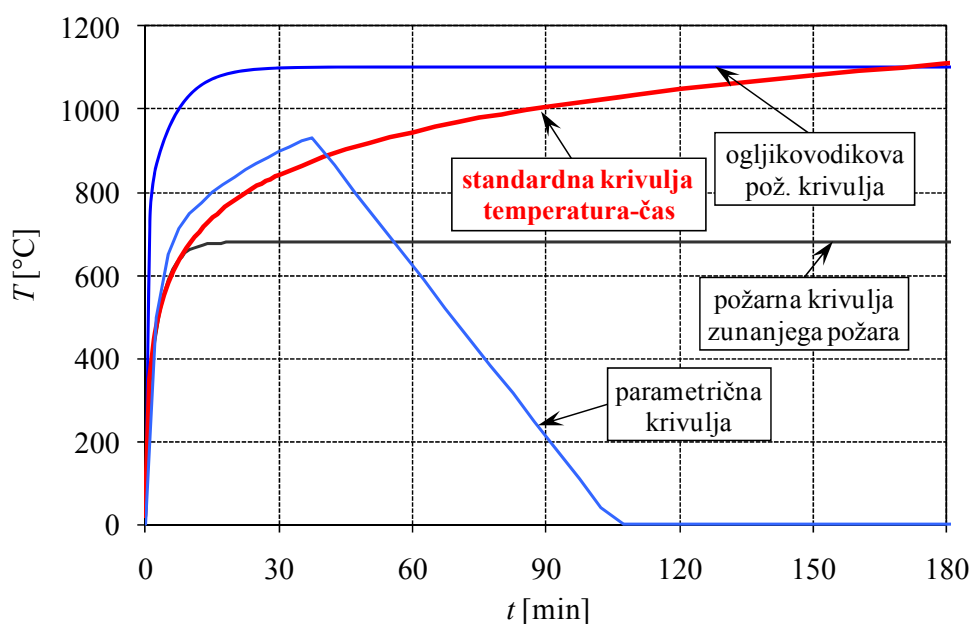
$$T_g = \begin{cases} T_{\max} - 625 \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } t_{\max}^* \leq 0.5, \\ T_{\max} - 250 \cdot (3 - t_{\max}^*) \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } 0.5 \leq t_{\max}^* \leq 2, \\ T_{\max} - 250 \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } t_{\max}^* \geq 2. \end{cases} \quad (21)$$

Pri tem je:

$$t_{\max}^* = 0.0002 \cdot q_{t,d} / O \cdot \Gamma \text{ in} \quad (22)$$

$$x = \begin{cases} 1 & \text{za } t_{\max} > t_{\text{lim}}, \\ t_{\text{lim}} \cdot \Gamma_{\text{lim}} / t_{\max}^* & \text{za } t_{\max} = t_{\text{lim}}. \end{cases} \quad (23)$$

Na sliki 1 prikazujemo požarne krivulje še v grafični obliki.



Slika 1: Požarne krivulje v skladu s SIST EN 1991-1-2:2002

Kadar projektiranje elementov temelji na tabeliranih podatkih ali drugih poenostavljenih postopkih v povezavi s standardno izpostavljenostjo požaru, lahko vpliv parametrične požarne krivulje prevedemo v enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru in sicer z izrazom:

$$t_{e,d} = (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c, \quad (24)$$

kjer je  $k_b$  faktor pretvorbe skladno s preglednico 3,  $w_f$  je faktor prezračevanja in se izračuna z enačbo (24),  $k_c$  pa je korekcijski faktor za material nosilnega prečnega prereza in je za armiran beton enak 1. Pri tem je potrebno dokazati, da velja:

$$t_{e,d} < t_{d,fi}. \quad (25)$$

Pri tem je  $t_{d,fi}$  projektna vrednost standardne požarne odpornosti (glej tudi enačbo (2)).

Preglednica 3: Faktor pretvorbe  $k_b$ 

| Toplotne lastnosti oboda<br>$b$ [ $\text{J}/(\text{m}^2 \text{s}^{1/2} \text{K})$ ] | $k_b$<br>[ $\text{min} \cdot \text{m}^2/\text{MJ}$ ] |
|---|--|
| $b > 2500$  | 0.04   |
| $720 \leq b \leq 2500$  | 0.055  |
| $b < 720$   | 0.07   |

Faktor prezračevanja izračunamo z enačbo:

$$w_f = (6/H)^{0.3} \left[ 0.62 + 90 \cdot (0.4 - \alpha_v)^4 / (1 + b_v \alpha_h) \right] \geq 0.5, \quad (26)$$

kjer je  $H$  višina požarnega sektorja v metrih, ostale parametre pa izračunamo z izrazi:

$$\alpha_v = A_v / A_f, \quad \text{z omejitvijo: } 0.025 \leq \alpha_v \leq 0.25, \quad (27)$$

$$\alpha_h = A_h / A_f \quad \text{in} \quad (28)$$

$$b_v = 12.5 \cdot (1 + 10 \cdot \alpha_v - \alpha_v^2) \geq 10. \quad (29)$$

$A_v$  je ploščina navpičnih odprtih sten sektorja,  $A_h$  je ploščina vodoravnih odprtih streh,  $A_f$  pa je ploščina tal sektorja.

### 3.2 Temperaturna analiza

V splošnem moramo za določitev časovnega spreminjanja temperatur nosilcev med požarom upoštevati vse tri načine prenosa toplote:

- i) sevanje oziroma radiacijo, pri katerem se energija prenaša z elektromagnetnim valovanjem,
- ii) konvekcijo, pri kateri se energija prenaša z gibanjem snovi z različnimi temperaturami in
- iii) prevajanje ali kondukcijo, pri katerem potuje energija v obliki toplote skozi snov z mest z višjo temperaturo na mesta z nižjo.

Pri običajnih gradbenih konstrukcijah iz betona, jekla ali lesa se seveda med požarom največ toplote po konstrukciji prenaša s kondukcijo. To opišemo s parcialno diferencialno enačbo za prevajanje toplote, znane kot Fourierjeva parcialna diferencialna enačba za prenos toplote po trdni snovi:

$$V: \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (30)$$

V enačbi (30) s  $T$  označujemo temperaturo posamezne točke elementa konstrukcije pri času  $t$ ,  $\lambda_{ij}$  so komponente prevodnostnega tenzorja snovi (v primeru izotropnega in homogenega materiala je  $\lambda_{ij} = \lambda$ ),  $Q$  je specifični prostorninski toplotni tok,  $\rho$  je gostota snovi,  $c$  pa specifična toplota snovi.

Prehod toplote skozi zunanjo površino nosilca zaradi konvekcije in radiacije v požarnem prostoru pa upoštevamo z ustreznimi robnimi pogoji. Ti so:

$$S_T: T_s - T_m = 0, \quad (31)$$

$$S_q : \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_i} n_i - q_s = 0, \quad (32)$$

$$V : T(x_i, 0) = T_0(x_i). \quad (33)$$

Z  $V$  označimo območje prostora, ki ga zavzema obravnavan element,  $S_T$  je mejna ploskev elementa, na kateri je s temperaturnim režimom okolja predpisano spreminjanje temperature  $T_s$ ,  $S_q$  je mejna ploskev elementa, na kateri je predpisan specifični površinski toplotni pretok  $q_s$  (povzročajo ga zunanji vplivi, npr. požar),  $n_i$  so komponente enotskega vektorja normale na mejno ploskev elementa,  $T_0$  pa je začetna temperatura v poljubni točki obravnavanega območja. Specifični površinski toplotni pretok  $q_s$  je sestavljen iz deleža  $q_c$ , ki ga prispeva izmenjava toplote med telesom in okolico s konvekcijo, ter iz deleža  $q_r$ , ki je posledica radiacije. Pozitiven je takrat, kadar toplota priteka v telo.

$$q_s = q_c + q_r \quad (34)$$

Toplotni pretok zaradi konvekcije je sorazmeren temperaturni razliki okolice in površine in ga zapišemo z izrazom:

$$q_c = \alpha_c (T_A - T_m), \quad (35)$$

kjer  $\alpha_c$  označuje prestopni koeficient. Skladno s SIST EN 1991-1-2:2005 je prestopni koeficient odvisen od krivulje temperatura-čas. Odvisnost prikazujemo v preglednici

Preglednica 4: Prestopni koeficient  $\alpha_c$

| Krivulja temperatura-čas  | $\alpha_c$ [W/(m <sup>2</sup> K)] |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Standardna                | 25                                |
| Krivulja zunanjega požara | 25                                |
| Ogljikovodikova           | 50                                |
| Modeli naravnih požarov   | 35                                |

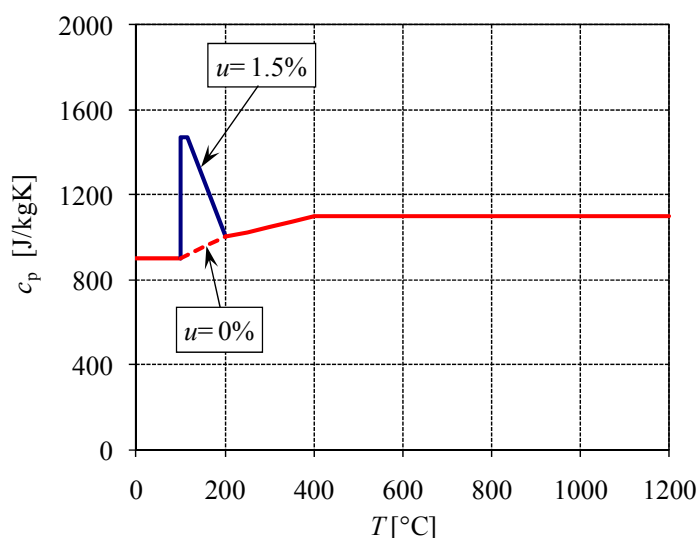
Toplotni pretok zaradi sevanja pa je določen z izrazom:

$$q_r = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot B \cdot [(T_r + 273)^4 - (T_m + 273)^4], \quad (36)$$

kjer je  $\Phi$  faktor oblike,  $\varepsilon_m$  je emisivnost površine elementa,  $\varepsilon_f$  je emisivnost plamenskega telesa,  $B$  je Stefan-Boltzmanova konstanta,  $T_r$  je efektivna temperatura sevanja požara,  $T_m$  pa površinska temperatura elementa. Skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 je privzeti faktor oblike  $\Phi = 1$ , ob upoštevanju učinkov lokacije in senčenja pa lahko upoštevamo tudi nižje vrednosti faktorja oblike. Za emisivnost betonskih površin upoštevamo  $\varepsilon_m = 0.7$ , za emisivnost plamenskega telesa pa privzamemo vrednost  $\varepsilon_f = 1.0$ .

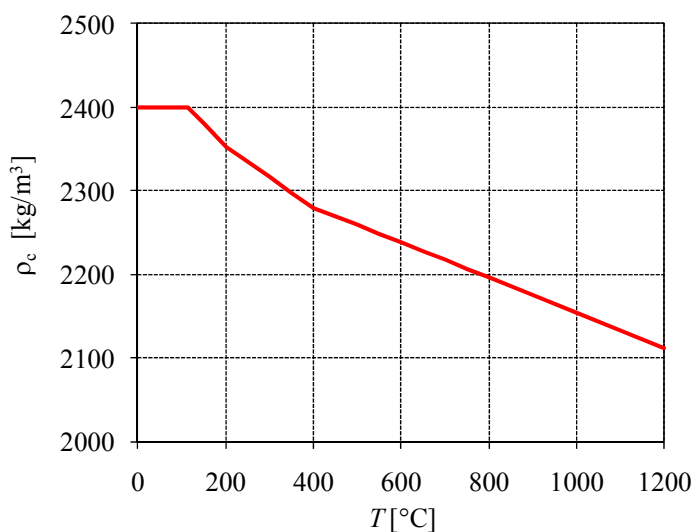
Analitično rešitev osnovne enačbe nestacionarnega prostorskega prevajanja toplote s pripadajočimi robnimi in začetnimi pogoji (enačbe (30) do (33)) poznamo le za najenostavnejše enodimenzionalne ali dvodimenzionalne probleme. V splošnem pa sistem rešimo z uporabo numeričnih metod in sicer z metodo končnih elementov, z diferenčno metodo ali pa z empiričnimi formulami, ki so na voljo v literaturi.

Poleg prenosa toplote se v poroznih materialih (na primer v betonu in lesu) med požarom po konstrukciji hkrati pretakajo tudi kapljevine in zmesi plinov, sočasno pa potekajo tudi številni kemijski procesi. Takšna povezana kemijsko-temperaturno-vlažnostna analiza, kot jo običajno imenujemo, je za vsakdanjo inženirsko prakso prezahtevna, zato upoštevamo vpliv transporta tekočin in kemičnih procesov na časovno razporeditev temperatur konstrukcij med požarom le posredno. Primer takšne poenostavitve je povečanje specifične toplote betona v temperaturnem območju med 100 in 200°C, s katerim posredno upoštevamo vpliv izparevanja vode na razvoj temperatur v betonu. Na sliki 2 prikazujemo temperaturno odvisnost specifične toplote betona  $c_p$  skladno s standardom SIST EN 1992-1-2:2005.



Slika 2: Spreminjanje specifične toplote betona iz kremenastega ali apnenčevega agregata s temperaturo pri vsebnosti vlage  $u = 0\%$  in  $1.5\%$  teže betona

Temperaturno odvisnost gostote betona, ki je posledica izparevanja vode, upoštevamo skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 in prikazujemo na sliki 3. Pri tem predpostavimo, da je gostota betona pri 20°C  $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ .



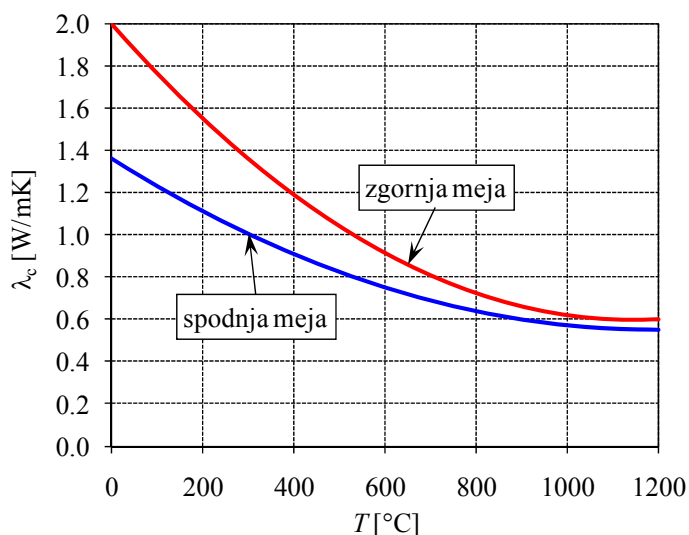
Slika 3: Spreminjanje gostote betona s temperaturo

Toplotno prevodnost betona  $\lambda_c$  se v skladu s SIST EN 1992-1-2:2005 lahko določi med zgornjo in spodnjo mejno vrednostjo in sicer:

$$\text{zgornja meja: } \lambda_c = 2 - 0.2451 \cdot (T/100) + 0.0107 \cdot (T/100)^2 \quad [\text{W/mK}], \quad (37)$$

$$\text{spodnja meja: } \lambda_c = 1.36 - 0.136 \cdot (T/100) + 0.0057 \cdot (T/100)^2 \quad [\text{W/mK}]. \quad (38)$$

Pri tem je  $T$  temperatura betona v  $^{\circ}\text{C}$ . Temperaturno odvisnost zgornje in spodnje meje toplotne prevodnosti prikazujemo na sliki 4.



Slika 4: Zgornja in spodnja meja toplotne prevodnosti betona

Po priporočilih standarda SIST EN 1992-1-2:2005 daje spodnja meja toplotne prevodnosti za betonske konstrukcije bolj realistične temperature kot zgornja meja.

Pri določanju temperatur nosilca med požarom ne naredimo velike napake, če predpostavimo, da je temperatura celotnega požarnega prostora ali pa vsaj dela na območju vzdolž nosilca enakomerna, kar bistveno poenostavi temperaturno analizo. V tem primeru izračunamo časovno razporeditev temperatur med požarom le v karakterističnem prečnem prerezu nosilca, saj se temperatura vzdolž nosilca ne spreminja.

