



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

**- PRILOGE H KONČNEMU POROČILU -**

Pedagoški mentor: doc. dr. Tomaž Hozjan  
Delovni mentor: dr. Matej Rozman  
Avtorji: *Anka Jenko*  
*Urška Dolinar*  
*Jan Špiler*  
*David Božiček*  
*Dušan Fister*  
*Anže Egart*  
*Sabina Huč*  
*Marko Kravos*

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.

## KAZALO

A.1 UVOD.....	A-1
A.2 POŽARNI SCENARIJI.....	A-1
A.2.2 Požarni scenariji v stanovanju.....	A-1
A.2.3 Požarni scenariji v bolnišničnih sobah.....	A-2
A.2.4 Požarni scenariji v hotelskih sobah.....	A-3
A.2.5 Požarni scenarij v knjižnicah.....	A-4
A.2.6 Požarni scenarij v pisarnah.....	A-5
A.2.7 Požarni scenarij v šolskih razredih.....	A-6
A.2.8 Požarni scenarij v nakupovalnih središčih.....	A-7
A.2.9 Požarni scenarij v kinu.....	A-8
A.2.10 Požarni scenarij v garažnih stavbah.....	A-9
A.2.11 Primerjava različnih požarnih sektorjev.....	A-10
A.3 PIROLIZA.....	A-11
A.3.1 Podatki za vnos pirolize v model FDS.....	A-11
A.3.2 Vnos podatkov v program.....	A-13
A.4 MODELIRANJE NARAVNEGA IN PRISILNEGA PREZRAČEVANJA.....	A-14
A.4.1 Modeliranje.....	A-15
A.4.1.1 Reakcija.....	A-15
A.4.1.2 Hitrost sproščanja požara.....	A-16
A.4.2 Naravno prezračevanje.....	A-17
A.4.2.1 Ugotovitve naravnega prezračevanja.....	A-17
A.4.3 Prisilno prezračevanje.....	A-18
A.4.3.1 Modeliranje prisilnega prezračevanja.....	A-19
A.4.3.2 Ugotovitve prisilnega prezračevanja.....	A-20
B.1 UVOD.....	B-1
B.2 Toplotna analiza.....	B-2
B.3 Temperaturno odvisni materialni parametri betona.....	B-4
B.4 Temperaturno odvisni materialni parametri lesa.....	B-6
B.5 UPORABA GRAFIČNEGA VMESNIKA ZA PROGRAM Heatko ZA IZRAČUN TEMPERATURNIH PROFILOV.....	B-1
B.6 VPLIV UPARJEVANJA NA POTEK RAZVOJA TEMPERATURE PO LESENM ELEMENTU.....	B-12
C.1 Opis delovanja grafičnega vmesnika za določanje požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov skladno s standardi Evrokod.....	C-1
C.1.1 Les.....	C-2
C.1.2 Beton.....	C-2



C.2 Primeri izračunov.....	C-4
C.2.1 Les.....	C-4
C.2.1.1 Standardna požarna krivulja .....	C-4
C.2.1.1.1 Primer: Standardna požarna krivulja .....	C-6
C.2.1.1.2 Prostoležeči nosilec .....	C-7
C.2.1.1.3 Steber .....	C-11
C.2.1.2 Parametrična požarna krivulja .....	C-13
C.2.1.2.1 Primer: Parametrična požarna krivulja.....	C-13
C.2.1.2.2 Konzola.....	C-13
C.2.2 Beton .....	C-16
C.2.2.1 Požarni scenarij.....	C-16
C.2.2.2 Mehanska analiza.....	C-17
C.2.2.2.1 Metoda izoterme 500°C .....	C-17
VIRI.....	C-25

## KAZALO SLIK

Slika A - 1: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v stanovanju.....	A-2
Slika A - 2: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v bolnišničnih sobah.....	A-3
Slika A - 3: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v hotelskih sobah. ....	A-4
Slika A - 4: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v knjižnicah. ....	A-5
Slika A - 5: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v pisarnah. ....	A-6
Slika A - 6: Normiran prikaz hitrosti sproščanja toplote v šolskih razredih. ....	A-7
Slika A - 7: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v nakupovalnih središčih. ....	A-8
Slika A - 8: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v kinu. ....	A-9
Slika A - 9: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v garažnih prostorih.....	A-10
Slika A - 10: Normirani prikaz primerjav hitrosti sproščanja toplote v različnih požarnih sektorjih. ....	A-10
Slika A - 11: Nenormiran prikaz primerjav hitrosti sproščanja toplote v različnih požarnih sektorjih. ....	A-11
Slika A - 12: Primerjava parametrov A in E za različne vrste lesa. ....	A-13
Slika A - 13: Razpon različnih podatkov za polietilen, ki jih podaja ena literatura (Lautenberger, 2007). ....	A-13
Slika A - 14: Določanje parametrov A, E in n. ....	A-14
Slika A - 15: Tloris požarnega sektorja.....	A-14
Slika A - 16: Optimiziran model obravnavanega požarnega sektorja.....	A-15
Slika A - 17: Hitrost sproščanja toplote normirana na $Q_{max}$ . ....	A-16
Slika A - 18: Hitrost sproščanja toplote za Ogenj1 in Ogenj2. ....	A-17
Slika A - 19: Skica primera ventilacije 1. ....	A-18
Slika A - 20: Skica primera ventilacije 2. ....	A-19
Slika A - 21: Skica primera ventilacije 3. ....	A-19
Slika A - 22: Model s prisilnim prezračevanjem. ....	A-20
Slika A - 23: Primerjava HRR po času pri različnih primerih ventilacije z izpihovanjem $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	A-21
Slika A - 24: Primerjava HRR za »Primer ventilacije 1« pri odprtem in zaprtem oknu.....	A-21
Slika A - 25: Primerjava HRR za »Primer ventilacije 2« pri odprtem in zaprtem oknu.....	A-22
Slika A - 26: Primerjava HRR za »Primer ventilacije 2« pri odprtem in zaprtem oknu.....	A-22
Slika A - 27: Temperatura v določeni točki nosilca v odvisnosti od časa za različne primere ventilacije pri vpihovanju $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	A-23
Slika A - 28: Primerjava HRR pri »Primeru ventilacije 1« za izpihovanje $5 \text{ m}^3/\text{s}$ in $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .A-24	A-24
Slika A - 29: Primerjava HRR pri »Primeru ventilacije 2« za izpihovanje $5 \text{ m}^3/\text{s}$ in $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . ..	A-24
Slika A - 30: Primerjava HRR pri »Primeru ventilacije 3« za izpihovanje $5 \text{ m}^3/\text{s}$ in $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .A-25	A-25
Slika B - 1: Grafi nominalnih krivulj temperatura-čas (Egart, 2012). ....	B-1
Slika B - 2: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za $t=30 \text{ min}$ , $t=60 \text{ min}$ in $t=90 \text{ min}$ pri požaru ISO-384 (Egart, 2012). ....	B-2
Slika B - 3: Graf specifične toplote v odvisnosti od temperature, ki ga podaja SIST EN 1992-1-2 in Tenchev s sodelavci (Egart, 2012). ....	B-4
Slika B - 4: Graf padanja gostote betona po SIST EN 1992-1-2 (Egart, 2012). ....	B-5
Slika B - 5: Graf zgornje in spodnje meje toplotne prevodnosti betona v odvisnosti od temperature (SIST EN 1992-1-2: 2005). ....	B-6

Slika B - 6: Graf toplotne prevodnosti (SIST EN 1995-1-2: 2004).....	B-7
Slika B - 7: Graf specifične toplote (SIST EN 1995-1-2: 2004).....	B-8
Slika B - 8: Graf med gostoto in gostoto suhega lesa (SIST EN 1995-1-2: 2004).....	B-8
Slika B - 9: Pogovorno okno s pomočjo katerega uporabnik podaja parametre in pregleduje rezultate.....	B-9
Slika B - 10: Rezultat izračuna toplotne analize (temperaturni profil).....	B-10
Slika B - 11: Izris temperaturnega profila brez ponovnega izračuna.....	B-11
Slika B - 12: Temperaturni profil betonskega pravokotnega prereza pri času tridesetih minut.....	B-12
Slika B - 13: Temperaturni profil betonskega pravokotnega prereza pri času šestdesetih minut.....	B-12
Slika B - 14: Model obravnavanega elementa.....	B-13
Slika B - 15: Položaj točk T0, T3 in T6.....	B-13
Slika B - 16: Razpored temperature po prerezu.....	B-14
Slika B - 17: Vpliv uparjevanja vode na razpored temperature po prerezu pri t=60 min (Špiler, 2014).....	B-15
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).....	B-15
Slika C - 1: Okno "O programu" je prvo okno, ki se nam pojavi ob zagonu.....	C-1
Slika C - 2: V oknu "začetek" začnemo z uporabo programa tako, da izberemo zeleni material.....	C-1
Slika C - 3: Primer rezultatov mehanske analize lesenega elementa.....	C-2
Slika C - 4: Primer rezultatov mehanske analize armiranobetonskega elementa.....	C-3
Slika C - 5: Okence v programskem vmesniku za izbiro statičnega sistema.....	C-6
Slika C - 6: Podatki za prostoležeči nosilec izpostavljen standardni požarni krivulji.....	C-7
Slika C - 7: Izbira požarne krivulje-standarda požarna krivulja.....	C-8
Slika C - 8: Rezultati programskega vmesnika (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požaru iz treh smeri.....	C-8
Slika C - 9: Rezultati iz Excel-a (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požaru iz treh smeri.....	C-9
Slika C - 10: Rezultati programskega vmesnika (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih smeri.....	C-10
Slika C - 11: Rezultati iz Excel-a (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih smeri.....	C-10
Slika C - 12: Podatki za steber izpostavljen standardni požarni krivulji.....	C-11
Slika C - 13: Rezultati programskega vmesnika (Les C22)-Steber izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih smeri.....	C-12
Slika C - 14: Rezultati iz Excel-a (Les C22)-steber izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih smeri.....	C-12
Slika C - 15: Podatki za konzolo izpostavljeno parametrični požarni krivulji.....	C-14
Slika C - 16: Vnos podatkov za parametrično požarno krivuljo in izris požarne krivulje. ...	C-14
Slika C - 17: Rezultati programskega vmesnika (Les C30)-Konzola izpostavljena parametrični požarni krivulji iz treh smeri.....	C-15
Slika C - 18: Rezultati iz Excel-a (Les C30)-konzola izpostavljena parametrični požarni krivulji iz treh smeri.....	C-15
Slika C - 19: Požarne krivulje v skladu s SIST EN 1991-1-2:2002.....	C-17



Slika C - 20: Obremenitev armiranobetonskega prečnega prereza v požarnem projektnem stanju (SIST EN 1992-1-2: 2005).....	C-19
Slika C - 21: Podatki za prostoležeči nosilec.....	C-20
Slika C - 22: Izbira požarne krivulje-standarda požarna krivulja. ....	C-20
Slika C - 23: Okence za rezultate temperaturne analize.....	C-21
Slika C - 24: Rezultati izračunov programskega vmesnika: prostoležeči AB nosilec izpostavljen standardni požarni krivulji. ....	C-21
Slika C - 25: Rezultati izračunov s pomočjo Excel-a: prostoležeči AB nosilec izpostavljen standardni požarni krivulji. ....	C-22
Slika C - 26: Izbira požarne krivulje-ogljikovodikova požarna krivulja. ....	C-23
Slika C - 27: Rezultati izračunov programskega vmesnika: prostoležeči AB nosilec izpostavljen ogljikovodikovi požarni krivulji.....	C-23
Slika C - 28: Rezultati izračunov s pomočjo Excel-a: prostoležeči AB nosilec izpostavljen ogljikovodikovi požarni krivulji. ....	C-24

## KAZALO TABEL

Tabela A - 1: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za stanovanja (SIST EN 1991-1-2).....	A-2
Tabela A - 2: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za bolnišnice (SIST EN 1991-1-2).....	A-3
Tabela A - 3: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za bolnišnice (SIST EN 1991-1-2).....	A-4
Tabela A - 4: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za knjižnice (SIST EN 1991-1-2).....	A-4
Tabela A - 5: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za pisarne (SIST EN 1991-1-2).....	A-5
Tabela A - 6: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za šolske razrede (SIST EN 1991-1-2). ....	A-6
Tabela A - 7: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za nakupovalna središča (SIST EN 1991-1-2). ....	A-7
Tabela A - 8: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za kino (SIST EN 1991-1-2).....	A-8
Tabela A - 9: Parametra $t \propto$ in $RHRf$ za garažne prostore (SIST EN 1991-1-2).....	A-9
Tabela A - 10: Parametri A in E za različne materiale. ....	A-11
Tabela A - 11: Razmerje atomov goriva. ....	A-16

Tabela B - 1: Vrednosti za prestopni koeficient $\alpha_c$ [ $W/m^2 K$ ], ki jih podaja SIST EN 1991-1-2. .....	B-3
Tabela B - 2: Toplotna prevodnost lesa in zoglenega sloja (SIST EN 1995-1-2: 2005)....	B-6
Tabela B - 3: Specifična toplota in razmerje med gostoto in gostoto suhega lesa (SIST EN 1995-1-2: 2004). ....	B-7

Tabela C - 1: Koeficient $k_{s,T}$ za natezno armaturo. ....	C-3
Tabela C - 2: Koeficient $k_{s,T}$ za tlačno armaturo.....	C-4



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 A h končnemu poročilu:*

***Določanje požarnega scenarija in modeliranje  
naravnega požara s pomočjo programskega  
orodja FDS***



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.

## A.1 UVOD

Pri dimenzioniranju stavb je potrebno upoštevati morebitno požarno obtežbo, ki ji bo stavba izpostavljena v času njene življenjske dobe. Določitev požarne obtežbe je analogna določitvi koristne obtežbe pri sobni temperaturi, kjer se za različne namembnosti prostorov uporabijo različne vrednosti koristne obtežbe. Tukaj bomo najprej pregledali različne primere požarnih scenarijev, ki so določeni za različne namembnosti prostorov. Sledil bo natančnejši pregled pirolize. Pozornost smo namenili tudi dvema vrstama prezračevanja: naravno ter prisilno prezračevanje. Na koncu pa sledi še praktični primer izdelave različnih modelov prezračevanja ter izpis realnega poteka temperature po nosilcu, katera nam bo v naslednjem koraku omogočila dimenzioniranje nosilnih elementov v stavbi.

## A.2 POŽARNI SCENARIJI

Pri modeliranju požara je potrebno poznati potek sproščanja toplote s časom, ki ga določimo po formuli:

$$Q = 10^6 \left( \frac{t}{t_\alpha} \right)^2$$

$Q$       Hitrost sproščanja toplote [W]

$t$       Čas [s]

$t_\alpha$       Čas, potreben, da se doseže hitrost sproščanja toplote 1 MW [s]

$RHR_f$  predstavlja največjo količino sproščene toplote na 1 m<sup>2</sup> požara v nadzorovanih pogojih gorenja. Izraža se v enotah kW/m<sup>2</sup>. Parametra  $t_\alpha$  in  $RHR_f$  določimo glede na namembnost požarnega sektorja. Poznamo različne hitrosti (hitri, srednji in počasni) razvoja požara, ki so predvsem odvisni od količine gorljivega materiala v prostoru.

### A.2.2 Požarni scenariji v stanovanju

V stanovanju do izbruha požara lahko pride zaradi dejavnosti človeškega faktorja, zato neodvisno od funkcionalne in konstrukcijske zasnove obstaja določena verjetnost vžiga oziroma izbruha požara. V stanovanju lahko pride do vžiga stropne, stenske, talne obloge ter delov stanovanjske opreme. Da pride do gorenja, morajo biti poleg vira toplote oziroma vžiga, v zadostnih količinah oziroma koncentracijah prisotni tudi gorljivi materiali in oksidacijsko sredstvo, kamor prištevamo kisik, zrak in oksidant (Huč, 2013). Glede na potencialne vire vžiga je v stanovanjih potrebno predvideti in omejiti naslednje možne vzroke požara (Huč, 2013):

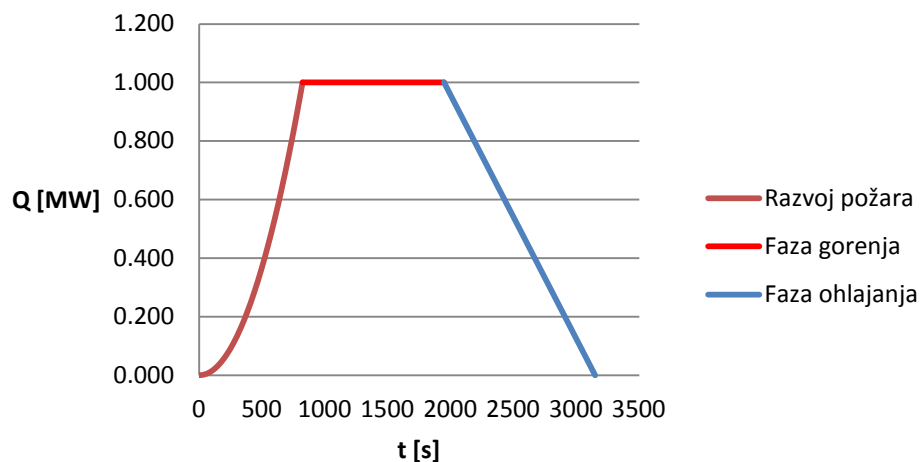
- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,

- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- malomarnost (odvržen cigaret, sveče),
- napake na plinski inštalaciji,
- neustrezno vzdrževanje kurilnih naprav in dimnikov,
- udarec strele in
- namerno podtaknjen požar.

Tabela A - 1: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za stanovanja (SIST EN 1991-1-2).

STANOVANJA		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Srednja	300	250

Podatki iz tabele A - 1 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 1.



Slika A - 1: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v stanovanju.

### A.2.3 Požarni scenariji v bolnišničnih sobah

V bolnišnični sobi lahko pride do izbruha požara zaradi dejavnosti človeškega faktorja, zato neodvisno od funkcionalne in konstrukcijske zasnove obstaja določena verjetnost vžiga oziroma izbruha požara. V bolnišnični sobi lahko pride do vžiga oblog, bolnišničnih postelj, bolnišnične opreme, omar za shranjevanje zdravil in raznih tekstilnih izdelkov. Glede na potencialne vire vžiga je v bolnišnični sobi potrebno predvideti in omejiti naslednje možne vzroke požara:

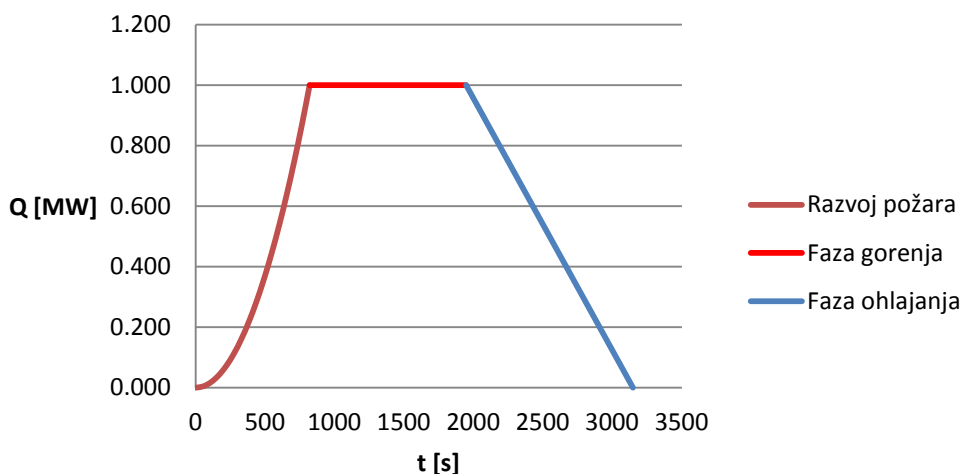
- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- malomarnost (odvržen cigaret),
- napake na plinski inštalaciji,

- udarec strele,
- namerno podtaknjen požar,
- nepravilno ravnanje z operacijskimi instrumenti.

Tabela A - 2: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za bolnišnice (SIST EN 1991-1-2).

BOLNIŠNICE		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Srednja	300	250

Podatki iz tabele A - 2 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 2.



Slika A - 2: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v bolnišničnih sobah.

#### A.2.4 Požarni scenariji v hotelskih sobah

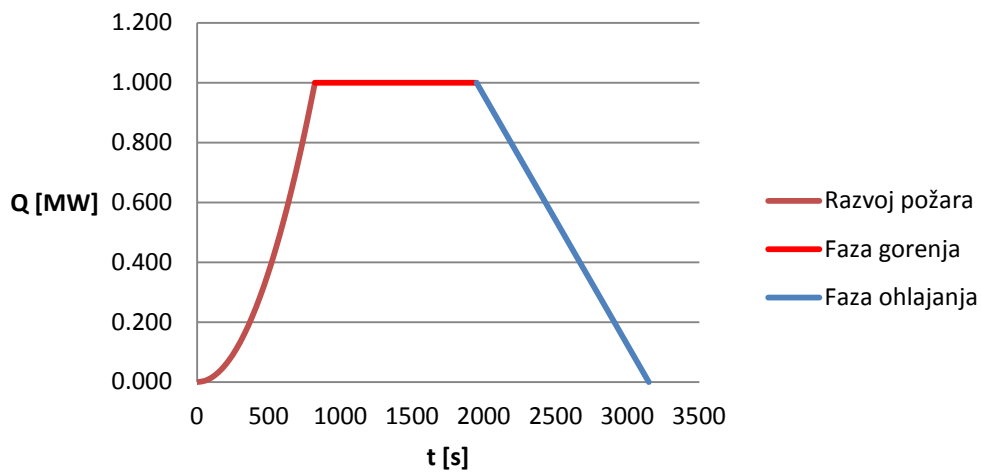
V hotelski sobi do izbruha požara, ravno tako kot v stanovanju, lahko pride zaradi dejavnosti človeškega faktorja, zato neodvisno od funkcionalne in konstrukcijske zasnove obstaja določena verjetnost vžiga oziroma izbruha požara. Glede na potencialne vire vžiga je v hotelskih sobah potrebno predvideti in omejiti naslednje možne vzroke požara:

- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- malomarnost (odvržen cigareti, sveče),
- napake na plinski inštalaciji,
- udarec strele in
- namerno podtaknjen požar.

Tabela A - 3: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za bolnišnice (SIST EN 1991-1-2).

HOTELI		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Srednja	300	250

Podatki iz tabele A - 3 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 3.



Slika A - 3: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v hotelskih sobah.

