

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Špiler, J., 2014. Toplotna analiza zaščitenih lesenih elementov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Hozjan, T.): 36 str.

Datum arhiviranja: 15-10-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Špiler, J., 2014. Toplotna analiza zaščitenih lesenih elementov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Hozjan, T.): 36 pp.

Archiving Date: 15-10-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

JAN ŠPILER

**TOPLOTNA ANALIZA ZAŠČITENIH LESENIH
ELEMENTOV**

Diplomska naloga št.: 167/B-GR

**HEAT TRANSFER ANALYSIS OF PROTECTED
TIMBER ELEMENTS**

Graduation thesis No.: 167/B-GR

Mentor:
doc. dr. Tomaž Hozjan

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 25. 09. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Jan Špiler izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Toplotna analiza zaščitenih lesenih elementov«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, september 2014

Jan Špiler

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 614.84:624.011.1(497.4)(043.2)
Avtor: Jan Špiler
Mentor: doc. dr. Tomaž Hozjan
Naslov: Toplotna analiza zaščitenih lesenih elementov
Tip dokumenta: diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema: 36 str., 33 sl.
Ključne besede: Toplotna analiza, metoda končnih elementov, numerično modeliranje

Izvleček

V diplomski nalogi je predstavljena in prikazana uporaba numeričnih metod za modeliranje prenosa toplote po zaščitenih lesenih gradbenih elementih izpostavljenim požaru. Za namen diplomske naloge je bil, v programskem okolju Matlab, izdelan numerični model na podlagi metode končnih elementov z uporabo trikotnih končnih elementov. S pomočjo predstavljenega numeričnega modela so bile med drugim izvedene analize vpliva toplotne izolacije in vpliva vlage v lesu na potek ogrevanja lesenega elementa. Ugotovljeno je bilo, da ima tako toplotna izolacija kot vpliv vlage velik vpliv na razpored temperature po lesenem elementu.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 614.84:624.011.1(497.4)(043.2)
Author: Jan Špiler
Supervisor: assist. prof. Tomaž Hozjan, Ph.D.
Title: Heat transfer analysis of timber structures
Document type: Graduation thesis - University studies
Notes: 36p., 33 fig.
Key words: Heat transfer, finite element method, numerical modeling

Abstract

This thesis presents and demonstrates the use of numerical methods in heat transfer modeling for protected timber elements exposed to fire. A numerical model based on finite element method with the use of triangular finite elements has been produced in the software environment Matlab, solely for the purpose of this thesis. The presented numerical model helped conducting analyses on the impact of thermal isolation and the impact of moisture in timber on the development of the heating regime in a timber element. The results show that both thermal isolation and moisture in timber have great impact on temperature distribution in timber element.

ZAHVALA

Svojemu mentorju doc. dr. Tomažu Hozjanu se iskreno zahvaljujem za vse znanje, ki sem ga z njegovo pomočjo, tekom izdelave diplomske naloge osvojil.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO SLIK	VIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	IX
1 UVOD	1
2 LES	2
2.1 Splošno o lesu	2
2.2 Vlažnost lesa	3
3 PRENOS TOPLOTE	4
3.1 OSNOVNI ZAKONI	5
3.1.1 Kondukcija	5
3.1.2 Radiacija	6
4 METODA KONČNIH ELEMENTOV	8
4.1 ROBNI POGOJI	12
4.1.1 Konvekcija	12
4.1.2 Radiacija	13
4.2 ALGORITEM RAČUNA	15
5 MATERIALNE KARAKTERISTIKE	16
5.1 LES	16
5.2 MAVČNE PLOŠČE	17
6 TOPLOTNA ANALIZA	19
6.1 VPLIV SPREMINJANJA OBMOČJA POVEČANJA SPECIFIČNE TOPLOTE NA REZULTATE TOPLOTNE ANALIZE	19

6.2	ANALIZA POŽARNO ZAŠČITENEGA LESENEGA ELEMENTA	23
6.2.1	VPLIV GOSTOTE MREŽE KONČNIH ELEMENTOV NA NATANČNOST RAČUNA	24
6.2.2	Primerjava segrevanja zaščitenega in nezaščitenega elementa	25
6.2.3	Vpliv uparjevanja vode na hitrost segrevanja prereza	28
7	ZAKLJUČEK	34
	VIRI	35

KAZALO SLIK

Slika 1: Mikrostruktura lesa [2].....	2
Slika 2: Nihanje količine vlage v lesu zaradi spreminjanja relativne vlage v okolici [3].....	3
Slika 3: Meritev toplotnega pretoka	5
Slika 4: Končni element	8
Slika 5: Konvekcija ob zunanji površini elementa	12
Slika 6: Primerjava uporabljene specifične toplote s tisto, ki je podana v SIST EN-1991-1-2: 2004- ..	16
Slika 7: Specifična toplota v odvisnosti od temperature za mavčne plošče	17
Slika 8: Zmanjševanje mase mavčnih plošč zaradi izhlapevanja vode	17
Slika 9: Toplotna prevodnost mavčnih plošč	18
Slika 10: Odvod funkcije f_w	20
Slika 11: Analiziran element	21
Slika 12: Standardna požarna krivulja, skladna s [10]	21
Slika 13: Primerjava razvoja temperature s časom v točkah T1, T2 in T3.....	22
Slika 14: Model obravnavanega elementa.....	23
Slika 15: Vpliv gostote mreže končnih elementov na natančnost rezultatov	24
Slika 16: Vpliv gostote mreže končnih elementov na natančnost rezultatov	25
Slika 17: Vpliv števila uporabljenih končnih elementov na čas računa	25
Slika 18: Razpored temperature po prerezu pri zaščitenem in nezaščitenem elementu	26
Slika 19: Položaj točk.....	27
Slika 20: Razpored temperature po prerezu pri času $t=30$ min	27
Slika 21: Razpored temperature po prerezu pri času $t=60$ min	28
Slika 22: Učinek požarne zaščite.....	28
Slika 23: Vpliv uparjevanja vode na razpored temperature po prerezu pri $t=60$ min.....	29
Slika 24: Primerjava razvoja temperature s časom pri zaščitenem elementu z upoštevanjem in brez upoštevanja uparjevanja vode v točkah T0, T3 in T6.....	30
Slika 25: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T0.....	31
Slika 26: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T1	32
Slika 27: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T3.....	32
Slika 28: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T6.....	33

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

MKE	Metoda končnih elementov
-----	--------------------------

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Les je poleg kamna prav gotovo material z najdaljšo tradicijo uporabe. Pred drugimi gradbenimi materiali ima vrsto prednosti. Kot naraven material je obnovljiv in biološko razgradljiv. Za pridobivanje in obdelovanje je potrebne veliko manj energije, kot pri nekaterih drugih gradbenih materialih, npr. pri jeklu in betonu, hkrati pa ima les zaradi svojih raznovrstnih lastnosti zelo širok obseg uporabnosti. V diplomski nalogi se bomo osredotočili na uporabo lesa v nosilnih konstrukcijah.

Uporaba sodobnih načinov predelave lesa, kot je npr. lemeliranje, je povzročila, da se les uporablja v vse večjih in vse zahtevnejših objektih. S tem se raba lesa širi in postaja razumevanje njegovih lastnosti vedno bolj pomembno. Ena izmed pomembnih lastnosti je tudi način obnašanja lesenih elementov v požaru. Analizo odziva elementa na požar lahko razdelimo na dva fizikalna procesa. Najprej s toplotno analizo določimo kako se bo element s časom segreval, v drugem delu pa določimo mehanski odziv lesenega elementa izpostavljenega toplotni in mehanski obtežbi.

V nalogi bomo podrobneje predstavili enega izmed pristopov k modeliranju prehoda toplote po trdni snovi. Čeprav trenutno že obstaja veliko različnih računalniških programov s katerimi je mogoče opraviti toplotno analizo smo se v želji, da bi se podrobneje spoznali z načinom delovanja teh modelov, odločili za izdelavo lastnega numeričnega modela v okolju Matlab.

2 LES

2.1 Splošno o lesu

Les je olesenelo vlaknasto tkivo rastlin, ki je sestavljeno iz različnih vrst celic. Te imajo v lesu funkcijo prevajanja in skladiščenja vode ter mineralnih snovi, poleg tega pa drevesu zagotavljajo mehansko odpornost. Skozi evolucijski razvoj je prišlo v strukturi lesa do velikih razlik med drevesnimi vrstami. Pri iglavcih je struktura bolj preprosta kot pri listavcih. Ker večji del lesa za konstrukcijske namene predstavlja les iglavcev, se vse lastnosti lesa v nadaljevanju diplomske naloge nanašajo na les iglavcev.

Za potrebe modeliranja prenosa toplote je dobro, da poznamo mikrostrukturo lesa. Ob večji povečavi je vidno, da je večina lesnega tkiva sestavljena iz podolgovatih vlaknastih celic. Povprečno 93% teh celic predstavljajo traheide, ki potekajo v osni smeri in v dolžino merijo od 0,7 mm do 11 mm [1].



Slika 1: Mikrostruktura lesa [2].

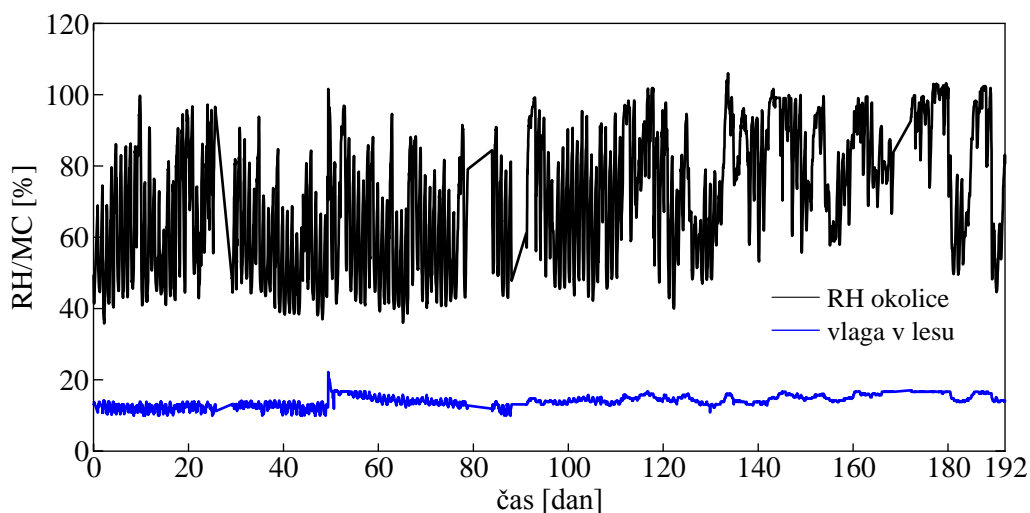
Zaradi »cevaste« mikrostrukture, vidne na sliki 1, se les v smislu mehanskih in termičnih lastnosti ne obnaša izotropno. Da pa se mu določiti dve glavni smeri, eno vzporedno z vlakni in eno pravokotno na vlakna. Toplotna prevodnost lesa v smeri vlaken je približno dvakrat večja, v primerjavi s prevodnostjo v smeri pravokotno nanje (Tabela 1). S povečevanjem vlažnosti, gostote in temperature raste tudi toplotna prevodnost[1].

Tabela 1: Tolpotna prevodnost lesa glede na smer [1]

Vzdolžno	0,223 W/m K – 0,331 W/m K
Radialno	0,121 W/m K – 0,176 W/m K

2.2 Vlažnost lesa

Kot smo že povedali, se tekom življenja drevesa po deblu v traheidnih celicah pretaka voda. Po poseku, razrezu in sušenju v lesu ostane del te vode še vedno prisoten. Poleg tega je zaradi poroznosti, vlažnost lesa ves čas odvisna tudi od pogojev okolja. Ko je relativna vlažnost okolja večja od relativne vlažnosti lesa, pride od navlaževanja lesa (absorpcija), v nasprotnem primeru pa do sušenja (desorpcija) (slika 2).



Slika 2: Nihanje količine vlage v lesu zaradi spreminjanja relativne vlage v okolici [3].

Iz izkušenj vemo, da suh les gori bolje od vlažnega, zato predvidevamo, da bo količina vlage v lesu pomembno vplivala na hitrost segrevanja prereza. Obstaja več načinov kako zajeti vpliv vlage na segrevanje. V naprednejših modelih je uporabljen bolj splošen pristop, pri katerem transport vlage in prenos toplote obravnavamo kot povezan problem. Na ta način lahko pridemo do bolj točnih rezultatov, vendar pa je izdelava takšnega modela zelo zahtevna. V našem modelu smo vpliv vlage na segrevanje upoštevali posredno in sicer, s povečanjem specifične toplote lesa.

3 PRENOS TOPLOTE

Toplota je fizikalna količina s katero merimo notranjo energijo telesa. Če imata dva predela nekega telesa različni temperaturi, potem bo toplotni tok tekkel iz predela z višjo temperaturo, proti predelu kjer je temperatura nižja. Zaradi tega procesa se bo temperaturna razlika med predeloma manjšala [5].