Pri običajni stopnji armiranja (do 4 % ploščine prečnega prereza) lahko vpliv armature na časovno spreminjanje temperatur prečnega prereza zanemarimo.

### 3.3 Mehanska analiza

Skladno s standardom SIST EN 1992-1-2:2005 lahko ocenimo požarno odpornost armiranobetonskega nosilca na dva načina. Pri prvem načinu zagotovimo zahtevano požarno odpornost nosilca z ustreznimi dimenzijami prečnega prereza oziroma z ustrežno debelino zaščitne plasti betona, ki jih predpisuje standard. V tem primeru detajlnejša analiza požarne odpornosti nosilca ni potrebna. Z zadostnimi dimenzijami nosilca preprečimo morebitno luščenje betona, z ustrežno debelino zaščitnega sloja pa preprečimo prekomerno segrevanje

armaturnih palic, saj se pri temperaturah višjih od 400°C trdnost hladno obdelanega jekla za armiranje drastično zmanjša.

Pri drugem načinu pa izračunamo požarno odpornost armiranobetonskega nosilca z eno izmed poenostavljenih računskih metod – metodo izoterme 500°C oziroma metodo območij. V nadaljevanju detajlno predstavimo metodo izoterme 500°C.

### 3.3.1 Metoda izoterme 500°C

Metodo lahko uporabljamo v povezavi s standardnimi in parametričnimi požari (s faktorjem odprtin  $O \geq 0.14 \text{ m}^{1/2}$ ). Primerna je za armirane in prednapete betonske prereze pri osni, upogibni in kombinirani osno upogibni obremenitvi. Temelji na predpostavki, da se del betona s temperaturo višjo od 500°C (poškodovani beton) pri računu nosilnosti zanemari, medtem ko beton s temperaturo pod 500°C ohrani polno trdnost.

Podobno kot pri računu odpornosti nosilca pri sobni temperaturi tudi pri metodi izoterme 500°C prispevajo k osno-upogibni odpornosti armiranobetonskih prečnih prerezov nosilcev med požarom tlačno obremenjeni beton s temperaturo nižjo kot 500°C ter natezna in tlačna vzdolžna armatura. Na podlagi eksperimentalnih in teoretičnih ugotovitev je ta predpostavka zelo konzervativna [Purkiss, 1996], saj ima beton iz kremenčevega agregata pri 500°C skladno s SIST EN 1992-1-2: 2005 še 60 % tlačne trdnosti betona pri sobni temperaturi, beton iz apnenčevega agregata pa celo 74 %. Tako zanemaritev odpornosti betona pri temperaturah, višjih od 500°C, delno nadomestimo tako, da za tlačno obremenjene betonske dele prečnih prerezov nosilcev, s temperaturami nižjimi od 500°C, upoštevamo pri računu požarne odpornosti prečnega prereza tlačno trdnost betona pri sobni temperaturi. Prispevke armaturnih palic k požarni odpornosti prečnega prereza nosilca pa moramo upoštevati skladno s temperaturno odvisnimi redukcijskimi faktorji (glej enačbo (3)). Zaradi večje preglednosti predstavimo metodo izoterme 500°C še z enačbami.

V požarnem projektne stanju je značilni prečni prerez armiranobetonskega nosilca obremenjen z osno silo  $N_{d,t,fi}$  in z upogibnim momentom  $M_{d,t,fi}$  ( $\equiv E_{d,t,fi}$ ). S pomočjo ravnotežja osnih sil v prečnem prerezu ( $N_s - N'_s - N_c - N_{d,t,fi} = 0$ ) izračunamo lego nevtralne osi,  $x$ , z enačbo (glej sliko 5):

$$x = \frac{N_s - N'_s - N_{d,t,fi}}{0.8 b_{fi} f_{cd}}, \quad (39)$$

kjer je:

$$N_s = \sum_i A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i}, \quad (40)$$

$$N'_s = \sum_j A'_{s,j} \cdot f'_{sd,fi,j}. \quad (41)$$

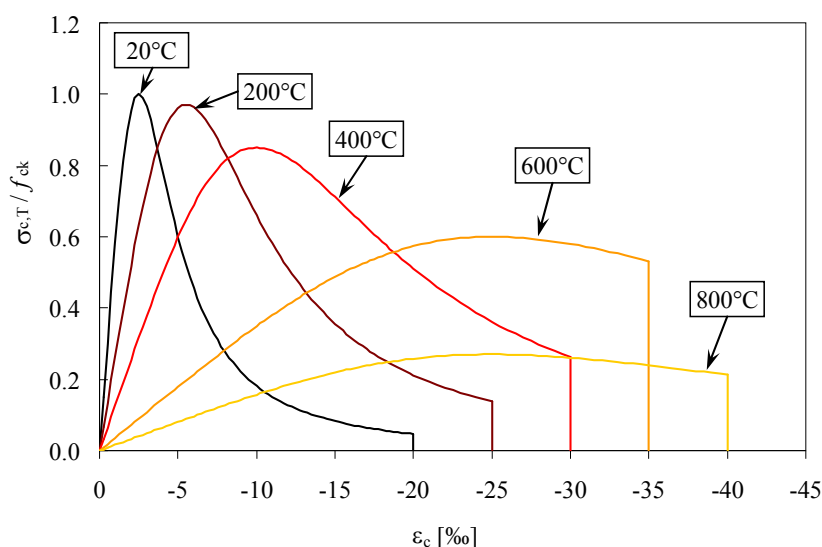
Pri izpeljavi smo upoštevali konstanten potek tlačnih napetosti v betonskem delu prečnega prereza. V enačbi (39) je  $b_{fi}$  reducirana širina prečnega prereza,  $f_{cd}$  je projektna tlačna trdnost betona pri sobni temperaturi,  $f_{sd,fi,i}$  in  $f'_{sd,fi,j}$  v enačbi (40) oziroma (41) pa sta od temperature



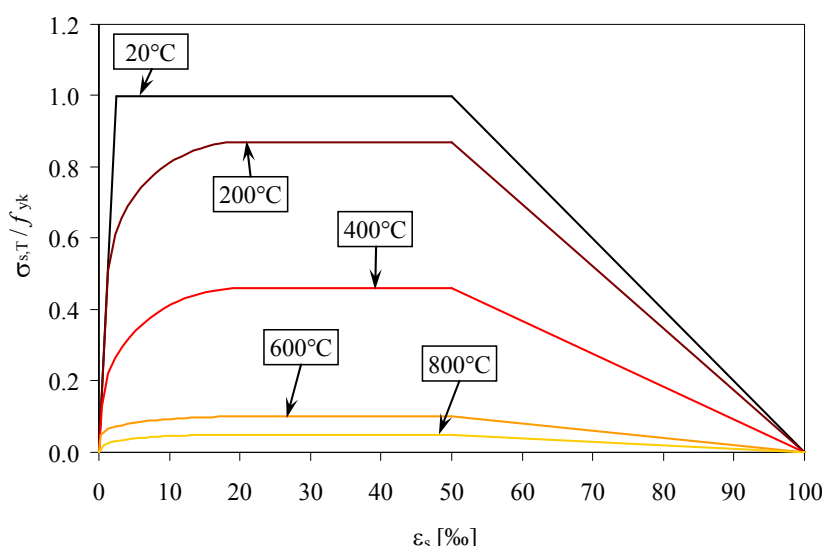


### 3.3.2 Toplotne in mehanske lastnosti betona in jekla za armiranje pri povišanih temperaturah

Bistven korak pri analizi požarne odpornosti vseh vrst konstrukcij med požarom je izbira pravilnega materialnega modela. V analizi uporabimo konstitucijski zakon za beton in jeklo za armiranje skladno s SIST EN 1992-1-2:2005. Temperaturno odvisni materialni parametri betona so: tlačna trdnost  $f_{c,T}$ , deformacija pri tlačni trdnosti  $\varepsilon_{c1,T}$  in mejna tlačna deformacija  $\varepsilon_{cu1,T}$ , za armaturo pa: elastični modul  $E_{s,T}$ , meja proporcionalnosti  $f_{sp,T}$  in trdnost  $f_{sy,T}$ . Na sliki 6 in 7 prikazujemo konstitucijska modela za betona iz apnenčevega agregata in hladno obdelano jeklo za armiranje v odvisnosti od temperature. Pri tem s  $\sigma$  označujemo vzdolžno normalno napetost vlakna, z  $\varepsilon$  pa mehansko deformacijo vlakna.

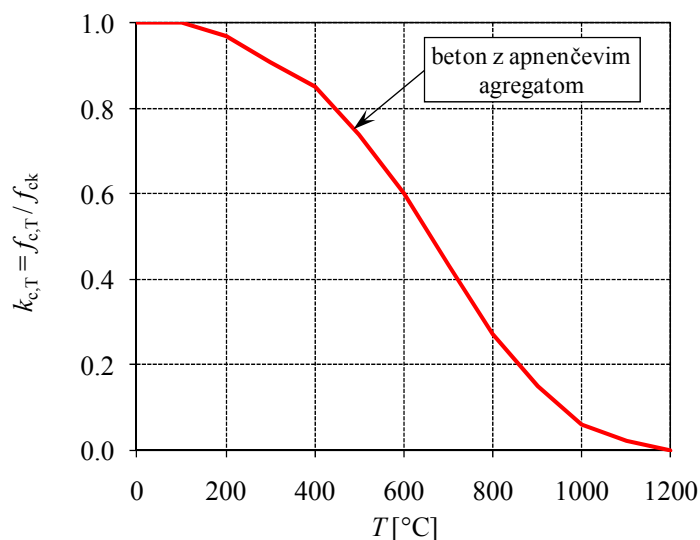


Slika 6: Temperaturno odvisni konstitucijski model betona z apnenčevim agregatom po SIST EN 1992-1-2:2005



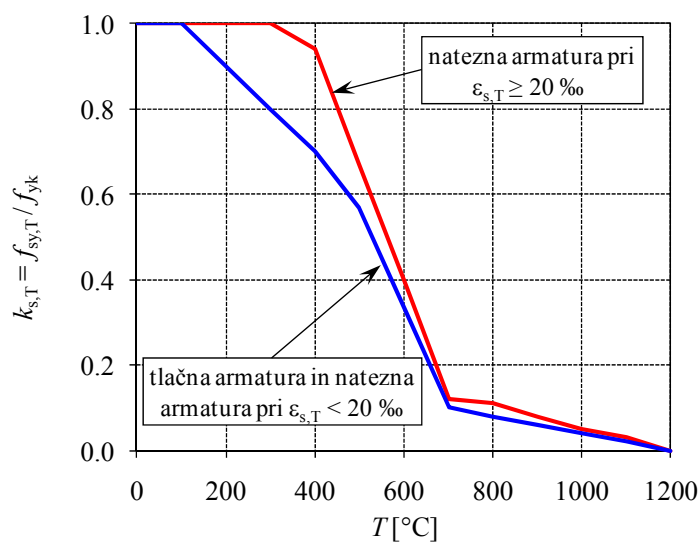
Slika 7: Temperaturno odvisni konstitucijski model hladno obdelanega jekla za armiranje (razred N) po SIST EN 1992-1-2:2005

Pri projektiranju z poenostavljenimi računskimi metodami pa potrebujemo le trdnosti materiala pri povišanih temperaturah. Na sliki 8 prikazujemo redukcijski faktor  $k_{c,T}$  za karakteristično tlačno trdnost betona  $f_{ck}$  iz apnenčevega agregata pri povišanih temperaturah.



Slika 8: Redukcijski faktor za karakteristično tlačno trdnost betona iz apnenčevega agregata pri povišanih temperaturah skladno s SIST EN 1992-1-2:2005

Podobno na sliki 9 prikazujemo še redukcijski faktor  $k_{s,T}$  za zmanjšanje karakteristične trdnosti natezne oziroma tlačne armature pri jeklu razreda N (hladno obdelano jeklo za armiranje).



Slika 9: Redukcijski faktor za karakteristično trdnost jekla za armiranje pri povišanih temperaturah skladno s SIST EN 1992-1-2:2005

V Dodatku C podajamo vrednosti redukcijskega faktorja  $k_{c,T}$  in  $k_{s,T}$  še v obliki preglednic.

## **4. ZAKLJUČEK**

## **5. LITERATURA**

- *HEATC*, M. Saje, G. Turk, Program za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote, FGG, Univerza v Ljubljani, 1987.

## A. DODATEK: RAČUN PARAMETRIČNE KRIVULJE TEMPERATURA-ČAS

### A.1 Primer učilnice s površino 140m<sup>2</sup>

V dodatku A1 prikažemo izračun parametrične krivulje temperatura-čas za primer učilnice.

#### A.1.1 Osnovni podatki požarnega sektorja

Požarni sektor je učilnica pravokotnega tlorisa z dimenzijami stranic 10×14 metrov. Tlorisna površina sektorja je 140 m<sup>2</sup>. Višina učilnice je 3.5 m. Na eni izmed daljših sten učilnice je pet oken z dimenzijami 2.4×2.8 metra. Na nasprotni steni so vrata dimenzij 1×2 metra.

Za toplotne lastnosti oboda upoštevamo kar gostoto, specifično toploto ter prevodnost betona ( $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_c = 900 \text{ J/kgK}$  in  $\lambda_c = 1.36 \text{ W/mK}$ ).

Predvideni so naslednji aktivni ukrepi gašenja:

- zunanja gasilska enota,
- varne intervencijske poti in
- gasilski pripomočki.

#### A.1.2 Karakteristična in projektna gostota požarne obremenitve glede na površino tal

Projektno vrednost gostote požarne obremenitve  $q_{f,d}$  izračunamo z enačbo (20). Pri tem upoštevamo uporabo navedenih aktivnih ukrepov gašenja. Izračun prikazujemo v preglednici 6.

