



Po kreativni poti do praktičnega znanja  
**IMPLEMENTACIJA NAPREDNIH PROJEKTANTSКИH  
METOD V GRADBENO PODJETJE**

*- PRILOGE H KONČNEMU POROČILU -*

|                   |                                                                                                                                      |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pedagoški mentor: | doc. dr. Tomaž Hozjan                                                                                                                |
| Delovni mentor:   | dr. Matej Rozman                                                                                                                     |
| Avtorji:          | <i>Anka Jenko<br/>Urška Dolinar<br/>Jan Špiler<br/>David Božiček<br/>Dušan Fister<br/>Anže Egart<br/>Sabina Huč<br/>Marko Kravos</i> |

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo



Projekt delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Projekt se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, 1. razvojne prioritete »Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti« ter prednostne usmeritve 1.3. »Štipendijske sheme«, v okviru potrjene operacije »Po kreativni poti do praktičnega znanja



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za gradbeništvo*  
*in geodezijo*



REPUBLIKA SLOVENIJA  
MINISTRSTVO ZA IZOBRAŽEVANJE,  
ZNANOST IN ŠPORT



JAVNI SKLAD REPUBLIKE SLOVENIJE  
ZA RAZVOJ KADROV IN ŠTIPENDIJE



*Naložba v vašo prihodnost*  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski socialni sklad



***Javni razpis za sofinanciranje projektov Po kreativni poti do praktičnega znanja  
v okviru OP RČV 2007 – 2013 1. razvojne prioritete: Spodbujanje podjetništva in  
prilagodljivosti; prednostne usmeritve 1.3. Štipendijske sheme***

***Naslov projekta: Implementacija naprednih projektantskih metod v gradbeno  
podjetje***

***Trajanje projekta:  
17.3.2014 – 30.9.2014***

***Sodelujoči:***

*Delovni mentor:* dr. Matej Rozman

*Pedagoški mentor:* doc. dr. Tomaž Hozjan

*Študenti:*  
Anka Jenko  
Urška Dolinar  
Jan Špiler  
David Božiček  
Dušan Fister  
Anže Egart  
Sabina Huč  
Marko Kravos



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za gradbeništvo*  
*in geodezijo*



REPUBLIKA SLOVENIJA  
MINISTRSTVO ZA IZOBRAŽEVANJE,  
ZNANOST IN ŠPORT



JAVNI SKLAD REPUBLIKE SLOVENIJE  
ZA RAZVOJ KADROV IN ŠTIPENDIJE



*Naložba v vašo prihodnost*  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski socialni sklad

Ta stran je namenoma prazna.



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za gradbeništvo*  
*in geodezijo*



REPUBLIKA SLOVENIJA  
MINISTRSTVO ZA IZOBRAŽEVANJE,  
ZNANOST IN ŠPORT



JAVNI SKLAD REPUBLIKE SLOVENIJE  
ZA RAZVOJ KADROV IN ŠTIPENDIJE



*Naložba v vašo prihodnost*  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski socialni sklad

*Priloga B h končnemu poročilu:*

## ***Toplotna analiza betonskih in lesenih elementov***



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za gradbeništvo*  
*in geodezijo*



REPUBLIKA SLOVENIJA  
MINISTRSTVO ZA IZOBRAŽEVANJE,  
ZNANOST IN ŠPORT



JAVNI SKLAD REPUBLIKE SLOVENIJE  
ZA RAZVOJ KADROV IN ŠTIPENDIJE

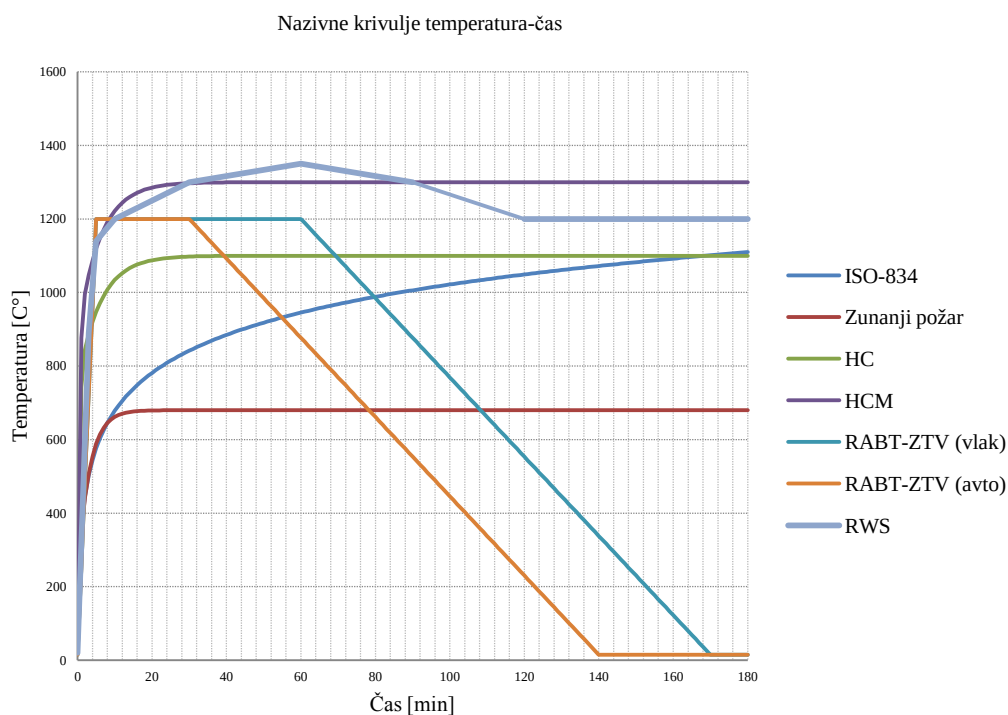


*Naložba v vašo prihodnost*  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski socialni sklad

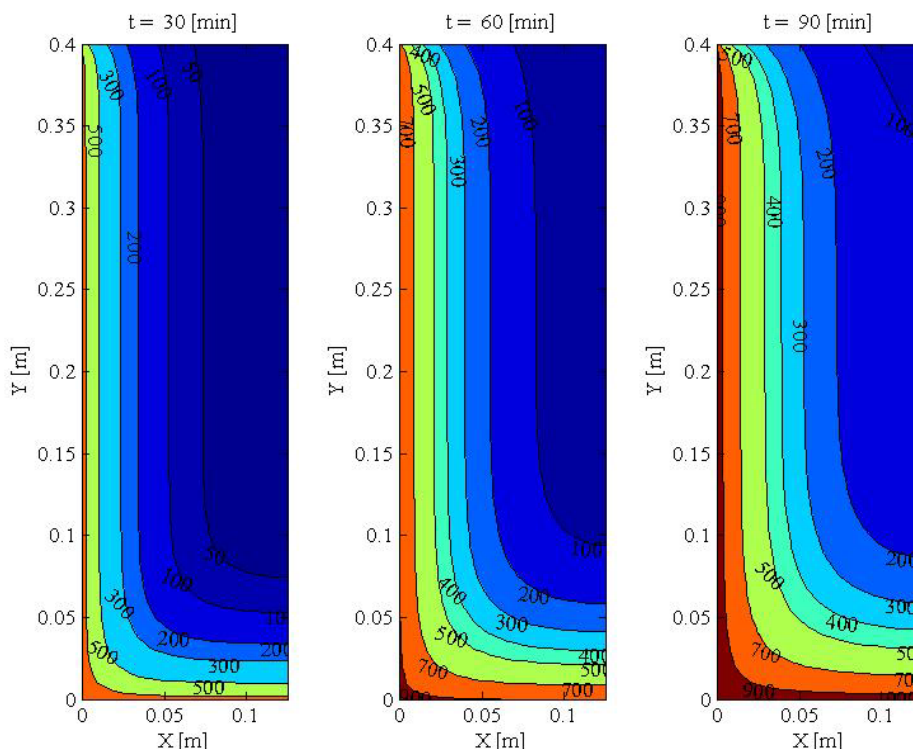
Ta stran je namenoma prazna.