### A.2.5 Požarni scenarij v knjižnicah

V knjižnicah se nahajajo velike količine gorljivega materiala in sicer lesene omare ter knjige, ki so spravljene v njih. Glede na potencialne vire vžiga je v knjižnicah, poleg človeškega faktorja, potrebno predvideti in omejiti naslednje možne vzroke požara:

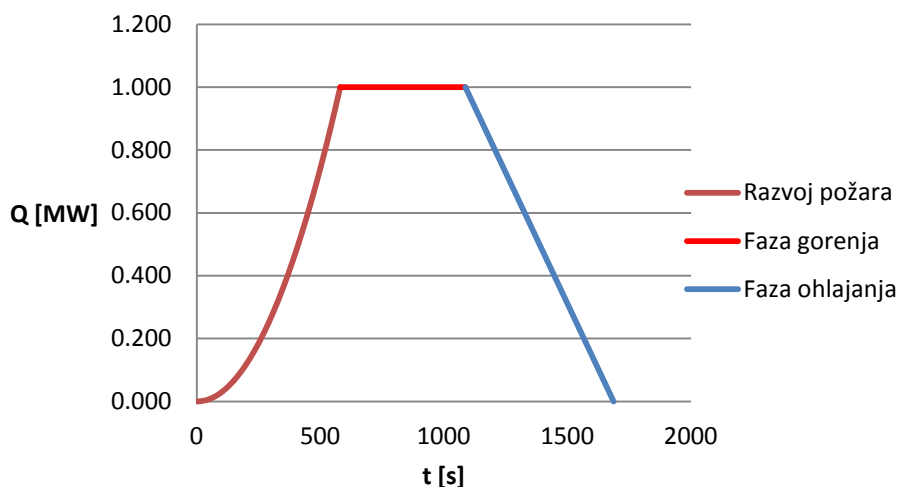
- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- malomarnost (odvržen cigaret),
- napake na plinski inštalaciji,
- udarec strele in
- namerno podtaknjen požar.

Tabela A - 4: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za knjižnice (SIST EN 1991-1-2).

KNJIŽNICE		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Hitra	150	500



Podatki iz tabele A - 4 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 4.



Slika A - 4: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v knjižnicah.

## A.2.6 Požarni scenarij v pisarnah

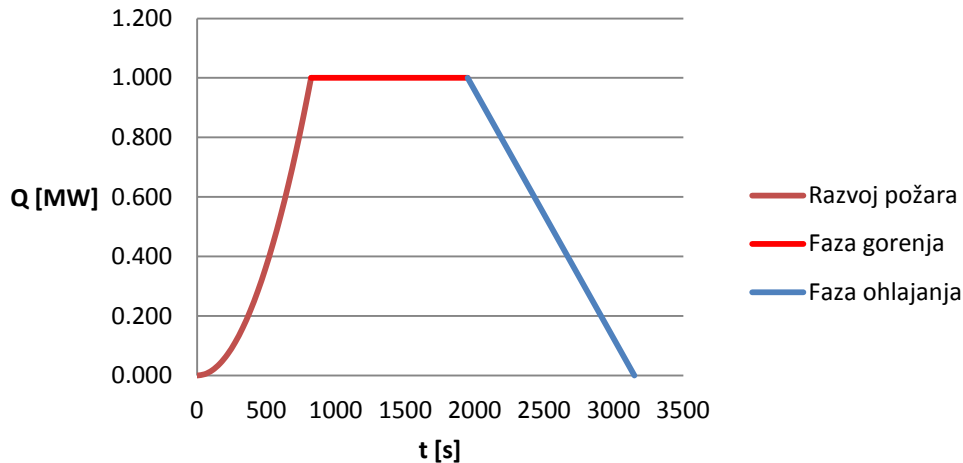
V pisarnah se ravno tako, kot v knjižnicah nahajajo omare, v katerih so spravljene predvsem različni fascikli ter pisarniško pohištvo, ki je dobro gorljivo. Glede na potencialne vire vžiga je v pisarnah, poleg človeškega faktorja, potrebno predvideti in omejiti naslednje možne vzroke požara:

- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- malomarnost (odvržen cigaret),
- napake na plinski inštalaciji,
- udarec strele in
- namerno podtaknjen požar.

Tabela A - 5: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za pisarne (SIST EN 1991-1-2).

PISARNE		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Srednja	300	250

Podatki iz tabele A - 5 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 5.



Slika A - 5: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v pisarnah.

### A.2.7 Požarni scenarij v šolskih razredih

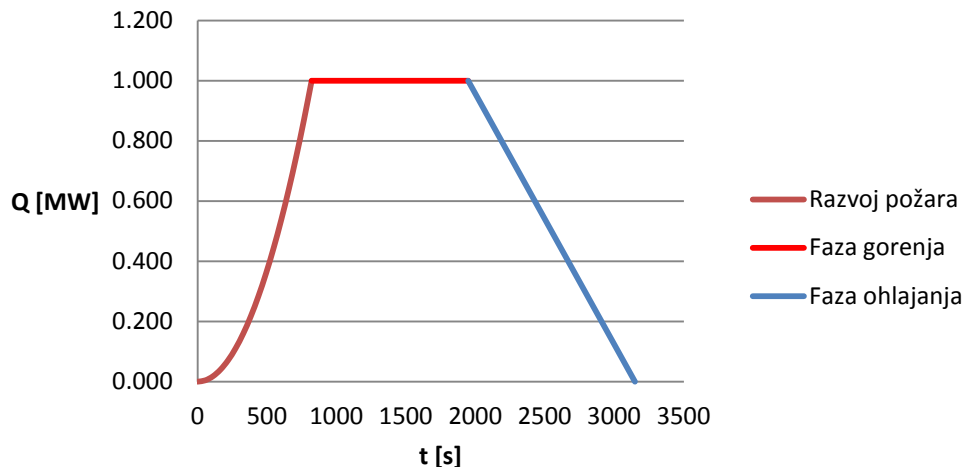
Šolski razredi so razporejeni eden ob drugem, v njih pa se kot gorljiv material pojavljajo lesene mize ter stoli, razne omare s knjigami, učni rekviziti (zemljevidi, slike, izdelki učencev). Glede na potencialne vire vžiga je v šolskih razredih, poleg človeškega faktorja, potrebno predvideti in omejiti naslednje vzroke požara:

- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- napake na plinski inštalaciji,
- namerno podtaknjen požar,
- udarec strele.

Tabela A - 6: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za šolske razrede (SIST EN 1991-1-2).

ŠOLSKI RAZREDI		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Srednja	300	250

Podatki iz tabele A - 6 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 6.



Slika A - 6: Normiran prikaz hitrosti sproščanja toplote v šolskih razredih.

### A.2.8 Požarni scenarij v nakupovalnih središčih

V nakupovalnih središčih so trgovine postavljene ena ob drugo, v njih pa se nahajajo gorljivi izdelki (oblačila, prehrana, igrače, čevlji, časopisi, računalniška oprema ...). Glede na potencialne vire vžiga je v nakupovalnih središčih, poleg človeškega faktorja, potrebno predvideti in omejiti naslednje vzroke požara:

- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- namerno podtaknjen požar,
- napake na plinski inštalaciji,
- udarec strele,
- samovžig zaradi nepravilnega skladiščenja izdelkov.

Tabela A - 7: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za nakupovalna središča (SIST EN 1991-1-2).

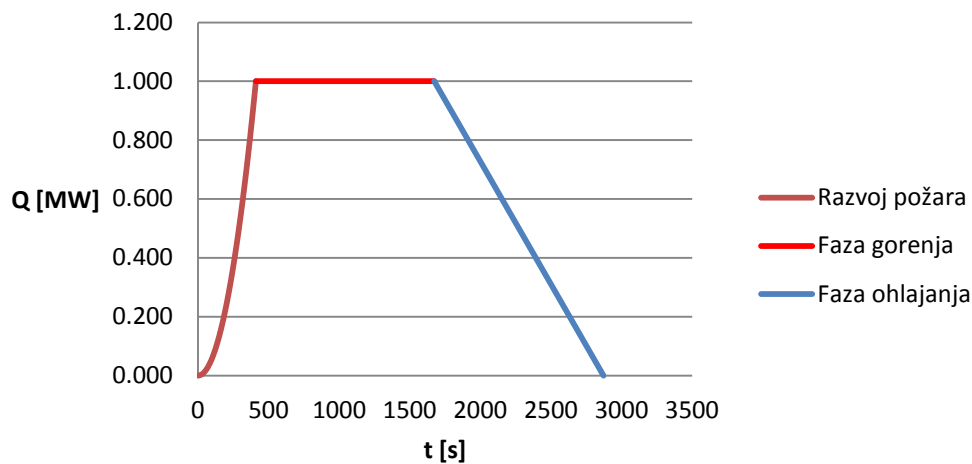
NAKUPOVALNA SREDIŠČA		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Hitra	150	250

V trgovinah in drugih komercialnih prostorih je hitrost sproščanja toplote na enoto površine odvisna predvsem od materiala, ki ga prostor vsebuje (J. Hietaniemi, E. Mikkola, 2010):

- 150 kW/m<sup>2</sup> ustreza prostorom, kjer se nahajajo leseni in papirnati izdelki,
- 300 kW/m<sup>2</sup> ustreza prostorom, kjer so skladiščeni celulozni izdelki in izdelki iz lahkih plastik (stavbno pohištvo),
- 500 kW/m<sup>2</sup> ustreza izdelkom, ki so iz mešanice celuloze in močno vnetljive plastike (stavbno pohištvo),

- $1000 \text{ kW/m}^2$  ustreza prostoru s kartonskimi škatlami ter izdelki iz zelo gorljivih materialov iz umetnih snovi
- $2000 \text{ kW/m}^2$  ustreza izdelkom iz visoko gorljivih materialov iz umetnih snovi.

Podatki iz tabele A - 7 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 7.



Slika A - 7: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v nakupovalnih središčih.

### A.2.9 Požarni scenarij v kinu

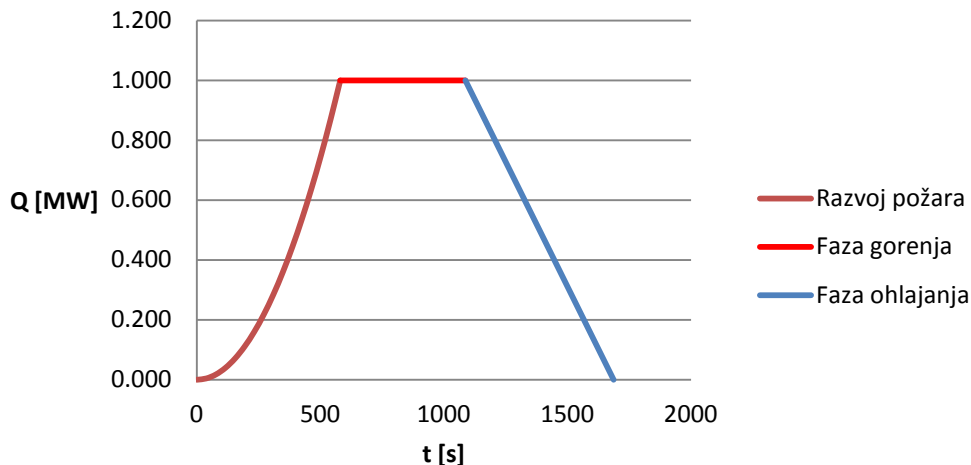
Kot gorljiv material v kinu najdemo tapecirane talne obloge, ter oblazinjene stole. Glede na potencialne vire vžiga je v kino dvoranh, poleg človeškega faktorja, potrebno predvideti in omejiti naslednje vzroke požara:

- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- napake na plinski inštalaciji,
- namerno podtaknjen požar,
- udarec strele.

Tabela A - 8: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za kino (SIST EN 1991-1-2).

KINO		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [ $\text{kW/m}^2$ ]
Hitra	150	500

Podatki iz tabele A - 8 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 8.



Slika A - 8: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v kinu.

### A.2.10 Požarni scenarij v garažnih stavbah

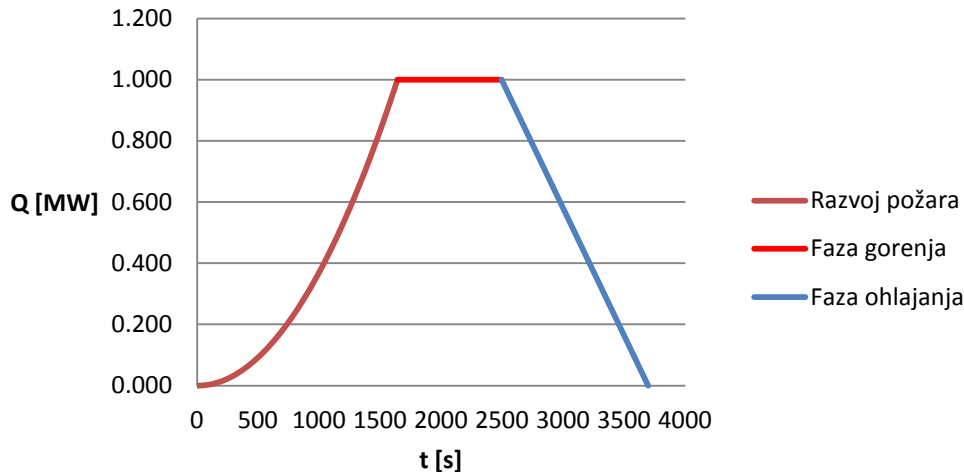
V garažnih stavbah se poleg betonskih stebrov in plošč nahajajo avtomobili, ki imajo kot vir gorljivega materiala v svojih rezervoarjih gorivo. Do izbruha požara lahko pride zaradi človeškega faktorja, zato je potrebno predvideti in omejiti naslednje vzroke požara:

- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih,
- nepravilna uporaba in okvare na električnih inštalacijah in napravah,
- malomarnost (odvržen cigaret),
- udarec strele,
- namerno podtaknjen požar in
- napaka na avtomobilski napeljavi.

Tabela A - 9: Parametra  $t_{\alpha}$  in  $RHR_f$  za garažne prostore (SIST EN 1991-1-2).

TRANSPORT		
Hitrost razvoja požara	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Počasna	600	250

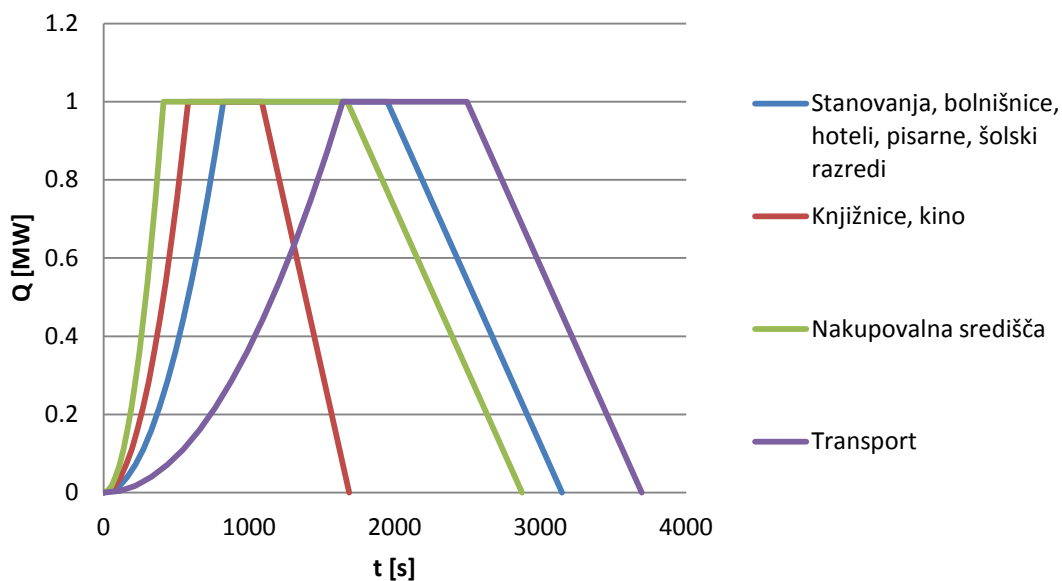
Podatki iz tabele A - 9 so bili uporabljeni pri izdelavi grafičnega prikaza hitrosti sproščanja toplote, ki ga vidimo na sliki A - 9.



Slika A - 9: Normirani prikaz hitrosti sproščanja toplote v garažnih prostorih.

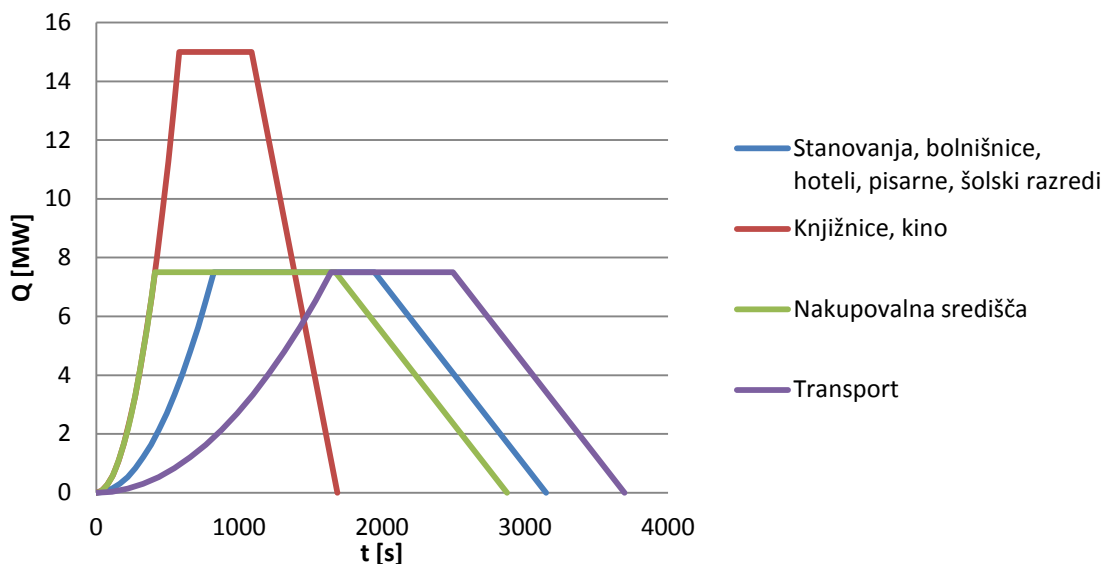
### A.2.11 Primerjava različnih požarnih sektorjev

Normirane vrednosti smo neposredno lahko uporabili v programu FDS. Na spodnjem grafu so prikazani vsi prej omenjeni požarni scenariji ter z njimi povezane normirane hitrosti sproščanja toplote. Najhitreje se požar razvije v nakupovalnih središčih. Nekoliko počasneje doseže fazo gorenja požar v kinu ter v knjižnicah, kjer hitro zgori vsa zaloga gorljivega materiala (knjige, lesene omare ter oblazinjeni stoli), nato pa sledi hitra faza ohlajanja. Najdaljšo fazo gorenja dosežemo v stanovanjih, bolnišničnih in hotelskih sobah ter v šolskih razredih. Najpočasnejši razvoj požara imamo v garažnih stavbah, saj razen avta, ki se je vžgal, nimamo drugih gorljivih elementov. Najdlje trajajoči požar imamo ravno v parkirnih hišah.



Slika A - 10: Normirani prikaz primerjav hitrosti sproščanja toplote v različnih požarnih sektorjih.

Požar v knjižnicah in kino dvoranh doseže največjo hitrost sproščanja toplote 15 MW, med tem ko je v stanovanjih, bolnišnicah, hotelih, pisarnah, šolskih razredih, nakupovalnih središčih ter v garažah največja dosežena hitrost sproščanja toplote enaka in znaša 7,5 MW. Največja hitrost sproščanja toplote je torej odvisna le od vrednosti  $RHR_f$  ter največjega območja požara  $A_{fi}$ , ki je v navedeni primerjavi enaka v vseh požarnih sektorjih. Spodnja slika s primerjavo različnih hitrosti sproščanja toplote, potrjuje navedene ugotovitve.



Slika A - 11: Nenormiran prikaz primerjav hitrosti sproščanja toplote v različnih požarnih sektorjih.

### A.3 PIROLIZA

Piroliza predstavlja razkroj snovi pri višjih temperaturah, kjer nastanejo številne organske molekule, ki imajo nižjo molsko maso kot pirolizirana snov.

#### A.3.1 Podatki za vnos pirolize v model FDS

Za določitev pirolize programi FDS zahtevajo podajanje treh parametrov za posamezen material. To so parametri  $A$  (*Pre-exponential Factor*),  $E$  (*Activation Energy*) ter  $n$  (*Mass Fraction Exponent*). Spreminjajo se glede na vrsto materiala in narekujejo obliko krivulje, ki prikazuje izgubo teže po času. Nekaj vrednosti za različne materiale prikazuje spodnja tabela. Vrednosti za iste materiale se v literaturi močno razlikujejo.

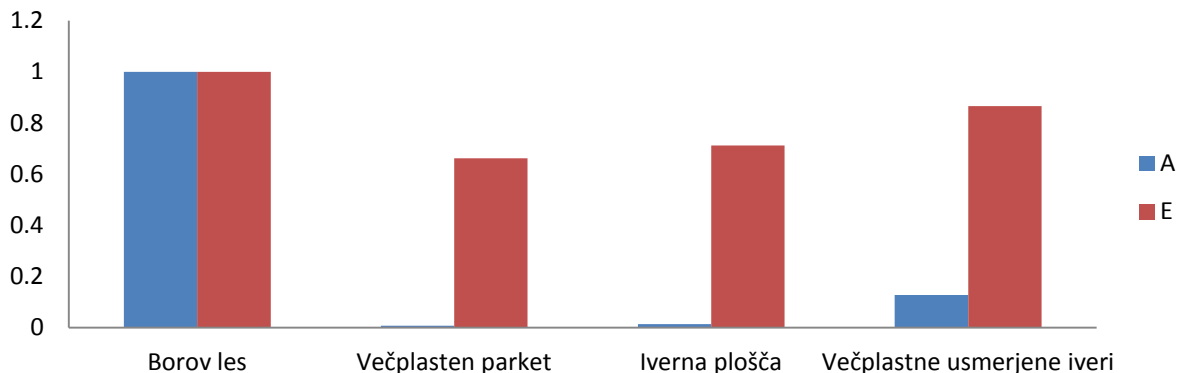
Tabela A - 10: Parametri  $A$  in  $E$  za različne materiale.