Preglednica 6: Račun projektne vrednosti gostote požarne obremenitve  $q_{f,d}$

|                  |       |  |  |   |   |
|------------------|-------|--|--|---|---|
| $q_{f,k} =$      | 347   | MJ/m <sup>2</sup>  | Solski razredi   | ▼ | karakteristična gostota požarne obtežbe |
| $q_{f,d} =$      | 424   | MJ/m <sup>2</sup>  | projektna vrednost gostote požarne obremenitve glede na površino tal $A_f$ |   |   |
| hitrost razvoja  |       |  |  |   |   |
| požara: srednja  |       |  |  |   |   |
| $m =$            | 0.8   | faktor izgorevanja za pretežno celulozne materiale   |  |   |   |
| $\delta_{q1} =$  | 1.30  | faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja   |  |   |   |
| $\delta_{q2} =$  | 1     | faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo<br>(za pisarne, stanovanja, hoteli, papirna industrija: 1.0) |  |   |   |
| $\delta_n =$     | 1.170 | faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja   |  |   |   |
| $\delta_{n1} =$  | 1     | avtomatski vodni gasilni sistem: 0.61  |  |   |   |
| $\delta_{n2} =$  | 1     | neodvisna preskrba z vodo: 0.87  |  |   |   |
| $\delta_{n3} =$  | 1     | avtomatsko zaznavanje požara in alarm (s toploto): 0.87  |  |   |   |
| $\delta_{n4} =$  | 1     | avtomatsko zaznavanje požara in alarm (z dimom): 0.73  |  |   |   |
| $\delta_{n5} =$  | 1     | avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto: 0.87  |  |   |   |
| $\delta_{n6} =$  | 1     | lastna gasilska enota: 0.61  |  |   |   |
| $\delta_{n7} =$  | 0.78  | zunanja gasilska enota: 0.78   |  |   |   |
| $\delta_{n8} =$  | 1     | varne intervencijske poti: 1, v primeru požara v stopnišču nadtlak: 0.9 (če niso predvidene: 1.5)                        |  |   |   |
| $\delta_{n9} =$  | 1     | gasilski pripomočki: 1 (niso predvideni: 1.5)  |  |   |   |
| $\delta_{n10} =$ | 1.5   | sistem za odvod dima: 1 (ni predviden: 1.5)  |  |   |   |

#### A.1.3 Parametrična požarna krivulja

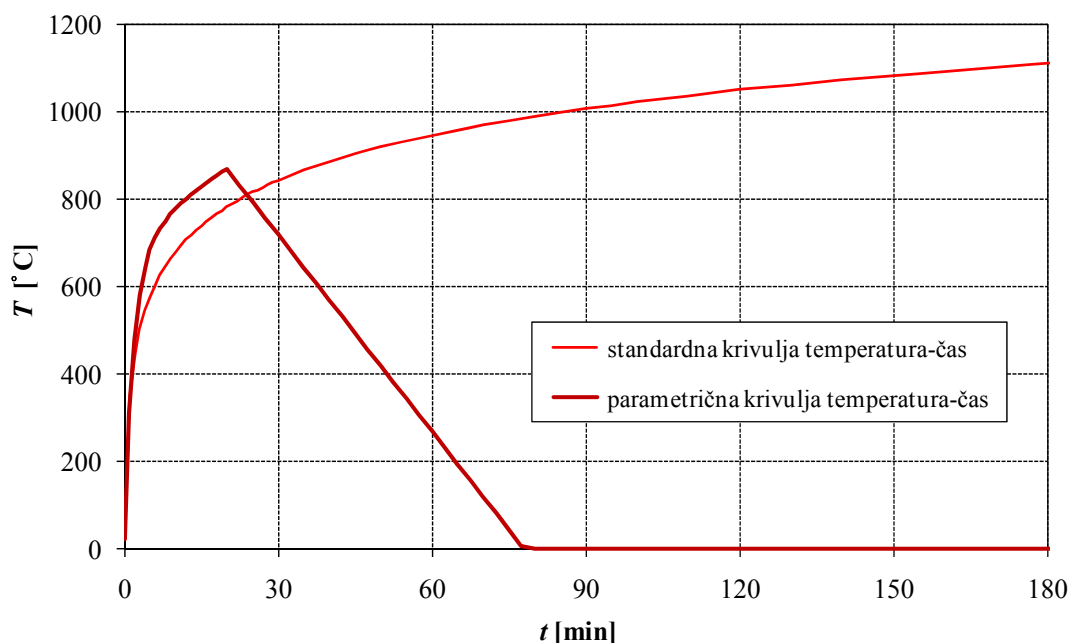
Glede na dimenzije požarnega sektorja, velikosti in razporeditve odprtih, toplotnih lastnosti materiala oboda ter projektne vrednosti gostote požarne obremenitve izračunamo parametrično požarno krivuljo. Račun pokaže, da je čas, pri katerem nastopi v fazi segrevanja najvišja

temperature, enak mejni vrednosti ( $t_{\max} = t_{\text{lim}}$ ). Zato upoštevamo korekcijo skladno z enačbo (17). Izračun osnovnih parametrov krivulje prikazujemo v preglednici 7.

Preglednica 7: Osnovni parametri krivulje

| Veljavne za požarne sektorje talne površine do 500m <sup>2</sup> brez odprtin v stropu in z maksimalno višino sektorja 4 m.<br>Predpostavljeno je, da požarna obremenitev sektorja v celoti zgori. |       |   |   |
|--|-------|---|---|
| $A_f =$  | 140   | m <sup>2</sup>  | površina tal  |
| $A_v =$  | 35.6  | m <sup>2</sup>  | celotna površina vertikalnih odprtin v vseh stenah  |
| $A_o =$  | 448   | m <sup>2</sup>  | celotna površina oboda (stene, stropovi in tla, vključno z odprtini)  |
| $h_{eq} =$   | 2.8   | m   | uteženo povprečje višin oken v vseh stenah  |
| $O =$  | 0.133 | ( $0.02 \leq O \leq 0.2$ )                                      | faktor odprtin [m <sup>1/2</sup> ]  |
| $b =$  | 1714  | J/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> K ( $1000 \leq b \leq 2000$ ) | toplotne lastnosti materiala oboda  |
| $\Gamma =$   | 5.062 |   | v primeru da je $\Gamma = 1$ , se krivulja približa standardni krivulji temperatura-čas                       |
| $t_{\max}^* =$   | 1.687 |   |   |
| $t_{\max} =$   | 0.33  | h   | čas, pri katerem nastopi v fazi segrevanja najvišja temperatura   |
| $t_{\text{lim}} =$   | 20    | min   | popravi t*! opomba: če $t_{\max} = t_{\text{lim}}$ je potrebno upoštevati $t^* = t \cdot \Gamma_{\text{lim}}$ |
| $\Gamma_{\text{lim}} =$  | 1.807 |   |   |
| $O_{\text{lim}} =$   | 0.079 |   |   |
| $q_{t,d} =$  | 132   | MJ/m <sup>2</sup> ( $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$ )               | projektna vrednost gostote požarne obremenitve glede na skupno površino $A_o$ oboda                           |

Na sliki 10 prikazujemo izračunano parametrično krivuljo za učilnico s površino 140 m<sup>2</sup>. Najvišja temperatura nastopi pri času  $t_{\max} = 20$  min in je  $T_{\max} = 867^\circ\text{C}$ . Krivuljo primerjamo s standardno krivuljo temperatura-čas.



Slika 10: Parametrična krivulja za učilnico s površino 140m<sup>2</sup>.

#### A.1.4 Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru

Skladno z enačbo (24) izračunamo še enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru. Izračun prikazujemo v preglednici 8. Parameter  $\alpha_v$  (enačba (27)) je večji od mejne vrednosti.

Preglednica 8: *Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru*

| Enakovreden čas izpostavljenosti: |             |   |
|-----------------------------------|-------------|---|
| $t_{e,d} =$                       | <b>18.1</b> | min   |
| $H =$                             | 3.5         | m   |
|                                   |             | višina požarnega sektorja                                 |
| $\alpha_v =$                      | 0.254       | ( $0.025 \leq \alpha_v \leq 0.25$ )                       |
| $\alpha_h =$                      | 0           |   |
| $b_v =$                           | 43.5        | ( $b_v \geq 10$ )   |
| $w_f =$                           | 0.78        | ( $w_f \geq 0.5$ )  |
|                                   |             | faktor prezračevanja                                      |
| $k_b =$                           | 0.055       | min·m <sup>2</sup> /MJ                                    |
|                                   |             | faktor pretvorbe  |
| $k_c =$                           | 1           |   |
|                                   |             | korekcijski faktor za material nosilnega prečnega prereza |

## A.2 Primer knjižnice s površino 280m<sup>2</sup>

V dodatku A2 prikažemo še izračun parametrične krivulje temperatura-čas za primer prostora v knjižnici.

### A.2.1 Osnovni podatki požarnega sektorja

Požarni sektor je prostor v knjižnici pravokotnega tlorisa z dimenzijami stranic 14×20 metrov. Tlorisna površina sektorja je 280 m<sup>2</sup>. Višina prostora je 3.5 m. Na obodnih stenah je pet oken z dimenzijami 2.4×2.2 metra ter dvojne vrat dimenzij 2×2 metra.

Za toplotne lastnosti oboda upoštevamo kar gostoto, specifično toploto ter prevodnost betona ( $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_c = 900 \text{ J/kgK}$  in  $\lambda_c = 1.36 \text{ W/mK}$ ).

Predvideni so naslednji aktivni ukrepi gašenja:

- avtomatski vodni gasilni sistem,
- avtomatsko zaznavanje požara (z dimom) in alarm,
- zunanja gasilska enota,
- varne intervencijske poti in
- gasilski pripomočki.

### A.2.2 Karakteristična in projektna gostota požarne obremenitve glede na površino tal

Projektno vrednost gostote požarne obremenitve  $q_{f,d}$  izračunamo z enačbo (20). Pri tem upoštevamo uporabo navedenih aktivnih ukrepov gašenja. Izračun prikazujemo v preglednici 9.

Preglednica 9: Račun projektne vrednosti gostote požarne obremenitve  $q_{f,d}$ 

|                  |       |  |  |   |   |
|------------------|-------|--|--|---|---|
| $q_{f,k} =$      | 1824  | MJ/m <sup>2</sup>  | Knjižnice  | ▼ | karakteristična gostota požarne obtežbe |
| $q_{f,d} =$      | 1144  | MJ/m <sup>2</sup>  | projektna vrednost gostote požarne obremenitve glede na površino tal $A_f$ |   |   |
| hitrost razvoja  |       |  |  |   |   |
| požara:          | hitra |  |  |   |   |
| $m =$            | 0.8   | faktor izgorjevanja za pretežno celulozne materiale  |  |   |   |
| $\delta_{q1} =$  | 1.51  | faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja   |  |   |   |
| $\delta_{q2} =$  | 1     | faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo<br>(za pisarne, stanovanja, hoteli, papirna industrija: 1.0) |  |   |   |
| $\delta_n =$     | 0.521 | faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja   |  |   |   |
| $\delta_{n1} =$  | 0.61  | avtomatski vodni gasilni sistem: 0.61  |  |   |   |
| $\delta_{n2} =$  | 1     | neodvisna preskrba z vodo: 0.87  |  |   |   |
| $\delta_{n3} =$  | 1     | avtomatsko zaznavanje požara in alarm (s toploto): 0.87  |  |   |   |
| $\delta_{n4} =$  | 0.73  | avtomatsko zaznavanje požara in alarm (z dimom): 0.73  |  |   |   |
| $\delta_{n5} =$  | 1     | avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto: 0.87  |  |   |   |
| $\delta_{n6} =$  | 1     | lastna gasilska enota: 0.61  |  |   |   |
| $\delta_{n7} =$  | 0.78  | zunanja gasilska enota: 0.78   |  |   |   |
| $\delta_{n8} =$  | 1     | varne intervencijske poti: 1, v primeru požara v stopnišču nadtlak: 0.9 (če niso predvidene: 1.5)                        |  |   |   |
| $\delta_{n9} =$  | 1     | gasilski pripomočki: 1 (niso predvideni: 1.5)  |  |   |   |
| $\delta_{n10} =$ | 1.5   | sistem za odvod dima: 1 (ni predviden: 1.5)  |  |   |   |

### A.2.3 Parametrična požarna krivulja

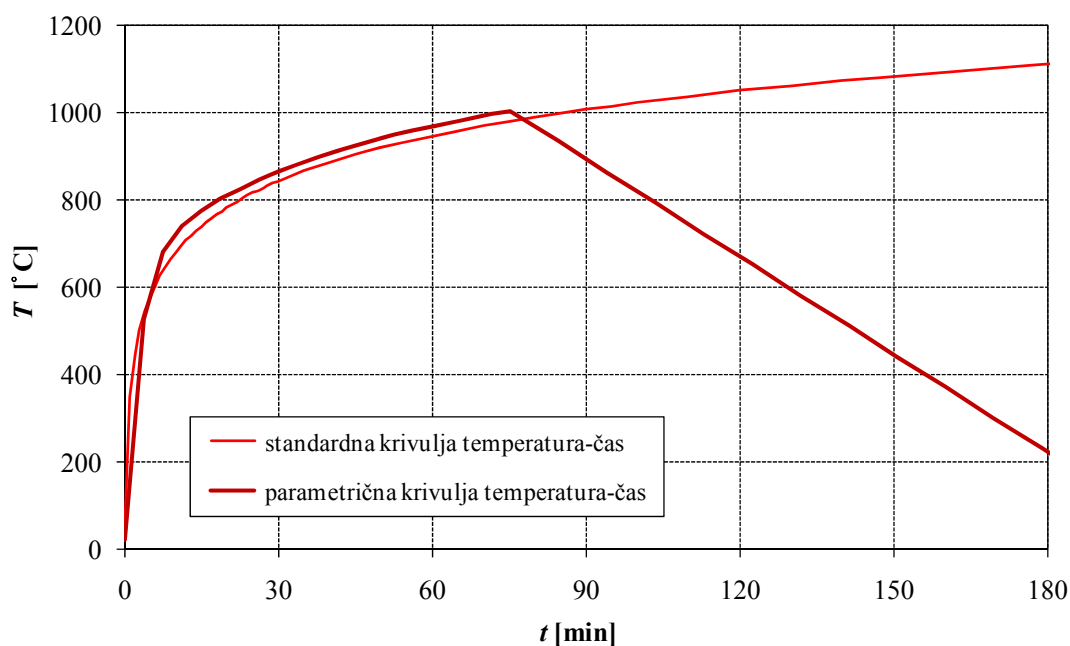
Glede na dimenzije požarnega sektorja, velikosti in razporeditve odprtih, toplotnih lastnosti materiala oboda ter projektne vrednosti gostote požarne obremenitve izračunamo parametrično požarno krivuljo. Izračun osnovnih parametrov krivulje prikazujemo v preglednici 10.

Preglednica 10: Osnovni parametri krivulje za primer požara v knjižnici

|  |        |   |   |  |  |
|--|--------|---|---|--|--|
| Veljavne za požarne sektorje talne površine do 500m <sup>2</sup> brez odprtih v stropu in z maksimalno višino sektorja 4 m.<br>Predpostavljeno je, da požarna obremenitev sektorja v celoti zgori. |        |   |   |  |  |
| $A_f =$  | 280    | m <sup>2</sup>  | površina tal  |  |  |
| $A_v =$  | 34.4   | m <sup>2</sup>  | celotna površina vertikalnih odprtih v vseh stenah                                      |  |  |
| $A_t =$  | 798    | m <sup>2</sup>  | celotna površina oboda (stene, stropovi in tla, vključno z odprtinami)                  |  |  |
| $h_{eq} =$   | 2.2    | m   | uteženo povprečje višin oken v vseh stenah  |  |  |
| $O =$  | 0.064  | (0.02 ≤ O ≤ 0.2)                                      | faktor odprtih [m <sup>1/2</sup> ]  |  |  |
| $b =$  | 1714   | J/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> K (1000 ≤ b ≤ 2000) | toplotne lastnosti materiala oboda  |  |  |
| $\Gamma =$   | 1.170  |   | v primeru da je $\Gamma = 1$ , se krivulja približa standardni krivulji temperatura-čas |  |  |
| $t_{max}^* =$  | 1.470  |   |   |  |  |
| $t_{max} =$  | 1.26   | h   | čas, pri katerem nastopi v fazi segrevanja najvišja temperatura                         |  |  |
| $t_{lim} =$  | 15     | min   | OK  | opomba: če $t_{max} = t_{lim}$ je potrebno upoštevati $t^* = t \cdot \Gamma_{lim}$ |  |
| $\Gamma_{lim} =$   | 29.544 |   |   |  |  |
| $O_{lim} =$  | 0.321  |   |   |  |  |
| $q_{f,d} =$  | 402    | MJ/m <sup>2</sup> (50 ≤ $q_{f,d}$ ≤ 1000)             | projektna vrednost gostote požarne obremenitve glede na skupno površino $A_t$ oboda     |  |  |

Na sliki 11 prikazujemo izračunano parametrično krivuljo za prostor v knjižnici s površino 280 m<sup>2</sup>. Najvišja temperatura nastopi pri času  $t_{max} = 75.4$  min in je  $T_{max} = 1003^\circ\text{C}$ . Krivuljo primerjamo s standardno krivuljo temperatura-čas.





Slika 11: Parametrična krivulja za prostor v knjižnici s površino  $280\text{m}^2$

#### A.2.4 Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru

Skladno z enačbo (24) izračunamo še enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru. Izračun prikazujemo v preglednici 11.

Preglednica 11: Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru

| Enakovreden čas izpostavljenosti: |             |                                       |
|-----------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| $t_{e,d} =$                       | <b>85.2</b> | min                                   |
| $H =$                             | 3.5         | m                                     |
| $\alpha_v =$                      | 0.123       | ( $0.025 \leq \alpha_v \leq 0.25$ )   |
| $\alpha_h =$                      | 0           |                                       |
| $b_v =$                           | 27.7        | ( $b_v \geq 10$ )                     |
| $w_f =$                           | 1.35        | ( $w_f \geq 0.5$ )                    |
| $k_b =$                           | 0.055       | $\text{min}\cdot\text{m}^2/\text{MJ}$ |
| $k_e =$                           | 1           |                                       |

višina požarnega sektorja  
faktor prezračevanja  
faktor pretvorbe  
korekcijski faktor za material nosilnega prečnega prereza

Potrebno je dokazati, da je projektna vrednost standardne požarne odpornosti elementa nosilne konstrukcije oziroma njenega dela, določena skladno s požarnimi deli standardov EN, večja od časa izpostavljenosti  $t_{e,d} = 85.2$  min (enačba (25)). To pomeni, da morajo imeti elementi nosilne konstrukcije knjižnice požarno odpornost vsaj REI 90.