## B.1 UVOD

Požar je stohastičen pojav, zato je ocena požarni scenarijev in kasneje modeliranje požara zahtevno in pri natančnejših matematičnih modelih kompleksno in časovno potratno. Na osnovi empirike imamo različne požarne modele, ki so primerni za uporabo v okviru njihovih predpostavk. Tako poznamo nazivne krivulje temperatura-čas (standardna krivulja temperatura-čas, HC, HCM...) in modele naravnih požarov, ki so parametrični (parametrične krivulje, enoconski modeli, dvoconski modeli...) in hidrodinamični modeli, ki temeljijo na zakonu o ohranitvi mase in energije. Za slednje modele potrebujemo poglobljeno znanje in čas za analizo. Na sliki B - 1 so prikazane požarne krivulje. Rezultate prvega dela analize, ki so lahko bolj ali manj natančni, uporabimo kot vhodni podatek za toplotno analizo. Toplotno analizo lahko delamo s pomočjo enačb, ki jih lahko rešimo peš (jekleni tankostenski profili) ali pa s pomočjo programov, ki temeljijo na metodi končnih elementov (MKE). Na sliki B - 2 je prikazan temperaturni profil, ki je rezultat temperaturne analize s pomočjo MKE. Po izdelavi temperaturnega profila je na vrsti mehanska analiza. Mehansko analizo lahko zopet izvedemo na poenostavljene načine (tabelirane vrednosti, enostavne metode) ali pa uporabimo natančnejši matematični model, pri katerem vključimo temperaturne deformacije. Vse tri korake požarne analize izvajamo ločeno, vendar so to povezani problemi.



Slika B - 1: Grafi nominalnih krivulj temperatura-čas (Egart, 2012).



Slika B - 2: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za  $t=30$  min,  $t=60$  min in  $t=90$  min pri požaru ISO-384 (Egart, 2012).

## B.2 TOPLOTNA ANALIZA

Pri toplotni analizi se ukvarjamo s prenosom toplote po trdni snovi. Vhodni podatki za to analizo so rezultati, ki jih dobimo s projektnim požarom. Toplota se po snovi lahko prenaša na tri različne načine: s konvekcijo, z radiacijo oz. sevanjem in s kondukcijo oz. prevajanjem. Prenos toplote po trdni snovi se opravi s pomočjo kondukcije, pri tem toplota potuje iz mesta z višjo temperaturo proti mestu z nižjo temperaturo. Pri sevanju toplota potuje s pomočjo elektromagnetnega valovanja pri konvekciji pa se gibljejo delci z različno temperaturo. Po konstrukciji se v primeru požara največ toplote prenese s pomočjo kondukcije, ki jo opišemo s pomočjo Fourierjeve parcialne diferencialne enačbe:

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

pri čemer je  $\theta$  [°C] temperatura posamezne točke,  $t$  [s] čas,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] gostota snovi,  $c$  [J/kg K] specifična toplota,  $\lambda_{ij}$  [W/m K] komponente prevodnostnega tenzorja,  $Q$  [W/m<sup>2</sup>] specifični prostorski toplotni tok.

Radiacijo in konvekcijo upoštevamo s pomočjo robnih pogojev, ki so:

$$S_T: \theta_S - \theta_M = 0,$$

$$S_q: \lambda_{ij} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x_i} n_i + h_s = 0,$$

$$V: \theta(x_i, 0) = \theta_0(x_i),$$

kjer je  $V$  prostor obravnavanega elementa,  $S_q$  mejna ploskev kjer je predpisan specifični toplotni pretok  $h_s$  [W/m<sup>2</sup>],  $\theta_r$  [°C] mejna ploskev kjer je spreminjanje temperature  $\theta_s$  [°C] predpisano s temperaturnim režimom,  $n_i$  komponente normale na ploskev,  $\theta_0$  [°C] pa začetna temperatura. Pri toplotnih vplivih na površino je potrebno upoštevati prenos toplote s konvekcijo in s sevanjem:

$$h_s = h_c + h_r,$$

pri čemer je  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>] toplotni tok zaradi konvekcije in je odvisen od temperature plinov  $\theta_g$  [°C] ter temperature površine elementa  $\theta_m$  [°C]. Definiran je z izrazom:

$$h_c = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m),$$

kjer je  $\alpha_c$  [W/m<sup>2</sup> K] prestopni koeficient. SIST EN 1991-1-2 podaja različne vrednosti glede na to, katero požarno krivuljo izberemo (tabela B - 1). Za požarno neobremenjene strani je  $\alpha_c=9$  W/m<sup>2</sup> K.

Toplotni tok zaradi radiacije  $h_r$  [W/m<sup>2</sup> K] je podan z enačbo:

$$h_r = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4],$$

kjer je  $\Phi$  oblikovni faktor, ki mora biti 1,0, če v referenčnih standardih za projektiranje (npr. SIST EN 1992) ni navedene drugačne vrednosti.  $\varepsilon_m$  je emisivnost površine in pri betonu znaša 0,7,  $\varepsilon_f$  pa emisivnost plamena,  $\theta_f$  [°C] je efektivna temperatura sevanja, Stefan-Boltzmannova konstanta pa je  $\sigma$  in znaša  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>].

Tabela B - 1: Vrednosti za prestopni koeficient  $\alpha_c$  [W/m<sup>2</sup> K], ki jih podaja SIST EN 1991-1-2.

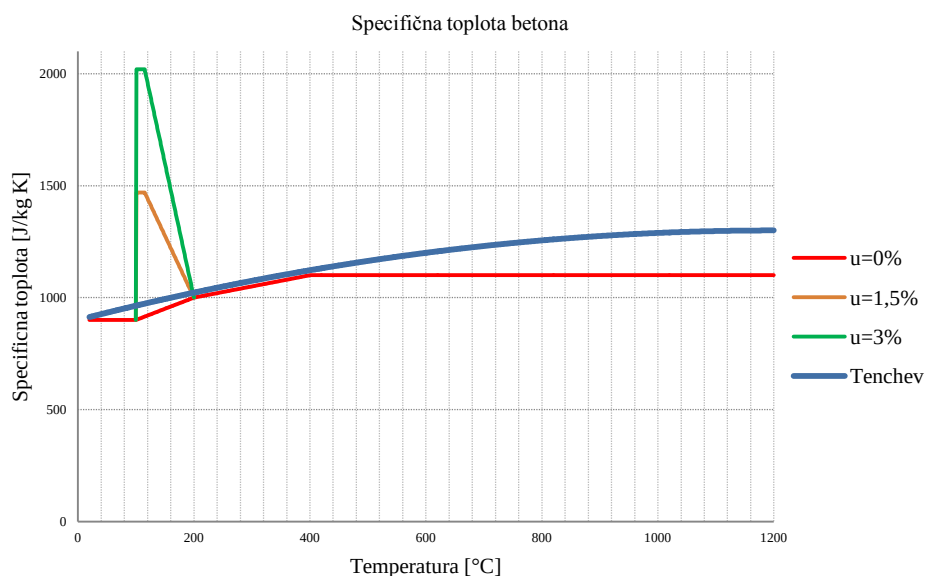
|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| Standardna krivulja temperatura-čas     | 25 |
| Požarna krivulja zunanjega požara       | 25 |
| Ogljikovodikov krivulja temperatura-čas | 50 |
| Parametrična krivulja temperatura-čas   | 35 |

Enačbe za prevajanje toplote in vode v porah so povezane in nelinearne. Zato jih rešujemo numerično s pomočjo MKE saj v splošnem niso rešljive analitično.