Obstajajo trije načini prenosa energije:

Kondukcija - je mehanizem, s katerim se toplota prenaša po trdninah. Prenos poteka na dva načina: preko vibracij iz ene molekule na drugo in z gibanjem prostih elektronov. Slednji način velja za bolj učinkovitega, zato so nekovinske snovi navadno slabši prevodniki toplote (in elektrike) [6].

Konvekcija – je prisotna v tekočinah. Tam imajo molekule možnost, da se prosto gibljejo. Pri naravni konvekciji je gibanje molekul posledica razlik v gostoti medija. Do razlik v gostoti pride, kadar so različni deli medija segreti na različne temperature. Pri prisiljeni konvekciji je gibanje molekul posledica zunanjih dejavnikov npr. mehanskega mešanja ali vetra. S tem, ko se molekule gibljejo iz enega konca na drugega, s sabo prenašajo toplotno energijo [6].

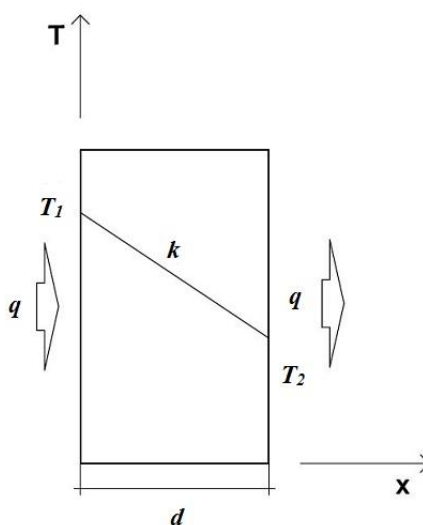
Radiacija – je edini izmed treh mehanizmov, s katerim se energija lahko prenaša tudi skozi prazen prostor. Vsako telo s temperaturo nad absolutno ničlo seva elektromagnetno sevanje. Energija, ki jo telo seva, je odvisna od njegove temnosti in od temperature na površini telesa. Ko elektromagnetno sevanje doseže telo, se del sevanja odbije, drugi del preide skozi telo, preostali del pa telo absorbira [6].

Pomembno je, da znamo pravilno oceniti kdaj in kje je smiselno in potrebno katerega izmed mehanizmov upoštevati. Pri modeliranju gradbenih elementov izpostavljenih požaru upoštevamo kondukcijo, za prenos toplote po elementu, vpliva radiacije in konvekcije pa upoštevamo na robu elementa, za zagotovitev ustreznih robnih pogojev.

3.1 OSNOVNI ZAKONI

3.1.1 Kondukcija

Kondukcijo, ki jo opisuje Fourierjev zakon, najlažje ponazorimo na primeru prevajanja toplote skozi raven zid. Predpostavimo, da je v zidu doseženo stacionarno stanje (temperature v zidu se s časom ne spreminjajo) in da sta temperaturi na eni in drugi strani zidu ves čas konstantni [5].



Slika 3: Meritev toplotnega pretoka

Na podlagi meritev toplotnega pretoka ugotovimo, da lahko enodimenzionalen toplotni pretok opišemo z enačbo [6]:

$$q = \frac{k(T_1 - T_2)}{d} \quad (3.1)$$

Za opis razporeda temperature po elementu pri stacionarnem stanju potrebujemo le Fourierjev zakon. Če pa želimo vedeti, kaj se dogaja s temperaturo znotraj elementa v dinamičnih pogojih (npr. če se temperatura na zunanem robu elementa spreminja), pa moramo upoštevati še eno količino t.j. specifično toploto. Specifična toplota nam pove, koliko energije je potrebne, da 1 kg snovi segrejemo za 1°C [7].

Ta odnos opišemo z izrazom:

$$Q = \rho c_p V \Delta T \quad (3.2)$$

V bolj splošni obliki prevajanje toplote opišemo s Fourierjevo parcialno diferencialno enačbo za prenos toplote po trdni snovi:

$$V : \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (i, j = x, y, z) \quad (3.3)$$

V enačbi (3.3) oznaka V predstavlja prostor, ki ga zaseda obravnavan element, s T je označena temperatura elementa v posamezni točki pri času t , Q je specifičen prostorninski toplotni pretok, ρ je gostota snovi, c_p specifična toplota, k pa koeficient toplotne prevodnosti [8].

3.1.2 Radiacija

Kot smo že omenili v začetku poglavja, vsa telesa, s temperaturo višjo od absolutne ničle, sevajo energijo. Bolj kot je telo »črno« in bolj kot je segreto, močnejše bo sevalo.

Površinski toplotni pretok, ki ga seva popolnoma črno telo opišemo s Stefanovim zakonom:

$$q_s = \sigma^* (273 + T)^4 \quad (3.4)$$

Kjer je $\sigma = 2,041 \cdot 10^{-4} \left[\frac{J}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ K^4} \right]$ Stefan – Boltzmannova konstanta. V osnovni obliki se temperatura v Stefanov zakon podaja v Kelvinih. Izraza (3.4) in (3.5) sta prirejena tako, da lahko temperature vanju podajamo v °C.

Telesa, s katerimi imamo opravka v požaru pri enaki temperaturi, sevajo manj kot črno telo, poleg tega pa ne sevajo v prazen polprostor, pač pa sevajo eno proti drugemu [5]. Tako npr. požar seva proti lesenemu elementu, ta sevanje sprejema, hkrati pa del energije tudi sam seva nazaj v okolico. Da lahko realno ponazorimo površinski toplotni pretok ki se, zaradi radiacije, pretaka iz požara na lesen element, v enačbo (3.4) vključimo faktor emisivnosti ϵ , tega določimo iz emisivnosti ognja ϵ_f in emisivnosti lesa ϵ_l tako, da je $\epsilon = \epsilon_f \epsilon_l$. T_{zrak} je temperatura na katero je segret zrak zaradi požara, T_{rob} pa je temperatura na obremenjenem robu elementa.

$$q_{rad} = \epsilon^* \sigma^* \left((273 + T_{zrak})^4 - (273 + T_{rob})^4 \right) \quad (3.5)$$

Prenos toplote s konvekcijo je nekoliko podrobneje opisan v poglavju robni pogoji.

Vpliv, ki ga imata na prehod toplote skozi zunanje stene elementa radiacija in konvekcija, upoštevamo z robnimi pogoji:

$$S_T : T_s - T_m = 0 \quad (3.6)$$

$$S_q : k \frac{\partial T}{\partial x_i} n_i - q_s = 0 \quad (3.7)$$

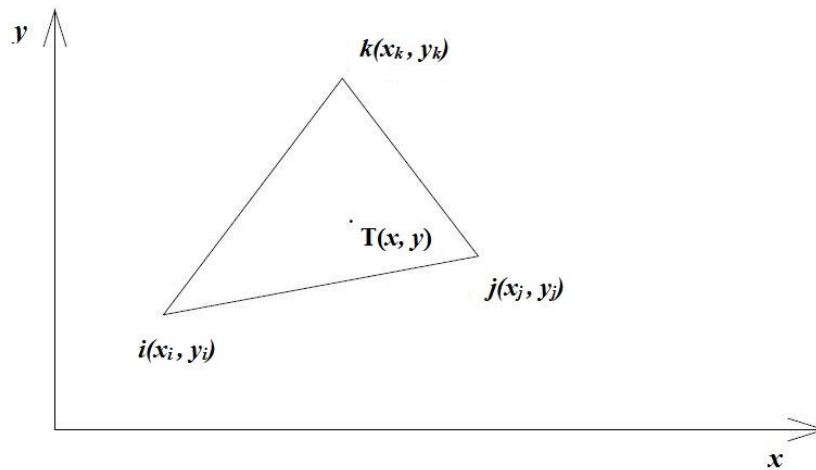
$$V : T(x_i, 0) = T_0(x_i) \quad (3.8)$$

V zgornjih enačbah predstavlja S_T mejno ploskev elementa na kateri direktno predpišemo temperaturo, S_q je mejna ploskev elementa na kateri predpišemo površinski toplotni pretok q_s , n_i so komponente enotskega vektorja na zunanji rob elementa, T_0 je začetna temperatura elementa v posamezni točki, q_s je sestavljen iz dveh delov, in sicer iz dela q_k , ki ga prinese površinski pretok zaradi konvekcije in iz dela q_r , ki ga prinese površinski pretok zaradi radiacije [8].

4 METODA KONČNIH ELEMENTOV

Analitično reševanje enačbe (3.3) ob upoštevanju robnih pogojev (3.6), (3.7) in (3.8) je zelo zahtevno, zato so analitične rešitve znane le za zelo enostavne enodimenzionalne in dvodimenzionalne primere. Na primer, za prenos toplote po tanki palici, pri čemer upoštevamo, da se temperatura na robu palice s časom ne spreminja in da so materialne karakteristike temperaturno neodvisne.

Za modeliranje zahtevnejših primerov se moramo poslužiti uporabe numeričnih metod. Skozi čas se je za najprimernejšo izkazala metoda končnih elementov (MKE). Pri MKE obravnavan element razdelimo na poljubno število manjših delov, ki jim pravimo končni elementi.



Slika 4: Končni element

V modelu je bil uporabljen najbolj osnoven tip dvodimenzionalnega končnega elementa – linearen trikotnik (slika 4). Temperaturo v poljubni točki tega trikotnika lahko z uporabo oblikovnih funkcij zapišemo na naslednji način:

$$T = N_i T_i + N_j T_j + N_k T_k \quad (4.1)$$

Pri čemer imajo oblikovne funkcije naslednjo obliko:

$$\begin{aligned}
 N_i &= \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y) \\
 N_j &= \frac{1}{2A}(a_j + b_j x + c_j y) \\
 N_k &= \frac{1}{2A}(a_k + b_k x + c_k y)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Koeficienti v enačbah se določijo na podlagi koordinat točk i, j, k .

$$\begin{aligned}
 a_i &= x_j y_k - x_k y_j; & b_i &= y_j - y_k; & c_i &= x_k - x_j \\
 a_j &= x_k y_i - x_i y_k; & b_j &= y_k - y_i; & c_j &= x_i - x_k \\
 a_k &= x_i y_j - x_j y_i; & b_k &= y_i - y_j; & c_k &= x_j - x_i
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Ob upoštevanju postopka izpeljave enačb opisanega v literaturi [9] prevedemo enačbe (3.3), (3.6), (3.7) in (3.8) v obliko, ki je primerna za uporabo v MKE:

$$\mathbf{C}_e = \int_V \rho c_p \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \tag{4.4}$$

$$\mathbf{K}_e = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} dV + h \int_{S_q} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS_q + \varepsilon \sigma R_{nelin} \int_{S_q} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS_q \tag{4.5}$$

$$\mathbf{f}_e = h T_{zrak} \int_{S_q} \mathbf{N}^T dS_q + \varepsilon \sigma R_{nelin} T_{zrak} \int_{S_q} \mathbf{N}^T dS_q \tag{4.6}$$

\mathbf{N} je matrika oblikovnih funkcij, \mathbf{C}_e , \mathbf{K}_e sta matriki specifične toplote in toplotne prevodnosti za posamezen končni element, \mathbf{f}_e je obtežni vektor, prav tako za posamezen končni element, \mathbf{k} je matrika v kateri zapišemo koeficiente toplotne prevodnosti v posamezni smeri, h je toplotni prestopni koeficient (glej sliko 5), R_{nelin} pa nelinearen člen ki ostane, ko lineariziramo enačbo (3.5).