## **B. DODATEK: TEMPERATURNI PROFILI**

### **B.1 Standardna krivulja temperatura-čas, prerez izpostavljen s treh strani**

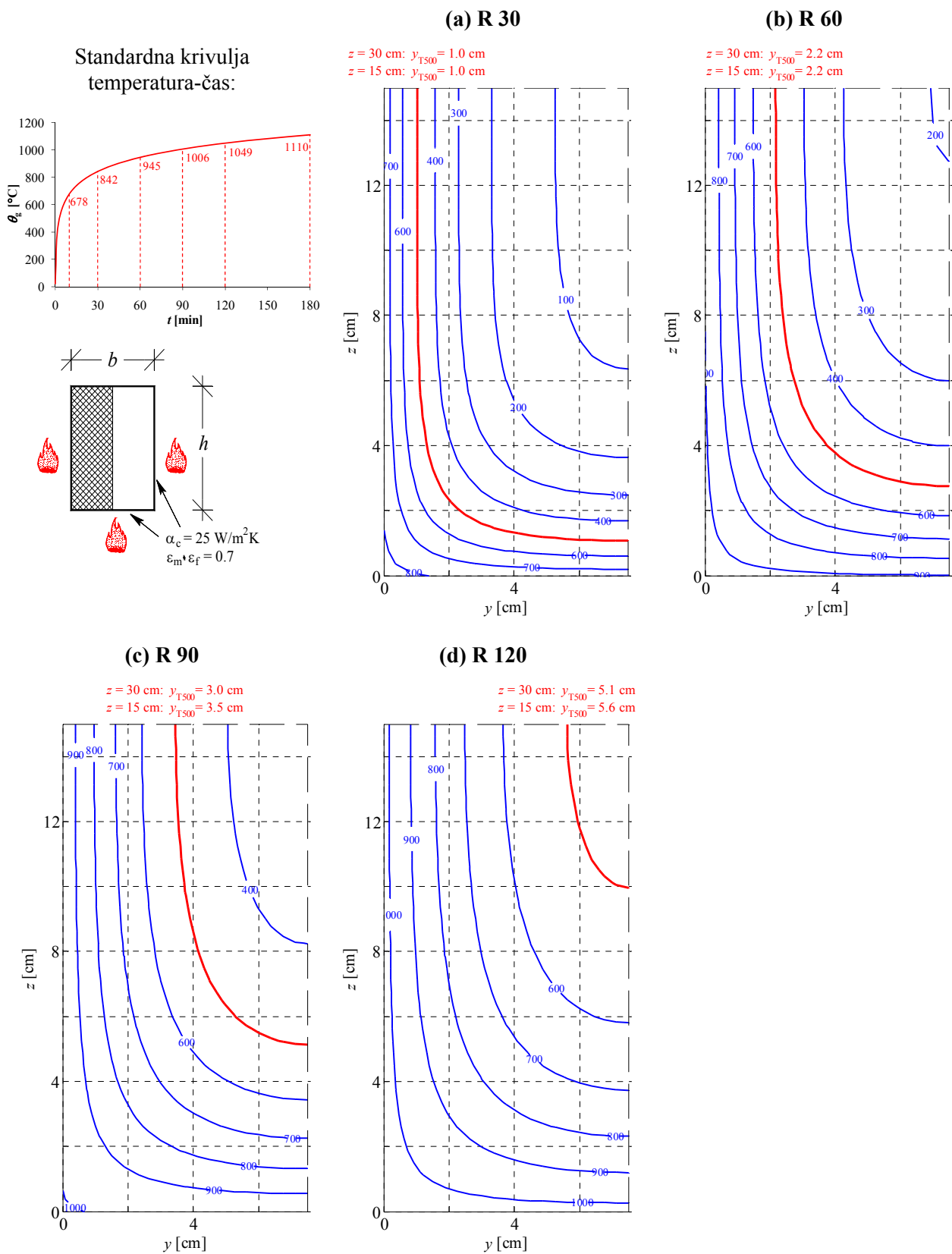
Temperaturni profili veljajo za armiranobetonske elemente s pravokotnimi prečnimi prerezi, ki so požaru (t.j. standardni krivulji temperatura-čas) izpostavljeni s treh strani. To pomeni, da je zgornja stran nosilca izolirana s ploščami ali drugimi elementi, ki funkcijo izolativnosti ohranijo v celotnem času zahtevane požarne odpornosti. Pri nosilcih s spremenljivo širino se širina  $b$  nanaša na težišče natezne armature.

Temperaturni profili temeljijo na naslednjih vrednostih:

- specifično toploto betona upoštevamo skladno s sliko 2 za vsebnost vlage 1.5 % teže betona,
- gostoto betona upoštevamo skladno s sliko 3,
- upoštevamo spodnjo mejo toplotne prevodnosti betona tako kot prikazujemo na sliki 4,
- na izpostavljenih stranicah prečnega prereza upoštevamo prestopni koeficient  $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  in emisivnost površine  $\varepsilon_m = 0.7$ .

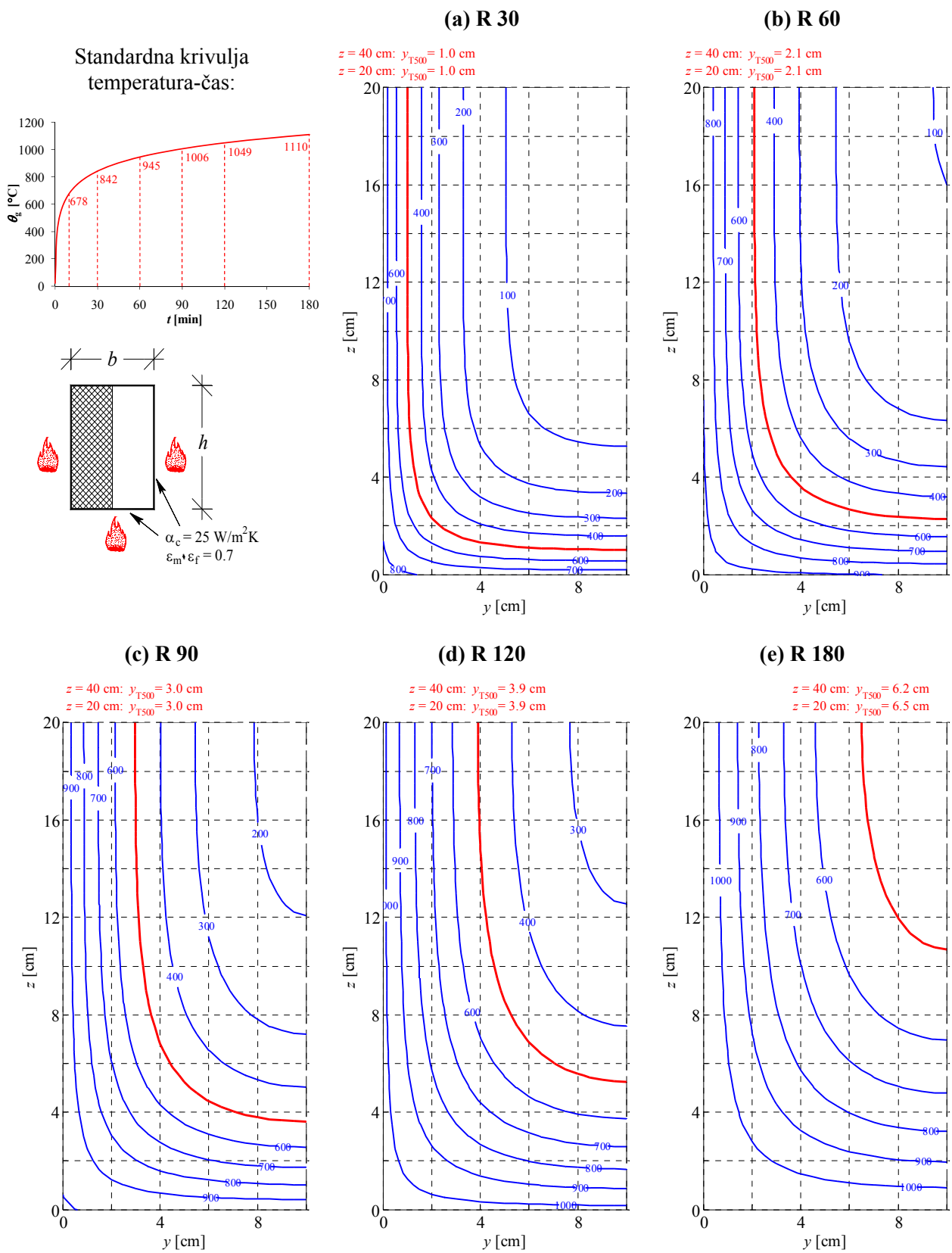
Zaradi upoštevanja simetrije temperature profile prikazujemo le za polovico prečnega prereza.

**B.1.1 Pravokotni prečni prerez  $b = 15, h \geq 15$  cm:**



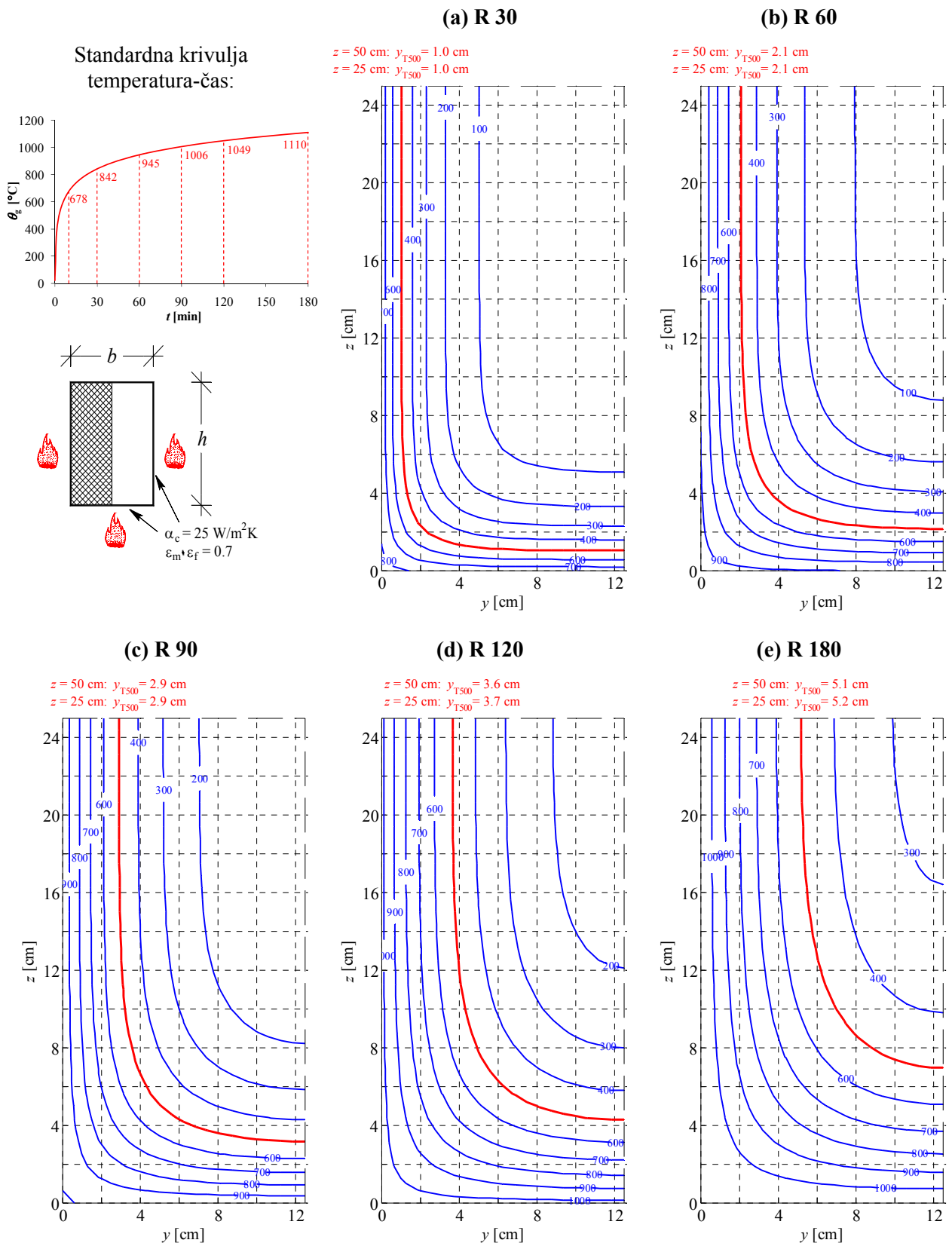
Slika 12: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez  $b/h = 15/\geq 15$  cm

**B.1.2 Pravokotni prečni prerez  $b = 20, h \geq 20$  cm:**



Slika 13: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez  $b/h = 20/\geq 20$  cm

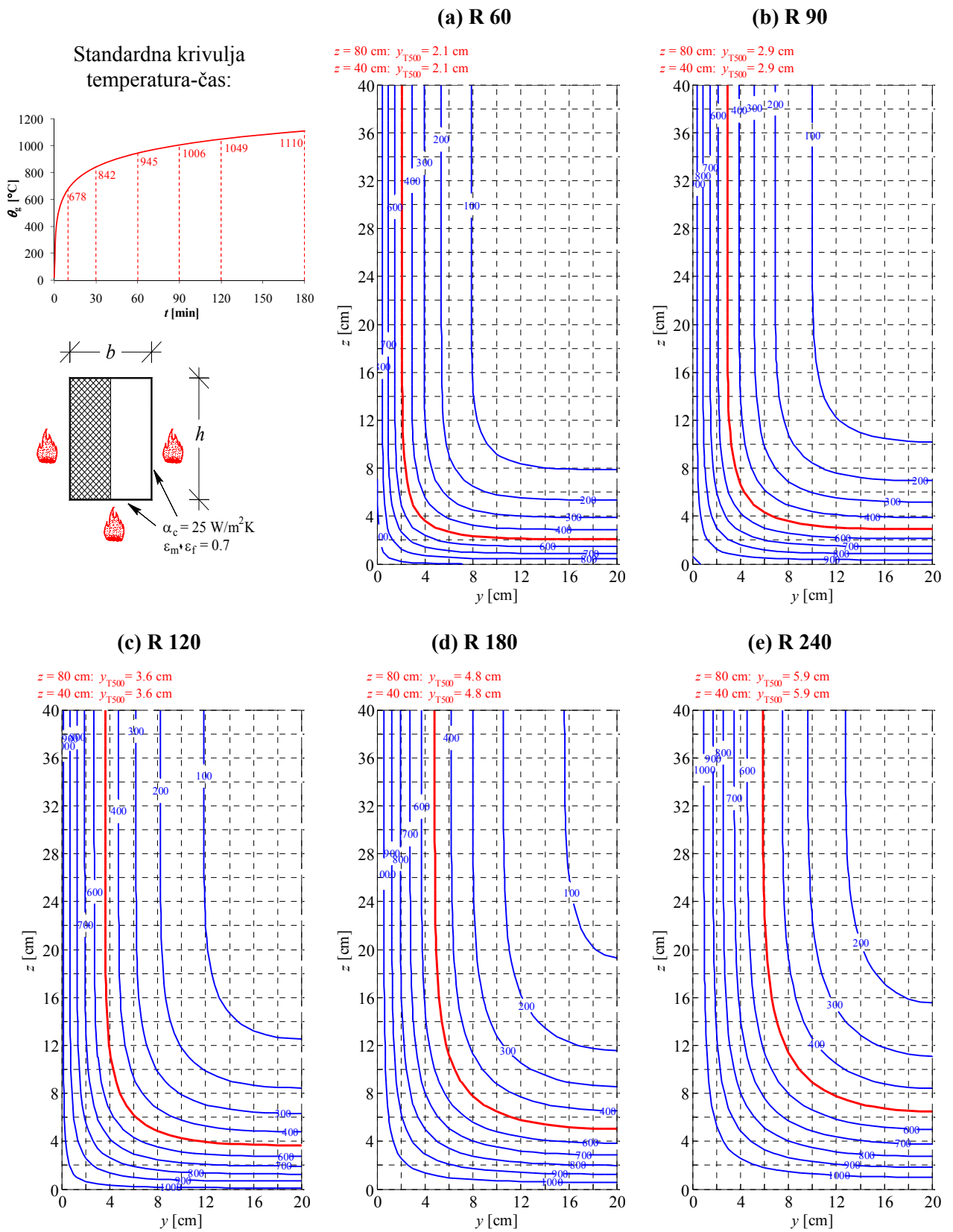
**B.1.3 Pravokotni prečni prerez  $b = 25$ ,  $h \geq 25$  cm:**