Program Heatko, ki ga uporabimo za toplotno analizo, upošteva temperaturno odvisne materialne parametre.

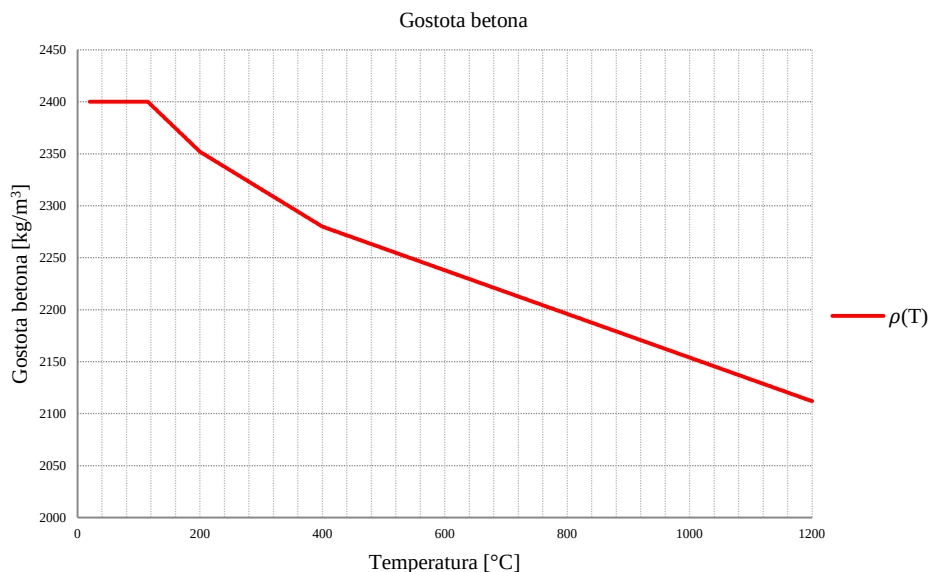
### B.3 TEMPERATURNO ODVISNI MATERIALNI PARAMETRI BETONA

V računu toplotne analize zanemarimo druge procese, ki se pojavijo v betonu pri povišanih temperaturah, saj so preveč kompleksni za vsakdanjo inženirsko uporabo. Izparevanje vode upoštevamo posredno s tem ko se specifična toplota med 100 °C in 200 °C poveča. Specifična toplota se z višanjem temperature povečuje, kar vidimo na sliki B - 3. Vlaga v betonu ima pozitiven učinek na prenos toplote v betonu vendar pri preveliki vlagi  $k$  [%] pride do eksplozivnega luščenja betona. Če je procent vlage  $k < 3$  % do tega problema ne pride (SIST EN 1992-1-2: 2005).



Slika B - 3: Graf specifične toplote v odvisnosti od temperature, ki ga podaja SIST EN 1992-1-2 in Tenchev s sodelavci (Egart, 2012).

Gostota betona se zaradi izparevanja vode z višanjem temperature zmanjšuje, kar je vidno na sliki B - 4.



Slika B - 4: Graf padanja gostote betona po SIST EN 1992-1-2 (Egart, 2012).

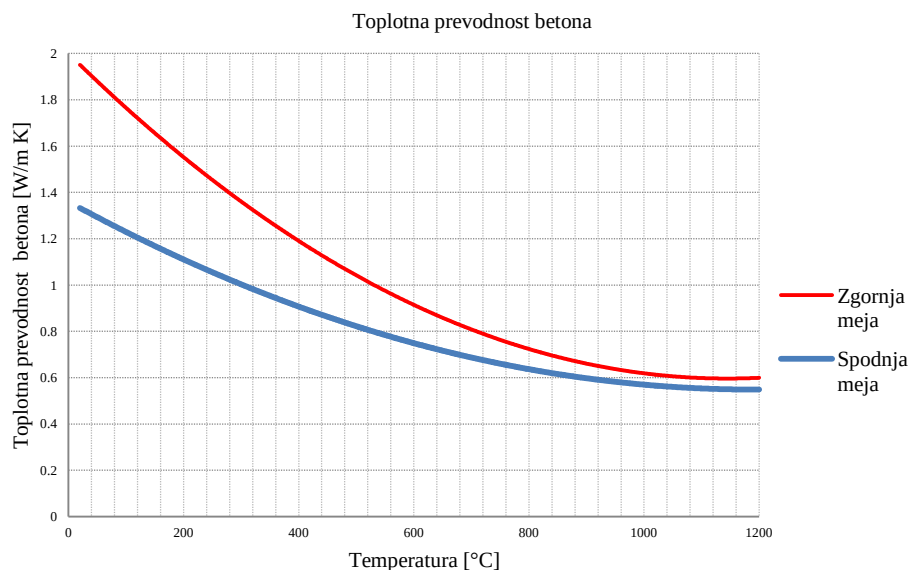
Toplotna prevodnost betona  $\lambda_c$  [W/m K] se z večanjem temperature  $\Theta$  [°C] zmanjšuje. V SIST EN 1992-1-2 sta podani dve meji, ki opisujeta zmanjševanje toplotne prevodnosti. Zgornja meja je podana z enačbo:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot \left(\frac{\Theta}{100}\right) + 0,0107 \cdot \left(\frac{\Theta}{100}\right)^2,$$

spodnja meja pa z enačbo:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \cdot (\Theta/100) + 0,0057 \cdot (\Theta/100)^2.$$

Standard SIST EN 1992-1-2 navaja, da je za betonske elemente bolj realna spodnja meja. Obe meji sta prikazani na sliki B - 5.



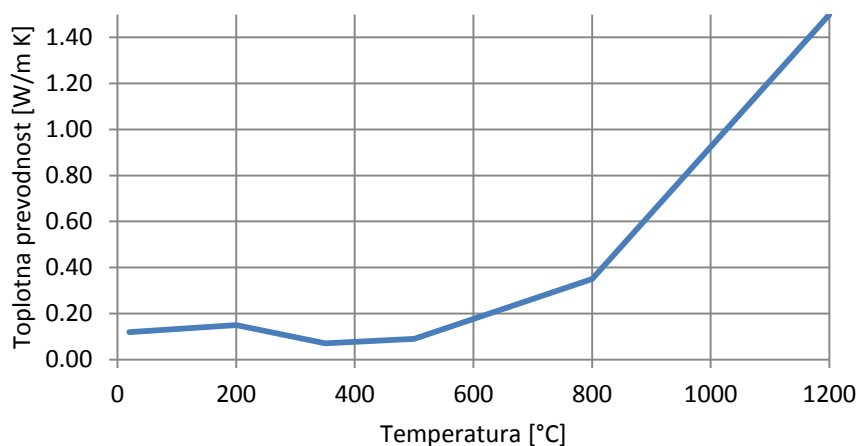
Slika B - 5: Graf zgornje in spodnje meje toplotne prevodnosti betona v odvisnosti od temperature (SIST EN 1992-1-2: 2005).