V splošnem se računalniška obdelava problema začne z enačbami (4.4), (4.5) in (4.6). Najprej za vsak element, s pomočjo numeričnega integriranja, določimo vrednosti za \mathbf{C}_e , \mathbf{K}_e in \mathbf{f}_e ter jih zapišemo v globalni matriki specifične toplote \mathbf{C} in toplotne prevodnosti \mathbf{K} ter v obtežni vektor \mathbf{f} . Te matrike razporedimo v enačbo (4.7). V našem modelu smo upoštevali implicitno obliko časovne diferencne sheme ($\theta=1$). Tako dobimo sistem linearnih enačb, v katerem so neznanke, temperature elementa v $n+1$ tem časovnem koraku.

$$\mathbf{C} \left\{ \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} \right\} + \mathbf{K} \left\{ \theta T^{n+1} + (1-\theta) T^n \right\} = \theta \mathbf{f}^{n+1} + (1-\theta) \mathbf{f}^n \quad (4.7)$$

Ker smo v modelu uporabili linearen trikotni element, lahko izpeljavo enačb (4.4), (4.5) in (4.6) po analitični poti pripeljemo še korak dlje. Matriko \mathbf{B} iz enačbe (4.5) dobimo iz matrike gradienta temperature (4.8). Če v enačbi (4.9) upoštevamo enačbe (4.2), dobimo končno vrednost matrike \mathbf{B} (enačba (4.10)). Pri tem lahko opazimo, da so komponente v matriki \mathbf{B} konstantne, saj se določijo na podlagi koordinat vozlišč posameznega končnega elementa, zato integriranje tega dela enačbe ni problematično.

$$\mathbf{g} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{T} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Integrale v drugem in tretjem členu enačbe (4.5) ter enačbo (4.6) rešimo z uporabo analitične rešitve integrala po robu trikotnika (4.11). Za integriranje enačbe (4.4) pa uporabimo analitično rešitev za integriranje po površini trikotnika (4.12).

$$\int_{\Gamma} N_i^a N_j^b d\Gamma = \frac{a!b!}{(a+b+1)!} \quad (4.11)$$

$$\int_{\Omega} N_i^a N_j^b N_k^c d\Omega = \frac{a!b!c!2A}{(a+b+c+2)!} \quad (4.12)$$

Nov zapis enačb (4.4), (4.5) in (4.6) je sledeč:

$$\mathbf{C}_e = \frac{\rho c_p A}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{K}_e = \frac{k}{4A} \left(\begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_j b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_k b_k & b_k b_j & b_k^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_j c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_k c_k & c_k c_j & c_k^2 \end{bmatrix} \right) + \frac{h l_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\varepsilon \sigma R_{nelin} l_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{f}_e = \frac{h T_{zrak} l_{ij}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{\varepsilon \sigma R_{nelin} T_{zrak} l_{ij}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

S tem, ko smo v modelu uporabili enačbe (4.13), (4.14) in (4.15) namesto enačb, (4.4), (4.5) in (4.6), smo se znebili potrebe numeričnem integriranju v vsaki iteraciji računa, s tem smo v veliki meri skrajšali čas računa. Slaba stran uporabe linearnih trikotnih končnih elementov napram drugim vrstam končnih elementov je, da je račun z trikotnimi končnimi elementi nekoliko manj natančen. Zato je potrebno za enako natančnost rezultatov uporabiti nekoliko gostejšo mrežo. Večanje števila končnih elementov pa vodi v daljšanje računskega časa, poveča pa se tudi poraba delovnega spomina na računalniku. Načeloma velja, da je trikotne elemente smiselno uporabiti za bolj enostavne primere. Pri zahtevnejših, kjer je potrebno uporabiti veliko število končnih elementov, ali pa je zahtevana velika

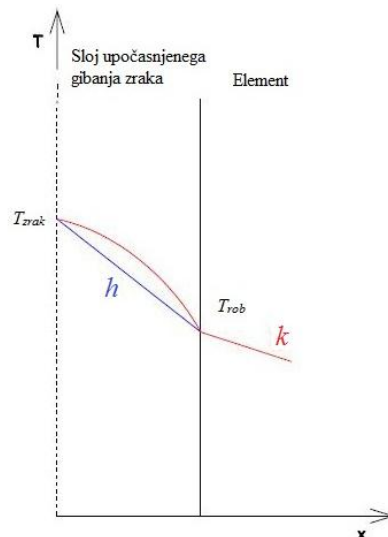
natančnost računa, je bolje uporabiti štirikotne elemente. V razdelku 6.1 je podana študija vpliva števila končnih elementov na računski čas.

Glede na zahtevano natančnost rezultatov in velikost elementov, ki jih v zvezi s prehodom toplote v požaru srečujemo v inženirski praksi, se izkaže uporaba trikotnih elementov za primernejšo, saj lahko z njimi ob precej krajšem času računa zagotovimo primerno natančnost rezultatov.

4.1 ROBNI POGOJI

Temperaturo na robu elementa lahko podamo na več načinov. Najbolj osnovna možnost je, da direktno predpišemo temperaturo v vozlišču. Ko obravnavamo nosilec izpostavljen požaru, ta način podajanja ni mogoč, saj temperatura na robu elementa, zaradi vplivov radiacije in konvekcije, ni enaka temperaturi zraka, ki ga element obdaja. V tem primeru robne pogoje podamo tako, da predpišemo površinski toplotni pretok. V primeru konvekcije je le-ta linearen, v primeru radiacije pa je nelinearno odvisen od temperaturne razlike med zrakom in zunanjim robom elementa. Posebna varianta toplotnega pretoka je tudi izoliran rob, pri čemer predpišemo, da je toplotni tok skozi površino enak nič [5].

4.1.1 Konvekcija



Slika 5: Konvekcija ob zunanji površini elementa

Med požarom se na zunanjem robu elementa tvori tanek sloj zraka (»sloj upočasnjene gibanja zraka«). Ta sloj zraka deluje kot plast toplotne izolacije. Potek temperature po debelini sloja je v

realnosti nelinearen (rdeča črta na sliki 5). Ker bi bila nelinearna obravnava problema zelo zahtevna, smo v modelu, v skladu z [9], upoštevali linearen potek temperature s prestopnim koeficientom h (modra črta). Toplotni pretok skozi sloj opišemo z izrazom:

$$q_{konv} = h * (T_{zrak} - T_{rob}) \quad (4.16)$$

Pot do določitve velikosti faktorja h je zelo težavna. Le-ta je namreč, med drugim, odvisen od: hitrosti gibanja zraka ob površini, prisotnosti turbolenc, geometrije in hrapavosti površine ter lastnosti medija, kot sta gostota in toplotna prevodnost [6]. Te lastnosti so okvirno upošteevane tudi v [10], tako da moramo pri različnih vrstah požarov upoštevati različne vrednosti za h .

Tabela 2: Prestopni koeficient h [10].

Požarna krivulja (temperature-čas)	h [W/m ² K]
Standardna	25
Zunanji požar	35
Ogljikovodikova	50
Modeli naravnih požarov	35

Problem pri upoštevanju konvekcije v računu je, da je toplotni pretok skozi sloj upočasnjenega gibanja zraka odvisen od razlike med temperaturo zraka T_{zrak} in temperaturo zunanjega roba T_{rob} elementa (slika 5), pri čemer pa temperature T_{rob} ne poznamo.

Če upoštevamo linearen potek temperature po sloju, problem rešimo tako, da temperaturo T_{rob} zapišemo na levi strani enačbe (4.7), med neznankami, kjer jo v matriki prevodnosti prištejemo na vseh robovih, ki so izpostavljeni konvekciji. Preostali del enačbe (4.16) sestavljajo znane količine, te nesemo na desno stran enačbe (4.7), v obtežni vektor.

4.1.2 Radiacija

Podobno kot pri konvekciji, je tudi toplotni pretok zaradi radiacije odvisen od razlike med temperaturo zraka in zunanjega roba elementa. Razlika je le ta, da se pri radiaciji ne moremo izogniti nelinearni obravnavi problema. Preden lahko enačbo (4.17) uporabimo v MKE, jo moramo linearizirati.

$$q_{rad} = \epsilon * \sigma * \left((273 + T_{zrak})^4 - (273 + T_{rob})^4 \right) \quad (4.17)$$

V enačbi (4.17) izpostavimo linearen člen

$$q_{rad} = \epsilon * \sigma * (T_{zrak} - T_{rob}) * \left((273 + T_{zrak})^2 + (273 + T_{rob})^2 \right) * \left((273 + T_{zrak}) + (273 + T_{rob}) \right) \quad (4.18)$$

Vzamemo, da je

$$R_{nelin} = \left((273 + T_{zrak})^2 + (273 + T_{rob})^2 \right) * \left((273 + T_{zrak}) + (273 + T_{rob}) \right) \quad (4.19)$$

Tako dobimo

$$q_{rad} = \epsilon * \sigma * R_{nelin} * (T_{zrak} - T_{rob}) \quad (4.20)$$

Člen R_{nelin} je odvisen od trenutne temperature na robu elementa T_{rob} . Ker le-te ne poznamo, moramo račun izvajati iterativno (glej poglavje 4.2). Postopek vpeljave enačbe (4.20) v (4.7) znotraj posamezne iteracije pa je analogen tistemu, ki je opisan pri konvekciji.

4.2 ALGORITEM RAČUNA

- Določi karakteristike, ki se skozi čas računa ne spreminjajo:
 - ploščine končnih elementov
 - dolžine stranic, ki mejijo na zunanji rob

ČASOVNI KORAK

- Določi temperaturo zraka pri trenutnem času iz požarne krivulje.

ITERACIJA

- ❖ Na podlagi trenutne temperature v elementu določi materialne karakteristike:
 - gostoto,
 - toplotno prevodnost,
 - specifično toploto.
- ❖ Določi vrednost nelinearnega člena radiacije.
- ❖ Zapiši materialne karakteristike v globalni matriki **C** in **K** in obtežni vektor **f**.
- ❖ Razporedi matrike v enačbo (4.7).
- ❖ Reši sistem enačb.
- ❖ Oceni napako.
- ❖ Ponavljaj dokler ni napaka dovolj majhna.

KONEC ITERACIJE

- Določi nov trenutni čas.
- Ponavljaj dokler ni dosežen končni čas.

KONEC

5 MATERIALNE KARAKTERISTIKE

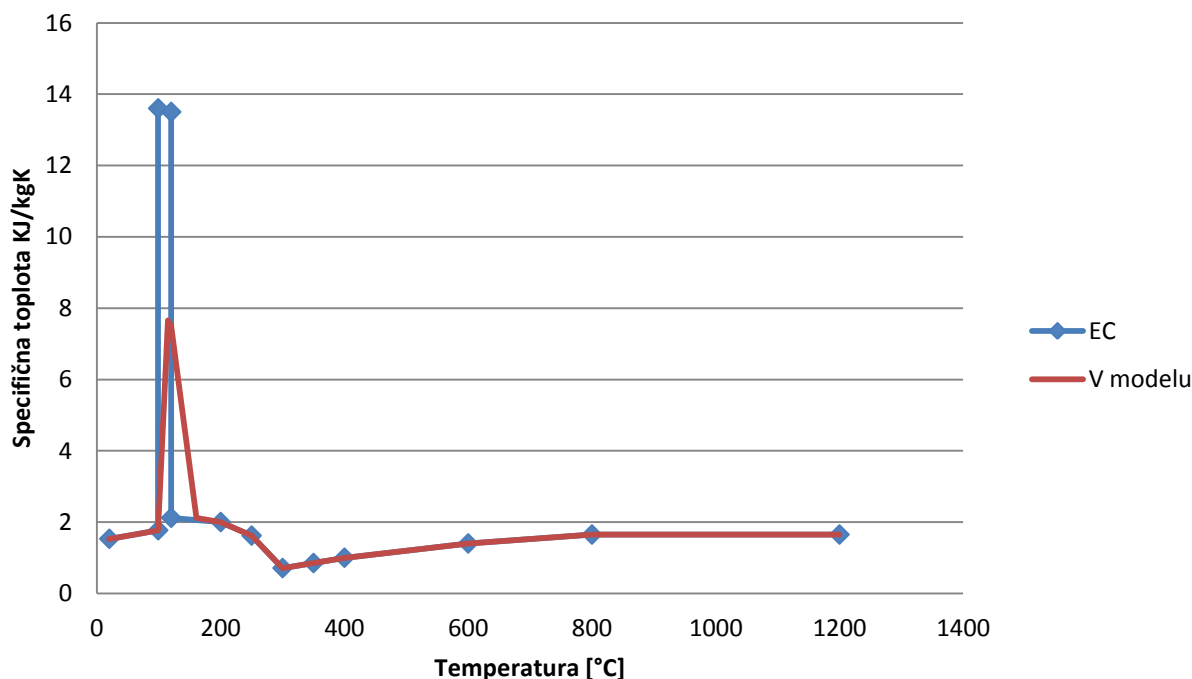
5.1 LES

Za toplotno analizo so pomembni podatki o gostoti, prevodnosti in specifični toploti materiala. Vse te karakteristike so v splošnem odvisne od temperature, kar tudi upoštevamo v prikazanem numeričnem modelu.

Za les je odvisnost materialnih karakteristik od temperature podana v standardu [10] in je bila kot taka tudi vgrajena v numerični model in uporabljena v prikazanih analizah.

Pri krivulji, s katero je podana odvisnost specifične toplote od temperature, smo morali narediti manjše popravke, saj zaradi »skoka«, ki nastane med 100 in 120°C (glej sliko 6), ta krivulja ni direktno uporabna za numerično analizo. Modificirali smo jo tako, da smo nekoliko razširili interval povečanja specifične toplote in tako zmanjšali gradient naraščanja specifične toplote na območju »skoka«. Pri smo pod grafom ohranili enako površino, kot jo predvideva standard [10].

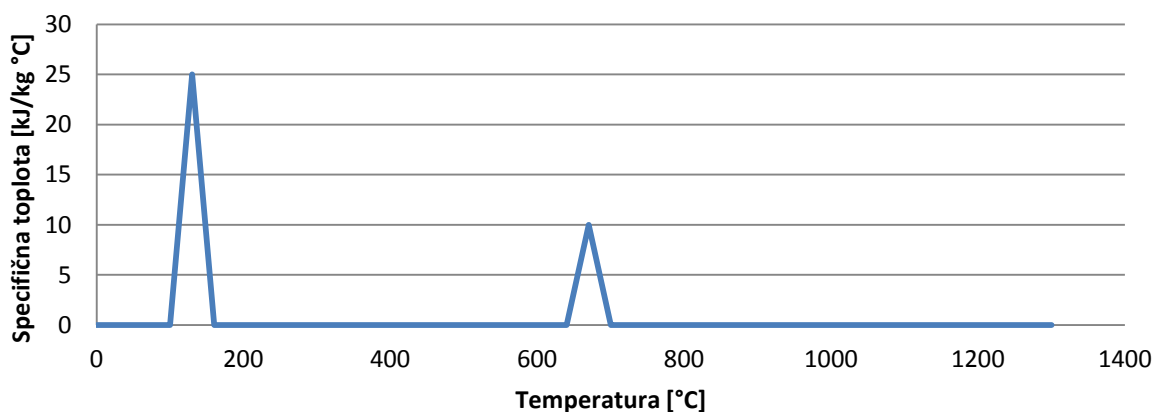
V razdelku 6.1 so podani tudi rezultati parametrične analize, ki kažejo da takšna modifikacija nima vpliva na globalno sliko ogrevanja prereza.