Slika 14: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez  $b/h = 25/\geq 25$  cm



**B.1.5 Pravokotni prečni prerez  $b = 40, h \geq 40$  cm:**



Slika 16: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez  $b/h = 40/\geq 40$  cm

## B.2 Standardna krivulja temperatura-čas, prerez izpostavljen s štirih strani

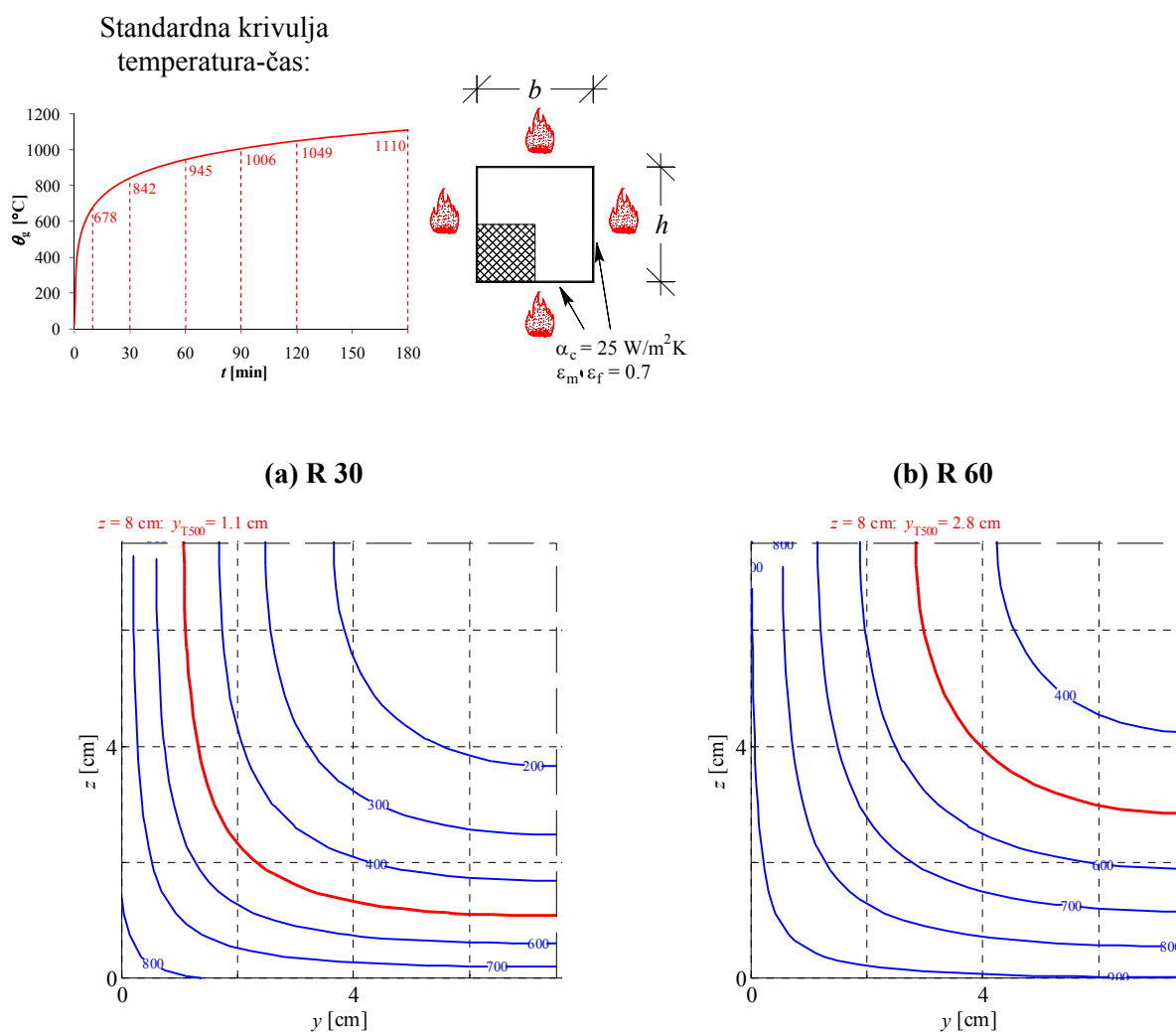
Temperaturni profili veljajo za armiranobetonse elemente s pravokotnimi prečnimi prerezi, ki so požaru (t.j. standardni krivulji temperatura-čas) izpostavljeni s vseh štirih strani.

Temperaturni profili temeljijo na naslednjih vrednostih:

- specifično toploto betona upoštevamo skladno s sliko 2 za vsebnost vlage 1.5 % teže betona,
- gostoto betona upoštevamo skladno s sliko 3,
- upoštevamo spodnjo mejo toplotne prevodnosti betona tako kot prikazujemo na sliki 4,
- na izpostavljenih stranicah prečnega prereza upoštevamo prestopni koeficient  $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  in emisivnost površine  $\epsilon_m = 0.7$ .

Zaradi upoštevanja simetrije temperaturne profile prikazujemo le za četrtinko prečnega prereza.

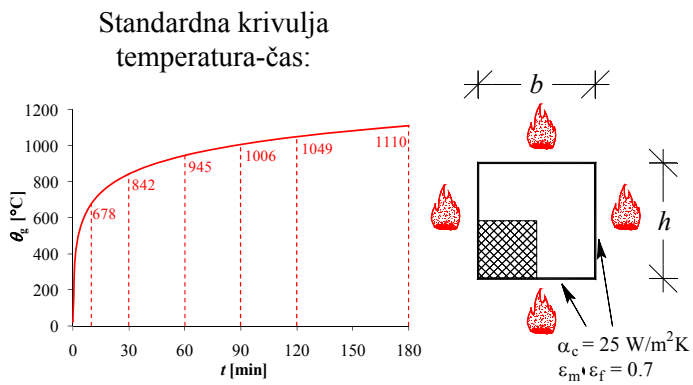
### B.2.1 Kvadratni prečni prerez $b = 15 \text{ cm}$ :



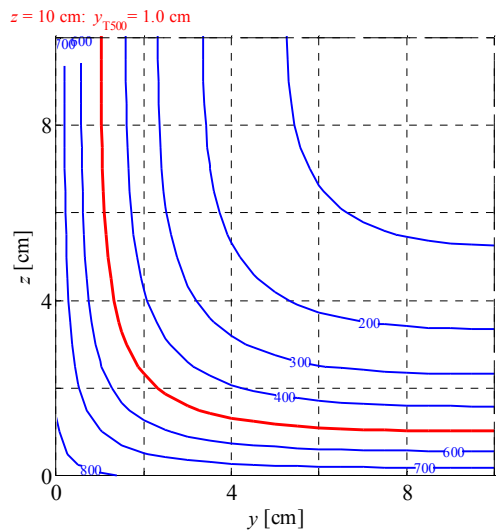
Slika 17: Temperaturni profili za kvadratni prečni prerez  $b/h = 15/15 \text{ cm}$



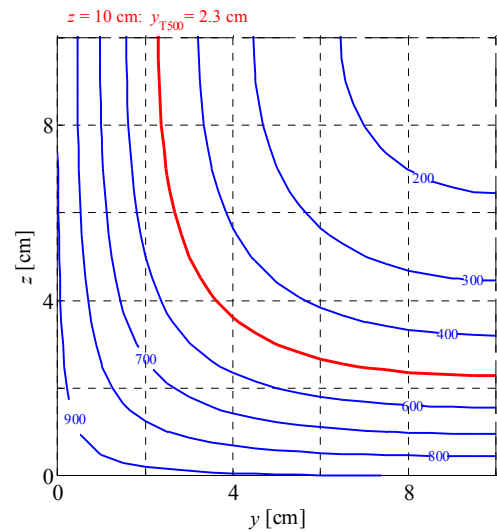
**B.2.2 Kvadratni prečni prerez  $b = 20$  cm:**



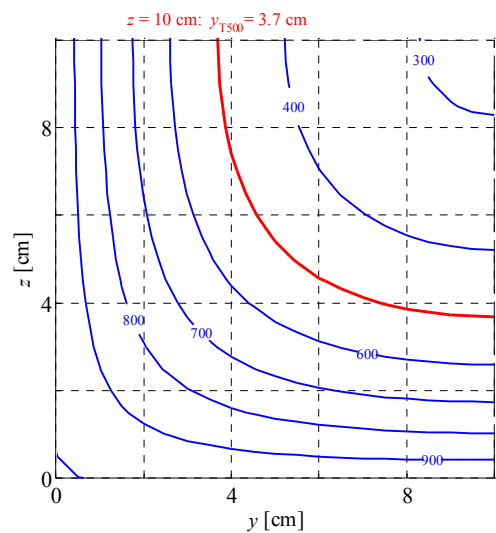
**(a) R 30**



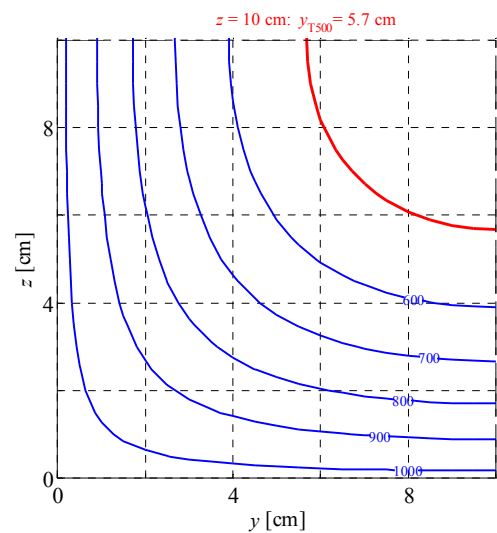
**(b) R 60**



**(c) R 90**

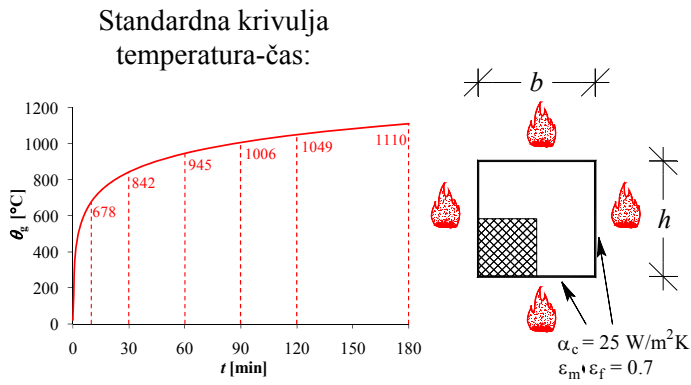


**(d) R 120**

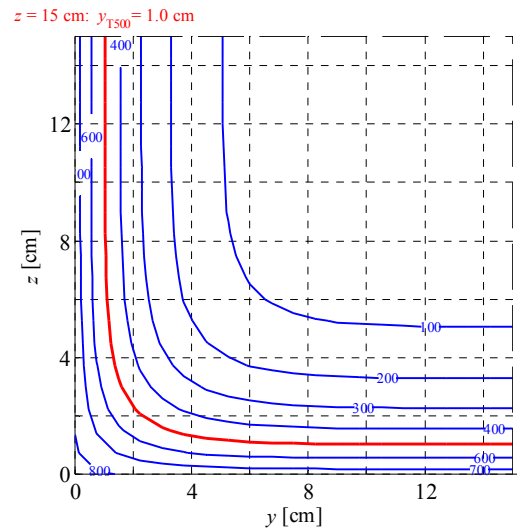


Slika 18: Temperaturni profili za kvadratni prečni prerez  $b/h = 20/20$  cm

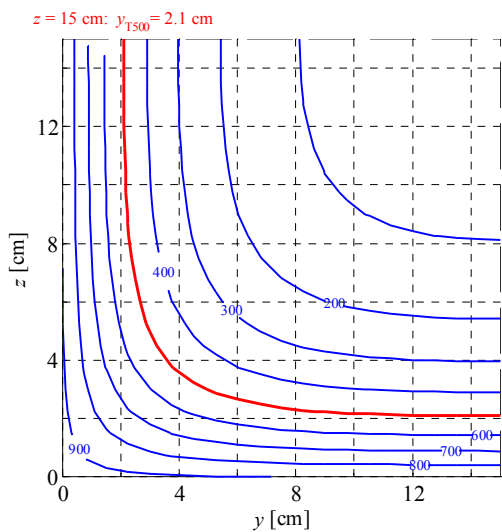
**B.2.3 Kvadratni prečni prerez  $b = 25$  cm:**