Material	$A$ (1/s)	$E$ (kJ/mol)	$n$
Celuloza (Matala, 2008) (Lautenberger, 2007)	$10^{10} - 10^{20}$	100 - 300	0 - 7
	$2,83 \cdot 10^{23}$	317	1
	$4,7 \cdot 10^{20}$	277	1
Lignin (Matala, 2008)	$10^{10} - 10^{20}$	100 - 300	0 - 7

Ksilana iz brezovega lesa (Matala, 2008)	$10^{10} - 10^{20}$	100 - 300	0 - 7
Breza (Matala, 2008)	$10^{10} - 10^{20}$	100 - 300	0 - 5
PVC (Matala, 2008)	$10^8 - 10^{20}$	100 - 300	0 - 4
Črna PMMA (Matala, 2008)	$10^{10}$	300	2 - 7
Polietilen (Lautenberger, 2007)	$8,79 \cdot 10^{10}$	203	1
	$7,92 \cdot 10^{12}$	181	1
	$9,80 \cdot 10^7$	138	1,3
	$1,95 \cdot 10^{13}$	220	1
	$9,62 \cdot 10^{14}$	241	1
	$9,69 \cdot 10^{11}$	201	1
Polietilen-tereftalat (Lautenberger, 2007)	$8,73 \cdot 10^{13}$	222	0,9
Polioksimetilen (Lautenberger, 2007)	$1,96 \cdot 10^{11}$	118	1
Polipropilen (Lautenberger, 2007)	$2,92 \cdot 10^{11}$	205	1
	$1,46 \cdot 10^8$	127	1
	$3,19 \cdot 10^{15}$	244	1
	$2,16 \cdot 10^{11}$	188	1
Polistiren (Lautenberger, 2007)	$2,14 \cdot 10^{15}$	240	1
	120572	110	1
	$3,21 \cdot 10^{13}$	204	1
Borov les (Beda, 2013)	3595	72,3	/
Večplasten parket (Beda, 2013)	25,78	47,9	/
Iverna plošča (Beda, 2013)	45,53	51,5	/
Večplastne usmerjene iveri (Beda, 2013)	459,17	62,6	/
Les (Bessmertnykh, 2014)	$6,45 \cdot 10^{-7}$	103,94	1,371
Koruzna slama (Bessmertnykh, 2014)	$8,00 \cdot 10^{-7}$	98,16	2,268
Neoluščen riž (Bessmertnykh, 2014)	$1,89 \cdot 10^{-8}$	116,59	3,526
Odpadki piščancev (Bessmertnykh, 2014)	0,35	34,47	2,23

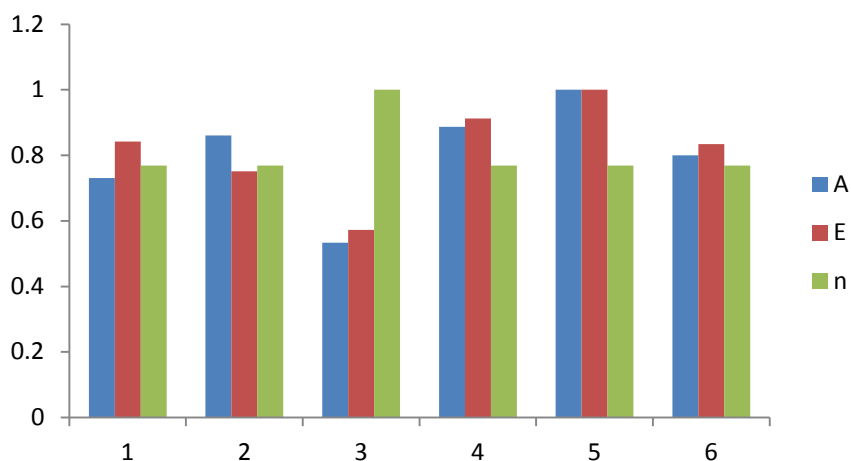


Ker se vrednosti parametrov A in E nahajajo na velikem razponu smo se osredotočili le na primerjavo štirih primerljivih materialov. Primerjali smo normirane vrednosti parametra A in E za različne vrste lesa: borov les, večplasten parket, iverna plošča in večplastne usmerjene iveri (Versita, 2013). Vrednosti so normirane na parametre za borov les. Iz spodnje slike je razvidno, da sta vrednosti A in E nekoliko povezani, saj največji vrednosti parametra A ustreza tudi največja vrednost parametra E, kar velja tudi za nižje vrednosti.



Slika A - 12: Primerjava parametrov A in E za različne vrste lesa.

Spodnja slika A-13 prikazuje razpon podatkov, ki jih za enak material podane v literaturi (Lautenberger, 2007). Podobno kot prej so vrednosti na grafu normirane na največjo vrednost parametrov A, E in n.

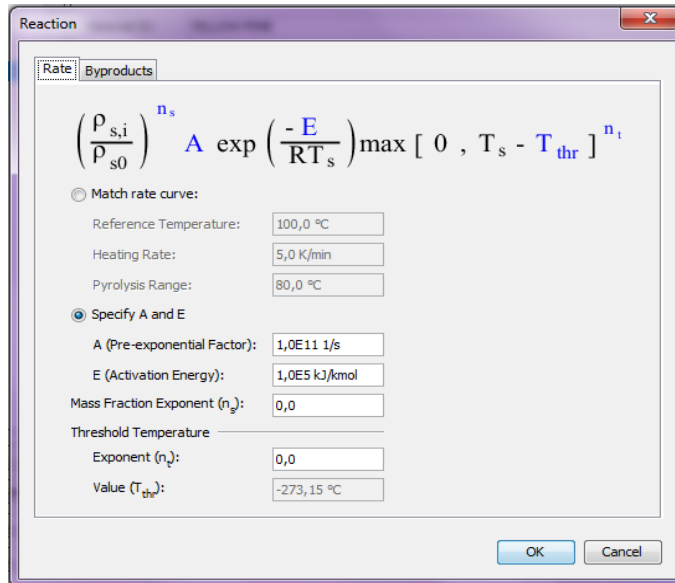


Slika A - 13: Razpon različnih podatkov za polietilen, ki jih podaja ena literatura (Lautenberger, 2007).

### A.3.2 Vnos podatkov v program

Omenjene parametre v programu Pyrosim predpišemo posameznemu materialu.

Najprej iz knjižnice FDS uvozimo materiale. To naredimo v meniju *Model* z ukazom *Edit Libraries*. Z ukazom *Edit Material* lahko materialu naknadno spremenimo lastnosti. V zavihku *Pyrolysis* podamo parametre A (*Pre-exponential Factor*), E (*Activation Energy*) ter n (*Mass Fraction Exponent*), kot prikazuje spodnja slika.

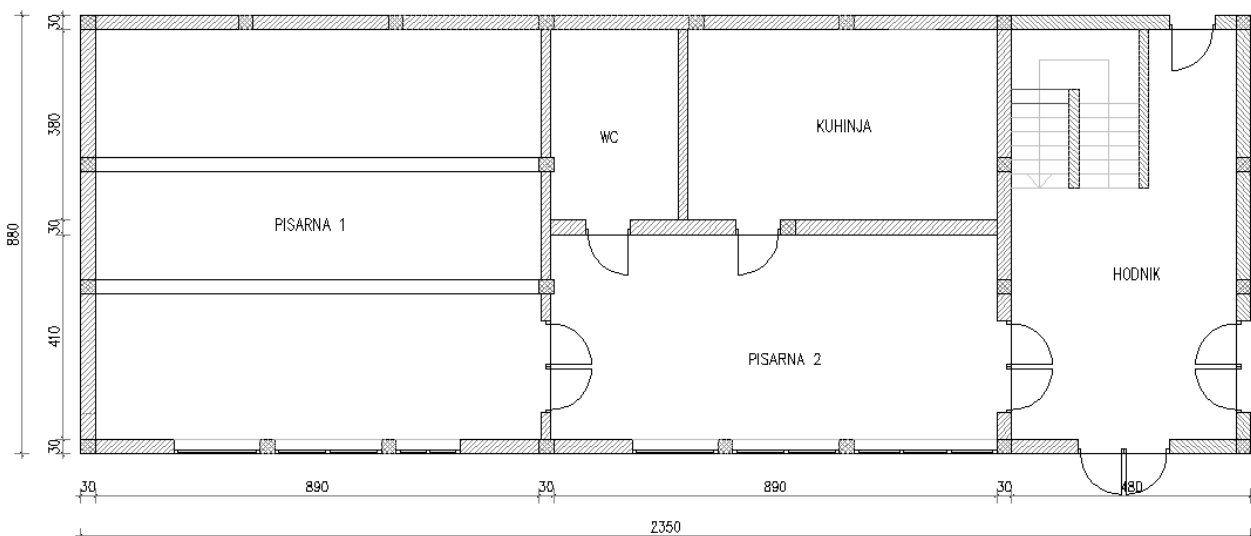


Slika A - 14: Določanje parametrov A, E in n.

#### A.4 MODELIRANJE NARAVNEGA IN PRISILNEGA PREZRAČEVANJA

V tem poglavju smo posebno pozornost namenili vrsti prezračevanja v objektu. V prvem delu smo obravnavali naravno prezračevanje, kjer smo opazovali razvoj požara pri različnih primerih odpiranja oken in vrat. V drugem delu pa smo se osredotočili na prisilno prezračevanje z ventilacijo, pri čemer smo spremljali hitrosti dotoka svežega zraka in odvod dima ter analizirali vpliv različnega pretoka zraka, pozicij ventilacije in interakcije z odprtimi okni na sam potek požara.

Za osnovni model smo si izbrali požarni sektor, ki vključuje dve pisarni. S primerjavo izračunov nekaj modelov, se je izkazalo, da modeliranje kuhinje, hodnika in WC-ja ne vpliva bistveno na rezultate analize, vendar bistveno podaljša sam račun, zato smo se odločili, da te prostore izločimo iz modela.



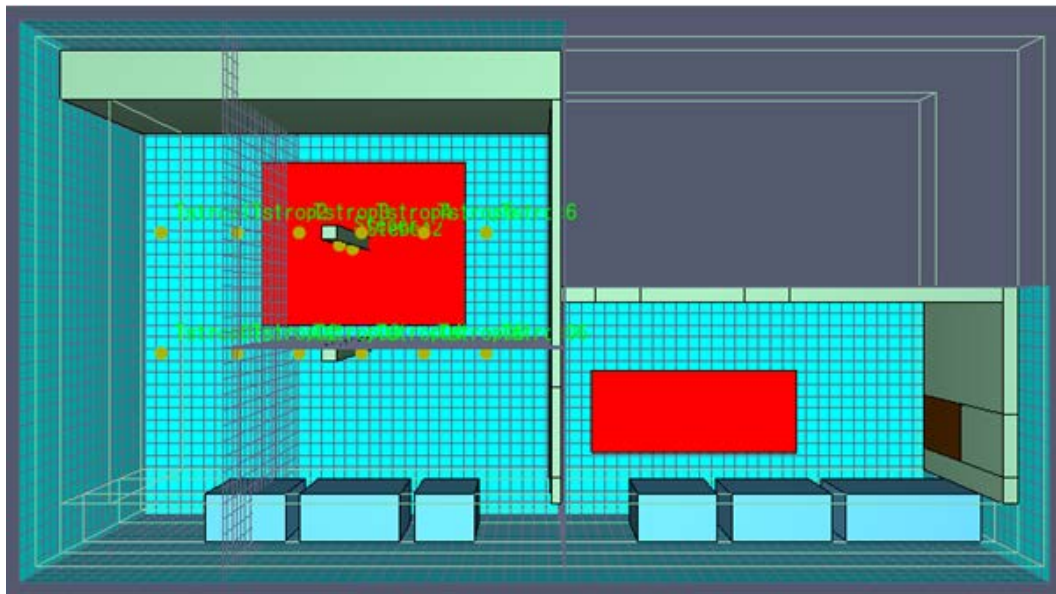
Slika A - 15: Tloris požarnega sektorja.

## A.4.1 Modeliranje

Z modeliranjem želimo doseči dovolj natančen račun v najkrajšem času, zato smo veliko pozornosti posvetili potrebni natančnosti modela oziroma njegovim poenostavitvi.

Pri modeliranju smo morali biti pozorni na umestitev merilcev temperature po nosilcu. Merilci morajo biti nameščeni natanko na zunanjem robu nosilca, saj sicer lahko pride do napačnega merjenja temperature. Program prilagaja dimenzije modela glede na izbrano mrežo, pri tem pa lahko samodejno premakne merilce v notranjost kakšnega od elementov. V mislih je bilo potrebno točno definirati pozicijo merilcev glede na izbrano mrežo, poleg tega pa upoštevati še odmik enega elementa od zunanjih sten.

Mreže zaradi hitrejšega izračuna razdelimo na podmreže, pri čemer upoštevamo nasvet, da naj končno število podmrež ne presega števila jeder procesorja v računalniku. Ker program Pyrosim uporablja samo jedra in ne tudi računskih niti, upoštevamo le fizična jedra procesorja. Upoštevali smo tudi, da meje podmrež ne smejo sekati območij izpustov oziroma prepustov. V našem primeru smo glavno mrežo razdelili na štiri podmreže. Z ukazom *Open Boundaries* v model dodamo robne pogoje, ki na mejah mreže omogočajo prost prehod zraka.



Slika A - 16: Optimiziran model obravnavanega požarnega sektorja.

### A.4.1.1 Reakcija

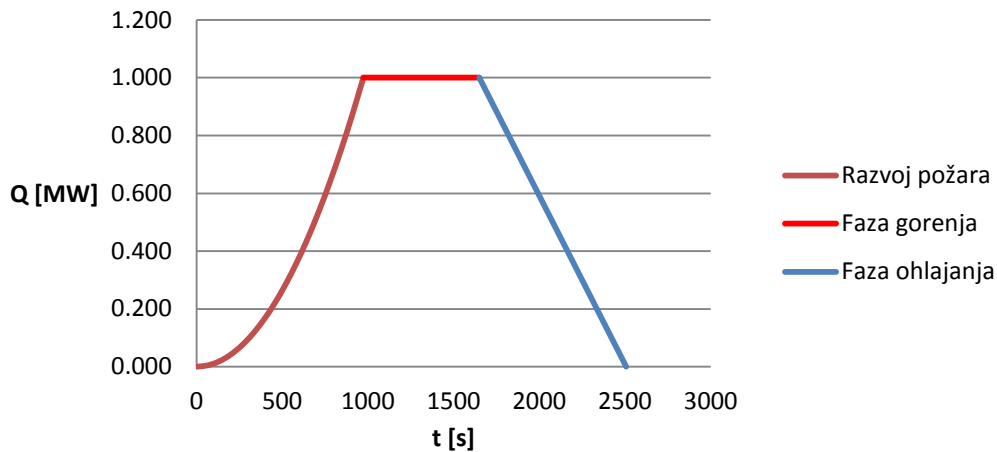
Reakcijo podamo z ukazom *Edit reactions*. V program sva vstavili vrednosti, ki jih prikazuje spodnja tabela.

Tabela A - 11: Razmerje atomov goriva.

Število C atomov x	3,4	Delež $v_{CO}$	0,004
Število H atomov y	6,2	Delež saj $v_{Soot}$	0,015
Število O atomov z	2,5	Delež $v_{H_2}$	0,1
Število N atomov v	0		

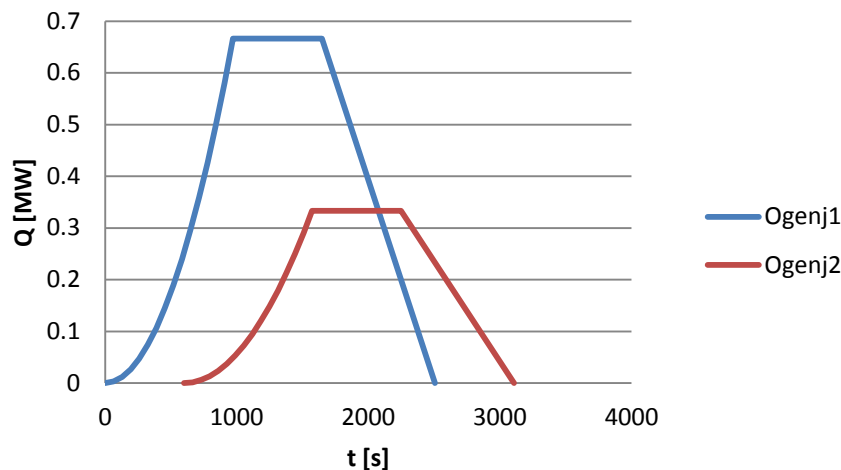
#### A.4.1.2 Hitrost sproščanja požara

Hitrost sproščanja toplote se določili skladno s SIST EN 1991-1-2, pri čemer upoštevamo  $t_\alpha = 300$  s,  $RHRf = 350$  kW/m<sup>2</sup>,  $q_{f,d} = 500$  MJ/m<sup>2</sup> in  $A_f = 30$  m<sup>2</sup>. Dobili potek hitrosti sproščanja toplote kot prikazuje slika A - 17.



Slika A - 17: Hitrost sproščanja toplote normirana na  $Q_{max}$ .

Dobljen potek hitrosti sproščanja toplote sorazmerno s površino razporedimo na dva elementa *Vent* – »Ogenj 1« velikosti 5 x 4 m in »Ogenj 2« velikosti 2 x 5 m. Upoštevamo, da »Ogenj 1«, ki se nahaja v »Pisarni 1«, zgore takoj, »Ogenj 2«, ki se nahaja v »Pisarni 2«, pa po 10 minutah.



Slika A - 18: Hitrost sproščanja toplote za Ogenj1 in Ogenj2.

#### A.4.2 Naravno prezračevanje

Naravno prezračevanje smo dosegli z odpiranjem nekaterih oken in vrat v modelu. S primerjavo rezultatov različnih modelov, ugotovimo vpliv naravnega prezračevanja na razvoj požara v požarnem sektorju.

V prvem modelu smo upoštevali, da so med požarom odprta vrata med pisarnama 1 in 2 ter srednje okno v pisarni 2, v drugem modelu pa zapremo vsa okna. Zagnali smo še nekaj dodatnih modelov z različnimi odpiranji oken.

##### A.4.2.1 Ugotovitve naravnega prezračevanja

- Požar je najhitreje zadušen, če zapremo vsa okna in vrata ter tako onemogočimo dostop novega kisika v oba prostora. Tudi mešanja zraka je izjemno malo in še to zgolj konvekcijsko po vsakemu prostoru posebej, saj med njima stoji fizična ovira.
- Če odpremo vmesna vrata, se požar v levi pisarni hitro preseli k preostalemu kisiku v desno pisarno, porabi kisik tudi tam in tako zaduši sebe in požar v sosednji pisarni. Mešanje zraka je na pričetku dokaj veliko, saj se vroč zrak pod stropom premika v sosednjo pisarno, hladen zrak pa vstopa v levo pisarno pri tleh, a se že pred 1000 sekundami dokaj umiri, nato pa nastopa večinoma samo še konvekcija zraka, požar pa je zadušen. Ne v tem, ne v prejšnjem primeru temperature med simulacijo ne presežejo 200 °C.
- Z odprtjem srednjega okna v desni pisarni ustvarimo konstanten dotok kisika v to pisarno in s tem omogočimo, da se požar polno razvije v okolici okna, drugje pa ne. Veliko mešanja zraka opazimo na pričetku v okolici okna, kjer imamo dotok svežega hladnega zraka in tudi odtok vročega zraka iz notranjosti in še vedno določen delež kisika v prostorih samih, a se stanje okoli 1500 sekunde umiri in stabilizira v gorenje samo pri oknu.

- Če dodatno odpremo še vsa okna v levi pisarni, potem ustvarimo naravno ventilacijsko pot med oknom v desni pisarni in na novo odprtimi okni v levi pisarni. S tem in pa razlikami v tlaku med prostori se vzpostavi stalen dotok svežega zraka v desno pisarno in nato preko odprtih vrat v levo. S tem je omogočeno veliko mešanje svežega zraka v okolici požarov in posledično se požar v obeh pisarnah polno razvije in doseže svojo največjo moč. V obeh zadnjih simulacijah temperature dosežejo okoli 600 °C.

V vsakem primeru lahko zaključimo, da je najbolj neugodno za konstrukcijske elemente in njihovo nosilnost med požarom, če so med požarom odprta vsa vrata in vsa okna, da se ustvari kar se da močna naravna ventilacija, ki prinaša v prostore nov kisik.

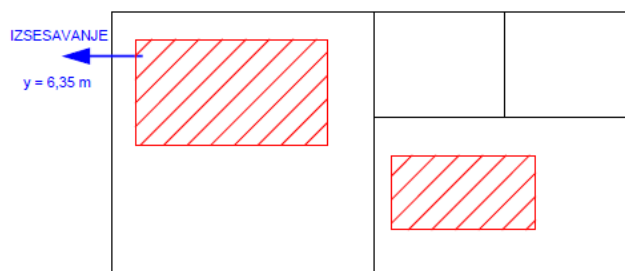
### A.4.3 Prisilno prezračevanje

Analiziramo različne primere prisilnega prezračevanja. Ventilatorjem smo spreminjali lego v prostoru ter njihovo moč.

Glede na lego ventilatorjev za vpihovanje in izpihovanje zraka izdelamo tri različne modele.

#### PRIMER VENTILACIJE 1:

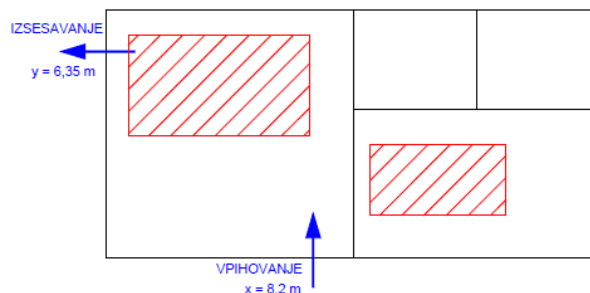
V prvem primeru v pisarno 1 vgradimo le ventilator za izsesavanje zraka. Ventilator ima dimenzije 65/65 cm in je nameščen na višini 3 m.



Slika A - 19: Skica primera ventilacije 1.

#### PRIMER VENTILACIJE 2:

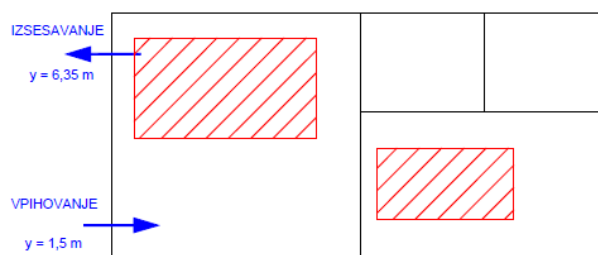
V drugem primeru v pisarno 1 vgradimo ventilator za izsesavanje in vpihovanje zraka. Ventilatorja imata dimenzije 65/65 cm in sta nameščena na višini 3 m.



Slika A - 20: Skica primera ventilacije 2.

### PRIMER VENTILACIJE 3:

Tretji primer ima tako kot drugi model v pisarni 1 nameščen ventilator za vpihovanje in izsesavanje zraka. Lego ventilatorja za vpihovanje zraka postavimo, kot kaže slika 31. Ventilatorja imata dimenzije 65/65 cm in sta nameščena na višini 3 m.



Slika A - 21: Skica primera ventilacije 3.