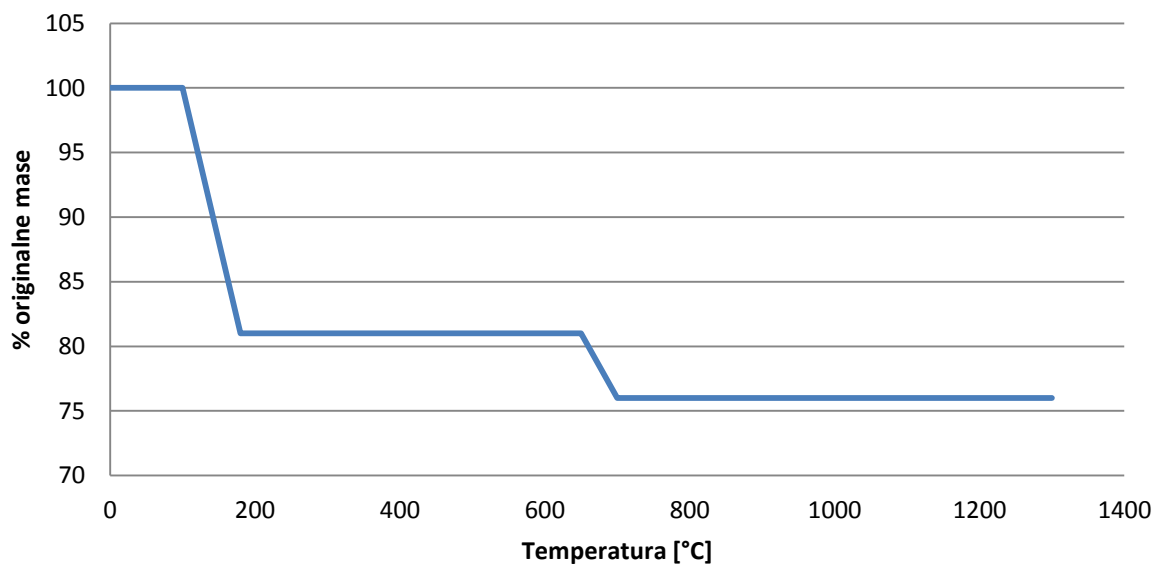
Slika 6: Primerjava uporabljene specifične toplote s tisto, ki je podana v SIST EN-1991-1-2: 2004-

5.2 MAVČNE PLOŠČE

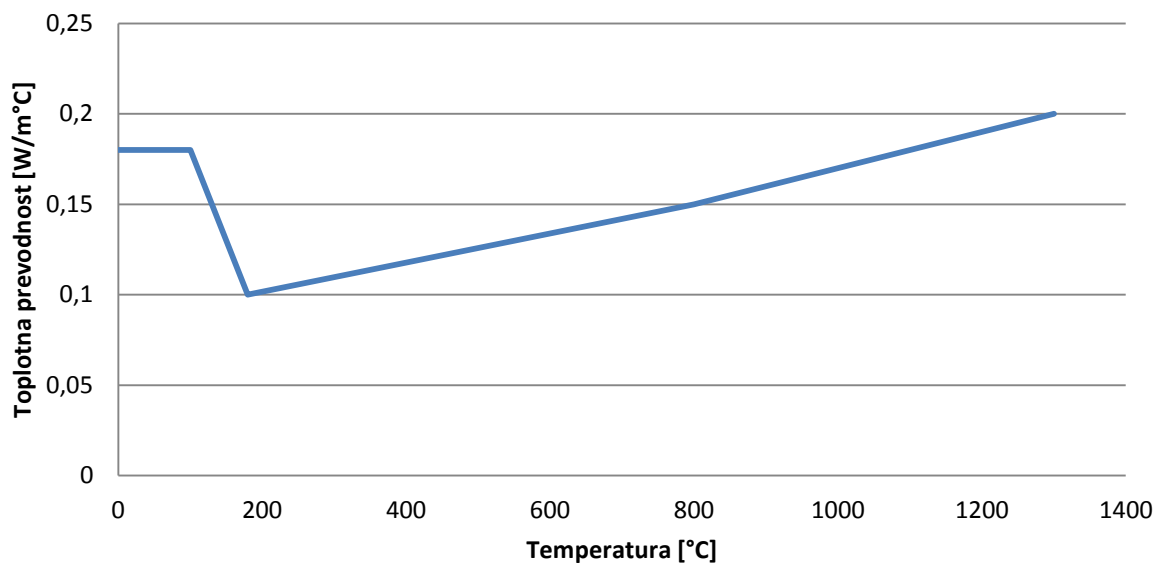
Priporočenih vrednosti materialnih karakteristik za materiale, ki se uporabljajo za požarno zaščito v standardu SIST EN-1991-1-5, ni. Zaradi poroznosti, nehomogenosti in vsebnosti vlage je materialne karakteristike mavčnih plošč zelo težko izmeriti, kar je pripeljalo do tega, da prihaja pri različnih avtorjih, do velikih razlik pri dobljenih karakteristikah [11]. Materialne karakteristike uporabljene v modelu smo povzeli po članku [11].



Slika 7: Specifična toplota v odvisnosti od temperature za mavčne plošče



Slika 8: Zmanjševanje mase mavčnih plošč zaradi izhlapevanja vode



Slika 9: Toplotna prevodnost mavčnih plošč

6 TOPLOTNA ANALIZA

6.1 VPLIV SPREMINJANJA OBMOČJA POVEČANJA SPECIFIČNE TOPLOTE NA REZULTATE TOPLOTNE ANALIZE

Kot smo že omenili prej, krivulje s katero je v [10] podana odvisnost med specifično toploto in temperaturo, ne moremo direktno uporabiti v modelu. Težava se pojavi, ko se temperatura v posameznem končnem elementu giblje na območju »stolpa«. Pri teh elementih znotraj iterativnega postopka velikost specifične toplote, ki jim jo pripišemo, zelo niha. npr od 1,8 kJ/kg K pri temperaturi 99°C skoči na 13,5 kJ/kg K pri 105°C. Zaradi nenadnih sprememb v specifičnih toplotah, pride do numerične nestabilnosti v računu, zaradi česar račun divergira. Da se izognemo težavam pri konvergiranju, je krivuljo potrebno nekoliko modificirati.

V nadaljevanju želimo s parametrično analizo pokazati, da spremembe, ki smo jih naredili na krivulji, ne vplivajo na globalno sliko segrevanja prereza.

Za reševanje problema smo uporabili pristop, ki je opisan v članku [12], tako smo reševali nekoliko modificirano enačbo prevajanja toplote (enačba (3.3))

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q, \quad (i, j = x, y, z) \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \rho c_{p,brez} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial L_w}{\partial t} \quad (6.2)$$

V izrazu (6.2) je $\frac{\partial H}{\partial t}$ sprememba energije po času, T je temperatura v posamezni točki pri času t , $c_{p,brez}$

je specifična toplota, v kateri ni zajetega vpliva uparjevanja vode. Funkcija L_w je definirana kot:

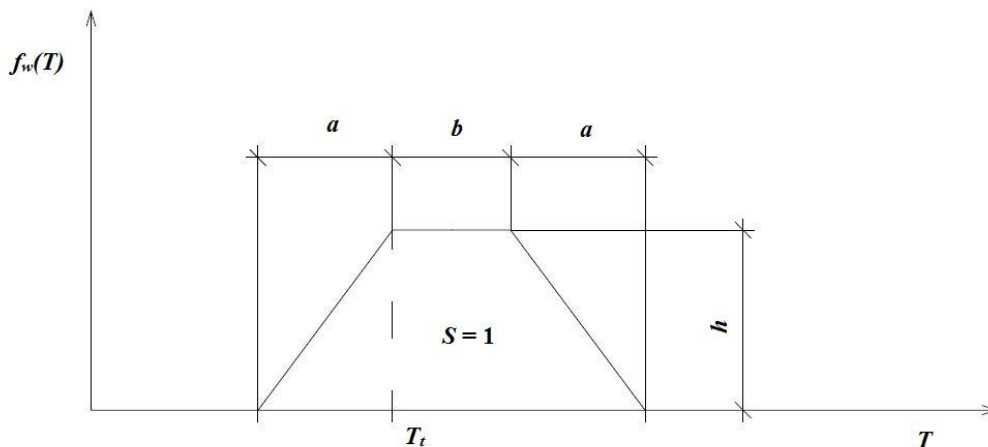
$$L_w = \rho w l_h f_w(T) \quad (6.3)$$

w je začetna relativna vlažnost lesa, l_h je latentna toplota vode in znaša 2257 KJ/kg, $f_w(T)$ pa je uparitvena funkcija.

Izraz (6.2) ima v računu isto vlogo kot $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ v izrazu (3.3), le da je v (6.2) specifično toplota izražena v dveh delih. V prvem členu je zajeta specifična toplota, pri kateri ne upoštevamo energije, ki se porabi za uparjevanje vode. S členom $\frac{\partial L_w}{\partial t}$ je zajeta energija, ki se troši med uparjevanjem vode (»stolp« na sliki 6). Funkcija L_w , je sestavljena iz konstantnega dela $\rho w l_h$ in funkcije $f_w(T)$. Odvod funkcije L_w po času dobimo s posrednim odvajanjem

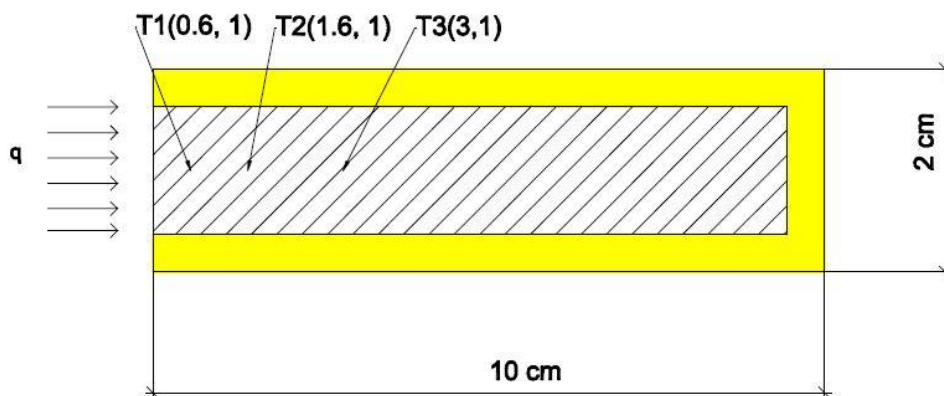
$$\frac{\partial L_w(T)}{\partial t} = \frac{\partial L_w(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho w l_h \frac{\partial f(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.4)$$

Za nas je pomemben odvod funkcije $f_w(T)$ po temperaturi, ta je definiran kot je prikazano na sliki 10. S spreminjanjem parametrov a , b lahko nadziramo obliko »stolpa«, h določimo na podlagi a in b tako, da je površina pod grafom funkcije vedno $S=1$. Če bi upoštevali parametra $a=0$ in $b=20$, bi bila podana odvisnost specifične toplote od temperature približno takšna, kot je navedena v standardu [9]. Edina razlika bi bila, da je maksimalna vrednost specifične toplote v [9] nekoliko nižja. Za takšen način zapisa smo se odločili zaradi lažje implementacije algoritmov v numerični model in ker omogoča dober nadzor nad obliko »stolpa«.