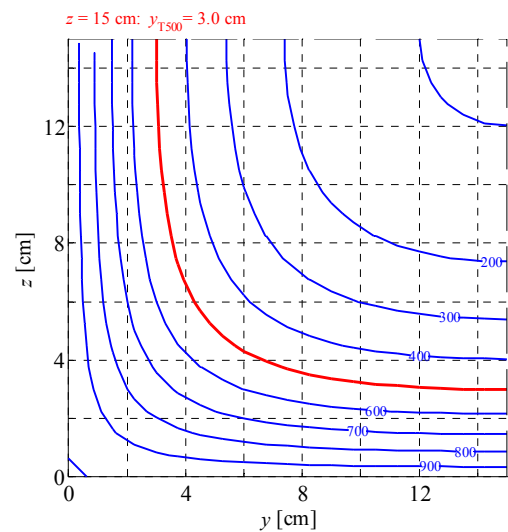
**(a) R 30**



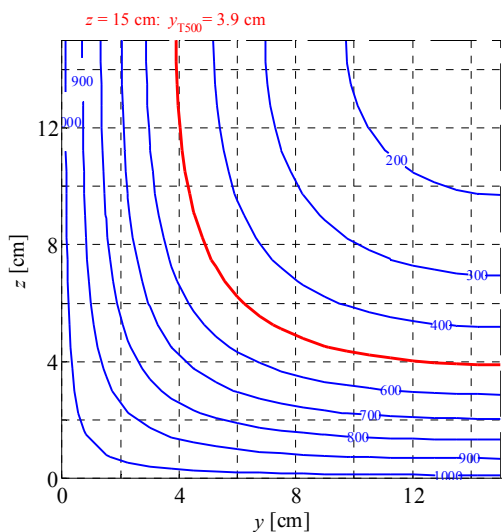
**(b) R 60**



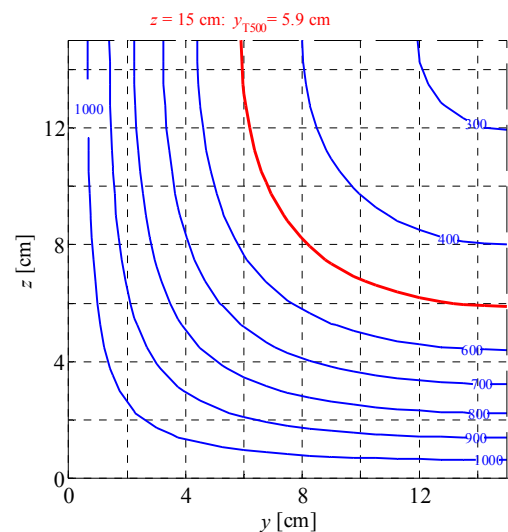
**(c) R 90**



**(d) R 120**

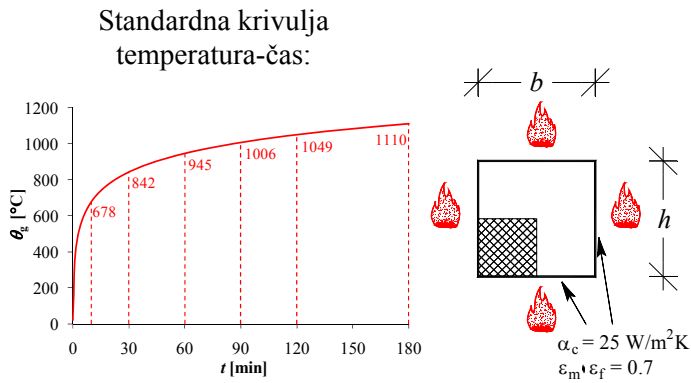


**(e) R 180**

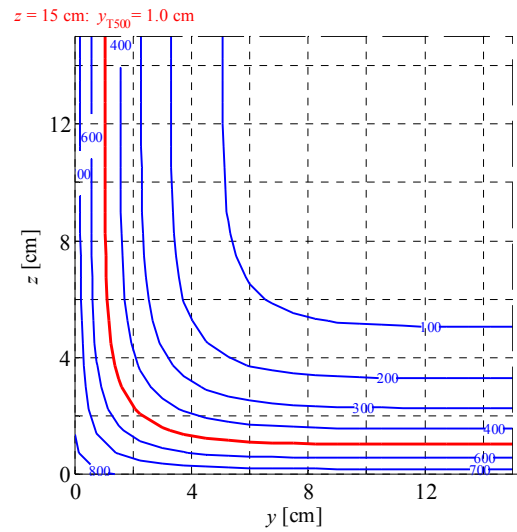


Slika 19: Temperaturni profili za kvadratni prečni prerez  $b/h = 25/25$  cm

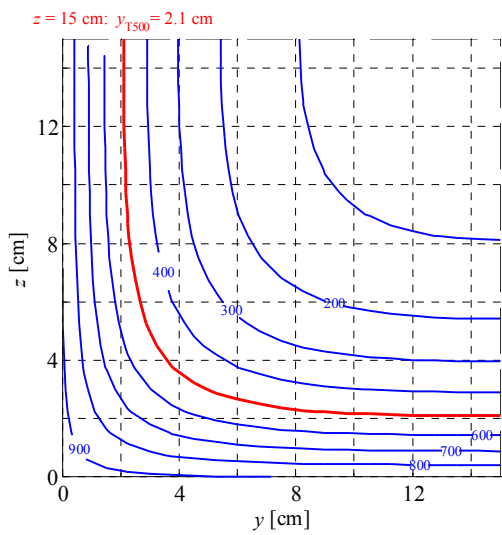
**B.2.4 Kvadratni prečni prerez  $b = 30$  cm:**



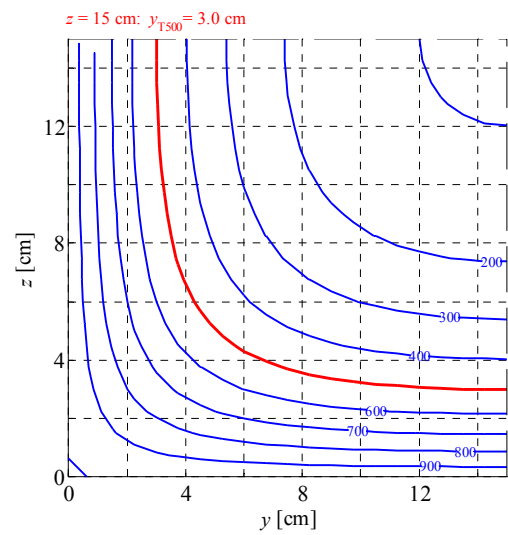
**(a) R 30**



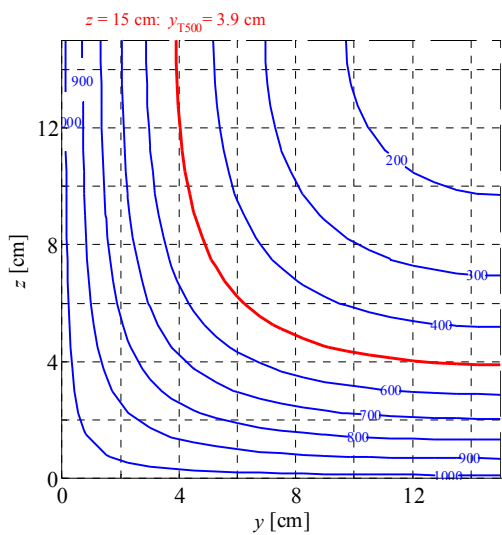
**(b) R 60**



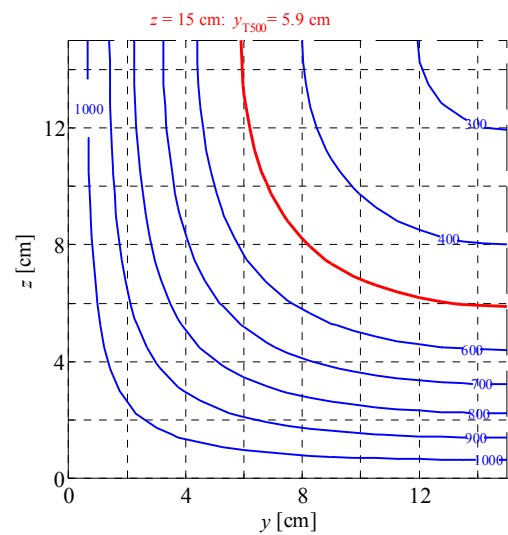
**(c) R 90**



**(d) R 120**

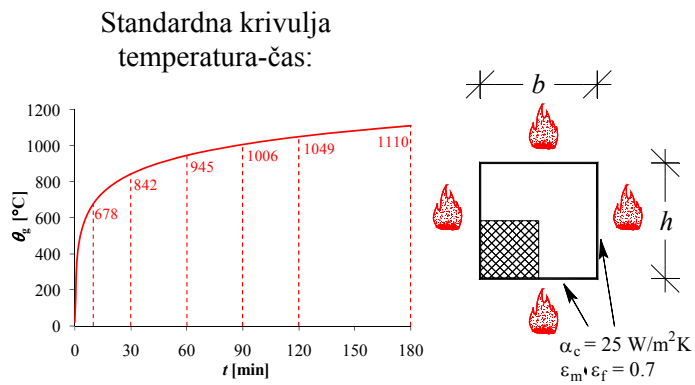


**(e) R 180**

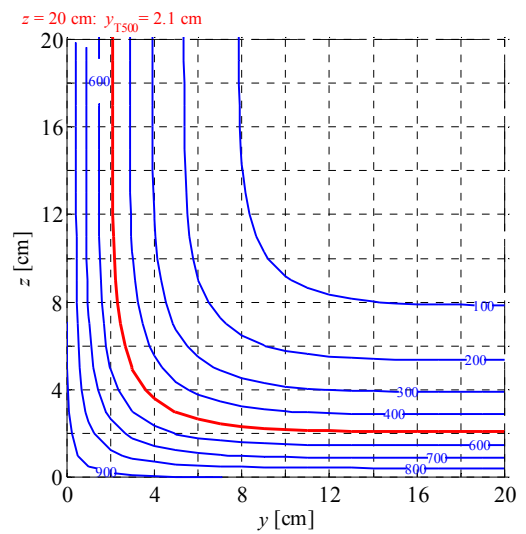


Slika 20: Temperaturni profili za kvadratni prečni prerez  $b/h = 30/30$  cm

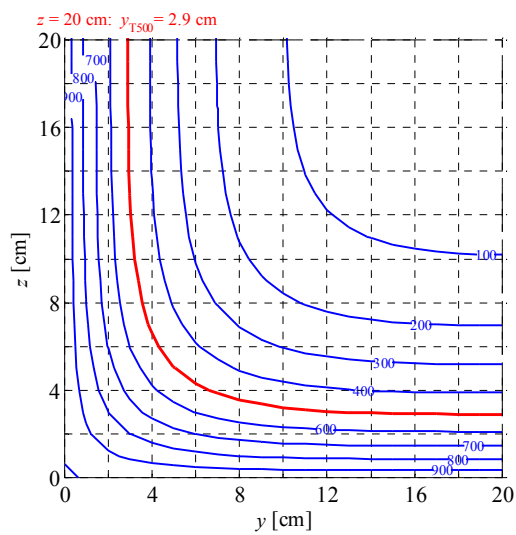
**B.2.5 Kvadratni prečni prerez  $b = 40$  cm:**



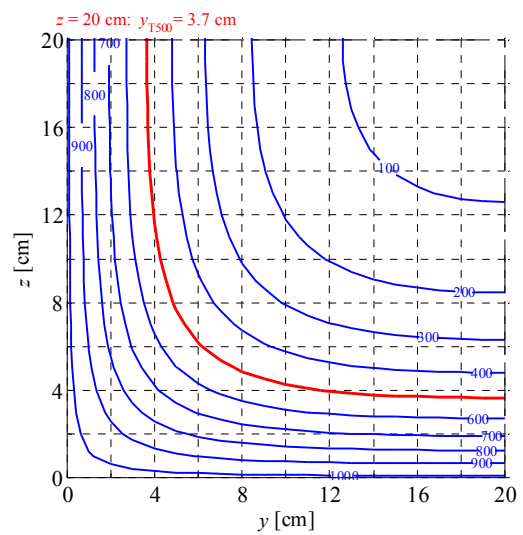
**(a) R 60**



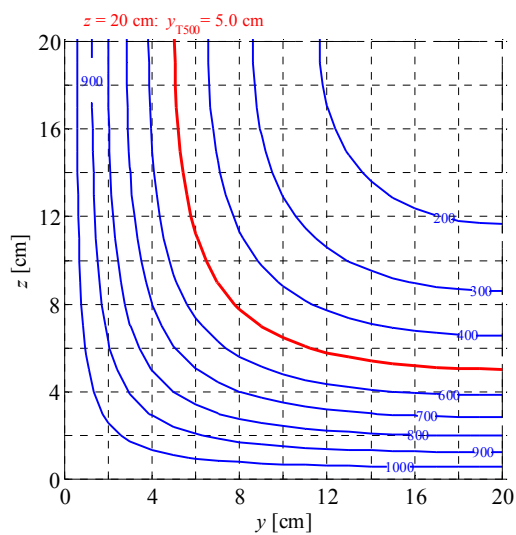
**(b) R 90**



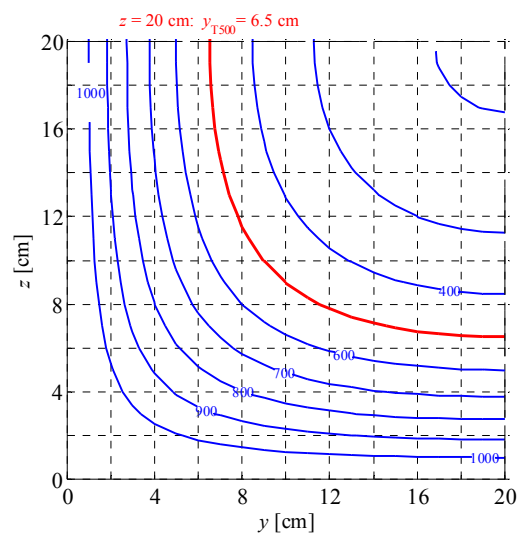
**(c) R 120**



**(d) R 180**

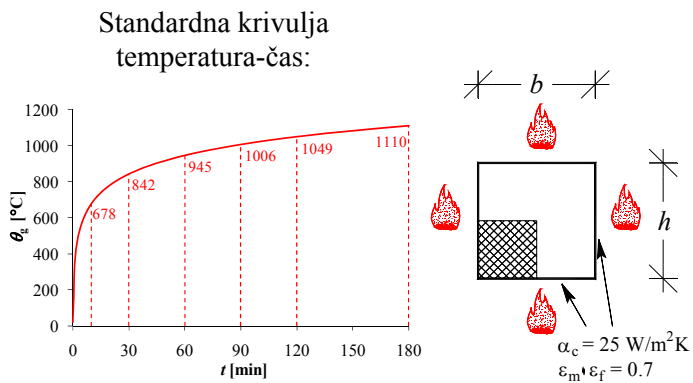


**(e) R 240**

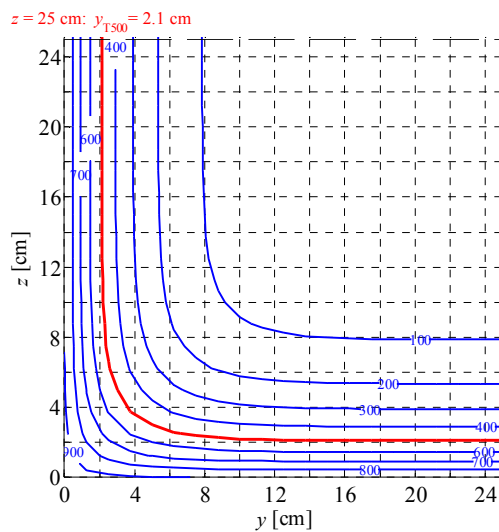


Slika 21: Temperaturni profili za kvadratni prečni prerez  $b/h = 40/40$  cm

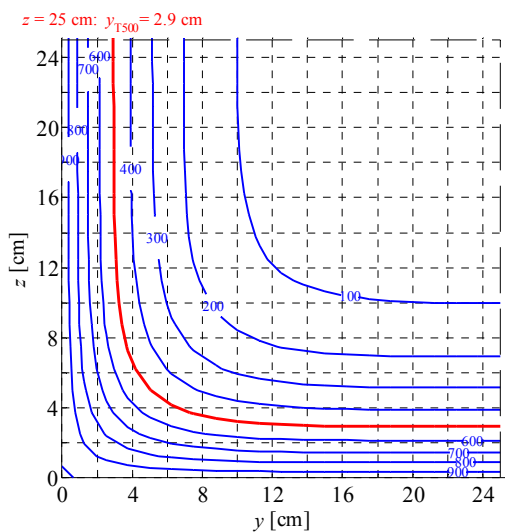
**B.2.6 Kvadratni prečni prerez  $b = 50$  cm:**