#### B.4 TEMPERATURNO ODVISNI MATERIALNI PARAMETRI LESA

Les je material, ki je podvržen pirolizi. Pri okoli 280 – 300 °C preide iz trdnega stanja v plin, ki gori. Okoli lesenega elementa se ustvari oglje, kateri ne prispeva k trdnosti elementa. V območju, kjer je temperatura manjša od temperature, ki je potrebna, da se trdna snov spremeni v plin in oglje, so trdnostni parametri nižji. Ostali del lesenega elementa pa ohrani celotno nosilnost. Čeprav les gori, pa zaradi slabega prevajanja toplote, jedro lesenega elementa dobro opravlja nosilno vlogo. Vлага v lesu pozitivno vpliva na prenos toplote, saj se za izparevanje vode porabi energija in se s tem upočasni ogrevanje lesa po prerezu. Toplotna prevodnost za les in zoglenelo plast je prikazana na grafu na sliki B - 6 za podatke iz tabele B - 2 (EN 1995-1-2: 2004).

Tabela B - 2: Toplotna prevodnost lesa in zoglenega sloja (EN 1995-1-2: 2004).

| Temperatura [°C] | Toplotna prevodnost [W/m K] |
|------------------|-----------------------------|
| 20               | 0.12                        |
| 200              | 0.15                        |
| 350              | 0.07                        |
| 500              | 0.09                        |
| 800              | 0.35                        |
| 1200             | 1.50                        |

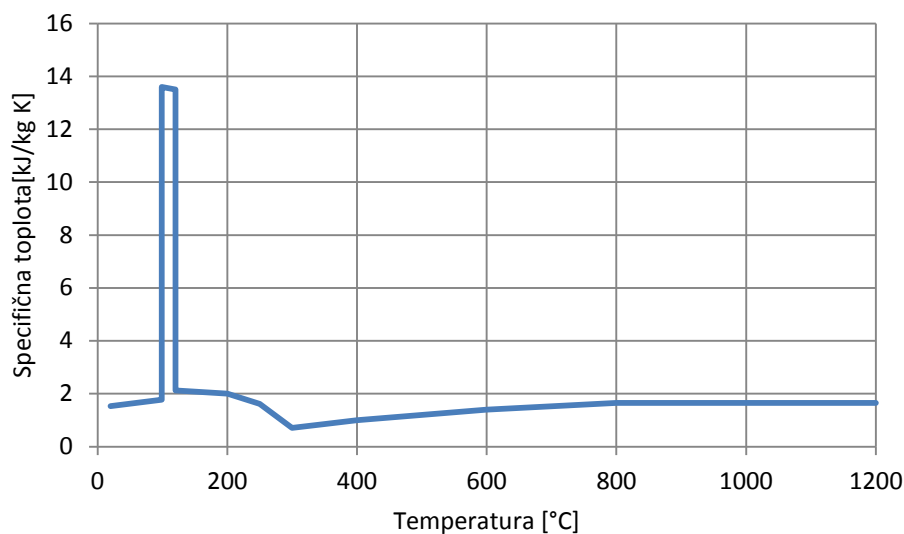


Slika B - 6: Graf toplotne prevodnosti (EN 1995-1-2: 2004).

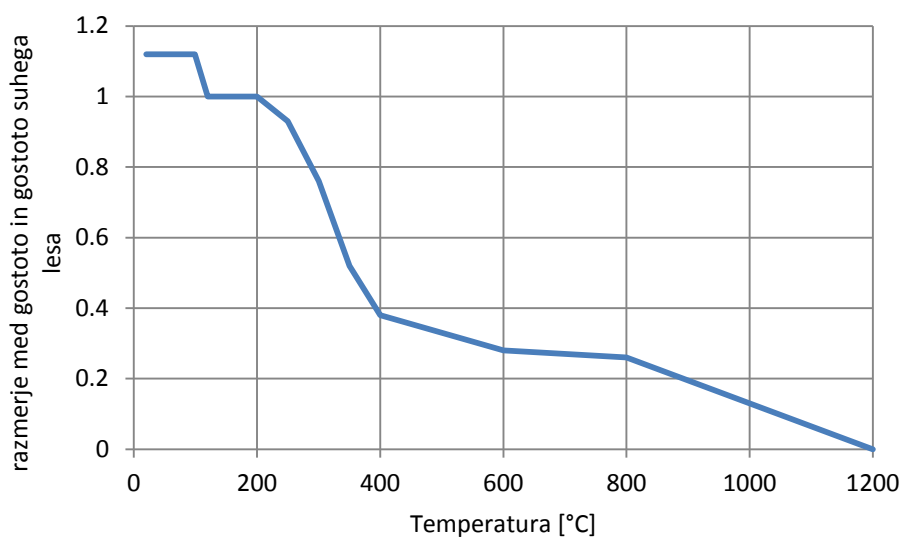
V območju med 99 °C in 120 °C specifična toplota močno naraste. S tem se zajame vpliv izparevanja vode, ki se nahaja v porah lesa. Gostoto lesa normiramo na gostoto suhe snovi. Preden se les ogreje na 100 °C je torej večja od 1 za procent vlažnosti, ko pa se les ogreje nad 100 °C pa voda izpari. Nadalje ko se les ogreva mu gostota pada. V tabeli B - 3 imamo tabelaričen prikaz gostote in specifične toplote, na sliki B - 7 pa imamo graf specifične toplote. Na sliki B - 8 je prikazan padec gostote lesa.

Tabela B - 3: Specifična toplota in razmerje med gostoto in gostoto suhega lesa (EN 1995-1-2: 2004).

| Temperatura [°C]        | Specifična toplota [kJ/kg K] | razmerje med gostoto in gostoto suhega lesa |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|
| 20                      | 1.53                         | 1+ω                                         |
| 99                      | 1.77                         | 1+ω                                         |
| 99                      | 13.6                         | 1+ω                                         |
| 120                     | 13.5                         | 1                                           |
| 120                     | 2.12                         | 1                                           |
| 200                     | 2                            | 1                                           |
| 250                     | 1.62                         | 0.93                                        |
| 300                     | 0.71                         | 0.76                                        |
| 350                     | 0.85                         | 0.52                                        |
| 400                     | 1                            | 0.38                                        |
| 600                     | 1.4                          | 0.28                                        |
| 800                     | 1.65                         | 0.26                                        |
| 1200                    | 1.65                         | 0                                           |
| ω je delež vlage v lesu |                              |                                             |



Slika B - 7: Graf specifične toplote (EN 1995-1-2: 2004).