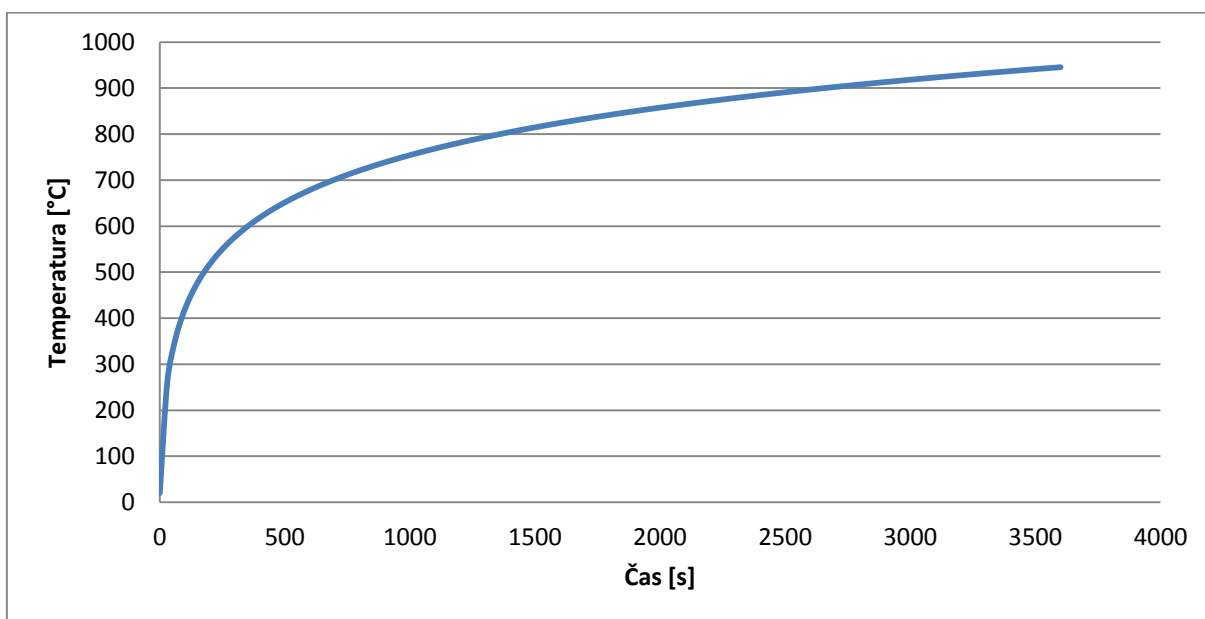


Slika 10:Odvod funkcije f_w

Analizo smo opravili na »enodimenzionalnem« primeru, kjer smo eno stranico elementu ogrevali, ostale tri pa so bile izolirane (slika 11). Uporabili smo materialne karakteristike za les ter standardno požarno krivuljo iz [10] (slika 12).



Slika 11: Analiziran element

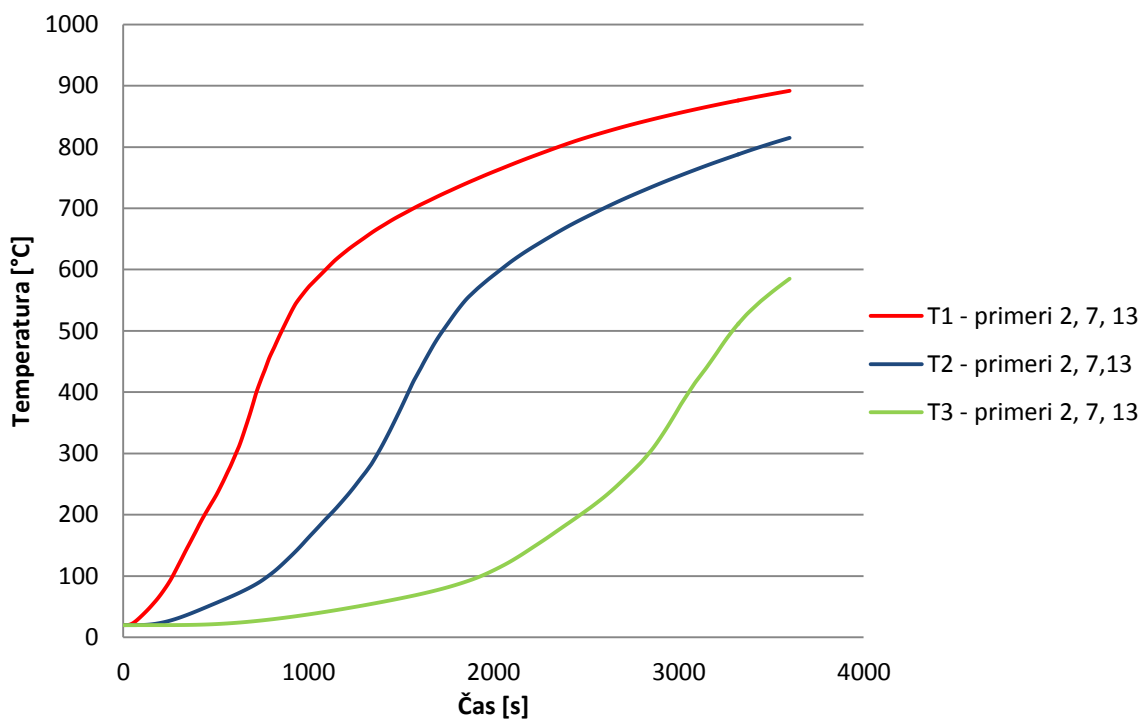


Slika 12: Standardna požarna krivulja, skladna s [10]

Izračun smo opravili za 10 primerov, pri tem pa smo spreminjali vrednosti parametrov a , b in T_r . Parametre smo spreminjali tako, da je bila površina pod grafom v vseh primerih enaka $S=1$ (slika 10). Vzdolž elementa smo točkah T1, T2 in T3 spremljali razvoj temperature s časom.

Tabela 3: Vhodni podatki

Št. primera	T_t	a	b
1	100	95	20
2	100	85	20
3	100	60	20
4	100	40	20
5	105	95	10
6	105	85	10
7	105	60	10
8	109	85	2
9	109	60	2
10	109	40	2



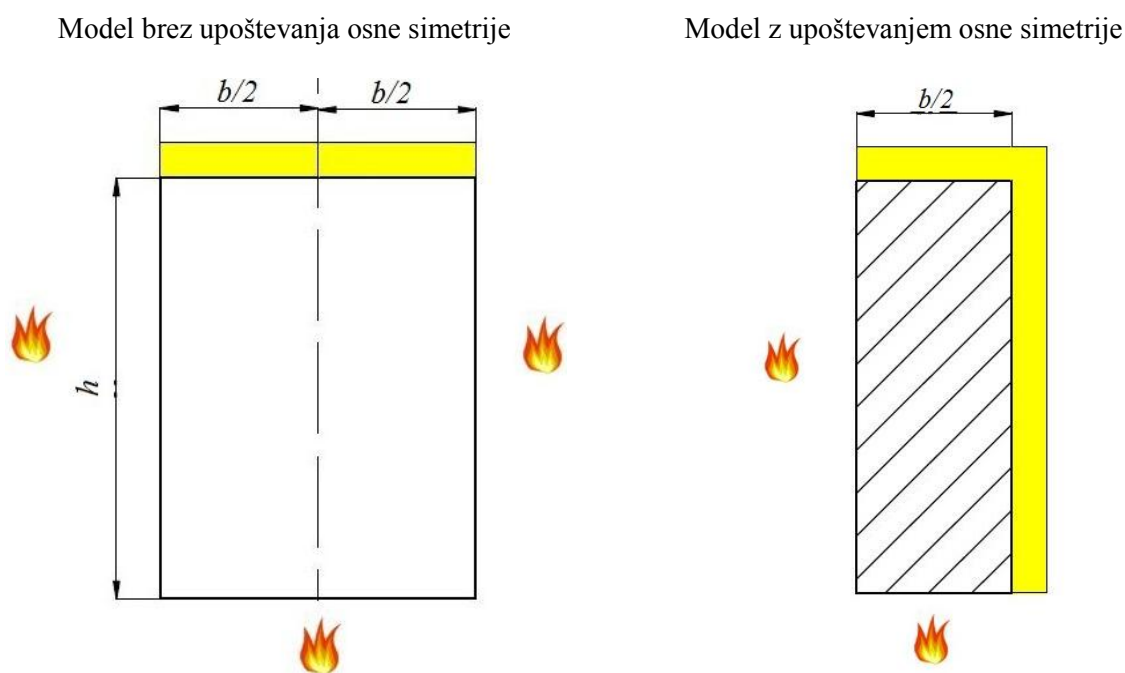
Slika 13: Primerjava razvoja temperature s časom v točkah T1, T2 in T3

V primerih 1 in 5 je bil odvod funkcije f_w prestrm, zato so se v računu pojavile težave pri konvergenci. V vseh ostalih primerih je bil račun uspešno zaključen. Iz rezultatov (slika 13) je razvidno, da v kolikor parametre spreminjamo znotraj preverjenih meja, spremembe praktično ne vplivajo na rezultate. Minimalne razlike se kažejo v fazi, ko so temperature v točki med 0 in 200 °C, vendar pa te razlike na globalno sliko segrevanja nimajo vpliva.

Iz analiz povzamemo tudi, da nobena izmed variant zapisa odvoda funkcije f_w ni bolj ugodna iz numeričnega vidika, saj je bilo v vseh primerih za izračun potrebno približno enako število iteracij in približno enak računski čas.

6.2 ANALIZA POŽARNO ZAŠČITENEGA LESENEGA ELEMENTA

Vse analize, ki so prikazane v nadaljevanju smo izvedli na lesenem nosilcu s prerezom $h/b=24\text{cm}/18\text{cm}$. Pri lesu smo uporabili materialne karakteristike, ki jih podaja standard [10], za gostoto lesa pri sobni temperaturi smo privzeli vrednost 420kg/m^3 , za začetna relativno vlažnost pa 12%. Nosilec je bil požaru izpostavljen s treh strani (levo, desno in spodaj). V primerih kjer smo obravnavali požarno zaščitene element, smo na vseh obremenjenih robovih upoštevali še 2 cm debelo zaščitno plast narejeno iz mavčnih plošč. Materialne karakteristike za mavčne plošče, ki smo jih uporabili so podane v razdelku 5.2.



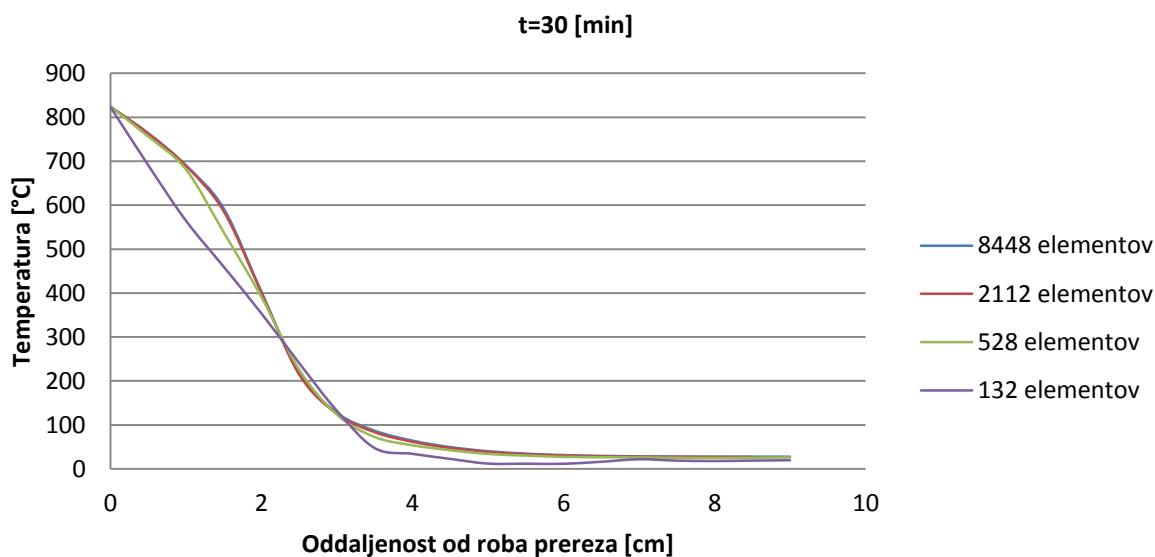
Slika 14: Model obravnavanega elementa

Da smo se izognili potrebi po upoštevanju prenosa toplote v vzdolžni smeri nosilca, smo predpostavili, da nosilec segrevamo enakomerno po celi dolžini in da je dolžina nosilca tako velika, da dogajanje na robovih elementa nima vpliva na potek segrevanja v obravnavanem prerezu. Poleg tega smo upoštevali še osno simetrijo prereza, vzdolž vertikalne osi skozi težišče, tako da smo lahko, namesto celotnega prereza, modelirali samo polovico. Na odrezanem robu smo upoštevali simetrijski robni

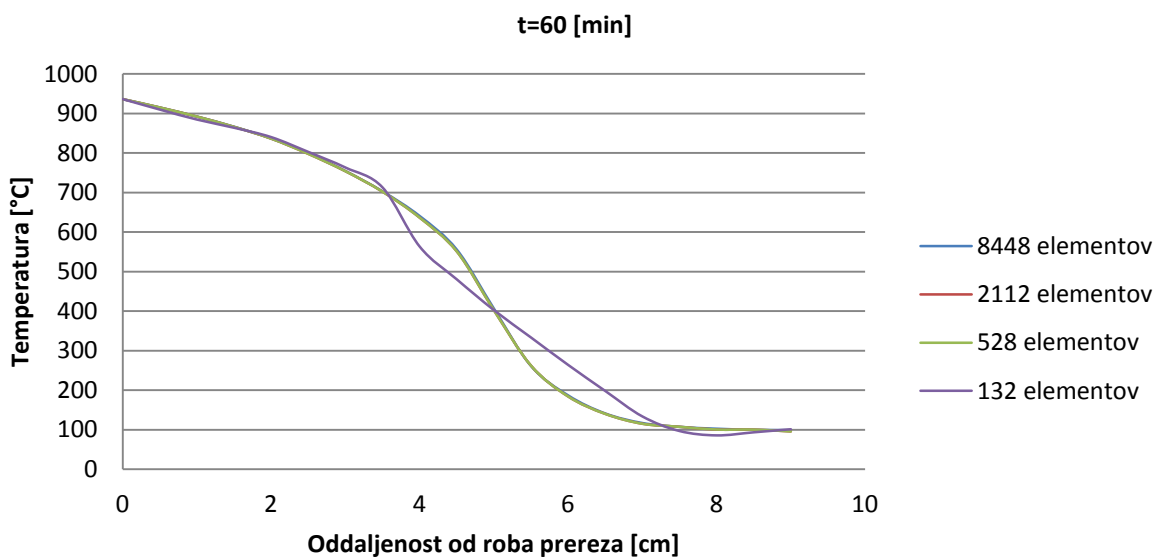
pogoj, ki pravi, da toplotnega toka skozi ta rob ni - to je značilnost izoliranega roba (desni element na sliki 14). Za simuliranje požara smo uporabili standardno krivuljo skladno s standardom [10].