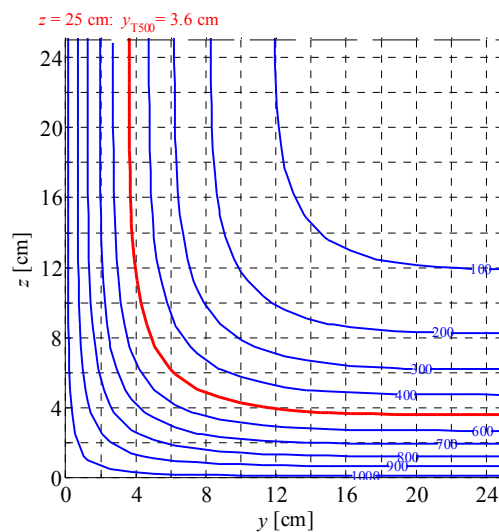
**(a) R 60**



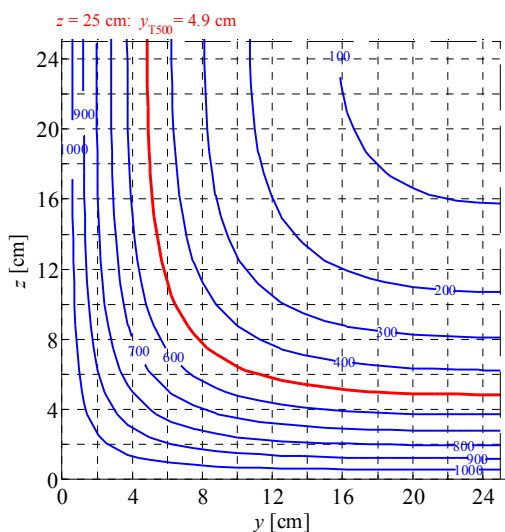
**(b) R 90**



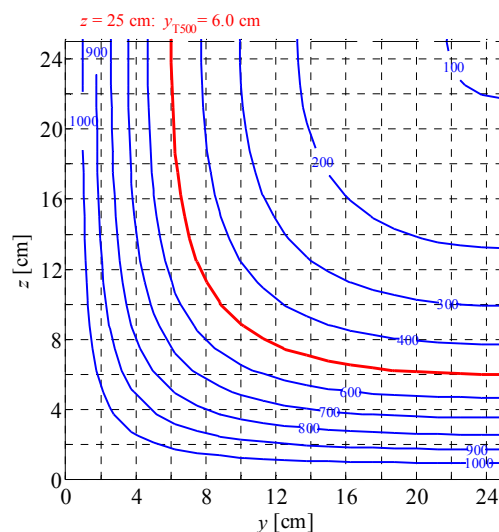
**(c) R 120**



**(d) R 180**

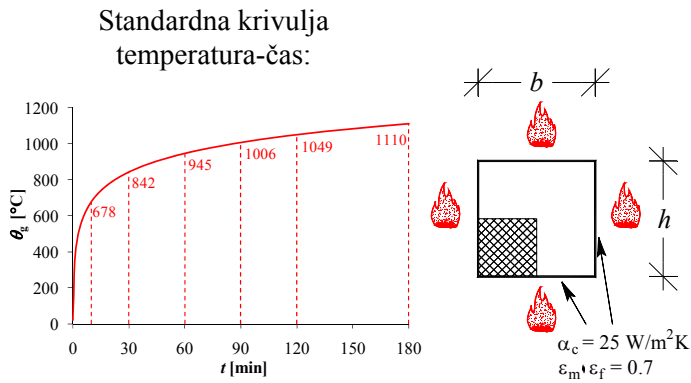


**(e) R 240**

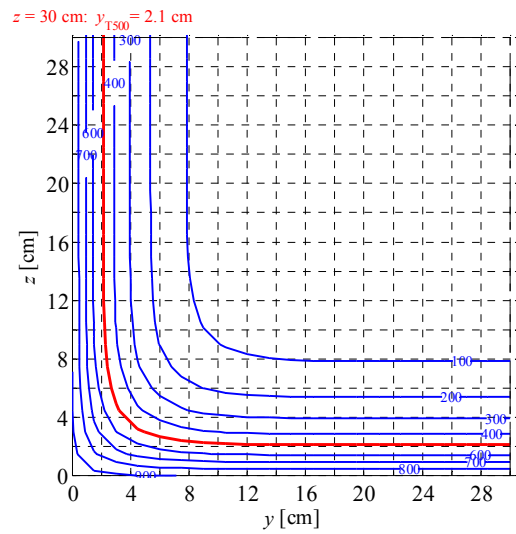


Slika 22: Temperaturni profili za kvadratni prečni prerez  $b/h = 50/50$  cm

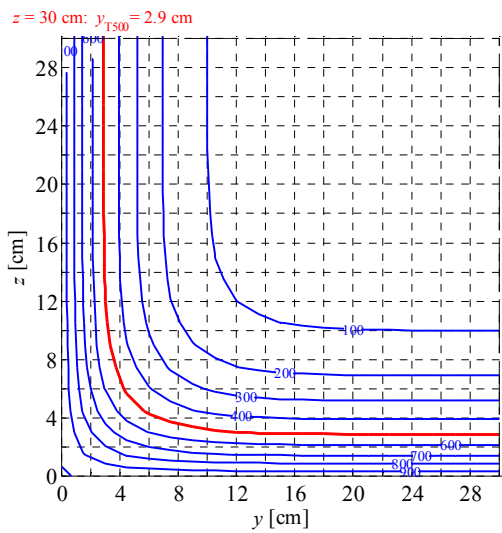
**B.2.7 Kvadratni prečni prerez  $b = 60$  cm:**



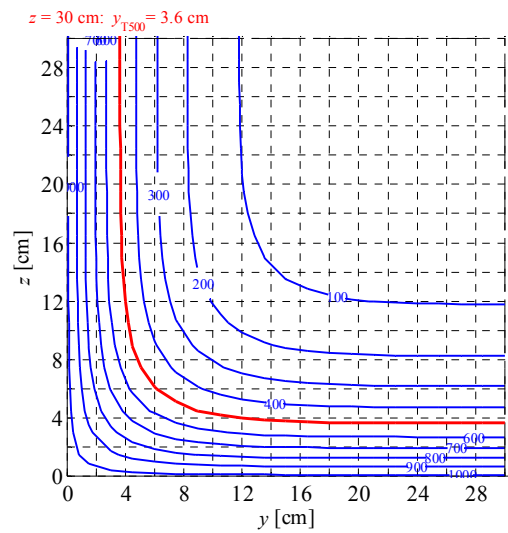
**(a) R 60**



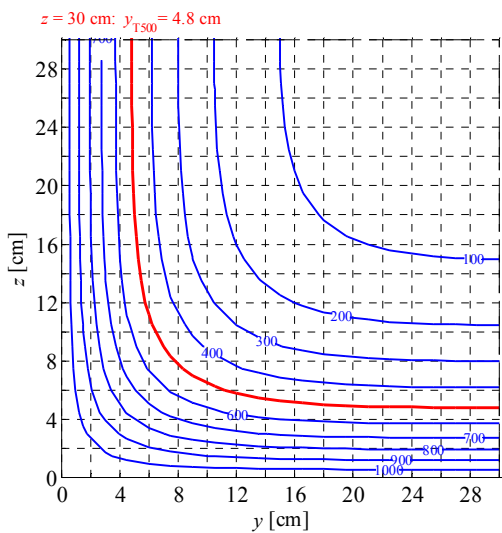
**(b) R 90**



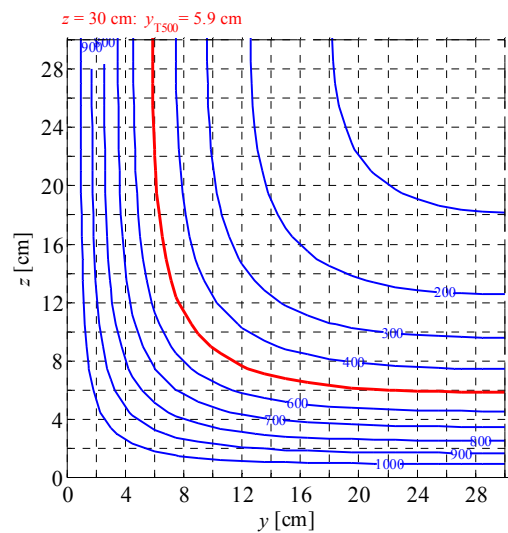
**(c) R 120**



**(d) R 180**



**(e) R 240**



Slika 23: Temperaturni profili za kvadratni prečni prerez  $b/h = 60/60$  cm

### **B.3 Ogljikovodikova krivulja temperatura-čas, prerez izpostavljen s treh strani**

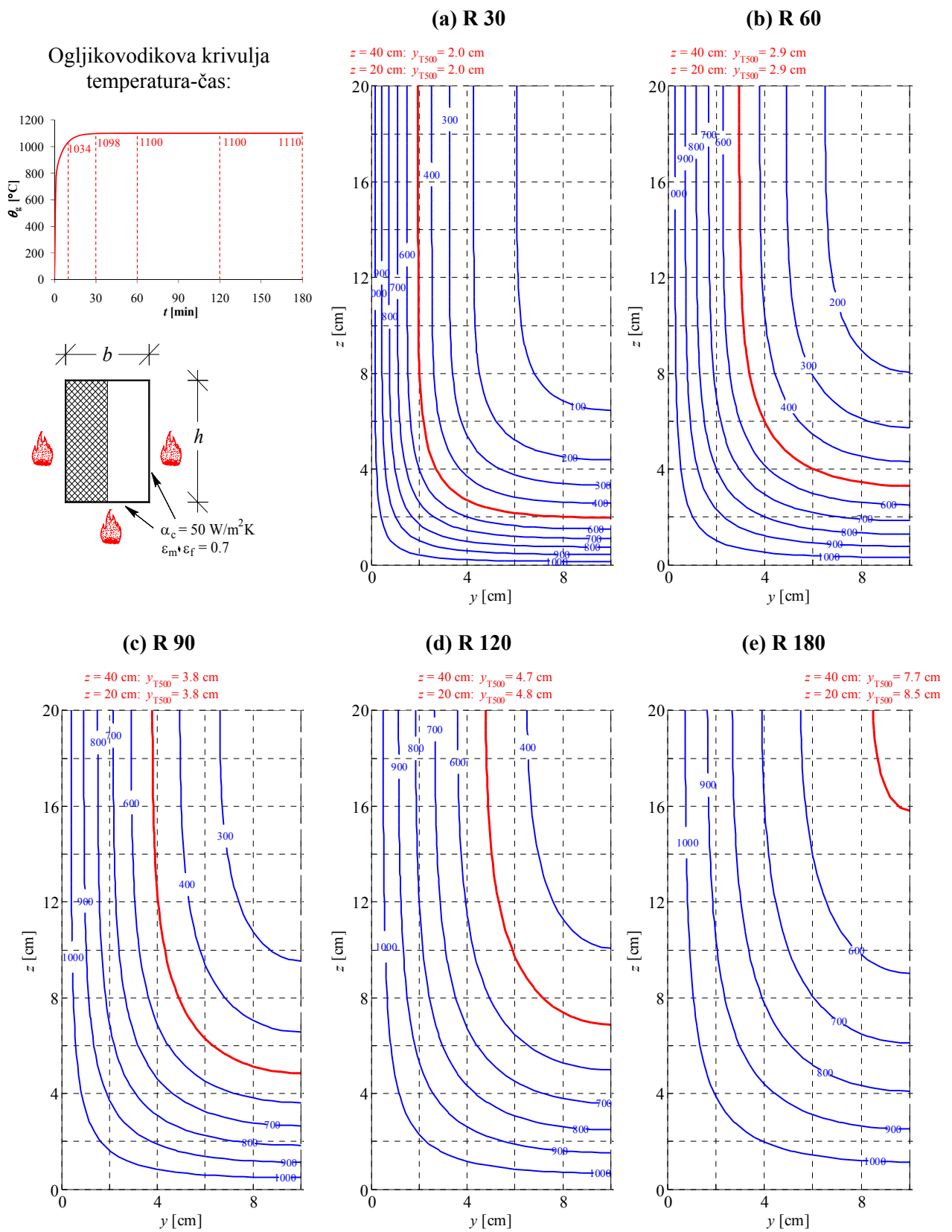
Temperaturni profili veljajo za armiranobetonske elemente s pravokotnimi prečnimi prerezi, ki so požaru (t.j. ogljikovodikovi krivulji temperatura-čas) izpostavljeni s treh strani. To pomeni, da je zgornja stran nosilca izolirana s ploščami ali drugimi elementi, ki funkcijo izolativnosti ohranijo v celotnem času zahtevane požarne odpornosti. Pri nosilcih s spremenljivo širino se širina  $b$  nanaša na težišče natezne armature.

Temperaturni profili temeljijo na naslednjih vrednostih:

- specifično toploto betona upoštevamo skladno s sliko 2 za vsebnost vlage 1.5 % teže betona,
- gostoto betona upoštevamo skladno s sliko 3,
- upoštevamo spodnjo mejo toplotne prevodnosti betona tako kot prikazujemo na sliki 4,
- na izpostavljenih stranicah prečnega prereza upoštevamo prestopni koeficient  $\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$  in emisivnost površine  $\varepsilon_m = 0.7$ .

Zaradi upoštevanja simetrije temperature profile prikazujemo le za polovico prečnega prereza.

**B.3.1 Pravokotni prečni prerez  $b = 20, h \geq 20$  cm:**

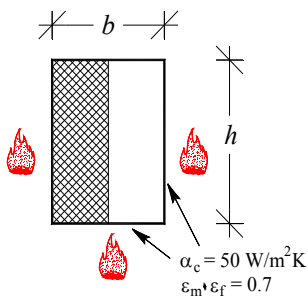
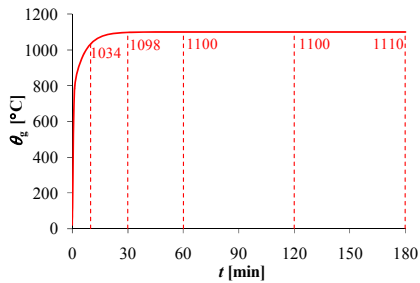


Slika 24: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez  $b/h = 20/\geq 20$  cm

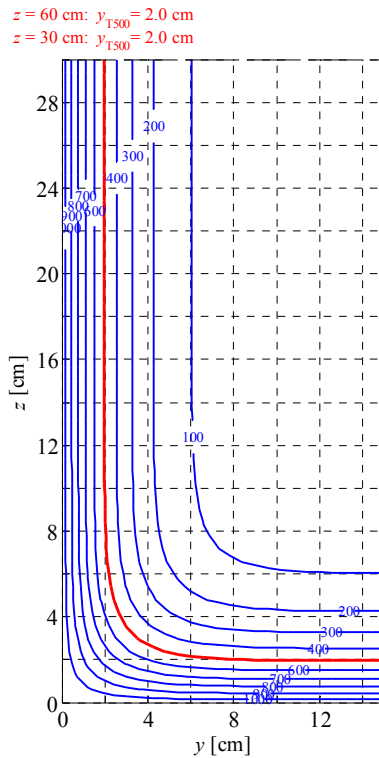


**B.3.2 Pravokotni prečni prerez  $b = 30, h \geq 30$  cm:**

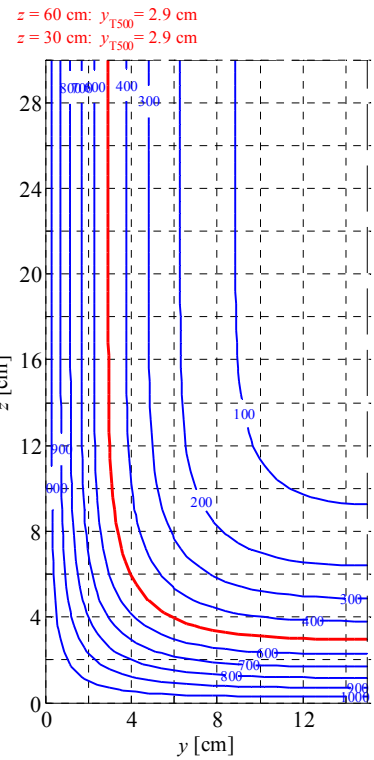
Ogljikovodikova krivulja temperatura-čas:



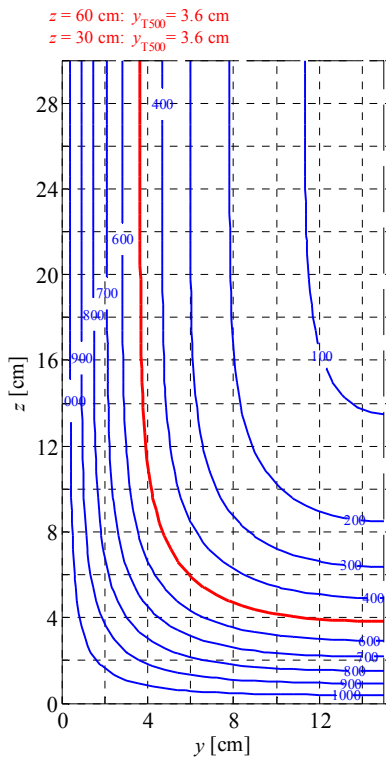
**(a) R 30**



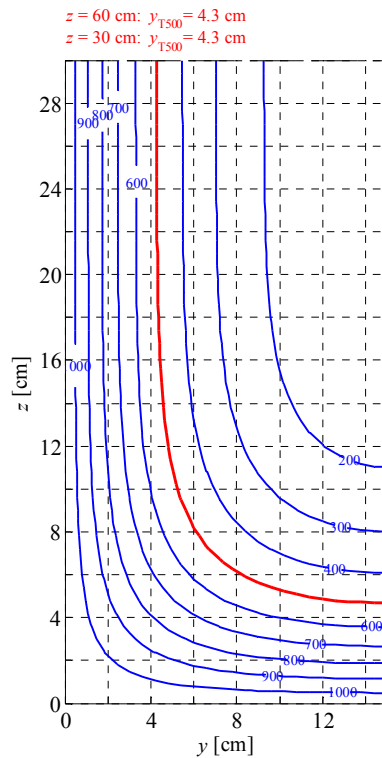
**(b) R 60**



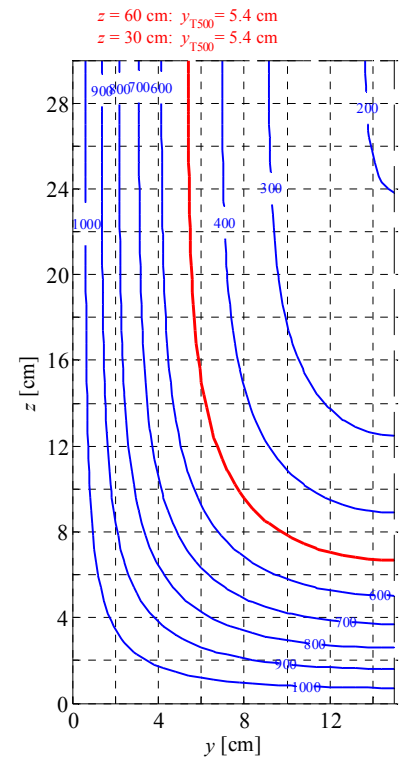
**(c) R 90**



**(d) R 120**



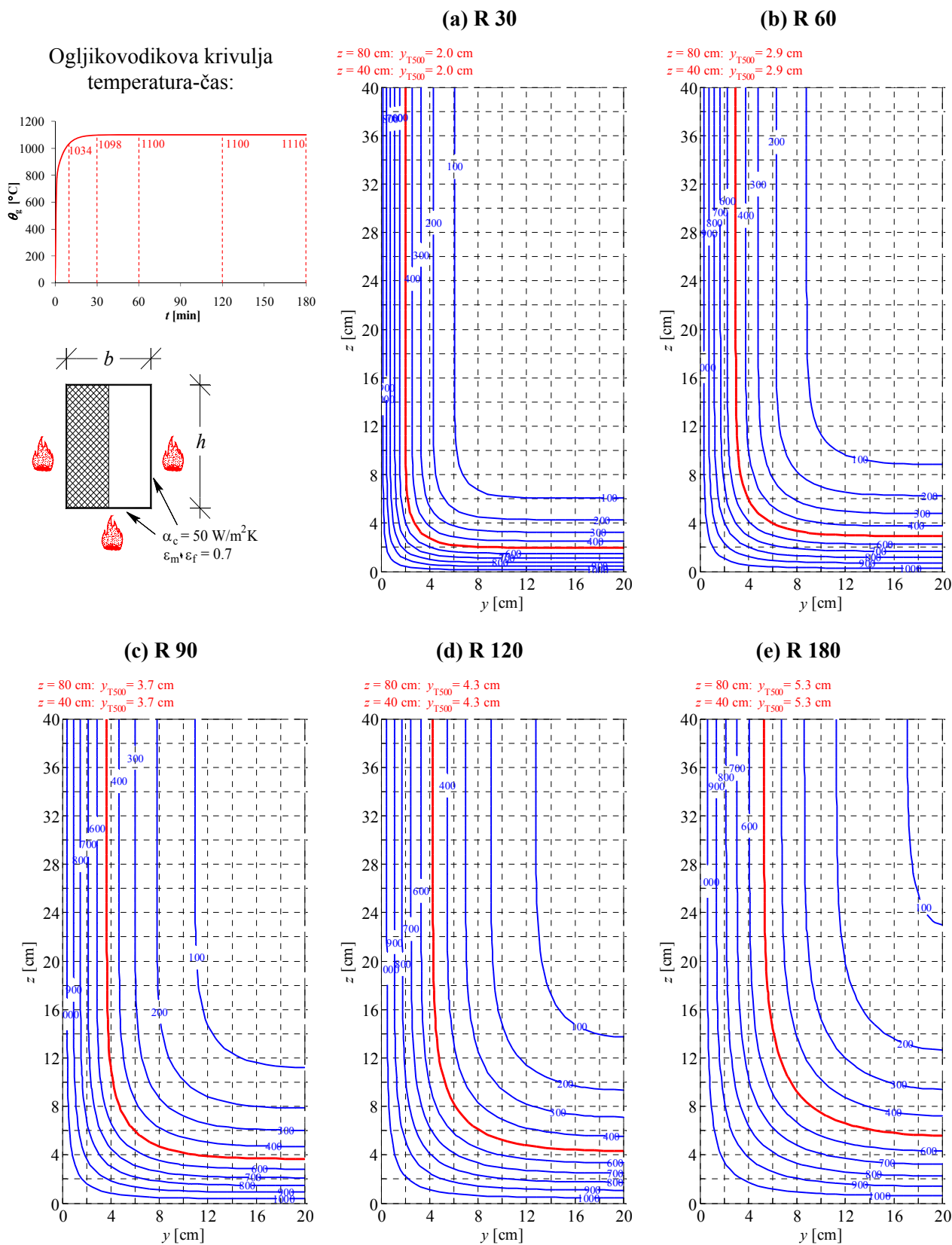
**(e) R 180**



Slika 25: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez  $b/h = 30/\geq 30$  cm



**B.3.3 Pravokotni prečni prerez  $b = 40, h \geq 40$  cm:**



Slika 26: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez  $b/h = 40/\geq 40$  cm



### C. DODATEK: REDUKCIJSKI FAKTORJI TRDNOSTI BETONA IN ARMATURE

V Dodatku C podajamo vrednosti redukcijskih faktorjev trdnosti materiala.

V preglednici 12 podajamo redukcijski faktor  $k_{c,T}$  za karakteristično tlačno trdnost betona  $f_{ck}$  iz apnenčevega agregata pri povišanih temperaturah v obliki preglednice.

Preglednica 12: Redukcijski faktor  $k_{c,T}$  za karakteristično tlačno trdnost betona iz apnenčevega agregata pri povišanih temperaturah

| beton iz apnenčevega agregata |      |       |       |       |       |       |       |       |       | $k_{c,T} = f_{c,T} / f_{ck}$ |
|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| $T$ [°C]                      | 0    | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90                           |
| 100                           | 1    | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.985 | 0.982 | 0.979 | 0.976 | 0.973                        |
| 200                           | 0.97 | 0.964 | 0.958 | 0.952 | 0.946 | 0.94  | 0.934 | 0.928 | 0.922 | 0.916                        |
| 300                           | 0.91 | 0.904 | 0.898 | 0.892 | 0.886 | 0.88  | 0.874 | 0.868 | 0.862 | 0.856                        |
| 400                           | 0.85 | 0.839 | 0.828 | 0.817 | 0.806 | 0.795 | 0.784 | 0.773 | 0.762 | 0.751                        |
| 500                           | 0.74 | 0.726 | 0.712 | 0.698 | 0.684 | 0.670 | 0.656 | 0.642 | 0.628 | 0.614                        |
| 600                           | 0.6  | 0.583 | 0.566 | 0.549 | 0.532 | 0.515 | 0.498 | 0.481 | 0.464 | 0.447                        |
| 700                           | 0.43 | 0.414 | 0.398 | 0.382 | 0.366 | 0.35  | 0.334 | 0.318 | 0.302 | 0.286                        |
| 800                           | 0.27 | 0.258 | 0.246 | 0.234 | 0.222 | 0.21  | 0.198 | 0.186 | 0.174 | 0.162                        |
| 900                           | 0.15 | 0.141 | 0.132 | 0.123 | 0.114 | 0.105 | 0.096 | 0.087 | 0.078 | 0.069                        |
| 1000                          | 0.06 | 0.056 | 0.052 | 0.048 | 0.044 | 0.04  | 0.036 | 0.032 | 0.028 | 0.024                        |
| 1100                          | 0.02 | 0.018 | 0.016 | 0.014 | 0.012 | 0.01  | 0.008 | 0.006 | 0.004 | 0.002                        |

V preglednici 13 podajamo redukcijski faktor  $k_{s,T}$  za zmanjšanje karakteristične trdnosti natezne armature (hladno obdelano jeklo za armiranje) pri deformacijah večjih od 20 ‰.

Preglednica 13: Koeficient  $k_{s,T}$  za natezno armaturo (hladno obdelano)

| natezna armatura (hladno obdelana) pri deformacijah $\varepsilon_{s,T} \geq 20$ ‰ |      |       |       |       |       |       |       |       |       | $k_{s,T} = f_{s,T} / f_{yk}$ |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| $T$ [°C]  | 0    | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90                           |
| 100   | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1                            |
| 200   | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1                            |
| 300   | 1    | 0.994 | 0.988 | 0.982 | 0.976 | 0.97  | 0.964 | 0.958 | 0.952 | 0.946                        |
| 400   | 0.94 | 0.913 | 0.886 | 0.859 | 0.832 | 0.805 | 0.778 | 0.751 | 0.724 | 0.697                        |
| 500   | 0.67 | 0.643 | 0.616 | 0.589 | 0.562 | 0.535 | 0.508 | 0.481 | 0.454 | 0.427                        |
| 600   | 0.4  | 0.372 | 0.344 | 0.316 | 0.288 | 0.26  | 0.232 | 0.204 | 0.176 | 0.148                        |
| 700   | 0.12 | 0.119 | 0.118 | 0.117 | 0.116 | 0.115 | 0.114 | 0.113 | 0.112 | 0.111                        |
| 800   | 0.11 | 0.107 | 0.104 | 0.101 | 0.098 | 0.095 | 0.092 | 0.089 | 0.086 | 0.083                        |
| 900   | 0.08 | 0.077 | 0.074 | 0.071 | 0.068 | 0.065 | 0.062 | 0.059 | 0.056 | 0.053                        |
| 1000  | 0.05 | 0.048 | 0.046 | 0.044 | 0.042 | 0.04  | 0.038 | 0.036 | 0.034 | 0.032                        |
| 1100  | 0.03 | 0.027 | 0.024 | 0.021 | 0.018 | 0.015 | 0.012 | 0.009 | 0.006 | 0.003                        |

V preglednici 14 podajamo še redukcijski faktor  $k_{s,T}$  za zmanjšanje karakteristične trdnosti tlačne armature in natezne armature (hladno obdelano jeklo za armiranje) pri deformacijah manjših od 20 ‰.

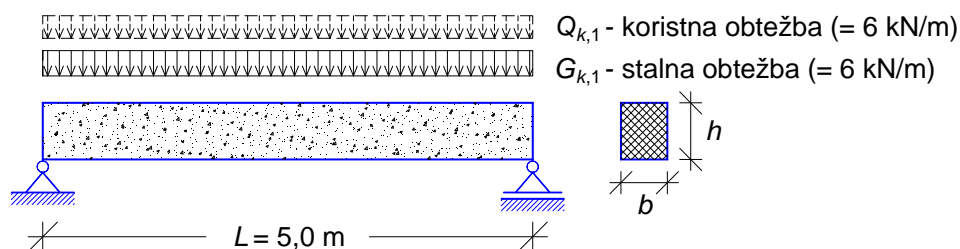
Preglednica 14: Koeficient  $k_{s,T}$  za tlačno armaturo (hladno obdelano)

| tlačna armatura in natezna armatura (obe hladno obdelani) pri deformacijah $\epsilon_{s,T} < 20 ‰$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       | $k_{s,T} = f_{sy,T} / f_{yk}$ |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|
| $T [^{\circ}\text{C}]$   | 0     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90                            |
| 100  | 1     | 0.99  | 0.98  | 0.97  | 0.96  | 0.95  | 0.94  | 0.93  | 0.92  | 0.91                          |
| 200  | 0.9   | 0.89  | 0.88  | 0.87  | 0.86  | 0.85  | 0.84  | 0.83  | 0.82  | 0.81                          |
| 300  | 0.8   | 0.79  | 0.78  | 0.77  | 0.76  | 0.75  | 0.74  | 0.73  | 0.72  | 0.71                          |
| 400  | 0.7   | 0.687 | 0.674 | 0.661 | 0.648 | 0.635 | 0.622 | 0.609 | 0.596 | 0.583                         |
| 500  | 0.57  | 0.547 | 0.523 | 0.500 | 0.476 | 0.453 | 0.429 | 0.406 | 0.382 | 0.359                         |
| 600  | 0.335 | 0.312 | 0.288 | 0.265 | 0.241 | 0.218 | 0.194 | 0.171 | 0.147 | 0.124                         |
| 700  | 0.1   | 0.098 | 0.096 | 0.094 | 0.092 | 0.09  | 0.088 | 0.086 | 0.084 | 0.082                         |
| 800  | 0.08  | 0.078 | 0.076 | 0.074 | 0.072 | 0.07  | 0.068 | 0.066 | 0.064 | 0.062                         |
| 900  | 0.06  | 0.058 | 0.056 | 0.054 | 0.052 | 0.05  | 0.048 | 0.046 | 0.044 | 0.042                         |
| 1000   | 0.04  | 0.038 | 0.036 | 0.034 | 0.032 | 0.03  | 0.028 | 0.026 | 0.024 | 0.022                         |
| 1100   | 0.02  | 0.018 | 0.016 | 0.014 | 0.012 | 0.01  | 0.008 | 0.006 | 0.004 | 0.002                         |

## D. DODATEK: RAČUN POŽARNE ODPORNOSTI AB ELEMENTOV

### D.1 Primer AB prostoležečega nosilca

Obravnavamo prostoležeči nosilec z razponom  $L = 5$  m. Lego in velikost stalne in koristne obtežbe prikazujemo na sliki 27. Nosilec je pravokotnega prečnega prereza dimenzij  $b/h = 25/35$  cm. Spodaj je nosilec armiran s tremi armaturnimi palicami  $\varnothing 16$ , zgoraj pa z dvema palicama  $\varnothing 12$ . Lego armature prikazujemo na sliki 28.



Slika 27: Geometrijski podatki obravnavanega prostoležečega nosilca ter lega in velikost zunanje obtežbe

Reducirana širina prečnega prereza

$$b_{fi} = b - 2 \cdot y_{T500} = 25 - 2 \cdot 2.1 = 20.8 \text{ cm}$$

Statična višina prereza:

$$d_{fi} = d = h - a = 35 - 4 = 31 \text{ cm}$$

Nosilnost spodnje-natezne armature ( $T_{s,1} = T_{s,3} \approx 480^\circ\text{C}$ ,  $T_{s,2} \approx 300^\circ\text{C}$ ):

$$N_s = \sum_{i=1}^3 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^3 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = 2 \cdot 2.01 \cdot 0.724 \cdot \frac{50}{1.0} + 2.01 \cdot 1.0 \cdot \frac{50}{1.0} = 246.0 \text{ kN},$$

Nosilnost zgornje-tlačne armature ( $T_{s,1} = T_{s,2} \approx 300^\circ\text{C}$ )

$$N'_s = \sum_{j=1}^2 A'_{s,j} \cdot f_{sd,fi,j} = \sum_{j=1}^2 A'_{s,j} \cdot k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fi}} = 2 \cdot 1.13 \cdot 0.8 \cdot \frac{50}{1.0} = 90.4 \text{ kN}$$

Lego nevtralne osi v požarnem projektnejem stanju:

$$x = \frac{N_s - N'_s - N_{d,t,fi}}{0.8 b_{fi} f_{cd}} = \frac{246.0 - 90.4}{0.8 \cdot 20.8 \cdot 2.5} = 3.74 \text{ cm}$$

Rezultanta tlačnih napetosti v betonu:

$$N_c = 0.8 x b_{fi} f_{cd} = 0.8 \cdot 3.74 \cdot 20.8 \cdot 2.5 = 155.6 \text{ kN}$$

Upogibna nosilnost, ki temelji na učinkovitem prerezu:

$$\begin{aligned} M_{500} &= N_c \cdot (d_{fi} - 0,4x) + N'_s \cdot (d_{fi} - a') = \\ &= 155,6 \cdot (31 - 0,4 \cdot 3,74) + 90,4 \cdot (31 - 4) = 7031 = 70,3 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Projektno upogibno odpornost armiranobetonskega prečnega prereza nosilca v požarnem projektnejem stanju pa izračunamo z enačbo:

$$M_{d,t,fi} = M_{500} \cdot k_m = 70,3 \cdot 0,95 = 66,8 \text{ kNm},$$