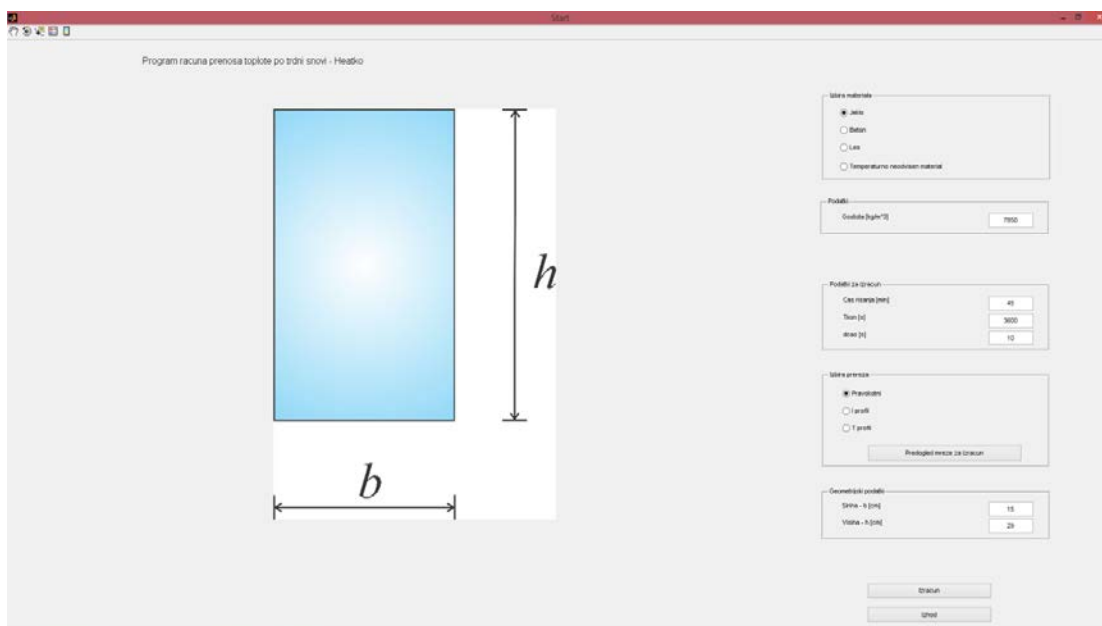


Slika B - 8: Graf med gostoto in gostoto suhega lesa (EN 1995-1-2: 2004).

## B.5 UPORABA GRAFIČNEGA VMESNIKA ZA PROGRAM HEATKO ZA IZRAČUN TEMPERATURNIH PROFILOV

Sledeče poglavje zajema opis delovanja grafičnega vmesnika prenosa toplote po trdni snovi.

Vmesnik se zažene z vpisom "Start" v MATLAB-ovo orodno vrstico. Prikaže se sledeča slika:



Slika B - 9: Pogovorno okno s pomočjo katerega uporabnik podaja parametre in pregleduje rezultate.

Ozadje vmesnika predstavlja glavni program, imenovan Heatko. Ta je z vmesnikom povezan preko MATLAB-ovega programskega orodja MATLAB GUI (angl. Graphical User Interface), ki omogoča hitro in preprosto gradnjo grafičnih vmesnikov. Komunikacijo med glavnim programom ter grafičnim vmesnikom predstavlja t.i. *function handle*. "Handle" omogoča nemoten klic funkcije, ne glede na njeno mesto.

Glavni program v aplikaciji je namenjen za račun prenosa toplote po trdni snovi. Ta za svoje delovanje potrebuje več pomožnih datotek, ki so nameščene v isti mapi. Sprva program prebere vhodne podatke, ki so razdeljeni v pet sklopov. Branje vhodnih podatkov omogoča funkcija *get*, ki prebira morebiti številsko vrednost ali niz znakov. Podobno funkcija *set* nastavlja želene parametre.

Prvi sklop omogoča izbiro materiala. Uporabnik lahko izbira med materiali jeklo, beton, les in temperaturno neodvisnim materialom. Vsem materialom so določene privzete vrednosti po standardu Evrokod, uporabnik lahko v drugem sklopu nekatere spreminja.

Materialoma jeklu in betonu lahko uporabnik poljubno nastavlja le vrednosti gostote. Ostale lastnosti, kot so specifična toplota, toplotna prevodnost in emisivnost so določene standardno. Za material les mora uporabnik podati tudi začetno vlago, medtem ko temperaturno neodvisnemu materialu poljubno določi tudi vrednosti specifične toplote in toplotne prevodnosti.

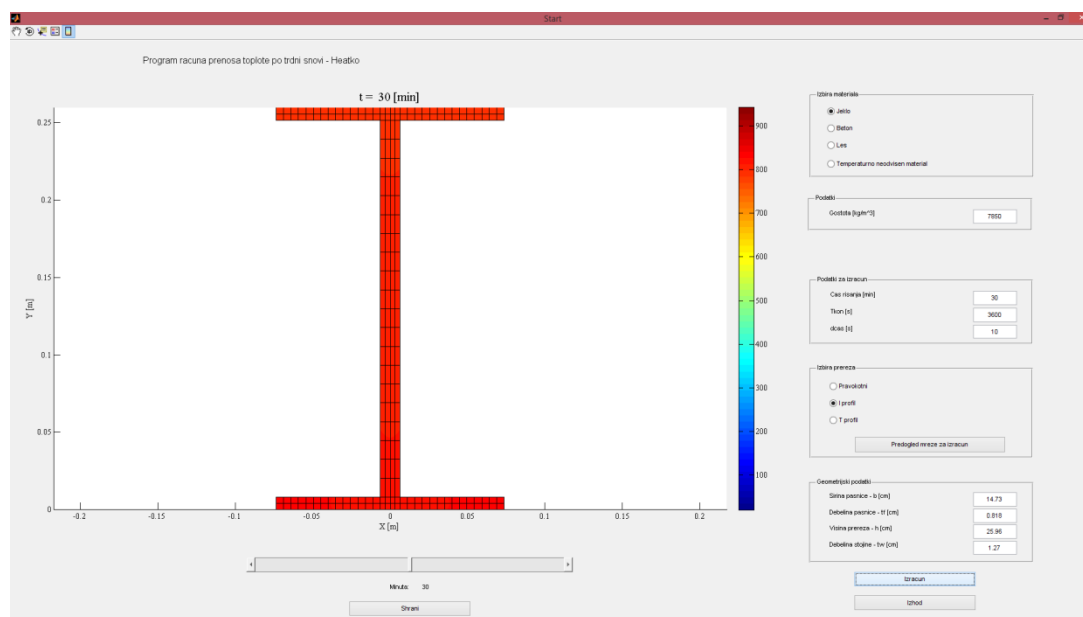
V sledečem, tretjem sklopu so podani časovni podatki za izračun. Prvi podatek, čas risanja določa časovni korak, ob katerem bo prikazan rezultat. Čas risanja je številčna vrednost med nič in podanim končnim časom risanja,  $T_{kon}$ . Ker je  $T_{kon}$  podan v sekundah, čas risanja pa v minutah, mora uporabnik vrednosti pretvoriti. Nepravilen čas risanja javi napako. Zadnji podatek,  $dcas$  oz. časovni prirastek, določa ločljivost izračunavanja. Časovni prirastek z vrednostjo deset pomeni, da bo program izračunal odziv za vsakih deset sekund.

V predzadnjem sklopu uporabnik izbira med različnimi načini risanja (prerezi), ki jih ponuja vmesnik. To so pravokotni prerez, I-profil in T-profil. Med izbiro različnih prerezov se menjavajo tudi posamezne slike, ki označujejo geometrijske podatke. V tem sklopu se nahaja tudi gumb za predogled mreže, ob pritisku nanj, se namesto slike prikaže generirana mreža z upoštevanimi geometrijskimi podatki. Za predogled se prikaže le polovica prereza.

V zadnjem sklopu uporabnik spreminja posamezne geometrijske podatke. Za pravokotni profil sta to širina in višina, ki ju uporabnik vnese v centimetrski enoti. Za I- in T-profil pa so geometrijski podatki širina in debelina pasnice, višina prereza ter debelina stojine.