6.2.1 VPLIV GOSTOTE MREŽE KONČNIH ELEMENTOV NA NATANČNOST RAČUNA

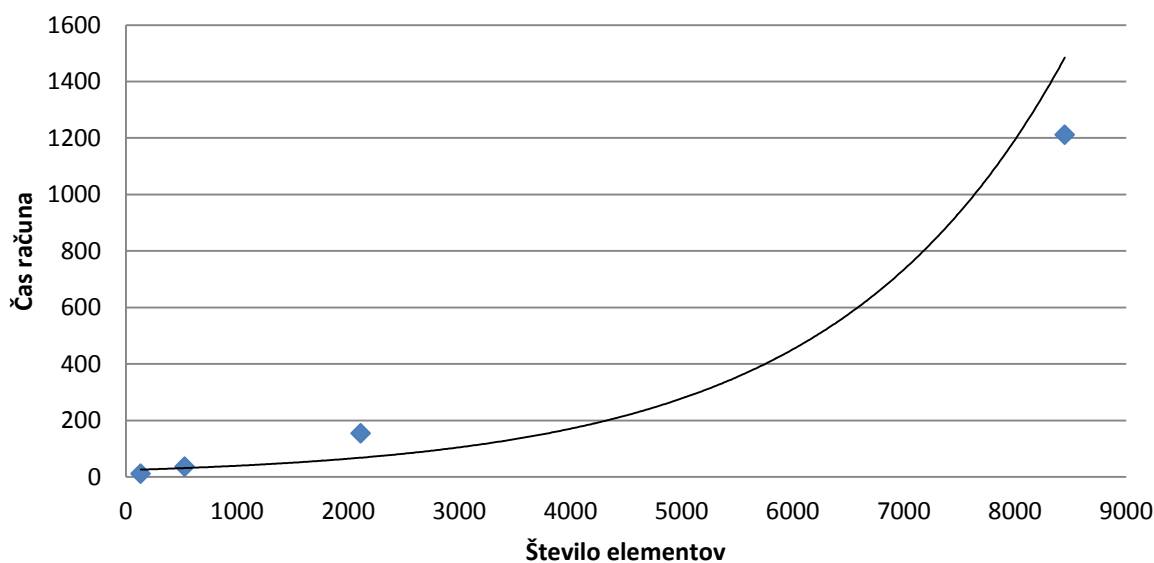
Načeloma velja, da z zgoščevanjem mreže končnih elementov povečamo natančnost rezultatov. Vendar pa se z gostoto mreže ne izplača pretiravati. Ob vedno bolj gosti mreži začnejo rezultati konvergirati k neki točni vrednosti in zato zgoščevanje od neke točke naprej več nima smisla. To trditev potrjuje tudi analiza, ki smo jo naredili. Pri različnih gostotah mreže smo preverjali potek temperature po prerezu. Iz grafov na slikah 15 in 16 vidimo, da je potek pri elementih razdeljenih na 2112 in 8448 elementov identičen. To pomeni, da je mreža razdeljena na 2112 končnih elementov že dovolj gosta, da se z njo zagotovi primerna natančnost rezultatov. Da z gostoto mreže res ni pametno pretiravati lahko vidimo tudi iz grafa prikazanega na sliki 17, kjer smo primerjali čas računa, ki je potreben za izračun problema pri določenem številu končnih elementov. Izkaže se, da se z večanjem števila uporabljenih končnih elementov računski čas povečuje.



Slika 15: Vpliv gostote mreže končnih elementov na natančnost rezultatov



Slika 16: Vpliv gostote mreže končnih elementov na natančnost rezultatov



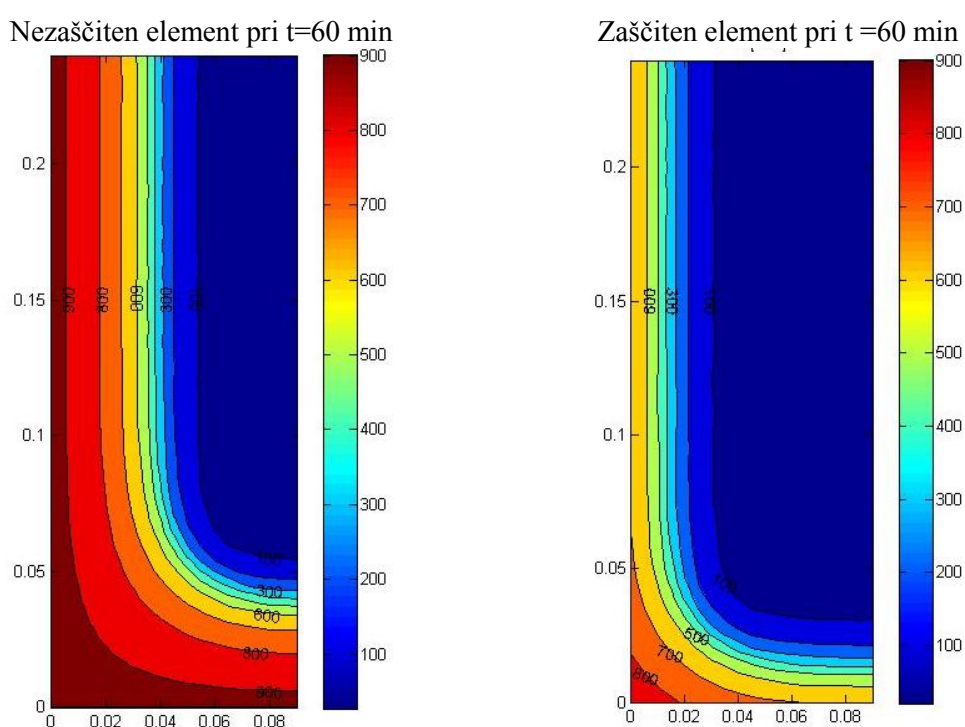
Slika 17: Vpliv števila uporabljenih končnih elementov na čas računa

6.2.2 Primerjava segrevanja zaščitene in nezaščitene elementa

Pri primerjavi smo se osredotočili na to, kako hitro v prerezu napreduje proces oglenenja pri lesenih elementih, ki so zaščiteni z mavčnimi ploščami in pri elementih, ki te zaščite nimajo. Uporabili smo predpostavko iz standarda [10], ki pravi, da se kot zoglenel upošteva tisti del lesenega prereza, pri

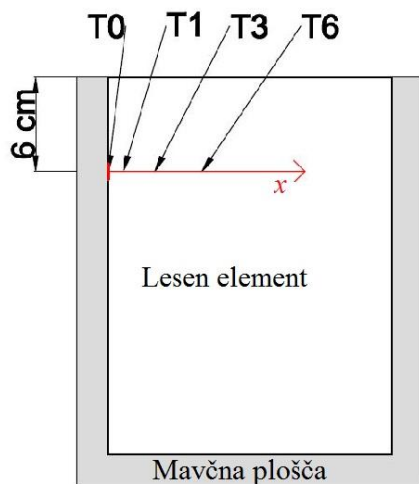
katerem je temperatura presegla 300°C . Koordinata x ima izhodišče na meji med lesenim elementom in zaščitnimi ploščami (slika 19).

Razlika o višini temperatur v prerezu med zaščitenim in nezaščitenim nosilcem je vidna že na prvi pogled. Če pogledamo temperaturo na robovih elementa vidimo, da se pri zaščitenem giblje okoli 700°C (razen v vogalu spodaj levo, kjer je nekoliko višja), pri nezaščitenem pa le-ta presega 900°C . Poleg tega, je območje na katerem temperatura še ni presegla 100°C , pri zaščitenem veliko večje kot pri nezaščitenem.

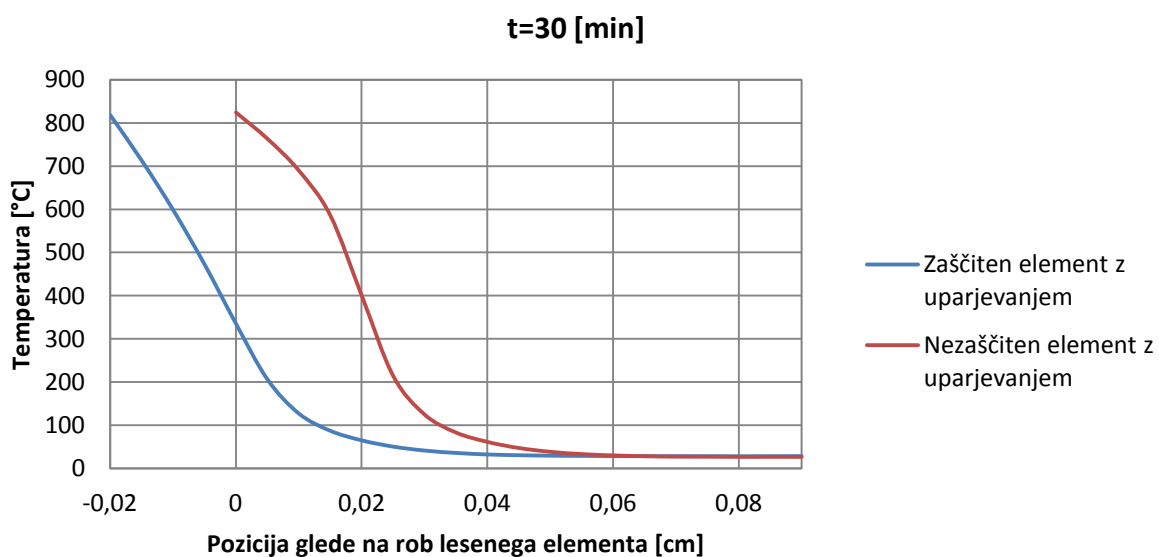


Slika 18: Razpored temperature po prerezu pri zaščitenem in nezaščitenem elementu

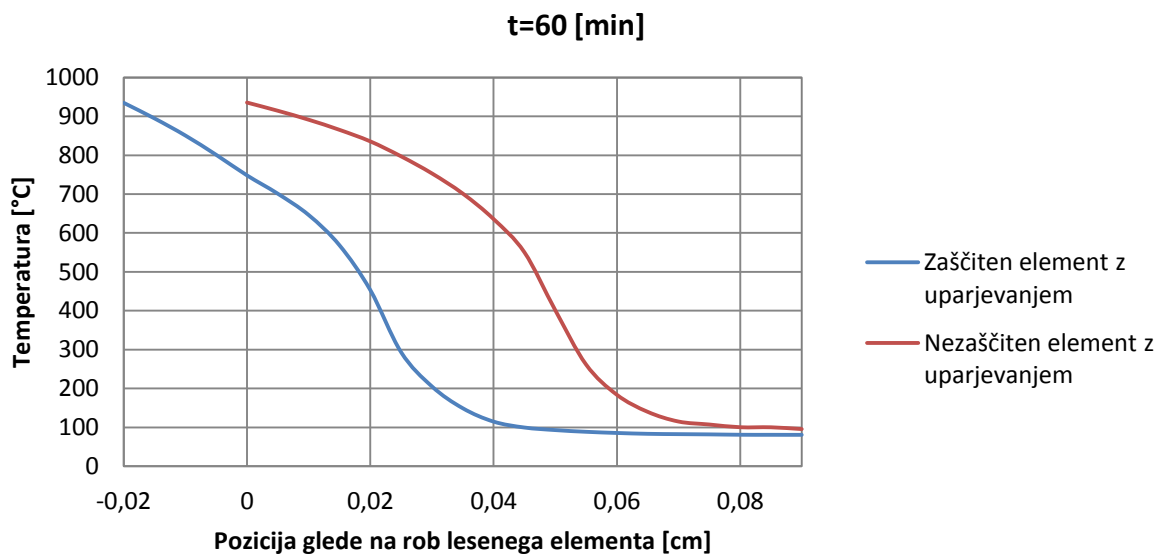
Na sliki 20 lahko vidimo, kakšen je potek temperature po globini prereza na višini 6 cm pod zgornjim robom elementa. Temperaturi na robu elementa po 30-minutni izpostavljenosti sta 810°C (rdeča črta), v nezaščitenem in 320°C (modra črta), v zaščitenem elementu. Kar pomeni, da so se na zaščitenem elementu, na površini, pravkar začeli kazati prvi znaki oglenenja, medtem ko je pri nezaščitenem elementu, zoglenelga že več kot 2 cm prereza. Po 60 minutah izpostavljenosti je del zoglenelga prereza pri nezaščitenem že 5,5 cm pri zaščitenem pa le 2,5 cm. Učinkovitost požarne zaščite je še bolj razvidna iz slike 22. Tu lahko vidimo, da je stopnja zoglenelosti zaščitenega prereza po 60-minutni izpostavljenosti požaru približno enaka, kot je pri nezaščitenem že po 30 minutah.