#### **A.4.3.1 Modeliranje prisilnega prezračevanja**

Model smo dopolnili s tremi opisanimi sistemi prezračevanja. Za vsakega izmed treh različnih sistemov izdelamo tri različne analize in pri vseh treh smo imeli odprta vmesna vrata. Prvo s pretokom  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , drugo s pretokom  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  in tretjo s pretokom  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  ter odprtim srednjim oknom v desni pisarni. Vse modele smo izdelali po naslednjem postopku.

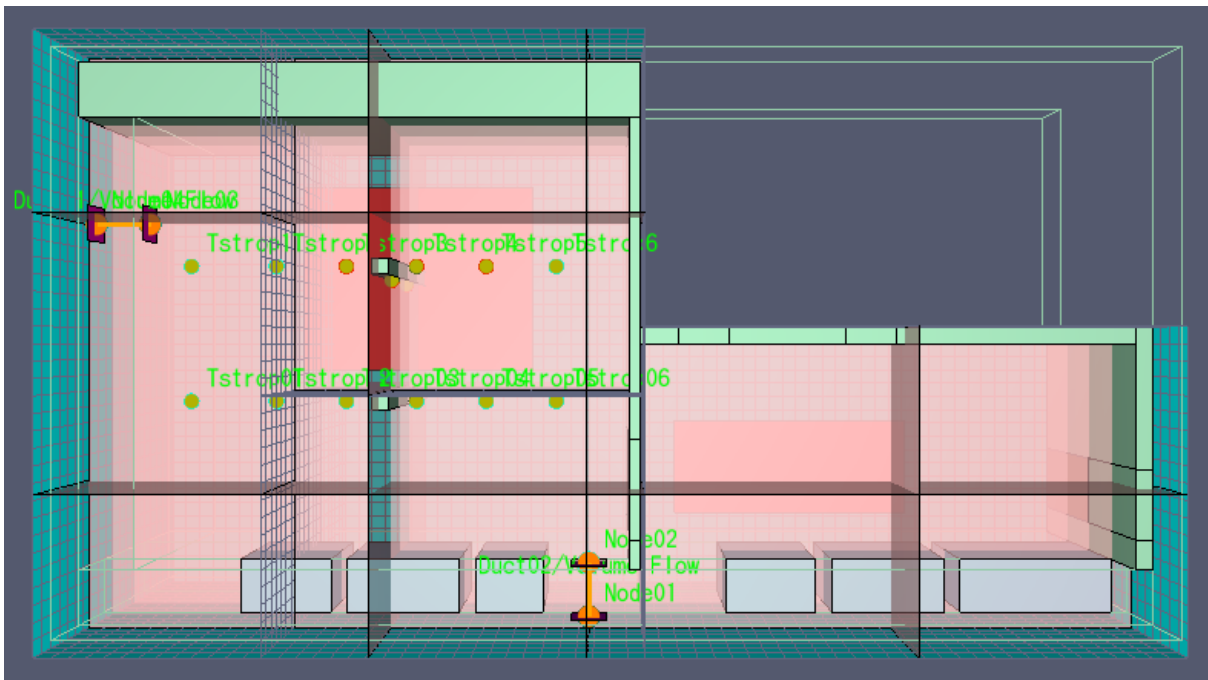
Izberemo si tri različne pozicije, na katerih ali vpihujemo ali izpihujemo zrak v levo, večjo pisarno. Opomba: Model ne bo hotel delovati, če ne bo pozicija in geometrija zračnikov primerna glede na izbrano mrežo, saj je analitičen model drugačen od zmodeliranega 3D modela in prilagojen na mrežo. Predlagamo, da se velikost zračnikov definira vsaj dvakrat večja kot je element podmreže. Prav tako je pomembno, da se zračniki nahajajo na mejni površini nekega elementa, npr. stene ali stropa.

Na prej definirane ventilacijske ploskve se pripiše numerična vozlišča *Nodes* in ta med seboj poveže s prezračevalnim kanalom *Duct*, kateremu sta pripisana primerna prerezna površina in pa model pretoka *Flow Model*.



V zadnjem koraku se izbere, kateri ventilator *Fan* se pripiše kanalu, temu pa določi časovni potek pretoka zraka. Opomba: Opazimo, da je pripis tudi najbolj enostavnega ventilatorja s konstantnim pretokom, problematičen pri analizi s sistemom *FDS Paralell*, saj le-teh enostavno ne upošteva in privzame, da je na mestu kanala le preboj skozi steno. To se lahko odpravi, če je pretok zraka definiran z enostavnim ventilatorjem *Basic Fan* že v samem kanalu. Prav tako je definicija negativnega pretoka enaka zamenjavi vstopnega in izstopnega vozlišča.

Sledi pregled modela v Preview Model in Smokeview.

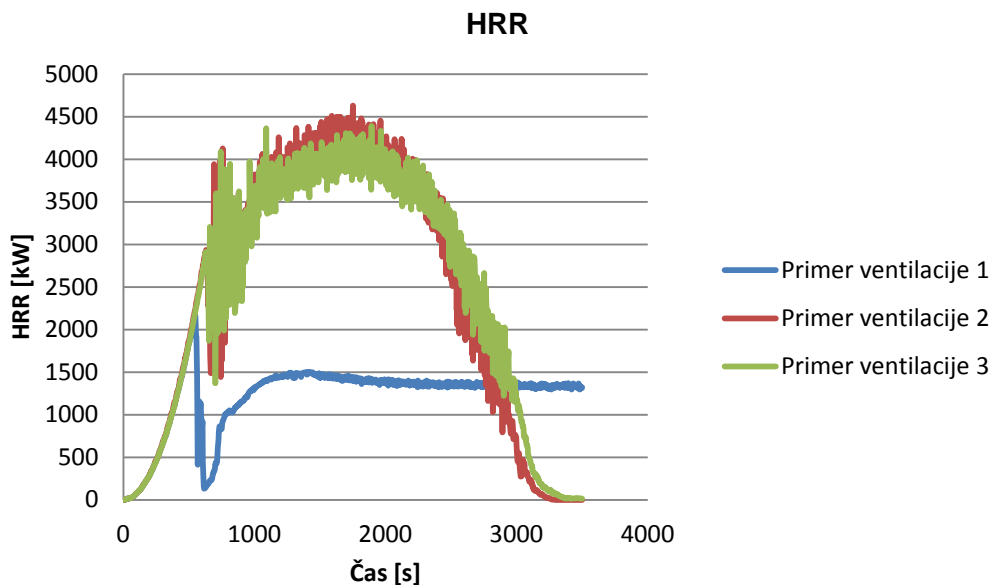


Slika A - 22: Model s prisilnim prezračevanjem.

#### A.4.3.2 Ugotovitve prisilnega prezračevanja

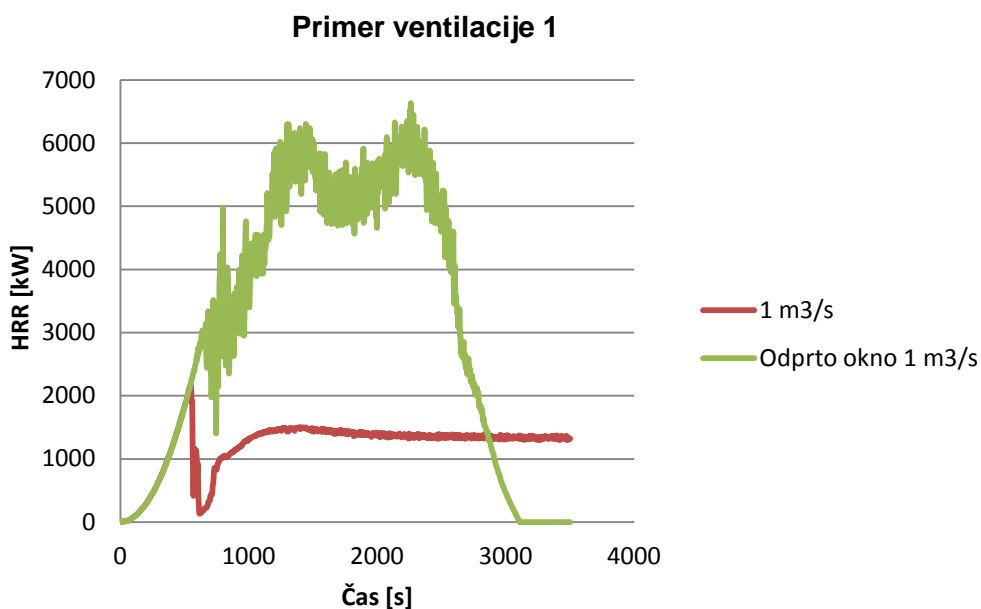
- Pri prvemu sistemu prezračevanja imamo v primeru zaprega okna izjemno malo globalnih sprememb pri požaru glede trajanja do zadušitve v primerjavi s primerom brez ventilacije. Je pa velika razlika pri kroženju zraka, saj se svež zrak iz manjše pisarne izsrka v večjo pisarno, kjer malo bolj zagori kot v primeru brez prezračevanja. Edina večja sprememba je izrazito vroče območje na zunanji strani stene v okolici ventilacijskega kanala, kar pa je bilo tudi za pričakovati. Prav tako lahko opazimo, da ni večje razlike med izpihovanjem  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  in  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , pri slednjem se vse skupaj le odvije nekaj hitreje.





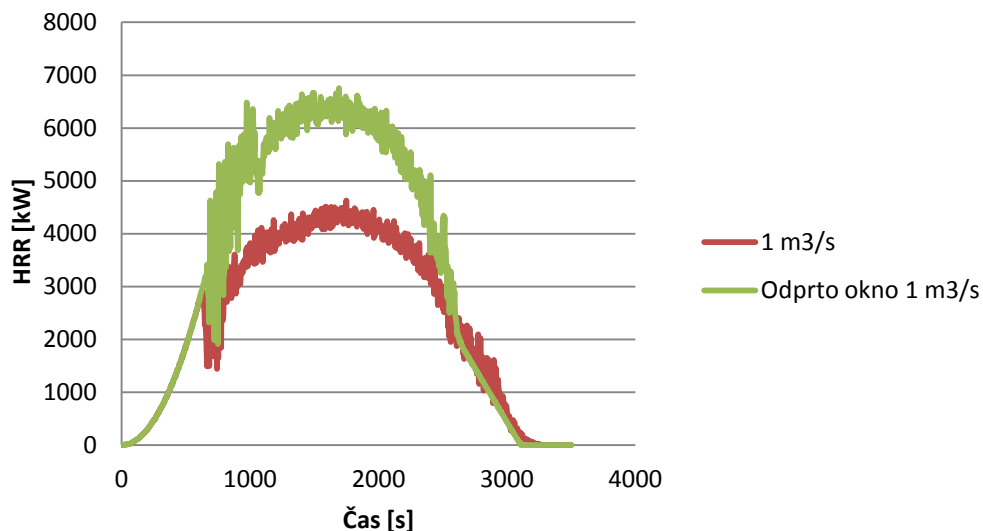
Slika A - 23: Primerjava HRR po času pri različnih primerih ventilacije z izpihovanjem  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

- Do drastične spremembe pride, ko odpremo okno in omogočimo prost pretok svežega zraka od okna do odprtine za prezračevanje. S tem omogočimo požaru, da se razvije in to v območju desne pisarne ter okolici vrat, kjer se od približno 800 sekund plameni obdržijo skoraj do konca simulacije. Temperature hitro dosežejo  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  in več.



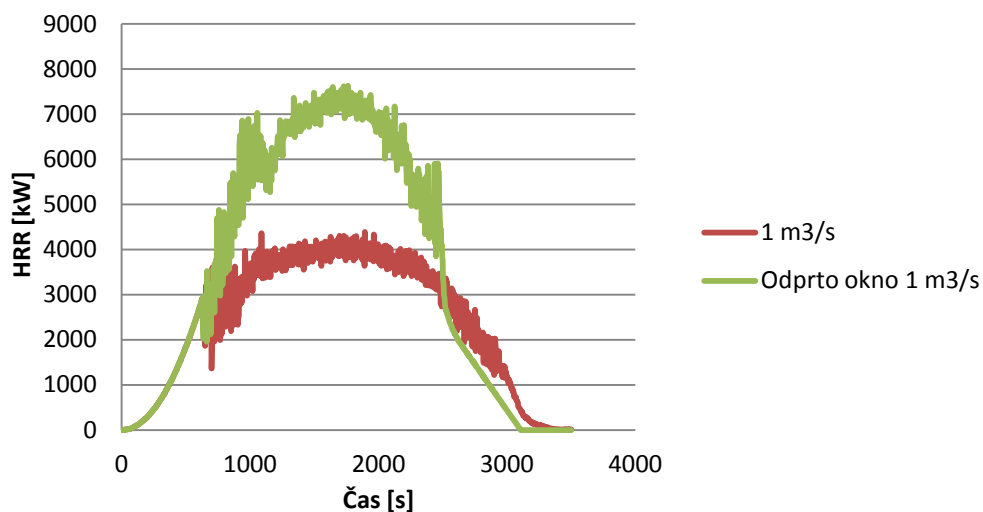
Slika A - 24: Primerjava HRR za »Primer ventilacije 1« pri odprtem in zaprtem oknu.

### Primer ventilacije 2



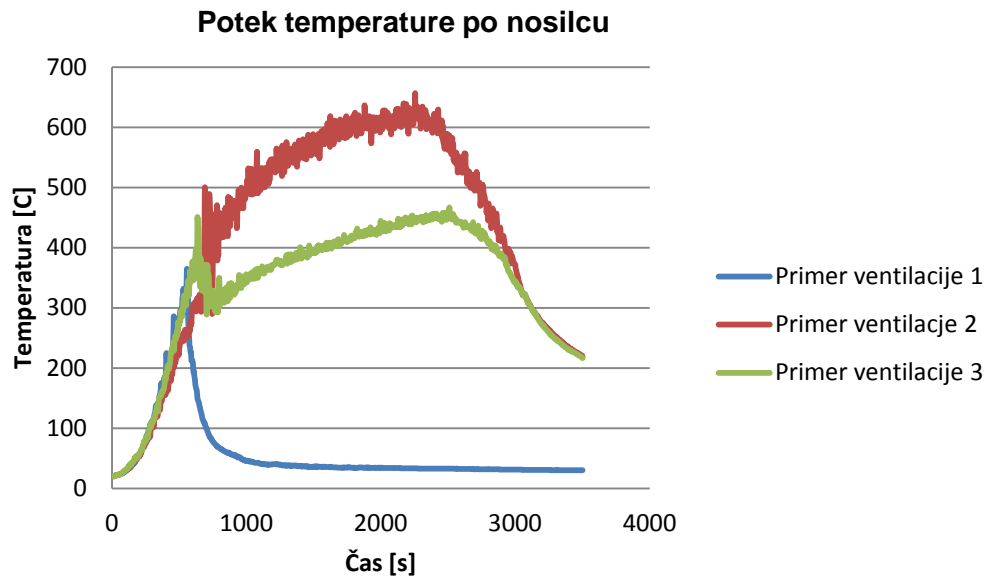
Slika A - 25: Primerjava HRR za »Primer ventilacije 2« pri odprtem in zaprtem oknu.

### Primer ventilacije 3



Slika A - 26: Primerjava HRR za »Primer ventilacije 2« pri odprtem in zaprtem oknu.

- Kot lahko že prej predvidimo, smo z vpihovanjem svežega zraka s sistemom ventilacije 2 vnesli v prostore z visokimi temperaturami več kisika in zato dobili bolj razvit požar (tudi nad 600 °C). Vidimo, kako se pri 1000 sekundah simulacije požara požar pri vseh prezračevanjih bolj razvije, kot če le-tega ni, še najbolj pa v primeru z odprtim oknom, kjer se požar bolj razvije tudi v desni pisarni.

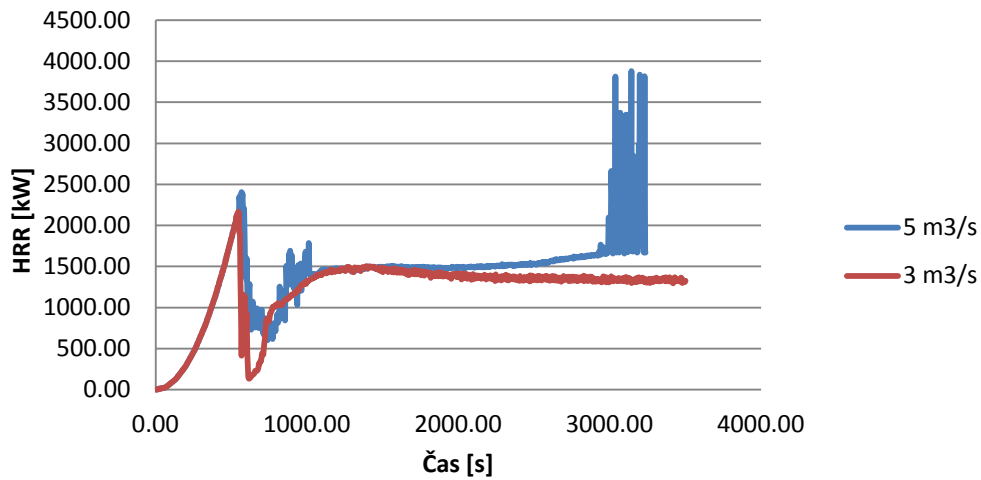


Slika A - 27: Temperatura v določeni točki nosilca v odvisnosti od časa za različne primere ventilacije pri vpihovanju  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

- Kroženje zraka poteka, kot predvideno, od okna in odprtine, kjer zrak vpihujemo, proti vratom in centru pisarne, nato pa nazaj do odprtine za izsesavanje, najbolj pa se požar razvije pri največjem dotoku svežega zraka, to je odprtini za vpihovanje.
- Simulacije sistema 3 dajejo še najbolj zanimive rezultate, saj naraven pretok zraka od odprtega okna še dodatno ojači pretok zraka z vpihovanjem, kar pomeni, da dobimo najbolj razvite požare ravno v tem primeru. Cona gorenja in visokih temperatur se razvije v območju zračnika za vpihovanje in pa vrat, saj je tam dotok svežega zraka s kisikom izjemno velik.

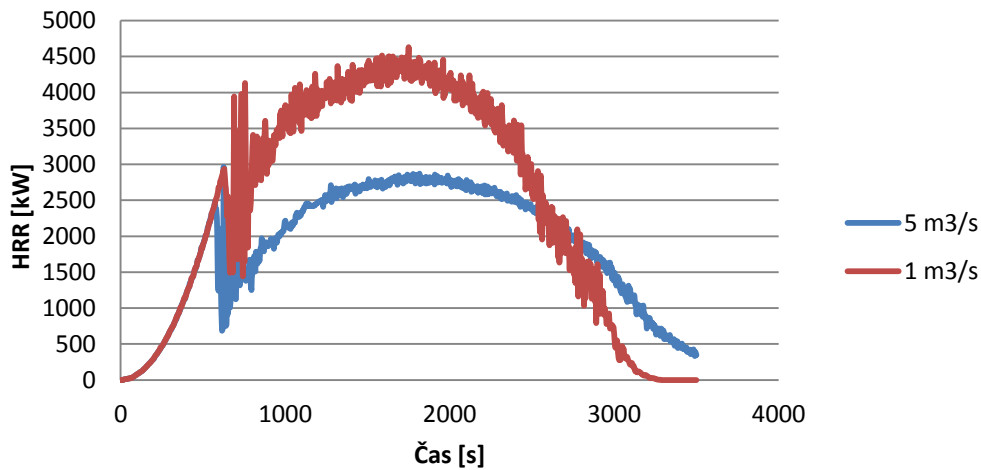
Zanimivo je še to, da v vseh primerih povečanje ventilacije iz  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  na  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  pri zaprtih oknih ne vplivajo veliko na potek požara in območja gorenja in je veliko bolj pomembna pozicija samih zračnikov, kot pa dejanski pretok skozi njih.

### Primer ventilacije 1



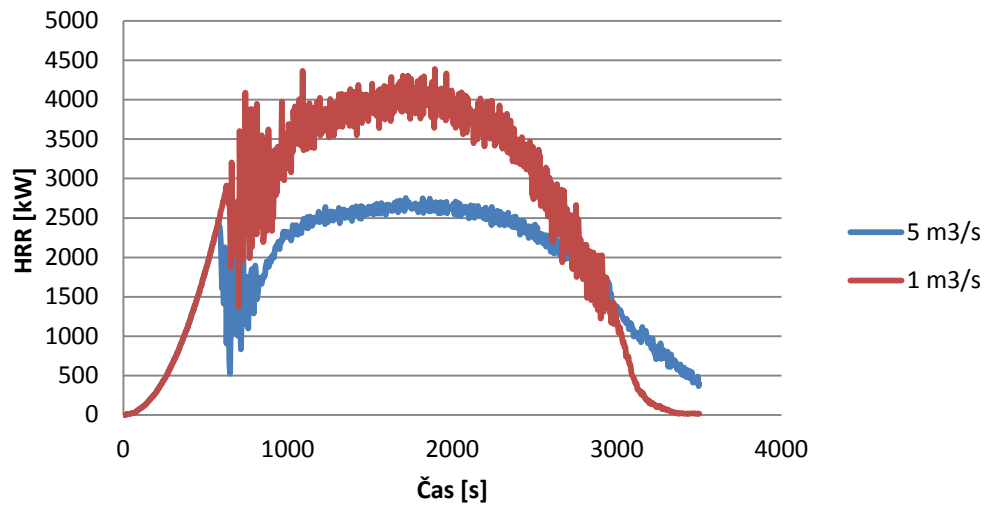
Slika A - 28: Primerjava HRR pri »Primeru ventilacije 1« za izpihovanje 5 m<sup>3</sup>/s in 1 m<sup>3</sup>/s.

### Primer ventilacije 2



Slika A - 29: Primerjava HRR pri »Primeru ventilacije 2« za izpihovanje 5 m<sup>3</sup>/s in 1 m<sup>3</sup>/s.