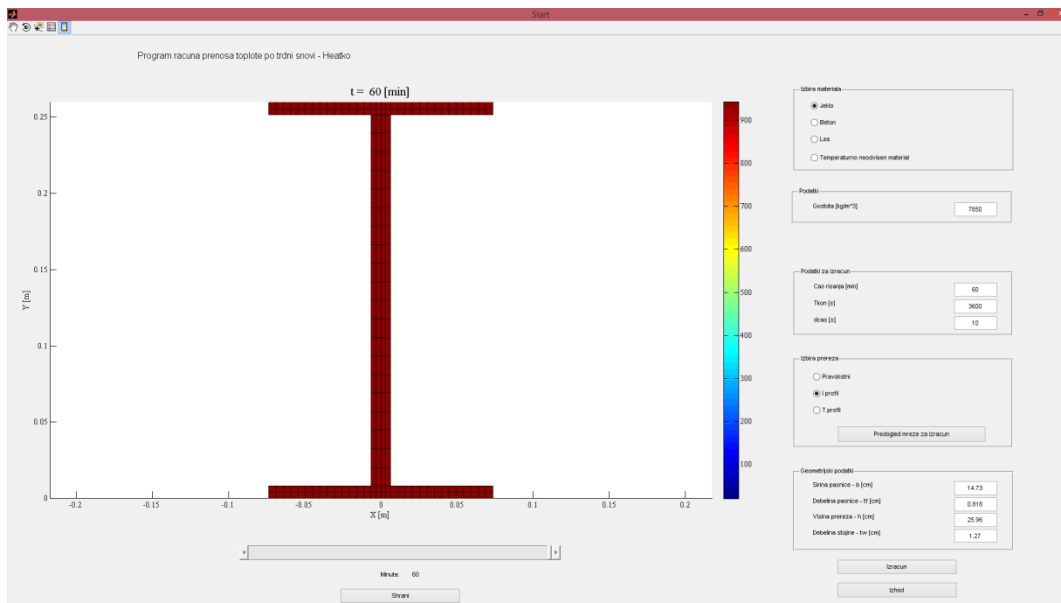
Po uspešno vnesenih podatkih se procesiranje prične s pritiskom na gumb "Potrdi". Potek lahko spremljamo v orodni vrstici MATLAB-a, kjer se izpisujejo delni rezultati ter časovni korak ali na pomožnem pogovornem oknu (angl. waitbar), ki se odpre po začetku. Procesiranje se konča po zaključenem zadnjem ciklu, ki je specificiran kot Tkon. Po končanem procesiranju se v zunanjo datoteko, imenovano "state.mat" shranijo vsi potrebni podatki za nadaljnjo obdelavo. Ta omogoča izris rezultatov po celotnem časovnem intervalu. Risanje je izvedeno z ukazom "risanje2D" ter "risanje2D\_I". Slednje je namenjeno za izris I-profilov.

Po končanem izračunu jeklenega I-profila pri tridesetih minutah se prikaže naslednji rezultat:



Slika B - 10: Rezultat izračuna toplotne analize (temperaturni profil).

Rezultat izračuna je predstavljen na risalnem polju. Temperaturo trdne snovi predstavlja priložena barvna lestvica. Pod risalno površino se nahaja tudi drsni element, ki brez nadaljnega izračunavanja omogoča pregled po celotnem časovnem definicijskem območju. Med nastavljanjem časovnega intervala se sproti izrisuje posamezni rezultat. Primer izrisa rezultata brez ponovnega izračunavanja prikazuje naslednja slika (pri šestdeseti minuti):

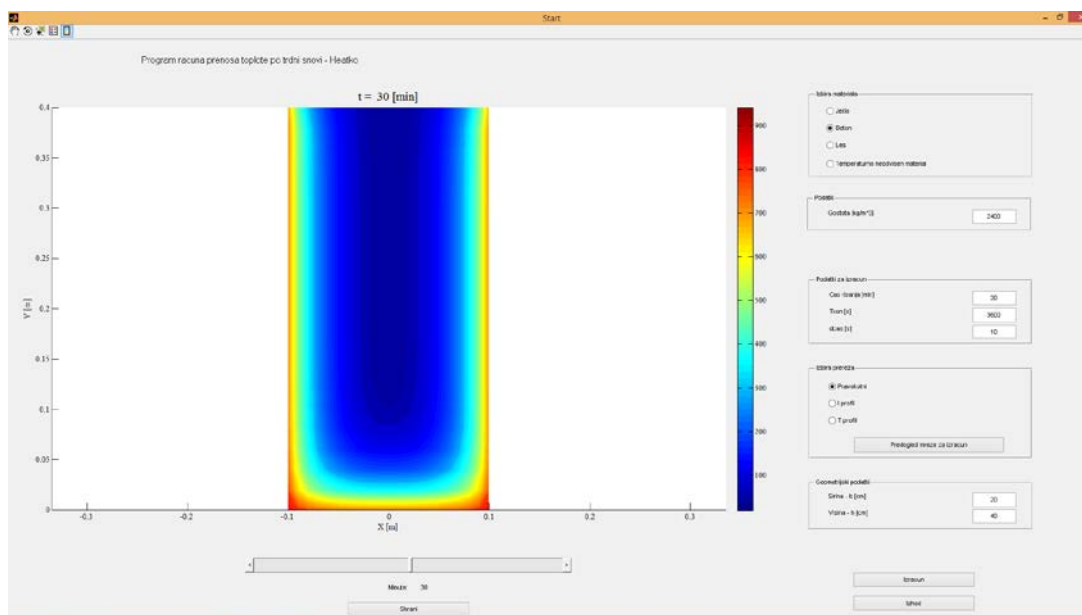


Slika B - 11: Izris temperaturnega profila brez ponovnega izračuna.

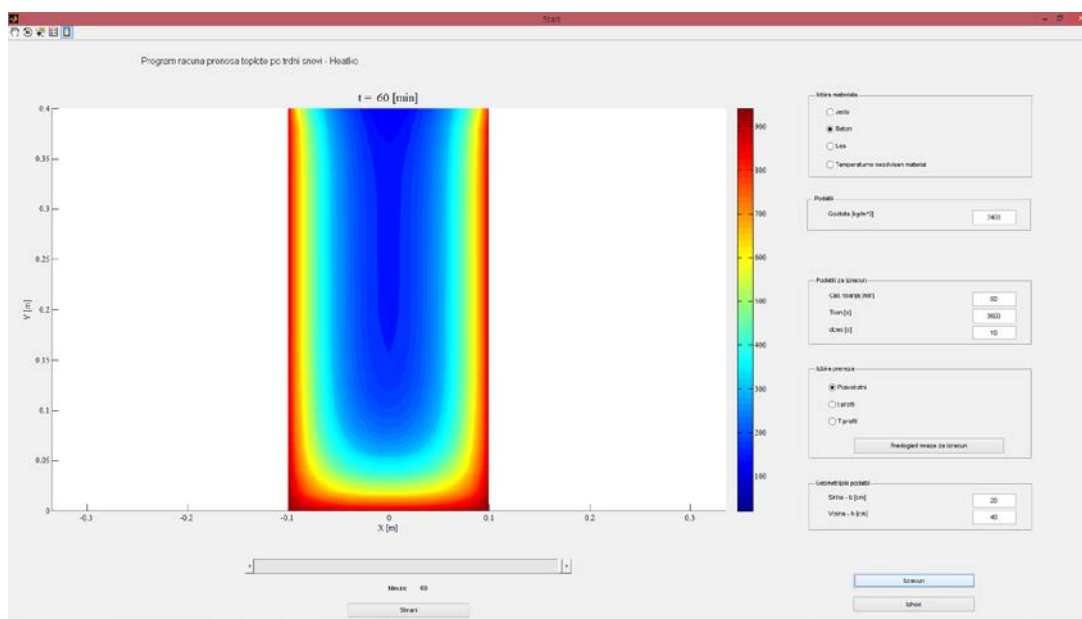
Iz slike je razvidno, da se s premikom drsnika spremeni tudi napis nad sliko, pod drsnikom ter čas risanja v rubriki vhodnih podatkov.