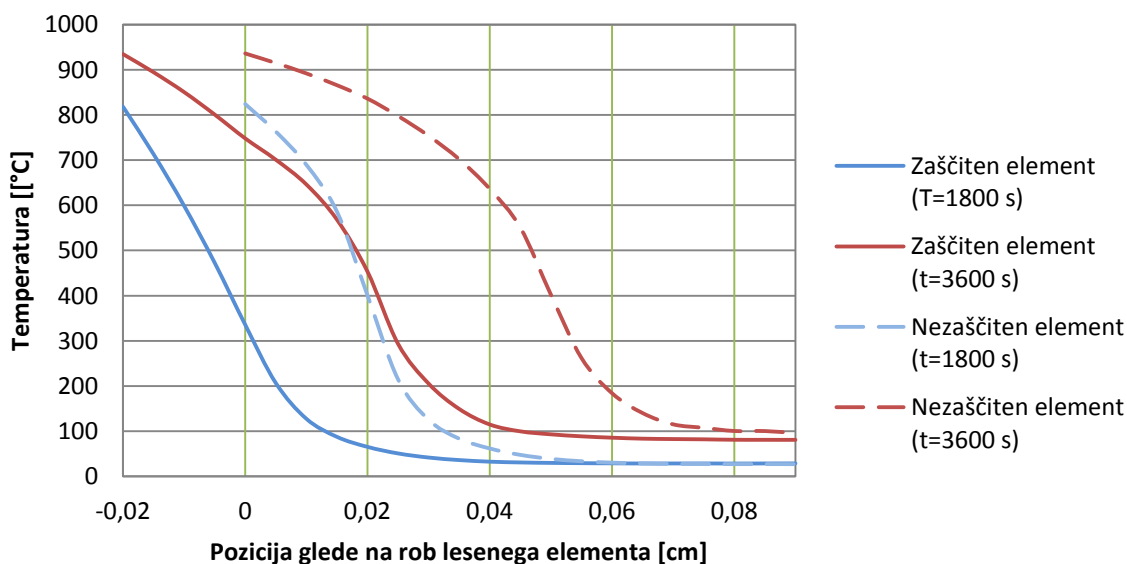
Slika 19: Položaj točk



Slika 20: Razpored temperature po prerezu pri času t=30 min



Slika 21: Razpored temperature po prerezu pri času t=60 min



Slika 22: Učinek požarne zaščite

6.2.3 Vpliv uparjevanja vode na hitrost segrevanja prereza

Pri toplotni analizi nas je zanimal tudi vpliv, ki ga ima uparjevanje vode na segrevanje prereza. V ta namen smo izvedli štiri simulacije požara, in sicer na:

- zaščitenem nosilcu z upoštevanjem uparjevanja,
- zaščitenem nosilcu brez upoštevanja uparjevanja,
- nezaščitenem nosilcu z upoštevanjem uparjevanja,

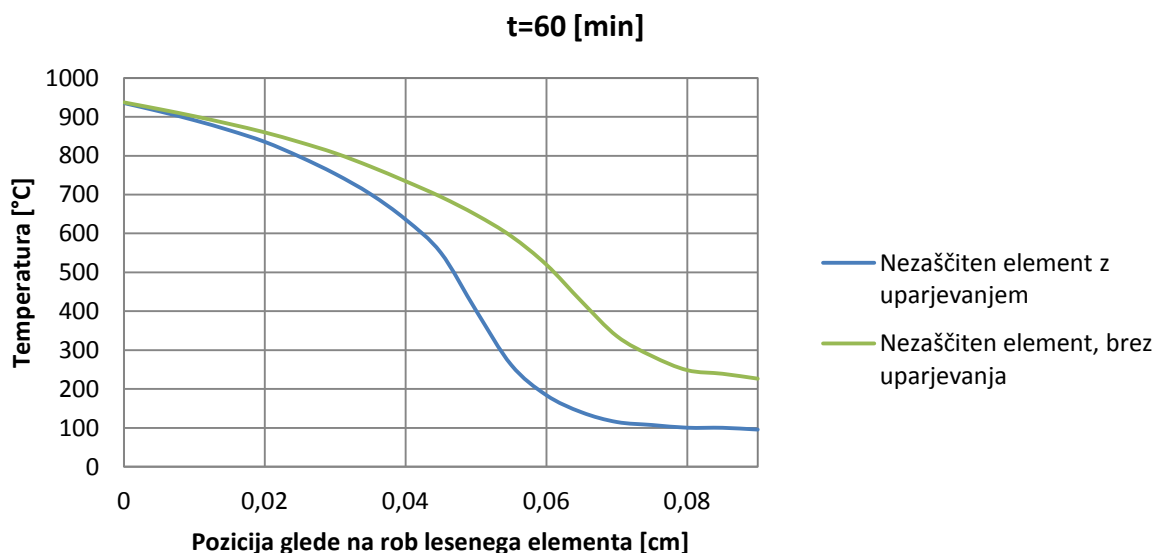
- nezaščitenem nosilcu brez upoštevanja uparjevanja.

Vpliv uparjevanja smo v računu zajeli s povečanjem specifične toplote na območju okoli temperature 100°C , kot je prikazano na sliki 6 (rdeča črta). Položaji obravnavanih točk (T0, T1, T3 in T6) za primer zaščitenega lesenega elementa so prikazani na sliki 19. Pri oznaki točke številka ob oznaki T pomeni koordinato x v cm, npr. točka T3 se nahaja na globini 3 cm.

Kot je bilo pričakovano, se je prerez, kjer vpliva uparjevanja nismo upoštevali, segreval hitreje kot prerez, kjer je bil ta vpliv upoštevan (slika 23). Kar je pri tem bolj zanimivo je trend, ki kaže, da se vpliv, ki ga ima uparjevanje na hitrost segrevanja z globino povečuje (slika 23 in 24).

Zaradi slednje ugotovitve smo v nadaljevanju raziskali:

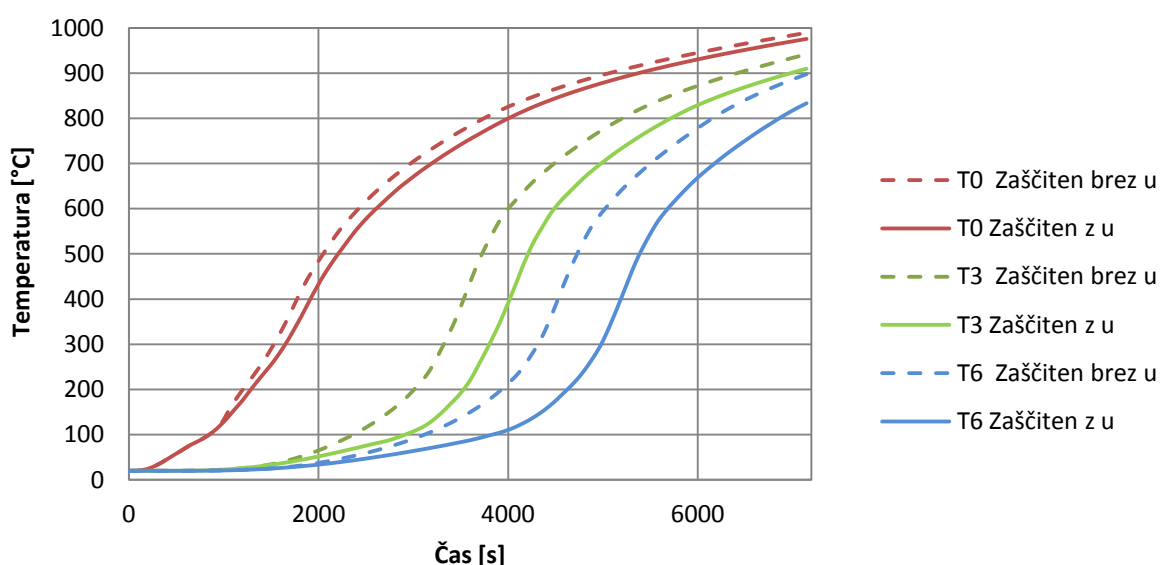
- kakšna je povezava med hitrostjo segrevanja prereza in velikostjo vpliva, ki ga ima uparjevanje vode na hitrost segrevanja,
- kakšen vpliv ima požarna zaščita na hitrost naraščanja temperature v elementu in
- ali med zaščitenimi in nezaščitenimi elementi obstajajo razlike v vplivu uparjevanja vode na hitrost segrevanja elementa.



Slika 23: Vpliv uparjevanja vode na razpored temperature po prerezu pri $t=60$ min

Na slikah 25, 26, 27 in 28 so izrisane primerjave poteka segrevanja v točkah T0, T1, T3 in T6. Kot smo že omenili prej, je v toplotni analizi zelo pomemben parameter, kdaj je v določeni točki došežena temperatura 300°C . Zato bo primerjava velikosti zamika, ki nastane zaradi uparjevanja potekala pri tej

temperaturi. Vidimo lahko, da se z globino vpliv uparjevanja povečuje, tako pri požarno zaščitenem, kot tudi pri nezaščitenem elementu. Poleg tega opazimo, da je v točkah T0 in T1 vpliv uparjevanja na segrevanje pri zaščitenem elementu večji, kot pri nezaščitenem. Vendar pa je ta razlika v točki T3 že manjša, v točki T6 pa je praktično ni mogoče zaslediti. Predvidevamo, da je to posledica hitrosti naraščanja temperature (naklon krivulje) v posamezni točki, v času, ko je tam temperatura okoli 100°C. Kot je razvidno na slikah 25, 26, 27 in 28, obstaja v tem času v točkah T0 in T1 velika razlika v hitrosti naraščanja temperature med zaščitenim in nezaščitenim elementom. Medtem ko ta razlika v T3 in T6 ni tako velika.

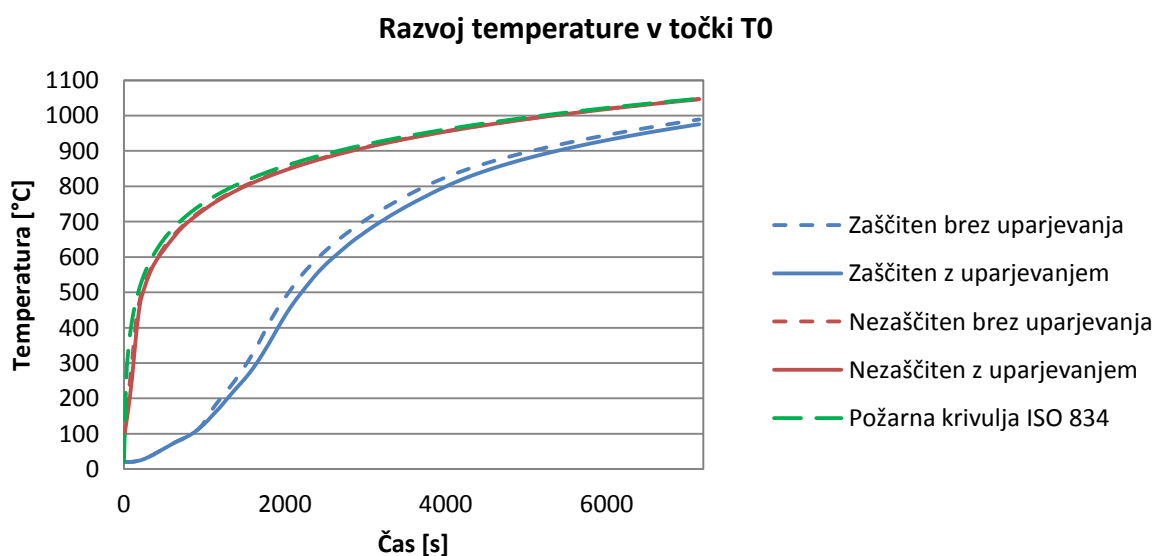


Slika 24: Primerjava razvoja temperature s časom pri zaščitenem elementu z upoštevanjem in brez upoštevanja uparjevanja vode v točkah T0, T3 in T6