### Primer ventilacije 3



Slika A - 30: Primerjava HRR pri »Primeru ventilacije 3« za izpihovanje 5 m<sup>3</sup>/s in 1 m<sup>3</sup>/s



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



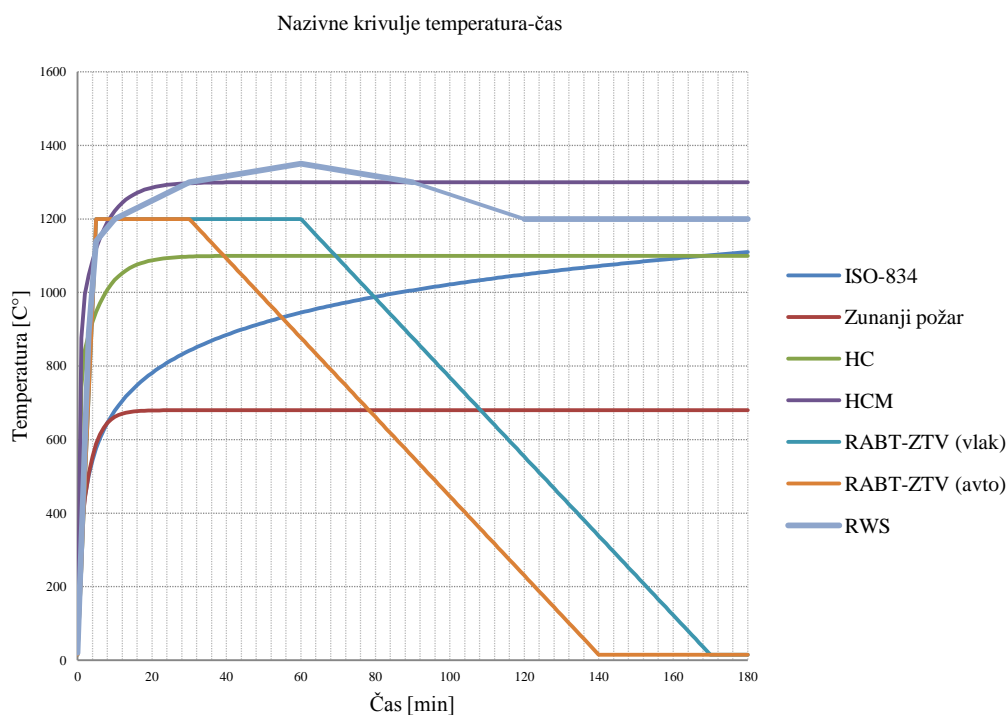
Naložba v vašo prihodnost  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski socialni sklad

Ta stran je namenoma prazna.

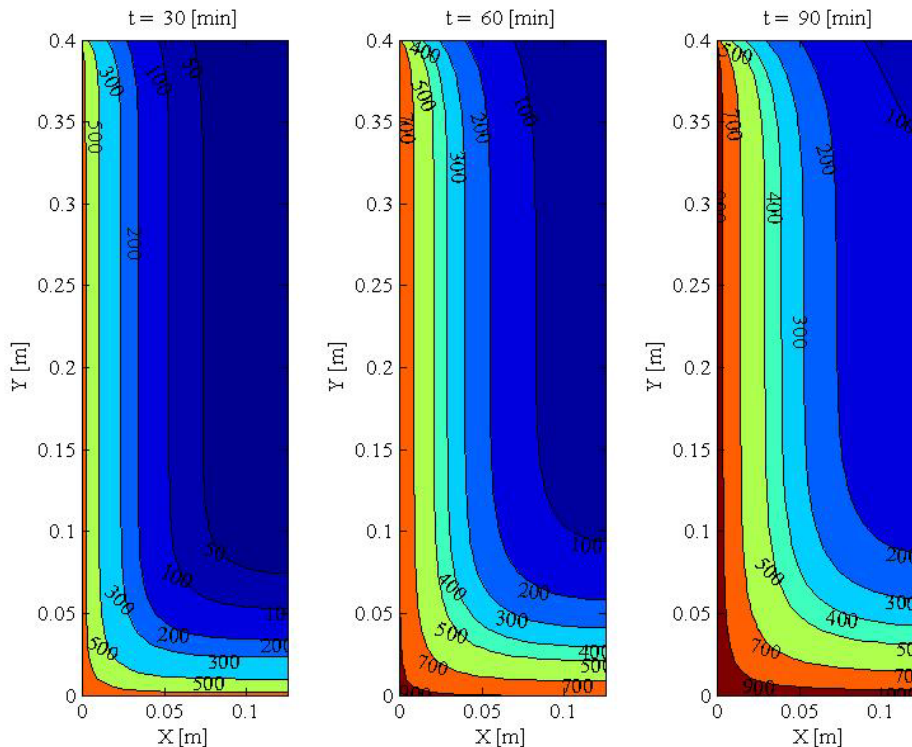


## B.1 UVOD

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 TOPLITNA 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 prostorninski 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  $h_s$  [ $W/m^2$ ],  $\theta_T$  [ $^{\circ}C$ ] mejna ploskev kjer je spreminjanje temperature  $\theta_s$  [ $^{\circ}C$ ] predpisano s temperaturnim režimom,  $n_i$  komponente normale na ploskev,  $\theta_0$  [ $^{\circ}C$ ] 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  $h_c$  [ $W/m^2$ ] toplotni tok zaradi konvekcije in je odvisen od temperature plinov  $\theta_g$  [ $^{\circ}C$ ] ter temperature površine elementa  $\theta_m$  [ $^{\circ}C$ ]. Definiran je z izrazom:

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

kjer je  $\alpha_c$  [ $W/m^2 K$ ] 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  $\alpha_c=9$   $W/m^2 K$ .

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

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

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,  $\theta_f$  [ $^{\circ}C$ ] je efektivna temperatura sevanja, Stefan-Boltzmannova konstanta pa je  $\sigma$  in znaša  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [ $W/m^2 K^4$ ].

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

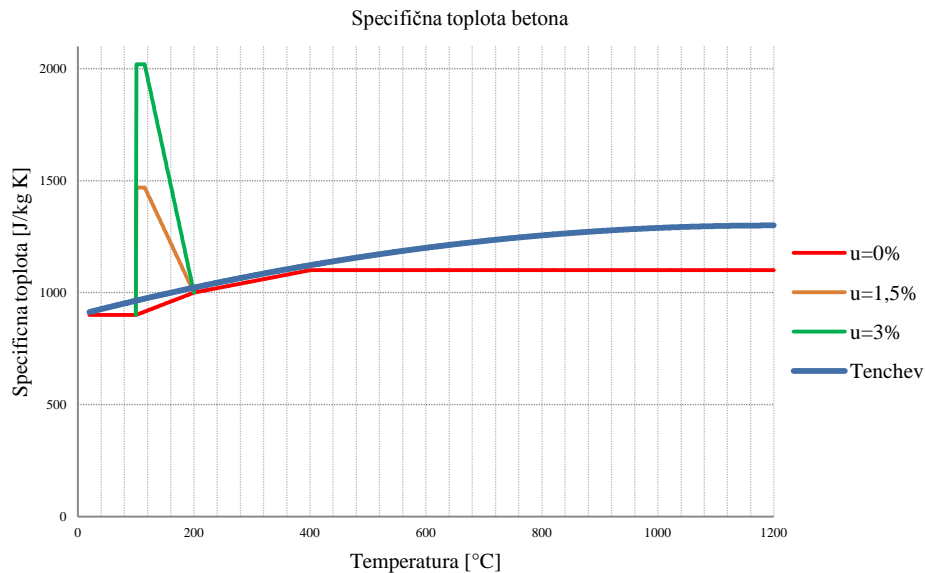
Standardna krivulja temperatura-čas	25
Požarna krivulja zunanjega požara	25
Ogljikovodikov krivulja temperatura-čas	50
Parametrična krivulja temperatura-čas	35

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.

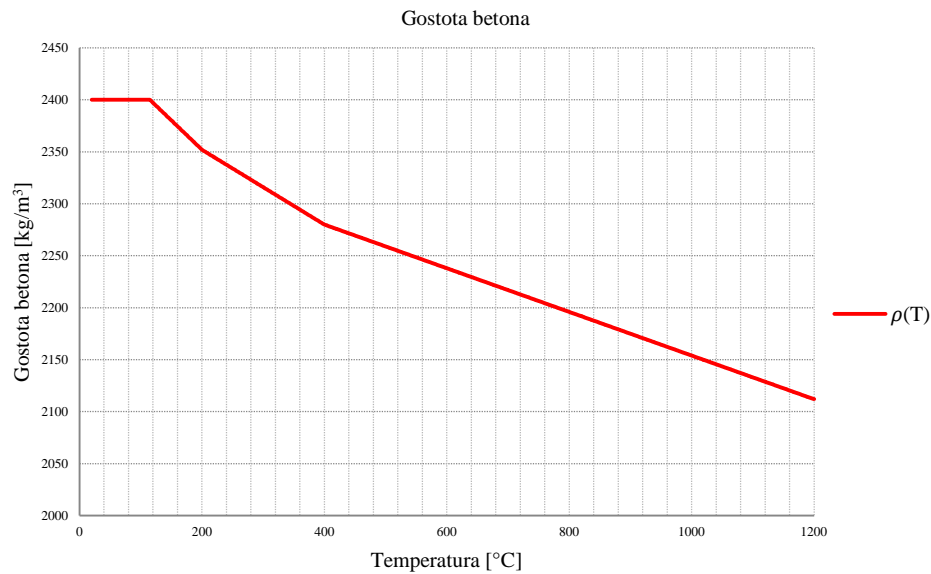
### B.3 TEMPERATURNO ODVISNI MATERIALNI PARAMETRI BETONA

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).

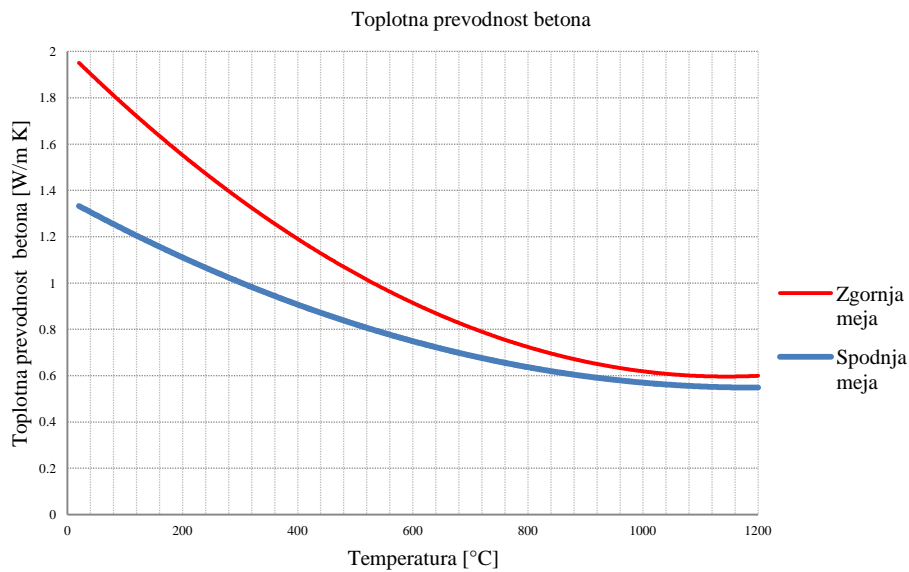
Toplotna prevodnost betona  $\lambda_c$  [W/m K] se z večanjem temperature  $\Theta$  [°C] zmanjšuje. V SIST EN 1992-1-2 sta podani dve meji, ki opisujeta zmanjševanje toplotne prevodnosti. Zgornja meja je podana z enačbo:

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

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.



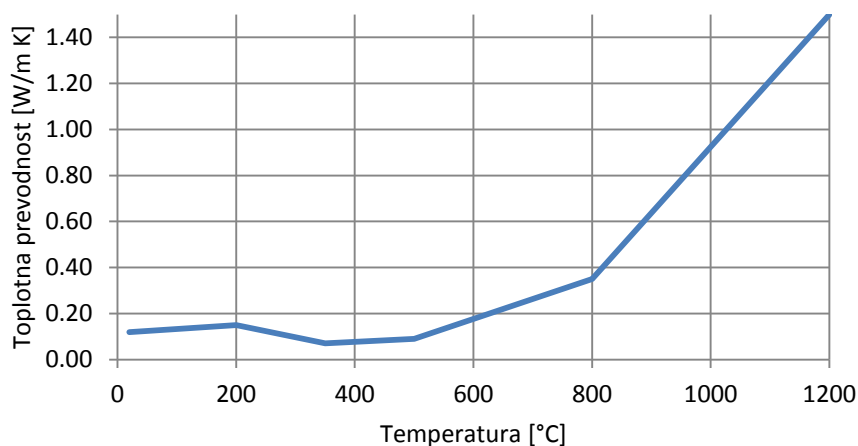
Slika B - 5: Graf zgornje in spodnje meje toplotne prevodnosti betona v odvisnosti od temperature (SIST EN 1992-1-2: 2005).

#### 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. Vlaga v lesu pozitivno vpliva na prenos toplote, saj se za izparevanje vode porabi energija in se s tem upočasnjuje 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



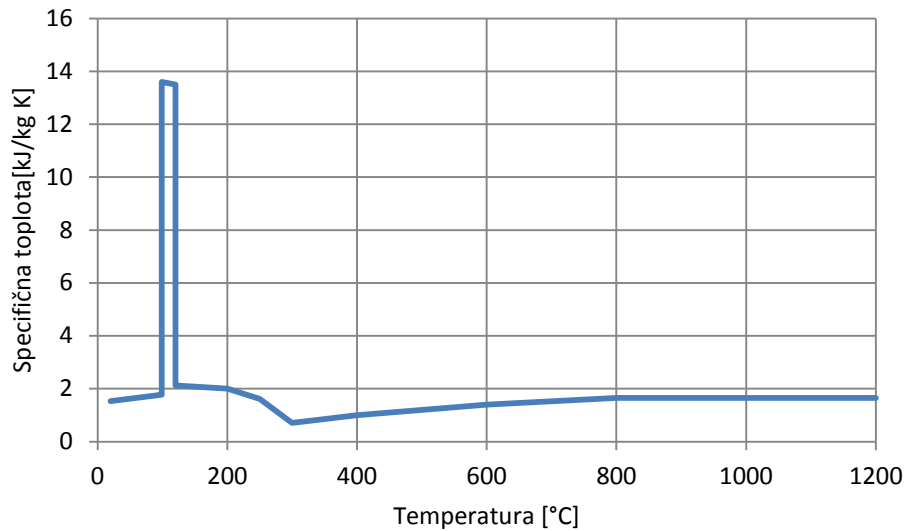
Slika B - 6: Graf toplotne prevodnosti (EN 1995-1-2: 2004).

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.

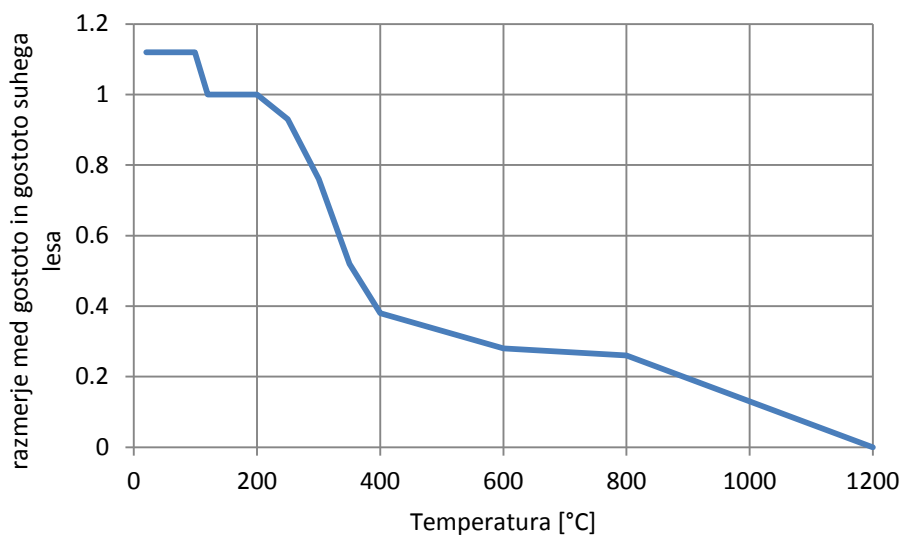
Tabela B - 3: Specifična toplota in razmerje med gostoto in gostoto suhega lesa (EN 1995-1-2: 2004).

Temperatura [°C]	Specifična toplota [kJ/kg K]	razmerje med gostoto in gostoto suhega lesa
20	1.53	1+ $\omega$
99	1.77	1+ $\omega$
99	13.6	1+ $\omega$
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

$\omega$  je delež vlage v lesu



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



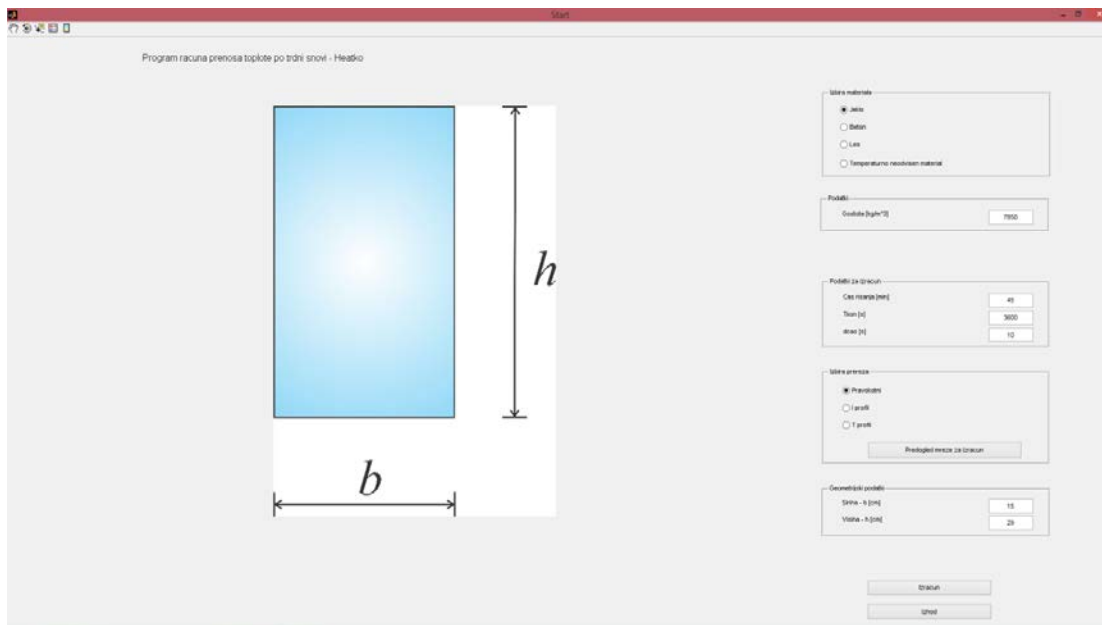
Slika B - 8: Graf med gostoto in gostoto suhega lesa (EN 1995-1-2: 2004).

## 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.

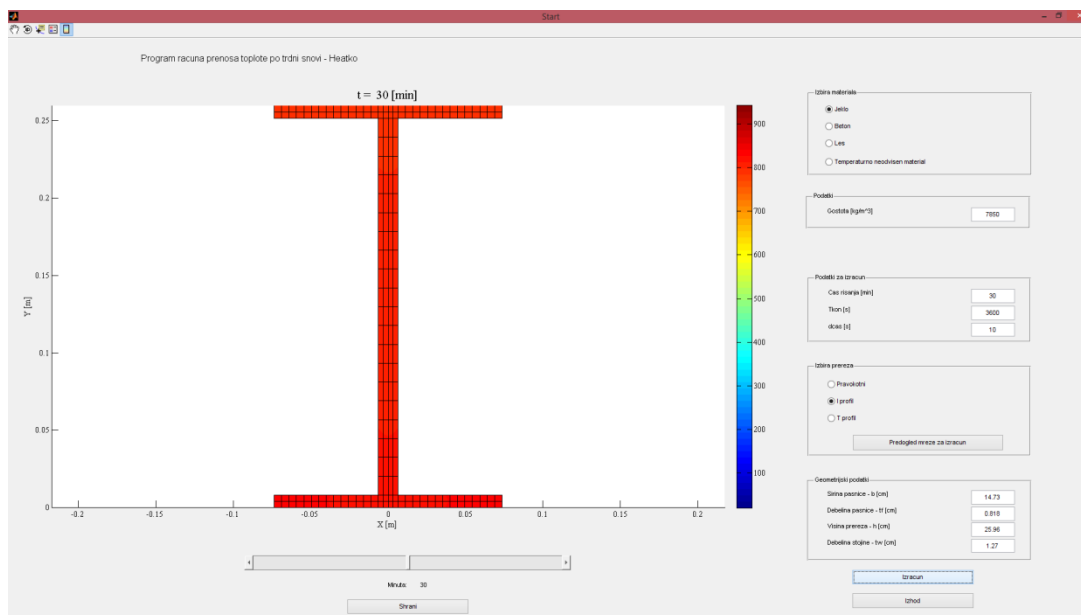
V sledečem, tretjem sklopu so podani časovni podatki za izračun. Prvi podatek, čas risanja določa časovni korak, ob katerem bo prikazan rezultat. Čas risanja je številčna vrednost med nič in podanim končnim časom risanja,  $T_{kon}$ . Ker je  $T_{kon}$  podan v sekundah, čas risanja pa v minutah, mora 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.