V orodni vrstici na vrhu je dodanih tudi pet gumbov, ki omogočajo premikanje in rotacijo risbe, podatkovni kurzor za branje ter gumb za vključitev legende in barvne lestvice.

V nadaljevanju je priložen tudi primer izračuna betonskega pravokotnega prereza širine dvajsetih centimetrov in višine štiridesetih centimetrov. Priložena sta dva rezultata, in sicer pri trideseti in šestdeseti minuti. Po zamenjavi materiala in novo izračunanih podatkih program izbriše uporabljeno risbo in jo nadomesti z novo. Prav tako prepíše stare vrednosti podatkov v datoteki "state.mat". Ob tem se pojavlja možnost trajnega shranjevanja rezultatov ter naknadni prikaz teh. Realizacijo omogoča gumb "Shrani", lociran na dnu. S pritiskom nanj se generira nova datoteka, ki shrani enake vrednosti, kot so zapisane v datoteki "state.mat". Ime datoteke predstavlja vrsta materiala, vrsta prereza ter aktualni datum in čas. Vse spremenljivke so med seboj ločene s pomišljajem. Čas zagotavlja, da se nova datoteka vedno shrani pod drugačno ime, npr. Beton-pravokotni-01-Sep-2014-20-00-00.mat. Omenjena datoteka je bila generirana prvega septembra letošnjega leta ob osmih. Rezultate pri trideseti in šestdeseti minuti prikazujeta naslednji sliki:



Slika B - 12: Temperaturni profil betonskega pravokotnega prereza pri času tridesetih minut.



Slika B - 13: Temperaturni profil betonskega pravokotnega prereza pri času šestdesetih minut.

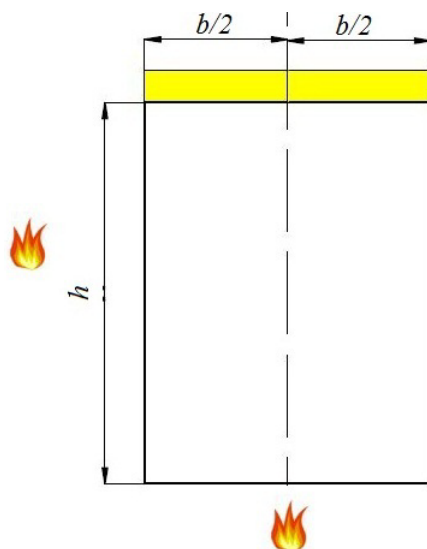
## B.6 VPLIV UPARJEVANJA NA POTEK RAZVOJA TEMPERATURE PO LESENEM ELEMENTU

Pri toplotni analizi nas je zanimal tudi vpliv, ki ga ima uparjevanje vode na segrevanje prereza. V ta namen smo izvedli dve simulaciji požara, v enem primeru smo vpliv uparjevanja na segrevanje prereza upoštevali v drugem primeru pa tega vpliva nismo upoštevali.

Analizo smo izvedli na lesenem nosilcu s prerezom  $h/b=24/18$  cm. Pri lesu smo uporabili materialne karakteristike, ki jih podaja standard SIST EN 1992-1-2. Za gostoto lesa pri sobni temperaturi smo privzeli vrednost  $420\text{kg/m}^3$ , za začetno relativno vlažnost pa 12%. Nosilec je

bil požaru izpostavljen s treh strani (levo, desno in spodaj), zgornji rob je bil izoliran. Vpliv uparjevanja smo v računu zajeli s povečanjem specifične toplote lesa na območju okoli temperature 100°C (slika B - 7). Za simuliranje požara smo uporabili standardno krivuljo iz standarda SIST EN 1992-1-2. Ker sta tako geometrija kot tudi obremenitev prereza osnosimetrični glede na vertikalno os skozi težišče smo modelirali le polovico prereza, pri tem smo na odrezanem robu upoštevali simetrijski robni pogoj, ki pravi, da toplotnega toka skozi ta rob ni – to je značilnost izoliranega roba (desni element na sliki B - 14)

Model brez upoštevanja osne simetrije

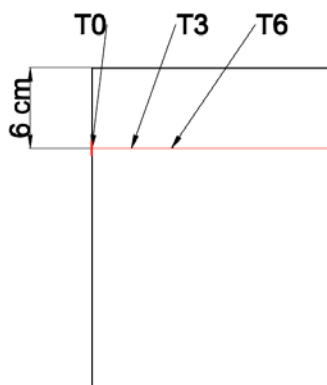


Model z upoštevanjem osne simetrije



Slika B - 14: Model obravnavanega elementa.

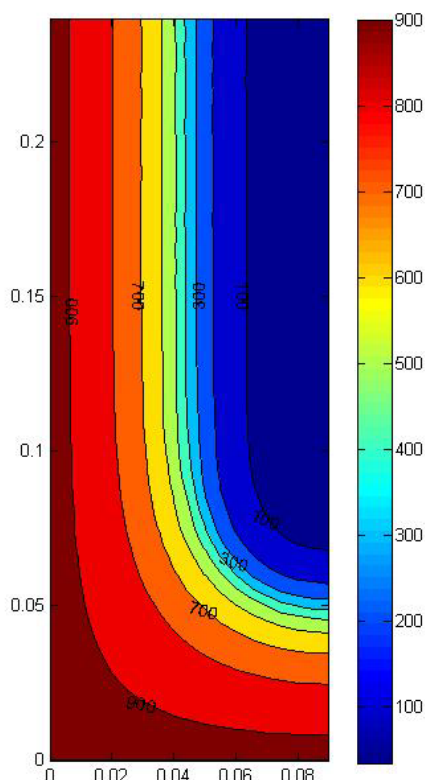
Pri primerjavi smo se osredotočili predvsem na hitrost napredovanja oglenenja po prerezu. Uporabili smo predpostavko iz standarda SIST EN 1992-1-2, ki pravi, da se za zoglenel, upošteva tisti del prereza kjer je temperatura presegla 300°C. Analizirali smo potek temperature po prerezu in časovni razvoj temperature v točkah T0, T3 in T6. Vse tri točke so na višini 6 cm pod zgornjim robom elementa, indeks za črko T pa nam pove kako globoko v prerezu se nahajajo, npr. točka T3 se nahaja 3 centimetre globoko (slika B - 15).



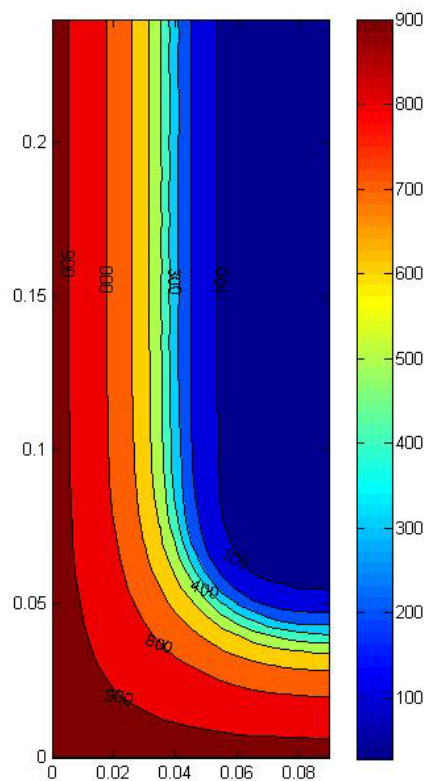
Slika B - 15: Položaj točk T0, T3 in T6.