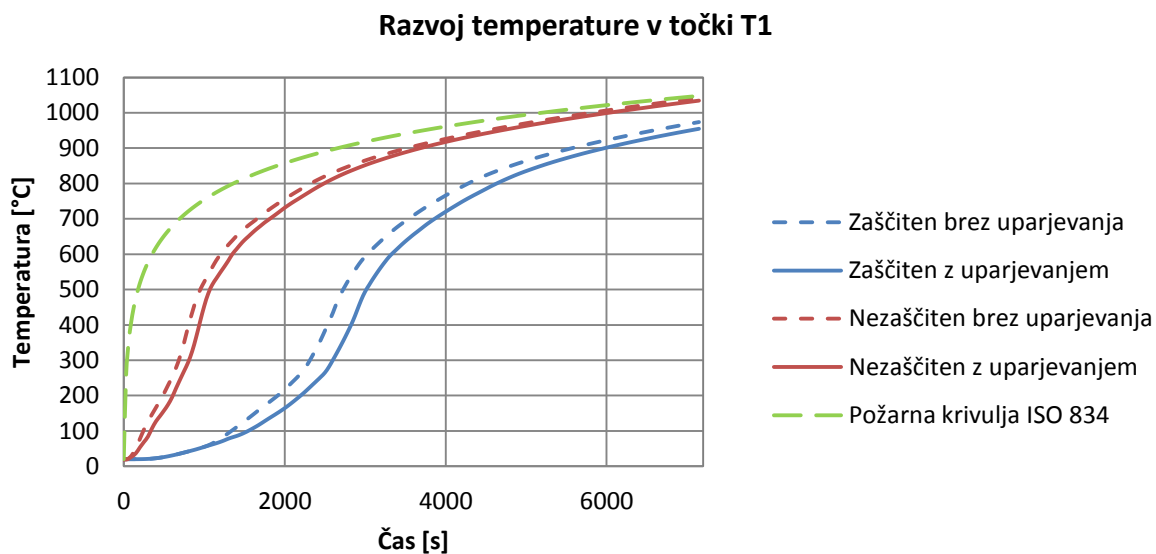
Da bi boljše razumeli kakšen vpliv ima hitrost segrevanja elementa na vpliv uparjevanja, si od blizu pogledimo proces uparjevanja vode. Predstavljajmo si eksperiment, pri katerem v zaprti, toplotno izolirani posodi, segrevamo vodo in pri tem merimo temperaturo. Najprej se bo voda iz začetne temperature segrela na 100°C, nakar se bo začel proces uparjevanja vode. Tekom tega procesa, se temperatura v posodi ne bo dvignila. Dvigovati se bo začela šele, ko bo vsa voda v posodi uparjena. Proces analogen zgoraj opisanemu, se vrši tudi znotraj lesenega elementa, le da se tam uparitvena temperatura giblje med 100°C in 120°C. Za uparitev enega litra vode je potrebno v posodo dovesti 2257 kJ energije. Kako dolgo bo trajal proces uparjevanja je zato odvisen od tega, kako hitro bomo dovajali energijo v posodo. Večji kot bo toplotni pretok v posodo, hitreje bomo dovedli potrebno energijo. Večji kot je toplotni pretok pa v splošnem pomeni tudi hitrejše segrevanje. Iz hitrosti segrevanja neke točke lahko torej posredno sklepamo o velikosti toplotnega pretoka.

V točki T1, pri zaščitenem elementu, kjer upoštevamo uparjevanje, npr. na sliki 26 (modra polna črta), vidimo, da se prvih 400 sekund temperatura v točki ne dviguje, ker se v tem času vsa energija zadrži v plasti požarne zaščite in v prvem centimetru lesenega elementa, zato je toplotni pretok skozi to točko enak nič. V nadaljevanju, ko so zunanje plasti že nekoliko segrete, se začne šibek toplotni tok pretakati tudi skozi točko T1. V času med 2000 s in 3000 s teče skozi točko največji toplotni pretok, nato se začne temperatura v okolici točke približevati temperaturi požara, s tem pa se toplotni tok skozi točko manjša.

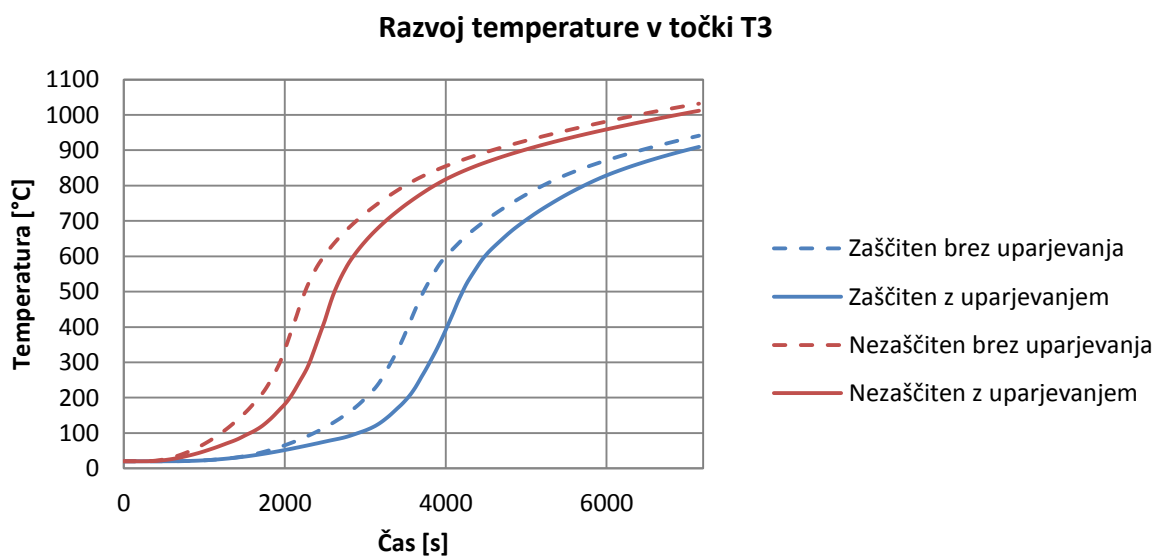
Če sedaj ponovno pogledamo hitrost segrevanja v točkah T0, T1, T3 in T6 v času, ko se temperatura v njih giblje okoli 100°C. V T0 in T1 lahko na podlagi hitrosti segrevanja sklepamo, da je toplotni tok skozi točko pri nezaščitenem elementu večji, kot pri zaščitenemu, kar pomeni, da bo pri slednjem potrebnega več časa, da se na območje vnese vsa energija, ki jo voda potrebuje za uparitev. V tem času se temperatura na območju ne bo dvigovala, zaradi česar bo nastal zamik v segrevanju elementa. V T3 in T6 lahko vidimo, da je hitrost naraščanja temperature veliko manjša kot v T0 in T1, kar pomeni, da je tudi toplotni tok skozi točki manjši. Zaradi tega bo v T3 in T6 potrebnega več časa, da se na območje dovede vsa toplota potrebna za uparitev, zaradi česar je zamik pri segrevanju v T3 in T6 večji kot v T0 in T1. Če primerjamo še hitrosti segrevanja v T3 in T6, med zaščitenim in nezaščitenim elementom v posamezni točki, vidimo, da sta hitrosti precej podobni (pri T3 nekoliko manj kot pri T6), kar se kaže tudi v podobnih velikostih zamikov segrevanja med zaščitenim in nezaščitenim elementom znotraj posamezne točke.



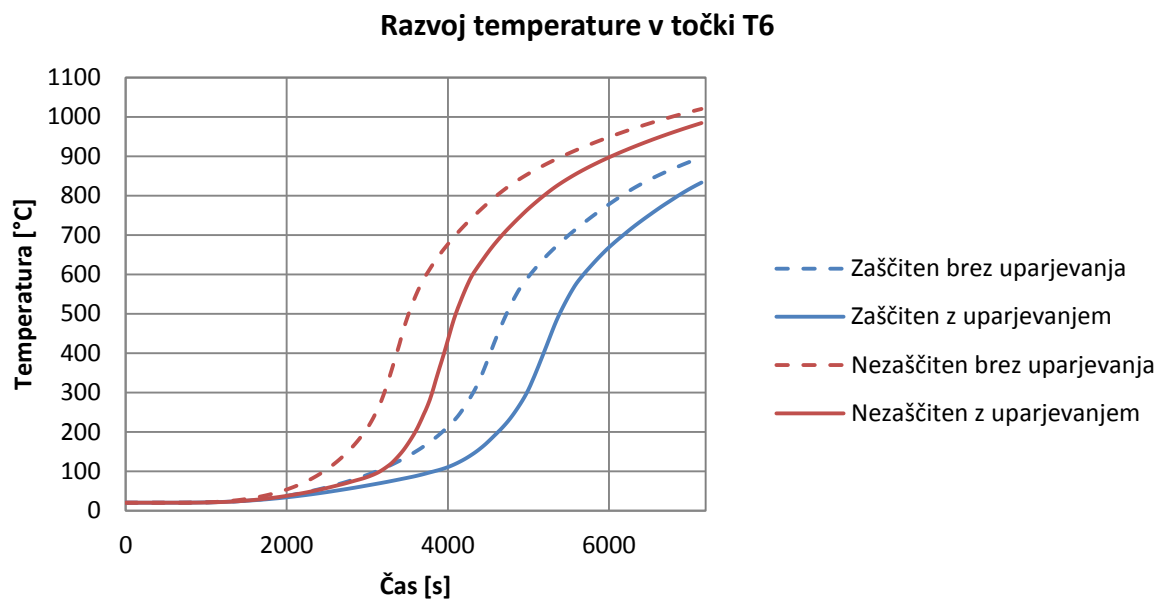
Slika 25: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T0



Slika 26: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T1



Slika 27: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T3



Slika 28: Vpliv uparjevanja na razvoj temperature v T6

7 ZAKLJUČEK

V okviru diplomske naloge smo spoznali eno izmed možnosti uporabe metode končnih elementov pri reševanju problemov povezanih s prenosom toplote po trdni snovi. Ugotovili smo, da lahko pri poenostavljeni požarni analizi zagotovimo dovolj dobro natančnost rezultatov že z uporabo najenostavnejše oblike ploskovnega končnega elementa – trikotnika, pri tem pa je računski čas veliko krajši kot, če bi uporabili bolj natančne npr. štirikotne končne elemente. Vpliv vlage smo v modelu zajeli s povečanjem specifične temperature lesa tako kot to predvideva SIST EN-1991-1-2. Za potrebe modeliranja smo krivuljo nekoliko modificirali. Da bi dokazali da predlagane modifikacije ne vplivajo na globalno sliko ogrevanja prereza smo izvedli parametrično študijo, kjer smo to tudi dokazali. Osrednja tema v nalogi je bila študija vpliva toplotne izolacije in uparjevanja vode na hitrost ogrevanja prereza. Kot glavni kriterij za primerjavo smo uporabili globino zoglenelosti prereza, ki je v skladu s standardom določena z izotermo 300°C. Ugotovili smo da se zaščiteni elementi segrevajo občutno počasneje od nezaščitenih. Podobno se elementi v katerih upoštevamo vpliv uparjevanja segrevajo počasneje od tistih kjer uparjevanja ne upoštevamo.

Zanimalo nas je še ali obstaja razlika v velikosti vpliva uparjevanja na segrevanje med zaščitenimi in nezaščitenimi elementi. Ugotovili smo, da v točkah, ki so blizu ogrevani površini razlika obstaja, vendar se le ta z globino zmanjšuje. Predvidevamo, da se razlika ustvari zaradi hitrosti segrevanja elementa v temperaturnem območju okoli 100°C. V primerih, ko je hitrost segrevanja v tem temperaturnem območju velika se v element zelo hitro dovede dovolj energije, da pride do uparitve vode in s tem nadaljnega dvigovanja temperature, medtem ko je v primeru, če je hitrost segrevanja nižja, za dovod toplote potrebne za uparitev vode potreben daljši čas, kar povzroči daljše stagniranje temperature in s tem večjo razliko v vplivu uparjevanja. Do predvidevanj zapisanih v zadnjem odstavku smo prišli na podlagi analize le enega primera. Da bi lahko zapisano potrdili ali ovrgli bi bilo potrebno narediti obsežnejšo parametrično študijo, kjer bi se posvetili analizi vpliva uparjevanja na segrevanje izoliranih in neizoliranih elementov.

VIRI

- [1] Gorišek, Ž. 2009. Les zgradba in lastnosti. Njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- [2] Boeing consult. 2014.
<http://www.boeingconsult.com/tafe/mat/Timber/HowTreeGrows-OH.htm>
(Pridobljeno 5.9.2014.)
- [3] Hozjan, T. Pazlar, T. Srpčič, S. 2012. Experimental and numerical analysis of glulam beams in natural climatic conditions. World conference on timber engineering (WCTE=, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012. 321-326.
- [4] Žitnik, J. 2009. Gradbeniški priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 693 str.
- [5] Turk, G. 1987. Programska oprema za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote z upoštevanjem raznih robnih pogojev in notranjega vira toplote zaradi hidratacije cementa. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Turk): 93 str.
- [6] Long, C.A., 1999. Essential heat transfer. London, Longman: 387 str.
- [7] Kladnik, R. 2013. Fizika za srednješolce 2. Energija: toplota, zvok, svetloba. Ljubljana, DZS: 240 str.
- [8] Študijsko gradivo Katedre za mehaniko. 2014.
<http://www.km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/POZAR/index.html> (Pridobljeno 18. 9. 2014.)
- [9] Lewis, R. W., Nithiarasu P., Seetharamu K. N. 2004. Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow. Chichester, Wiley: 341 str.
- [10] SIST EN 1991-1-2:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije

- [11] Rahanian I., Wang Y. 2009. Thermal conductivity of gypsum at high temperatures. *Acta Polytechnica*. 49, 1: 16-20.

- [12] Di Capua D., Mari A.R. 2007. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire. *Fire safety journal*. 42: 139-149