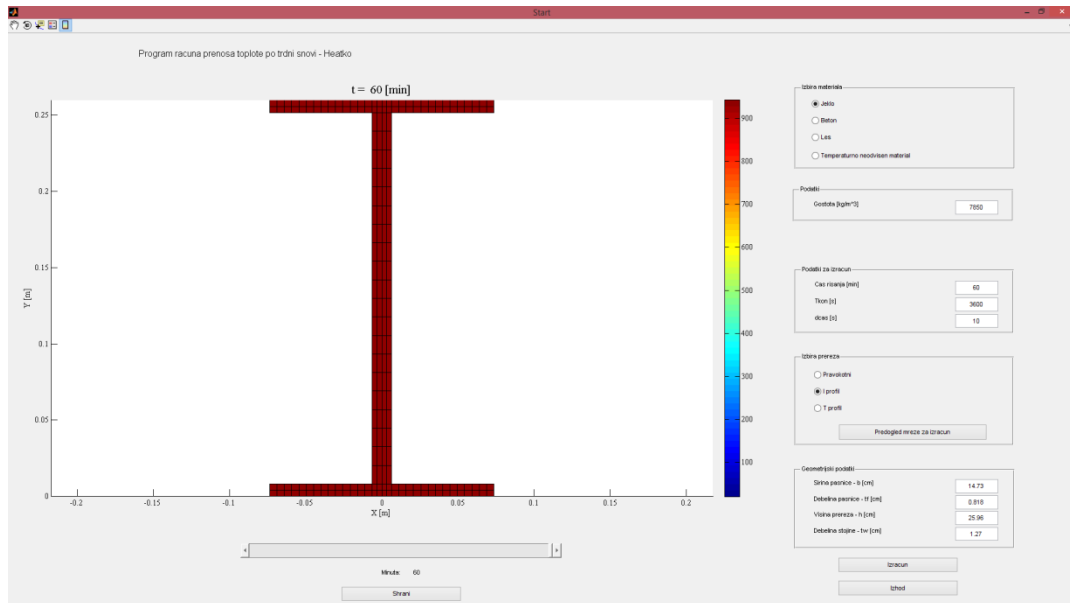
Po uspešno vnesenih podatkih se procesiranje prične s pritiskom na gumb "Potrdi". Potek lahko spremljamo v orodni vrstici MATLAB-a, kjer se izpisujejo delni rezultati ter časovni korak ali na pomožnem pogovornem oknu (angl. waitbar), ki se odpre po začetku. Procesiranje se konča po zaključenem zadnjem 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):

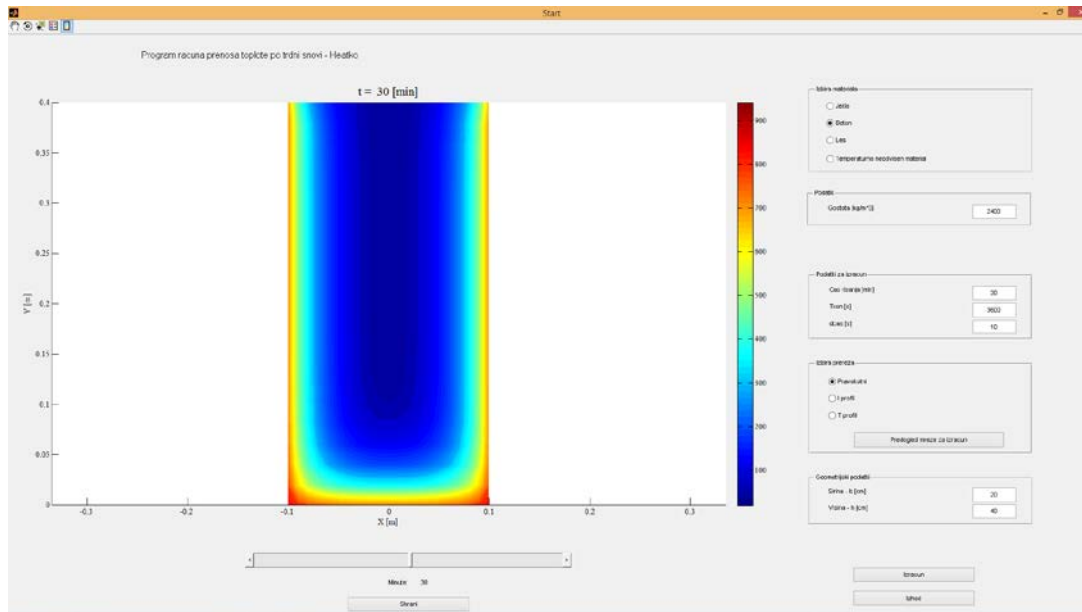


Slika B - 11: Izris temperaturnega profila brez ponovnega izračuna.

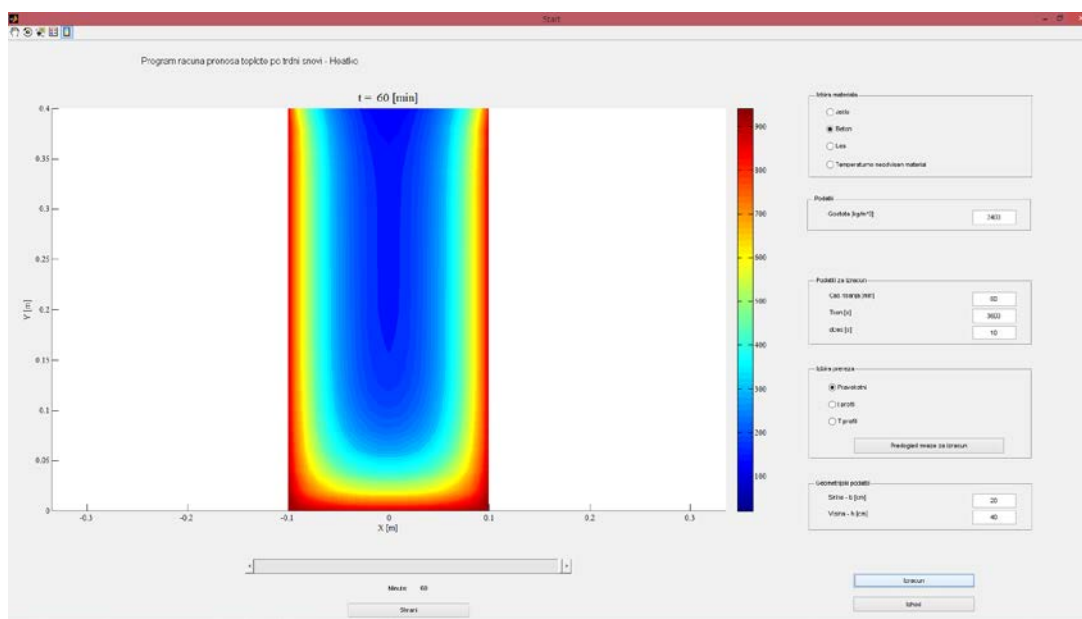
Iz slike je razvidno, da se s premikom drsnika spremeni tudi napis nad sliko, pod drsnikom ter čas risanja v rubriki vhodnih podatkov.

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.

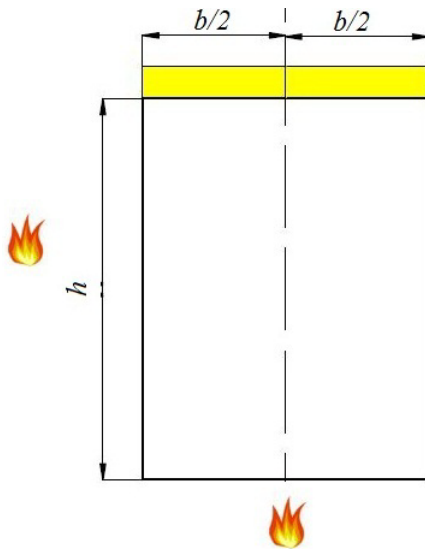
## B.6 VPLIV UPARJEVANJA NA POTEK RAZVOJA TEMPERATURE PO LESENM ELEMENTU

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.

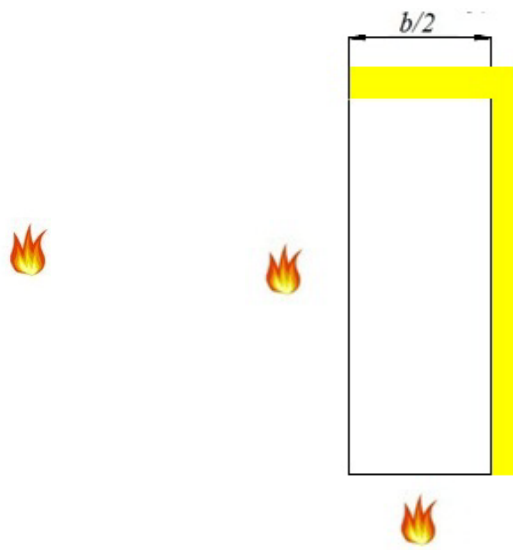
Analizo smo izvedli na lesenem nosilcu s prerezom  $h/b=24/18$  cm. Pri lesu smo uporabili materialne karakteristike, ki jih podaja standard SIST EN 1992-1-2. Za gostoto lesa pri sobni temperaturi smo privzeli vrednost  $420\text{kg/m}^3$ , za začetno relativno vlažnost pa 12%. Nosilec je

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 robu (desni element na sliki B - 14)

Model brez upoštevanja osne simetrije

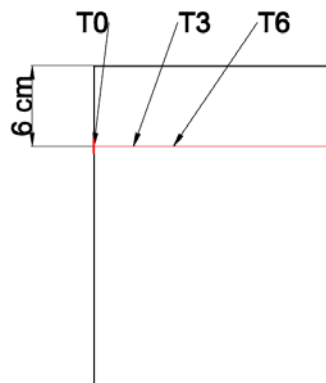


Model z upoštevanjem osne simetrije



Slika B - 14: Model obravnavanega elementa.

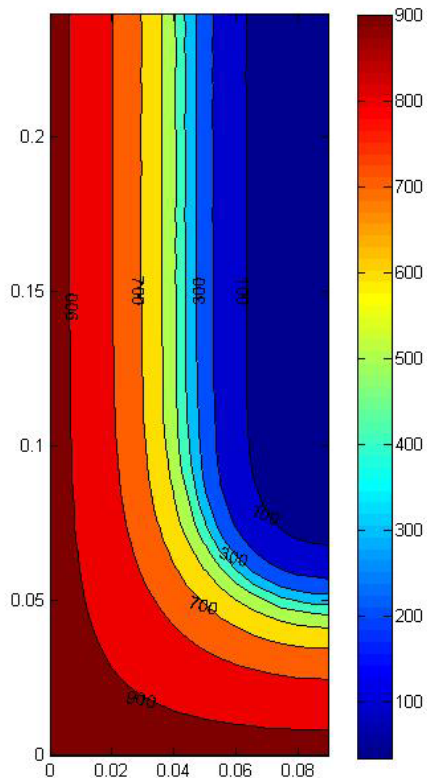
Pri primerjavi smo se osredotočili predvsem na hitrost napredovanja oglenenja po prerezu. Uporabili smo predpostavko iz standarda SIST EN 1992-1-2, ki pravi, da se za zoglenel, upošteva tisti del prereza kjer je temperatura preseгла 300°C. Analizirali smo potek temperature po prerezu in časovni razvoj 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).



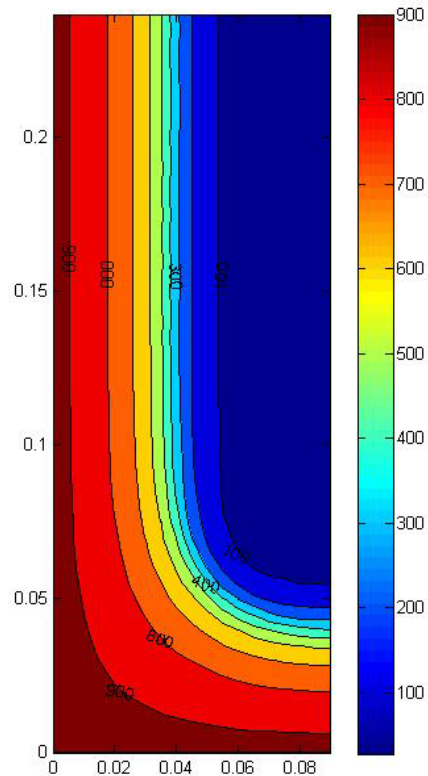
Slika B - 15: Položaj točk T0, T3 in T6.

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

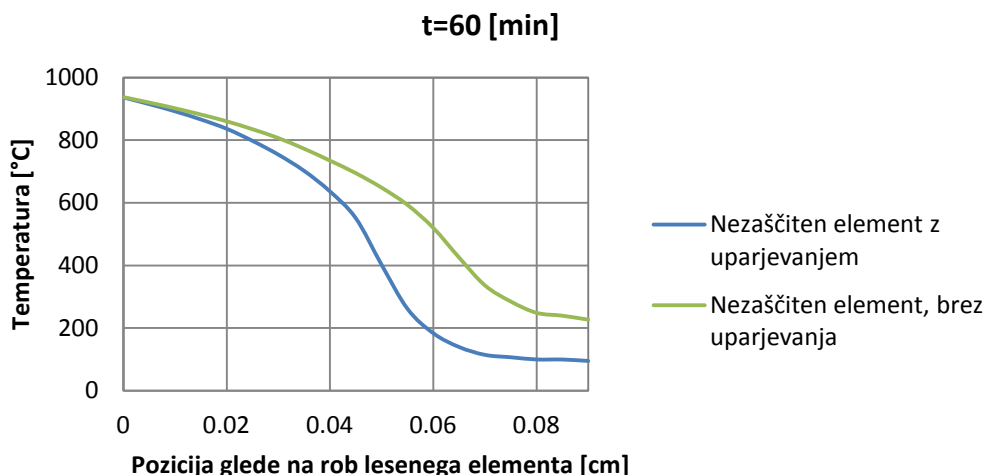


Razpored temperature po prerezu če upoštevamo vpliv uparjevanja na segrevanje

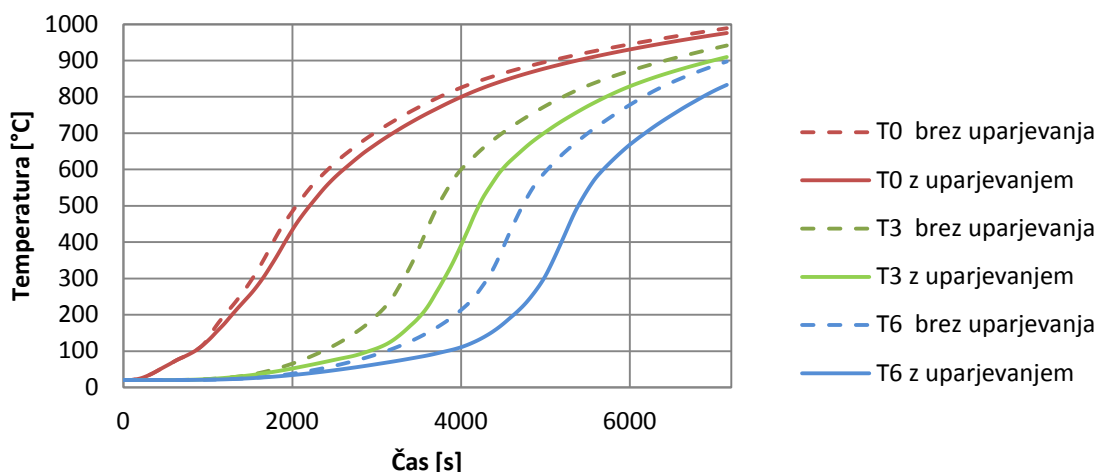


Slika B - 16: Razpored temperature po prerezu.

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 razlika, ko se pomikamo globlje v element, povečevati. Ko primerjamo globino zoglenelosti 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.





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 C h končnemu poročilu:*

***Poenostavljena mehanska analiza lesenih  
elementov po standardu SIST EN 1995-1-2:  
2004 in armiranobetonskih elementov po  
standardu SIST EN 1992-1-2: 2004***



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



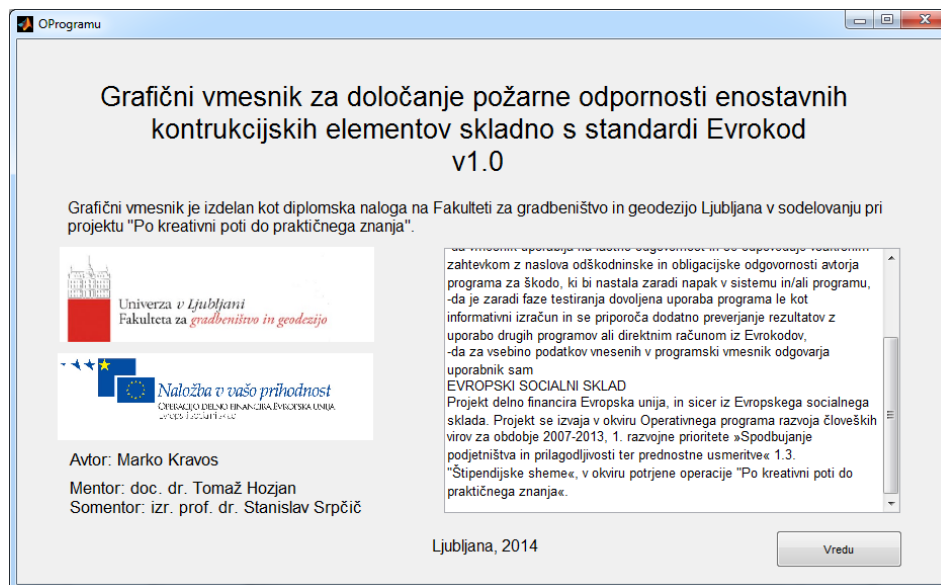
Naložba v vašo prihodnost  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski socialni sklad

Ta stran je namenoma prazna.

## C.1 OPIS DELOVANJA GRAFIČNEGA VMESNIKA ZA DOLOČANJE POŽARNE ODPORNOSTI ENOSTAVNIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV SKLADNO S STANDARDI EVROKOD.

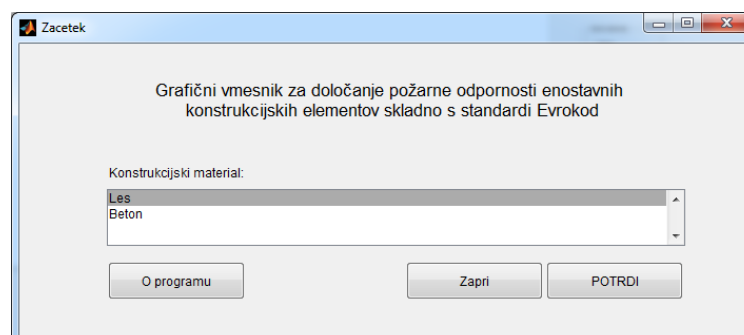
Osnovni namen grafičnega vmesnika (v nadaljevanju vmesnik) je približati izračun požarne odpornosti študentom in projektantom. S preglednim grafičnim vnosom vhodnih podatkov in iznosom rezultatov dobi uporabnik boljši pregled nad dogajanjem v elementu tekom požarne obremenitve, prav tako pa lahko opazuje spremembe pri različnih obremenitvah, elementih in materialih.

Program zaženemo z dvoklikom na datoteko FIDO.exe (oziroma FIDObeta.exe). V kolikor program zaganjamo prvič, moramo najprej namestiti program MCR (Matlab Compiler Runtime). To storimo z zagonom datoteke FIDO\_pkg (oz. FIDObeta\_pkg). Ko se vsebina datoteke razširi, se pojavi namestitveni čarovnik s katerim namestimo MCR na poljubno mesto na računalniku. Ko je namestitev končana, lahko program FIDO zaženemo.



Slika C - 1: Okno "O programu" je prvo okno, ki se nam pojavi ob zagonu.

Drugo okno (pojavi se v ozadju uvodnega okna), pa je že prvi uporabni del programa (slika C - 2). Na njem izberemo material konstrukcijskih elementov, ki jih bomo analizirali. Na voljo imamo Les in Beton.



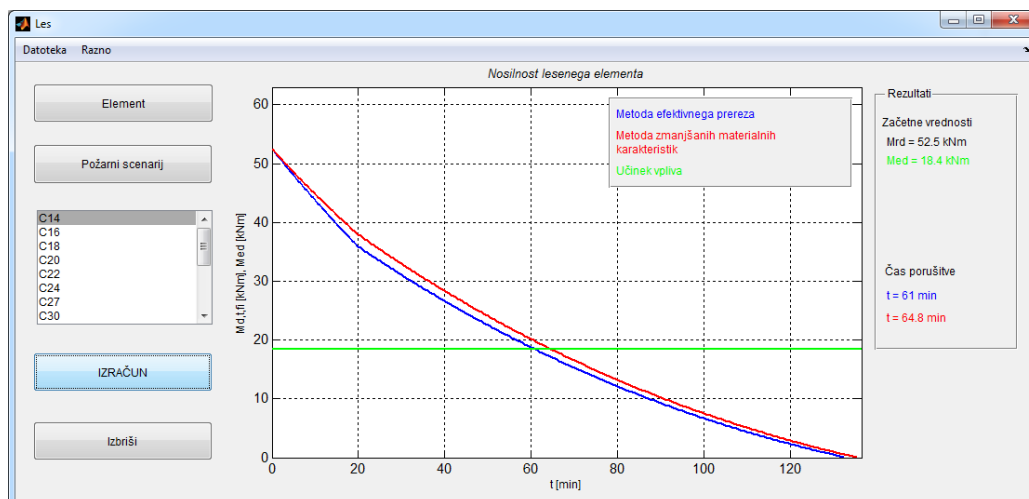
Slika C - 2: V oknu "začetek" začnemo z uporabo programa tako, da izberemo željeni material

Okni za analizo elementov sta si v osnovi zelo podobni. V obeh primerih moramo vnesti vse potrebne podatke o elementu in o požarnem scenariju. Programski vmesnik sam preverja ali so vneseni vsi potrebni podatki in ali so ti podatki sploh števila, vseeno pa pri vnosu pazimo na smiselnost podatkov.

Po vnosu vseh podatkov v osnovnem oknu pritisnemo na gumb »IZRAČUN«, ki nam v obliki grafa vrne podatke o padanju mehanske odpornosti po času tekom izbrane požarne obremenitve. Poleg grafa se nam na desni strani izpiše še začetna mehanska odpornost (nosilnost pred izbruhom požara, t.j. nosilnost pri sobni temperaturi), učinek vpliva (obremenitev) v elementu ter čas porušitve (t.j. čas ko odpornost pade pod učinek vpliva).

### C.1.1 Les

Program se v tem primeru poslužuje dveh poenostavljenih metod iz standarda SIST EN 1995-1-2:2005 in sicer metode z zmanjšanim prečnim prerezom (v nadaljevanju metoda 1) in metode z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami (v nadaljevanju metoda 2). Rezultati se izpišejo za obe metodi (slika C-3). Pri vnosu podatkov o elementu in požarnem scenariju in tipu lesa, vrstni red ni pomemben.

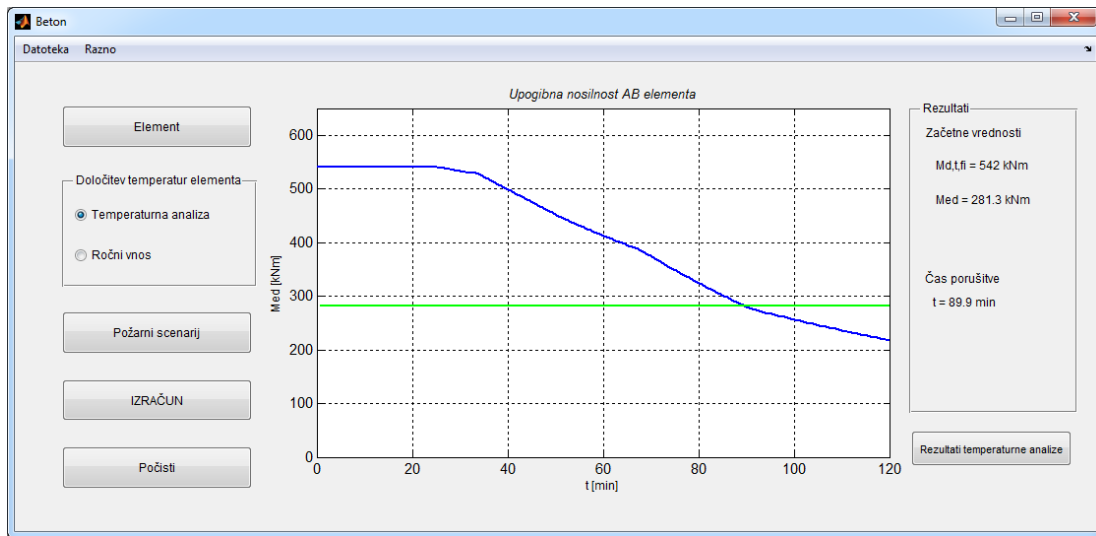


Slika C - 3: Primer rezultatov mehanske analize lesenega elementa.