Na sliki B - 16 je primerjava razporeda temperature po prerezu pri času  $t=60$  min, iz nje lahko ocenimo, da sta območji na katerih je temperatura že presegla  $800^{\circ}\text{C}$  v obeh primerih približno enako veliki. Do večjih razlik pride pri območjih, ki so ogreta na nekoliko nižjo temperaturo, tako je npr. območje kjer temperatura še ni presegla  $100^{\circ}\text{C}$  v primeru, ko smo v računu upoštevali vpliv uparjevanja veliko večje kot v primeru, ko tega nismo upoštevali.

Razpored temperature po prerezu če ne upoštevamo vpliva uparjevanja na segrevanje

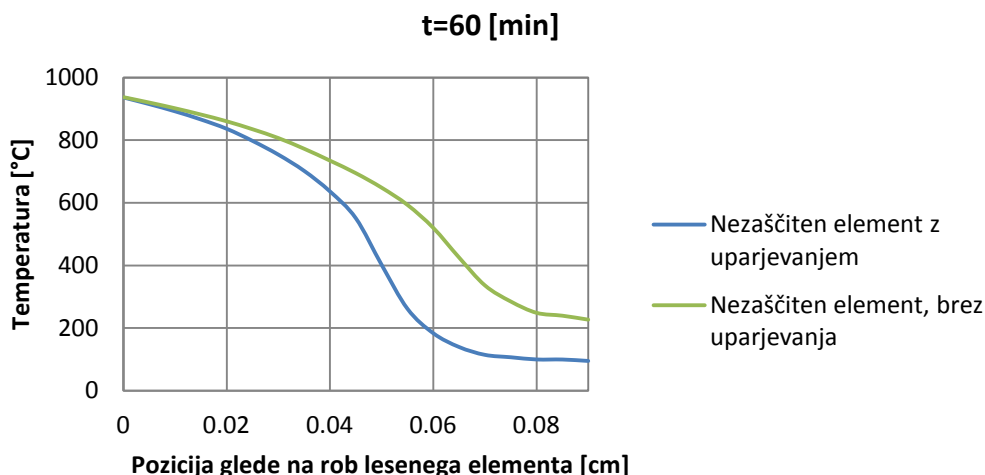


Razpored temperature po prerezu če upoštevamo vpliv uparjevanja na segrevanje

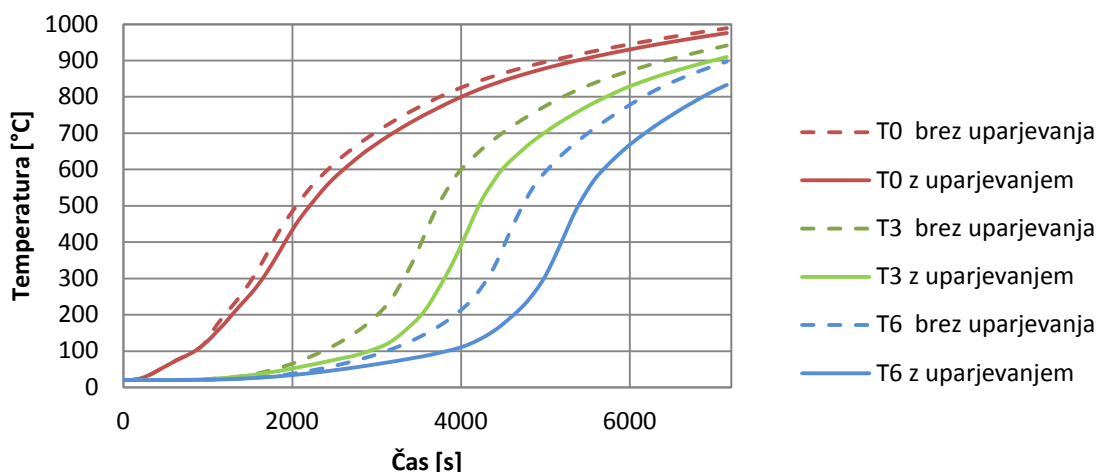


Slika B - 16: Razpored temperature po prerezu.

Podrobnejšo primerjavo si lahko pogledamo na sliki B - 17, kjer je prikazan razpored temperature po prerezu na višini 6 cm pod zgornjim robom elementa pri času  $t=60$  min. Vidimo, da so temperature na robu elementa v obeh primerih res približno enake, vendar pa se začne razlikati, ko se pomikamo globlje v element, povečevati. Ko primerjamo globino zогlenelosti prerezov po šestdesetih minutah izpostavljenosti požaru vidimo, da je v primeru, ko v računu nismo upoštevali uparjevanja, ta za 2 cm večja kot v primeru, ko smo uparjevanje upoštevali. S primerjavo na sliki B - 18 kjer smo v točkah T0, T3 in T6 primerjali časovni razvoj temperature, lahko še enkrat potrdimo, da se vpliv uparjevanja na hitrost segrevanja prereza z globino povečuje. V točki T6 je temperatura  $300^{\circ}\text{C}$  v primeru, ko uparjevanja ne upoštevamo, dosežena približno 700 sekund prej, kot če uparjevanje upoštevamo. Če naredimo isto primerjavo v točki T0 vidimo, da je tam temperatura  $300^{\circ}\text{C}$  v primeru, ko uparjevanja ne upoštevamo dosežena le nekaj deset sekund prej, kot če uparjevanje upoštevamo.



Slika B - 17: Vpliv uparjevanja vode na razpored temperature po prerezu pri t=60 min (Špiler, 2014).



Slika B - 18: Primerjava razvoja temperature s časom pri zaščitenem elementu z upoštevanjem in brez upoštevanja uparjevanja vode v točkah T0, T3 in T6 (Špiler, 2014).

Iz prikazanega vidimo, da ima uparjevanje vode v lesu pomemben vpliv na potek temperature po prerezu elementa. Če želimo prerez, glede zahtev požarne odpornosti, dimenzionirati optimalno moramo pri modeliranju segrevanja elementa ta vpliv upoštevati zelo natančno. Ker uparjevanje upočasnjuje segrevanje (deluje ugodno) smo v primeru, da ga ne upoštevamo sicer na varni strani, saj so v tem primeru dimenzije izračunane na podlagi mehanske analize večje od dejansko potrebnih. Večji problem se pojavil, če vpliv uparjevanja precenimo, saj so takrat izračunane dimenzije prereza premajhne, da bi z njimi lahko zagotovili potrebno požarno odpornost.



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za gradbeništvo*  
*in geodezijo*



REPUBLIKA SLOVENIJA  
MINISTRSTVO ZA IZOBRAŽEVANJE,  
ZNANOST IN ŠPORT



JAVNI SKLAD REPUBLIKE SLOVENIJE  
ZA RAZVOJ KADROV IN ŠTIPENDIJE



*Naložba v vašo prihodnost*  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski socialni sklad

Ta stran je namenoma prazna.