### C.1.2 Beton

Program deluje na osnovi poenostavljene metode izoterme 500°C definirane v standardu 1992-1-2:2005. Metoda zahteva uporabo temperaturnih profilov, kjer je za različne prečne prereze, različne požarne scenarije in različne čase označen potek izoterme 500°C. V ta namen program ponuja dve opciji in sicer ročni vnos in temperaturno analizo. Pri prvi s pomočjo temperaturnih profilov vnesemo temperature v armaturi in širino pregretega betona (metoda predvideva, da beton s temperaturo nad 500°C nima trdnosti). V primeru temperaturne analize pa program deluje v povezavi s programom HEATKO (Hozjan, 2009) in določi potek izoterme za specifičen primer. Rezultate temperaturne analize si lahko posebej ogledamo s pritiskom na gumb »Rezultati temperaturne analize«. Pri obeh opcijah se

upošteva padec nosilnosti armature v odvisnosti od povišane temperature in sicer z redukcijskimi koeficienti  $k_{s,T}$  za ustrezno armaturo (preglednica 12 in preglednica 13).



Slika C - 4: Primer rezultatov mehanske analize armiranobetonskega elementa.

Tabela C - 1: Koeficient  $k_{s,T}$  za natezno armaturo.

Hladno obdelana natezna armatura pri deformacijah $\epsilon_{s,T} \geq 20 \text{ ‰}$										
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

Tabela C - 2: Koeficient  $k_{s,T}$  za tlačno armaturo.

Hladno obdelana tlačna in natezna armatura pri deformacijah $\epsilon_{s,T} < 20 \%$										
T [°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	0.5	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

## C.2 PRIMERI IZRAČUNOV

Rezultate izračunov vmesnika je bilo potrebno še preveriti. V programskem pripomočku *Excel* smo pripravili program, ki računa po Evrokod standardih. Rezultati morajo biti primerljivi z rezultati, ki jih daje programski vmesnik.

### C.2.1 Les

#### C.2.1.1 Standardna požarna krivulja

- Metoda efektivnega prečnega prereza:

Debeline zoglenelega (upoštevamo vpliv robnega oglenenja):

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

$$k_0 = 1$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

Oglenenje pri požarni izpostavljenosti iz večih strani:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t$$

$\beta_n = 0.7$  mm/min (lepljen lameliran les)

t = čas v minutah

Efektivna širina in višina prereza:

$$b_{ef} = b - 2d_{ef}$$

$h_{ef} = h - d_{ef}$  oz.  $h_{ef} = h - 2d_{ef}$ , če je element izpostavljen požaru iz vseh 4 strani.

Materialne karakteristike:

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

$$f_{20} = k_{fi} * f_k$$

$f_k$  = trdnost lesa

$$k_{fi} = 1.25 \text{ (za masiven les)}$$

$$\gamma_{M,fi} = 1.0 \text{ (material ne oslabšamo)}$$

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} * f_{20} / \gamma_{M,fi}$$

- **Metoda z reduciranimi materialnimi karakteristikami:**

Rezidualna širina in višina prereza:

$$b_{rez} = b - 2d_{char,n}$$

$h_{rez} = h - d_{char,n}$  oz.  $h_{rez} = h - 2d_{char,n}$ , če je element izpostavljen požaru iz vseh smeri.

$$f_{md,fi} = k_{mod,fi} * f_{m,20} / \gamma_{M,fi}$$

Materialne karakteristike:

Obseg požaru izpostavljenih stranic (p) in površino rezidualnega prereza ( $A_r$ ) podajamo v m oz  $m^2$ .

$p = b_{rez} + 2h_{rez}$  oz.  $p = 2b_{rez} + 2h_{rez}$ , če je element izpostavljen požaru iz vseh strani.

$$A_r = b_{rez} * h_{rez}$$

$k_{mod,fi} = 1.0 - 1/200 * p/A_r$  (pri upogibni trdnosti) oz.  $k_{mod,fi} = 1.0 - 1/125 * p/A_r$  (pri tlačni trdnosti).

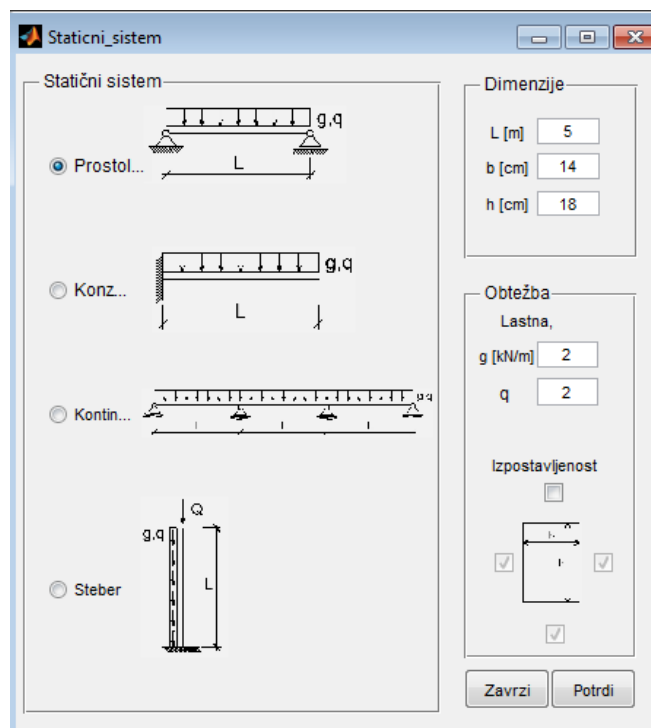
$$f_{20} = k_{fi} * f_k$$

$$Y_{M,fi} = 1.0$$

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} * f_{20} / Y_{M,fi}$$

### C.2.1.1.1 Primer: Standardna požarna krivulja

V programskem vmesniku si kot prvo izberemo ustrežni statični sistem. Potrebujemo dolžino elementa (L) in dimenzije prereza (b,h). Nato si izberemo obtežbo (lastno-g, spremenljivo-q). Program nato sam izračuna obtežno kombinacijo. Ta je vedno enaka, ne glede na vrsto spremenljive obtežbe. Kombinacijski faktor  $\psi_2$  je za naslednje primere enak 1,0. Sledi še izbira izpostavljenosti požaru. Tu moramo izbrati iz koliko strani ogroža požar naš element, na izbiro imamo izpostavljenost iz treh oz. vseh smeri. Na izbiro imamo 3 upogibno obremenjene elemente (prostoležeči nosilec, konzolo, in kontinuirni nosilec preko treh polj), ter tlačno obremenjen element (steber).



Slika C - 5: Okence v programskem vmesniku za izbiro statičnega sistema.



### C.2.1.1.2 Prostoležeči nosilec

Izberem prostoležeči nosilec z naslednjimi dimenzijskimi in obtežnimi podatki (Slika C-6).

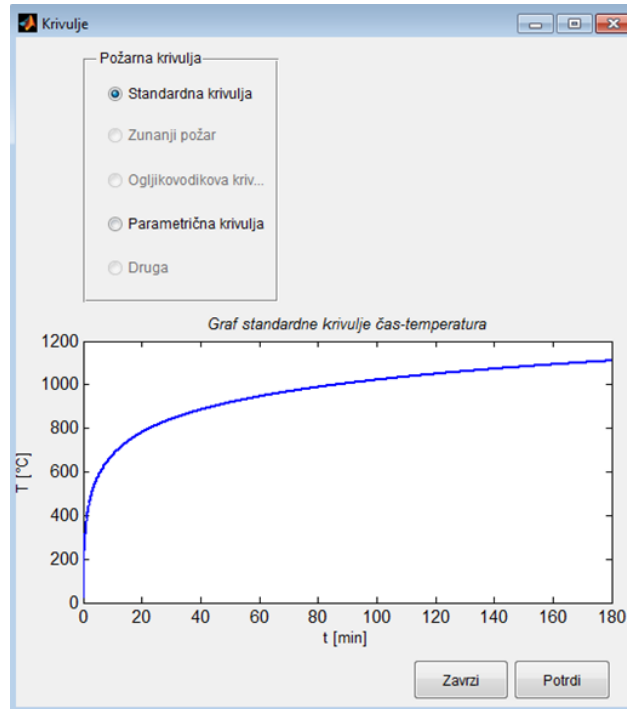
The screenshot shows the 'Staticni sistem' window with the following settings:

- Statični sistem:** Prostoležeči (selected)
- Dimenzije:**
  - L [m]: 5
  - b [cm]: 16
  - h [cm]: 20
- Obtežba:**
  - Lastna, koristna:
    - g [kN/m]: 2
    - q [kN/m]: 2
  - Izpostavljenost požaru:
    - (unchecked)
    - (checked)
    - (checked)
    - (checked)

Buttons: Zavrzi, Potrdi

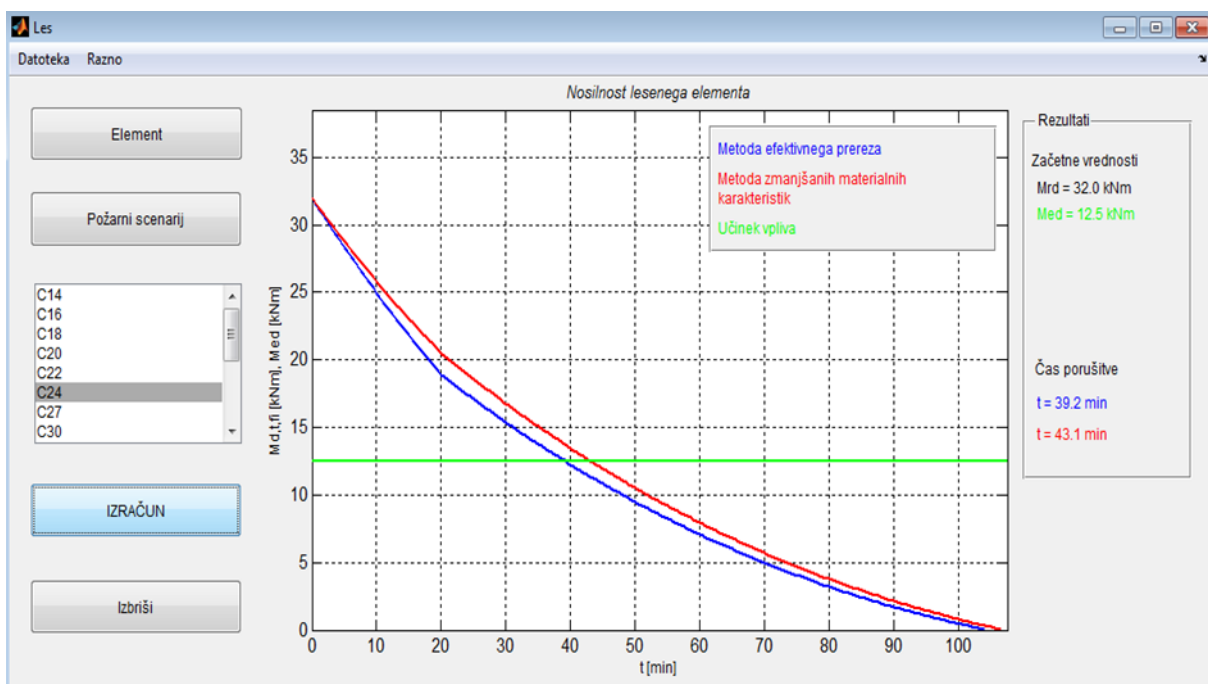
Slika C - 6: Podatki za prostoležeči nosilec izpostavljen standardni požarni krivulji.

Sledi izbira požarnega scenarija. Na izbiro imamo standardno požarno krivuljo in parametrično požarni krivuljo. Izberemo standardno požarno krivuljo (Slika C - 7). Kot opazimo na sliki, temperatura plinov v okolici elementa narašča skozi celoten proces požara.



Slika C - 7: Izbira požarne krivulje-standarda požarna krivulja.

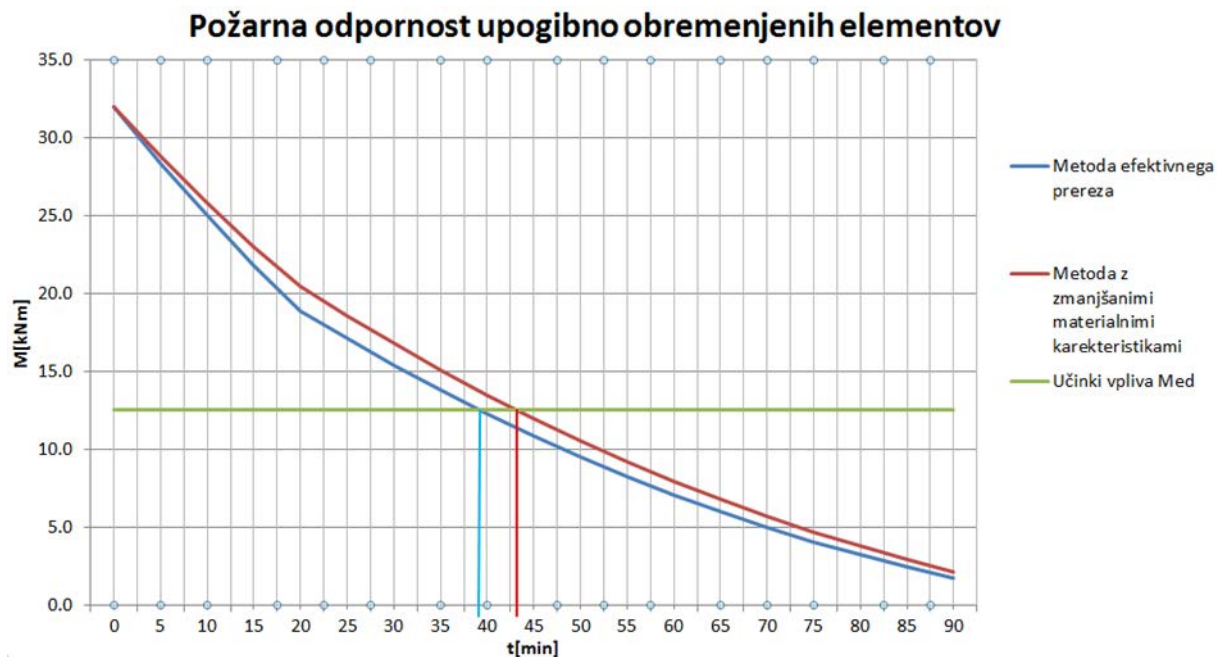
Izbrane imamo vse potrebne podatke za izračun. V osnovnem okencu izberemo še kakovost lesa in pritismo na gumb izračun. Izrišeta se dve krivulji, ki predstavljata padanje nosilnosti lesenega elementa tekom požara, za metodo z efektivni prerezom (modra krivulja) in metodo z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami (rdeča krivulja). Izriše se tudi ravna linija, ki predstavlja učinek vpliva, ki je za naš primer upogibni moment (zelena linija).



Slika C - 8: Rezultati programskega vmesnika (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požaru iz treh smeri.

Mesto, kjer se sekata krivulji z ravno linijo predstavlja porušitev elementa, abscisna koordinata pa predstavlja čas porušitve v minutah. Čas porušitve (se izpiše v okencu) je 39.2 minut za metodo 1 oz. 43.1 minut za metodo 2. To je pričakovano, saj velja metoda 1 za bolj konzervativno metodo.

Prikažem še rezultate iz programa Excel.



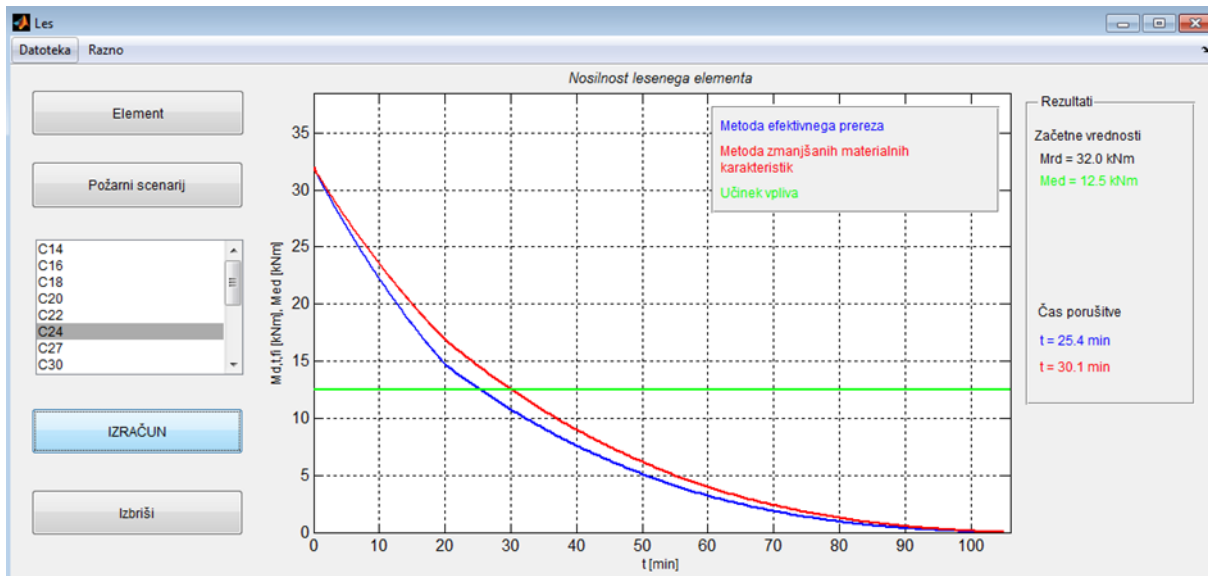
Slika C - 9: Rezultati iz Excel-a (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požaru iz treh smeri.

Rezultati (razultate odčitam iz grafikona) so primerljivi, tako lahko sklepamo da program deluje pravilno.

Sedaj primerjamo isti nosilec še za primer, ko je ta izpostavljen požaru iz vseh štirih smeri. Zanima nas, če program pravilno upošteva zmanjšanje efektivne oz. rezidualne višine.

V okencu za statični sistem, tako obkljukamo še zgornj stranico prereza.

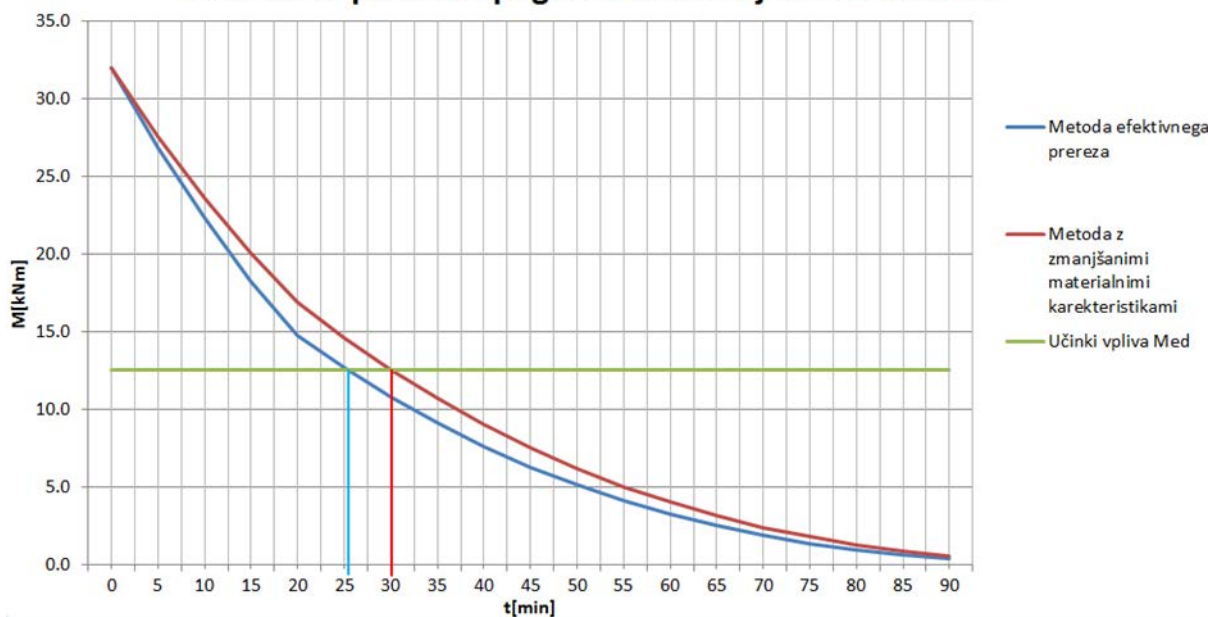
Pričakujemo, da se element poruši hitreje.



Slika C - 10: Rezultati programskega vmesnika (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požari iz vseh štirih smeri.

Čas porušitve pri metodi 1 je 25,4 minut, pri metodi 2 pa 30,1 minutm kar je za slabih 15 minut hitreje, kot v primeru izpostavljenosti iz treh smeri.

### Požarna odpornost upogibno obremenjenih elementov



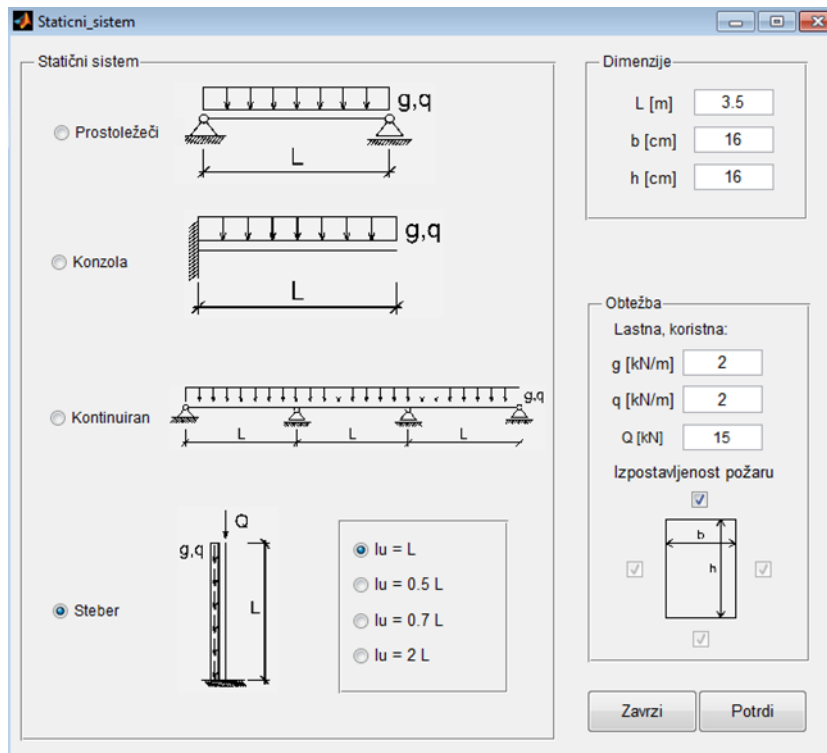
Slika C - 11: Rezultati iz Excel-a (Les C24)-prostoležeči nosilec izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih smeri.

Rezultati iz Excela so primerljivi, tako lahko sklepamo, da program pravilno upošteva zmanjšanje efektivne oz. rezidualne višine, pri izpostavljenosti iz vseh štirih smeri.

### C.2.1.1.3 Steber

Za razliko od upogibno obremenjenih lesenih elementov, kjer je kritična nosilnost prereza je v primeru stebrov kritična uklonska stabilnost elementa. Tako mora programski vmesnik pravilno upoštevati spremembo vitkosti elementa tekom razvoja požara, zaradi večanja ogljenele plasti.

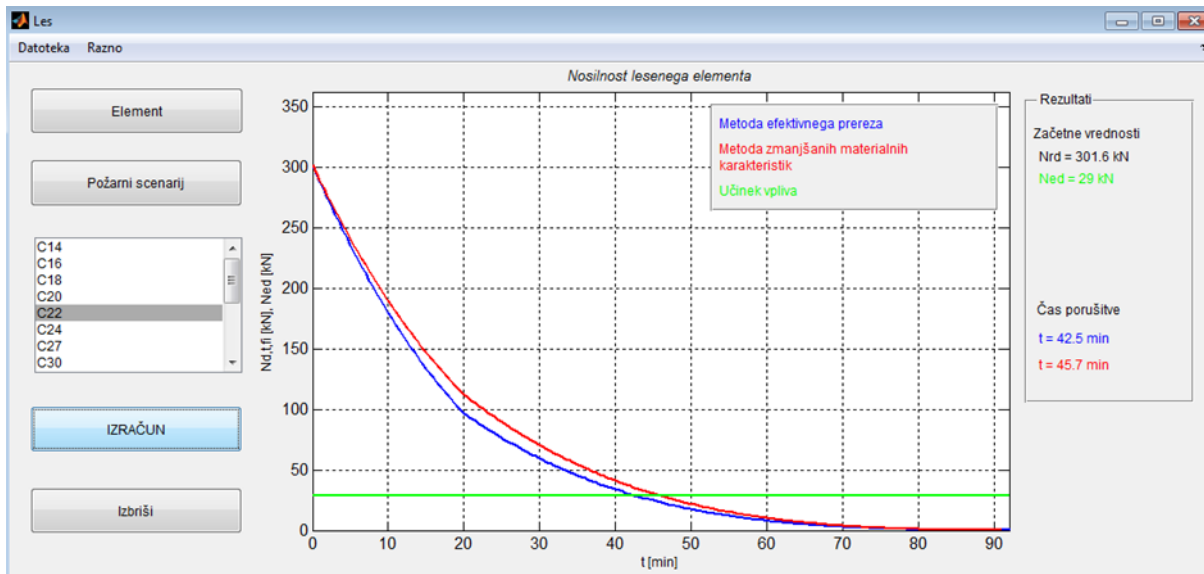
Izberemo steber z naslednjimi lastnostmi (Slika C-12).



Slika C - 12: Podatki za steber izpostavljen standardni požarni krivulji.

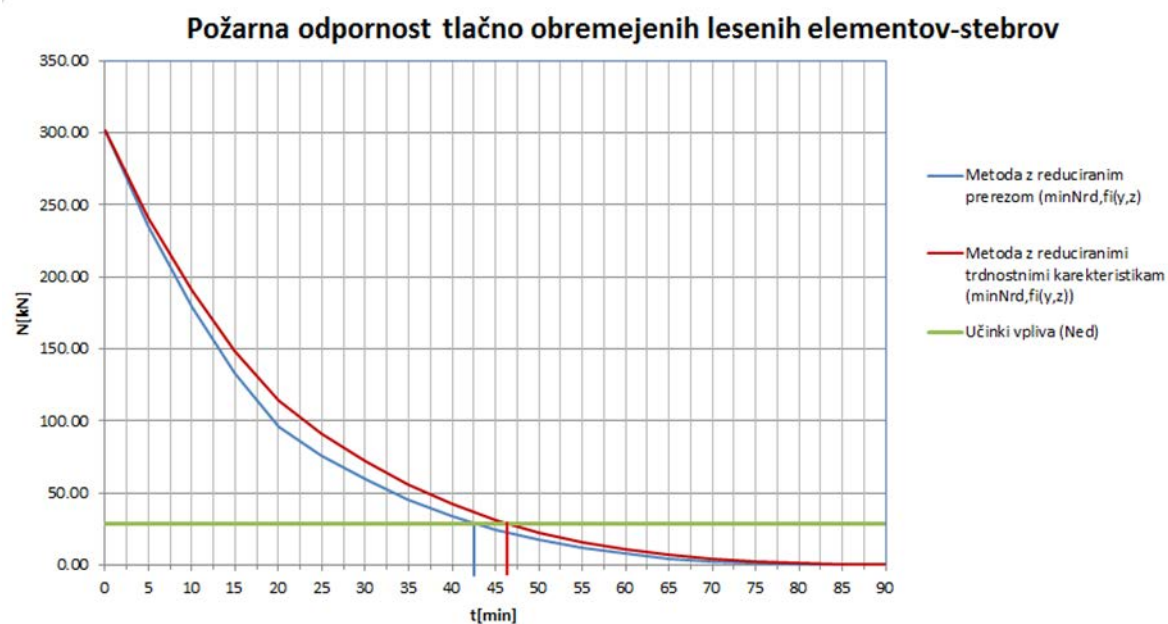
Kot vidimo programski vmesnik omogoča izbiro uklonskih dolžin elementa, v odvisnosti od klasičnih načinov podpiranja.

Izberemo še kakovost lesa in imamo ustrezne podatke za izračun. Ob ponovnem izračunu ni potrebno ponovno izbirati požarnega scenarija, v kolikor ga ne želimo spremeniti.



Slika C - 13: Rezultati programskega vmesnika (Les C22)-Steber izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih smeri.

Učinek vpliva je v tem primeru osna sila v stebru. Krivulji padanja nosilnosti pa predstavljata kritični osni sili, ki povzročita uklon stebra (upoštevata se minimalna vrednost od kritičnih osnih sil za uklon okoli y in z osi prečnega prereza elementa). Programski vmesnik poda naslednja časa porušitve elementa, in sicer 42.5 minut pri metodi 1 in 45.7 minut pri metodi 2 (Slika C – 13).



Slika C - 14: Rezultati iz Excel-a (Les C22)-steber izpostavljen standardnemu požaru iz vseh štirih smeri.

Iz odčitkov na grafikonu iz Excela vidimo, da se rezultati ujemajo.

### C.2.1.2 Parametrična požarna krivulja

Spremeni se stopnja oglenjenja ter globina oglene plasti.

Stopnja oglenjenja:

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

kjer  $\Gamma$  predstavlja brezdimenzijski parameter, in ga določimo v skladu s standardom SIST EN 1991-1-2: 2004, dodatek A-Parametrične krivulje temperatura-čas.

Globino zoglenele plasti določimo po naslednji enačbi:

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

kjer je to časovna perioda pri konstantni stopnji oglenjenja, določimo jo z izrazom:

$$t_0 = 0.009 \frac{q_{t,d}}{o}.$$

#### C.2.1.2.1 Primer: Parametrična požarna krivulja

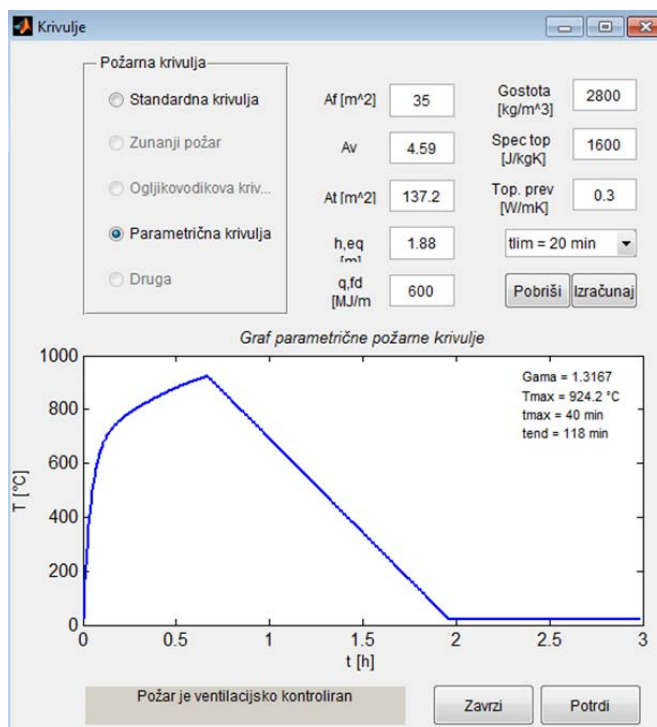
#### C.2.1.2.2 Konzola

Izberemo statični sitem za konzolo z naslednjimi podatki (Slika C-15).



Slika C - 15: Podatki za konzolo izpostavljeno parametrični požarni krivulji.

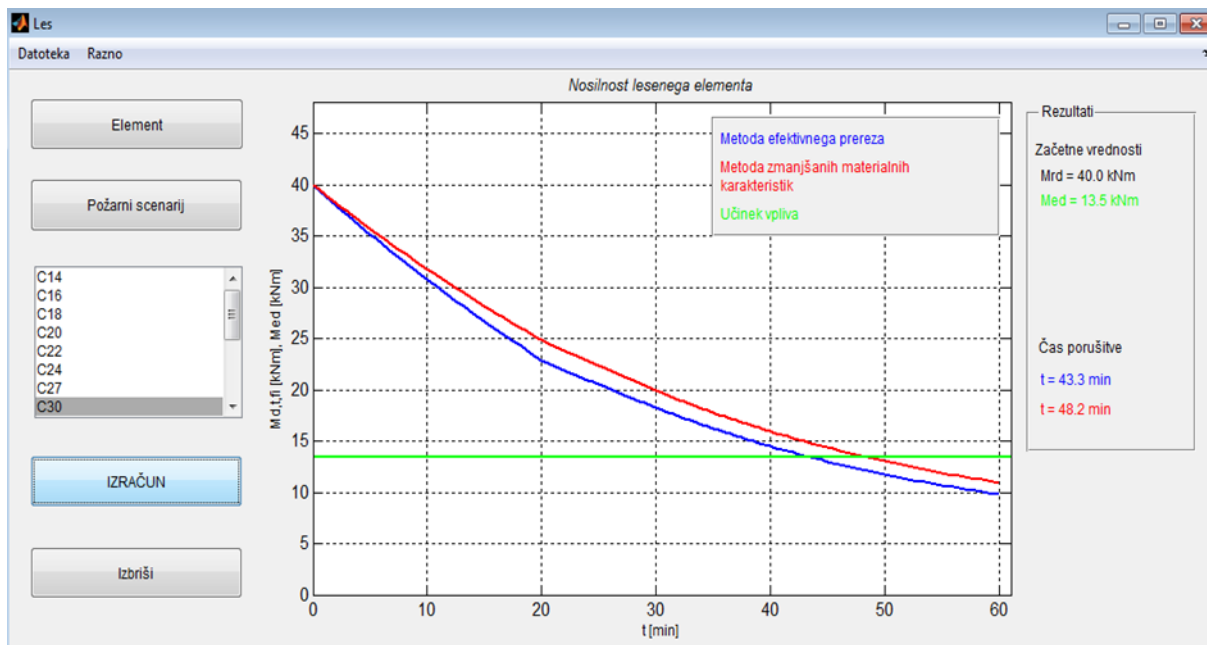
Sledi vnos podatkov za izračun parametrične požarne krivulje. Krivulja upošteva ključne geometrijske podatke prostora, toplotno-fizikalne lastnosti oboda prostora in gostoto požarne obtežbe. Za razliko od standardne požarne krivulje, ki narašča ves čas, parametrična upošteva padanje temperature plinov v okolici elementa (Slika C-16).



Slika C - 16: Vnos podatkov za parametrično požarno krivuljo in izris požarne krivulje.

Sledi izbira kakovosti lesa in imamo vse pripravljeno za izračun.



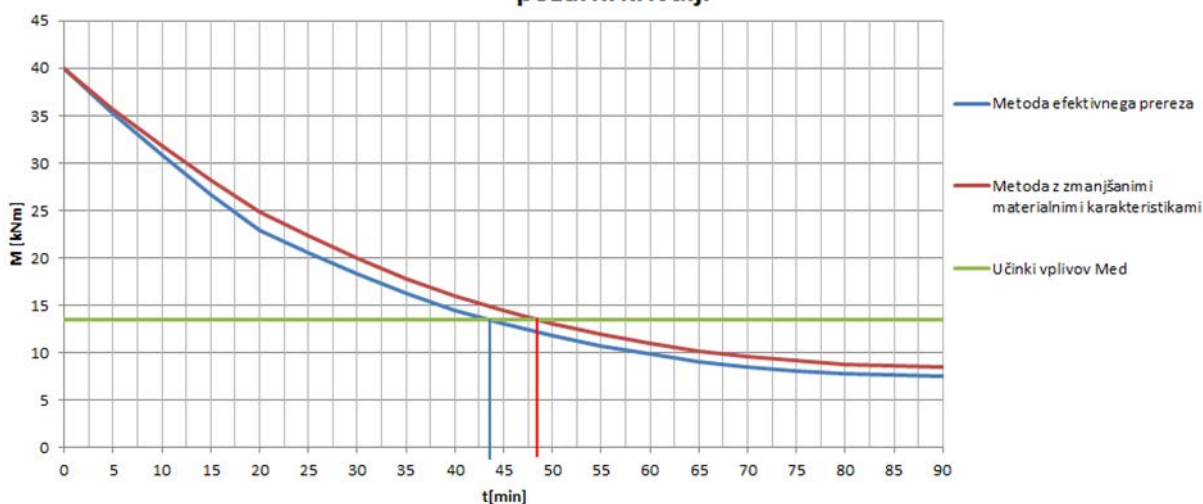


Slika C - 17: Rezultati programskega vmesnika (Les C30)-Konzola izpostavljena parametrični požarni krivulji iz treh smeri.

Čas porušitve je 43,3 minut. za metodo 1 in 48,2 minut. za metodo 2.

Sledi še prikaz rezultatov iz Excela.

### Požarna odpornost upogibnih elementov izpostavljenih parametrični požarni krivulji



Slika C - 18: Rezultati iz Excel-a (Les C30)-konzola izpostavljena parametrični požarni krivulji iz treh smeri.

Na podlagi odčitkov iz grafikona lahko sklepamo, da se podatki dobro ujemajo.

## C.2.2 Beton

Kot prvo, prikažemo del teoretičnega ozadja, po katerem se računa požarna odpornost betonskih elementov. Besedilo je povzeto po standardu SIST EN 1992-1-2: 2005.

### C.2.2.1 Požarni scenarij

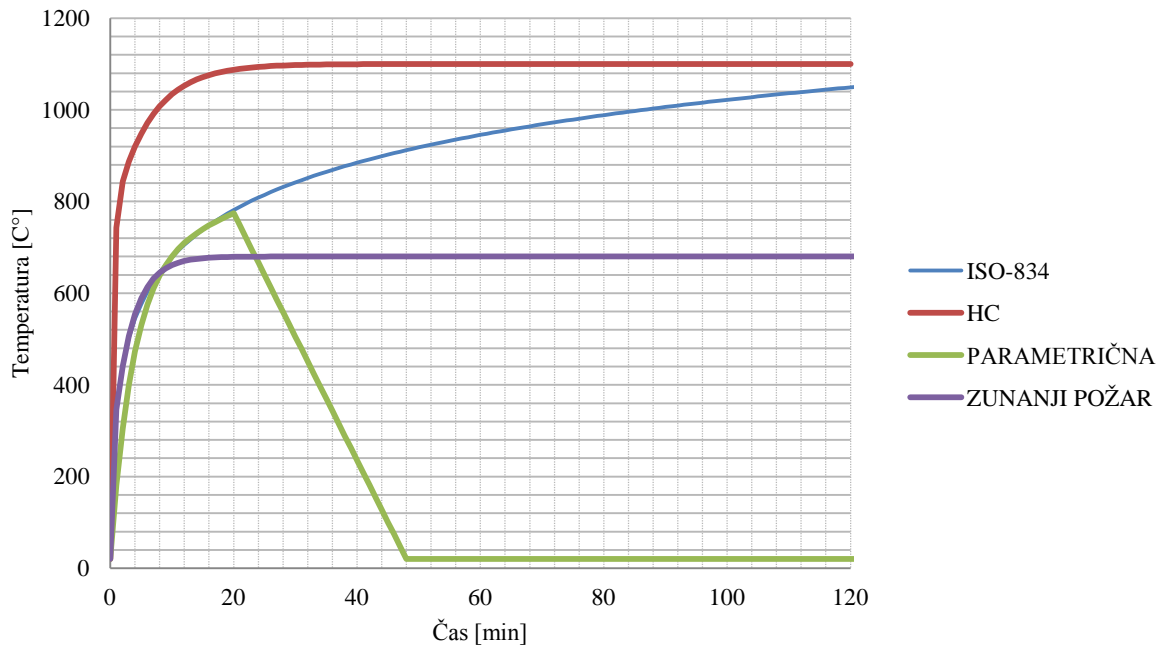
Požarni scenarij predstavlja kvalitativen opis poteka požara s časovno opredeljenimi ključnimi dogodki, ki označujejo požar in ga razlikujejo od drugih možnih požarov. Navadno definira proces vžiga in širjenja (rasti) požara, stopnjo polno razvitega požara ter stopnjo pojemanja požara upoštevajoč lastnosti 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** (parametrična krivulja), 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.



Slika C - 19: Požarne krivulje v skladu s SIST EN 1991-1-2:2002.

### C.2.2.2 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 predstavimo metodo izoterme 500°C, saj je bila uporabljena v programskem vmesniku.

#### C.2.2.2.1 Metoda izoterme 500°C

Metodo izoterme 500°C predstavljan poenostavljen postopek določitve požarne odpornosti enostavnih betonskih elementov skladno s standardom SIST EN 1992-1-2. Lahko jo 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 prereзов 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 precej konzervativna 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 prereзов 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 projektnem 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 C-20):

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

kjer je:

$$N_s = \sum_i A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i},$$

$$N'_s = \sum_j A_{s,j} \cdot f_{sd,fi,j}.$$

Pri izpeljavi smo upoštevali konstanten potek tlačnih napetosti v betonskem delu prečnega prereza, pri tem je  $b_{fi}$  reducirana širina prečnega prereza,  $f_{cd}$  je projektna tlačna trdnost betona pri sobni temperaturi,  $f_{sd,fi,i}$  in  $f'_{sd,fi,j}$  pa predstavljata temperaturno odvisne projektne trdnosti spodnje oziroma zgornje vzdolžne armaturne palice med požarom. Izračunamo ju z izrazom (3) in sicer:

$$f_{sd,fi,i} = k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} \quad \text{in} \quad f'_{sd,fi,j} = k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fi}},$$

kjer je  $k_{s,T,(j)}$  redukcijski faktor trdnosti spodnje oziroma zgornje armature. Upoštevati je potrebno trdnosti pri povišanih temperaturah za vsako armaturno palico posebej, namreč le te se lahko precej razlikujejo.

Upogibno nosilnost, ki temelji na učinkovitem prerezu, izračunamo z enačbo:

$$M_{500} = M_{u1} + M_{u2} = N_c \cdot z + N'_s \cdot z' = N_c \cdot (d_{fi} - 0,4x) + N'_s \cdot (d_{fi} - a')$$

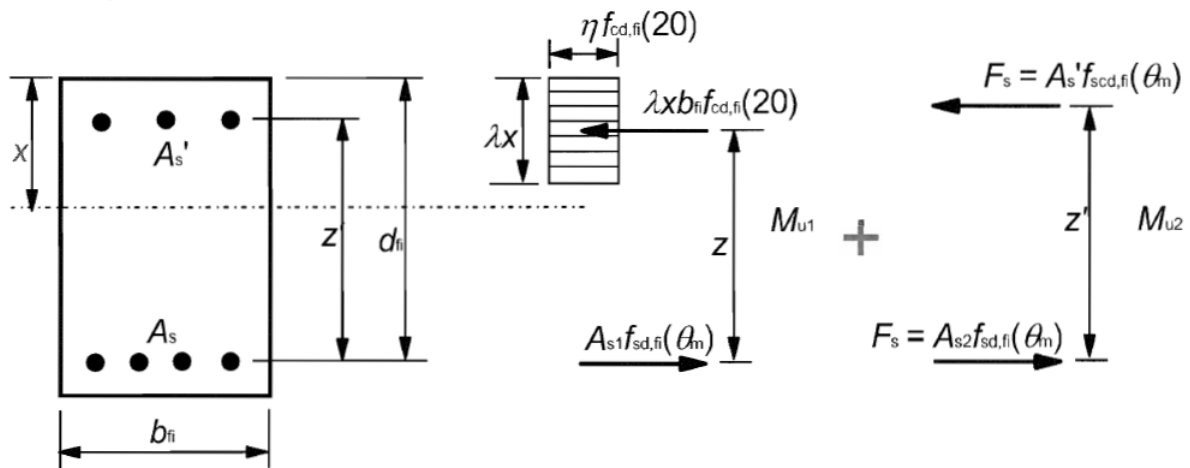
kjer je  $z$  ročica notranjih sil,  $z'$  je razdalja med težiščema spodnje in zgornje vzdolžne armature,  $d_{fi}$  je statična višina prečnega prereza v pogojih požara,  $a'$  pa je oddaljenost težišča zgornje (tlačne) armature od zgornjega roba (slika C-20).

Projektno odpornost armiranobetonskega prečnega prereza nosilca  $R_{d,t,fi}$  v požarnem projektnejem stanju (v tem primeru upogibno odpornost  $M_{d,t,fi}$ ) pa izračunamo z enačbo:

$$M_{d,t,fi} = M_{500} \cdot k_m,$$

kjer je  $k_m$  redukcijski faktor, ki je za normalne betone enak 1 za visoko trdne betone pa je podan v SIST EN 1992-1-2 v preglednici 6.2N (dodatekN).

Ker se nekatere količine, kot so to reducirana širina prečnega prereza, globina nevtralne osi, trdnostne lastnosti armaturnih palic, med požarom spreminjajo, moramo požarno odpornost armiranobetonskega nosilca preveriti pri različnih časovnih intervalih med trajanjem požara.



Slika C - 20: Obremenitev armiranobetonskega prečnega prereza v požarnem projektnejem stanju (SIST EN 1992-1-2: 2005).

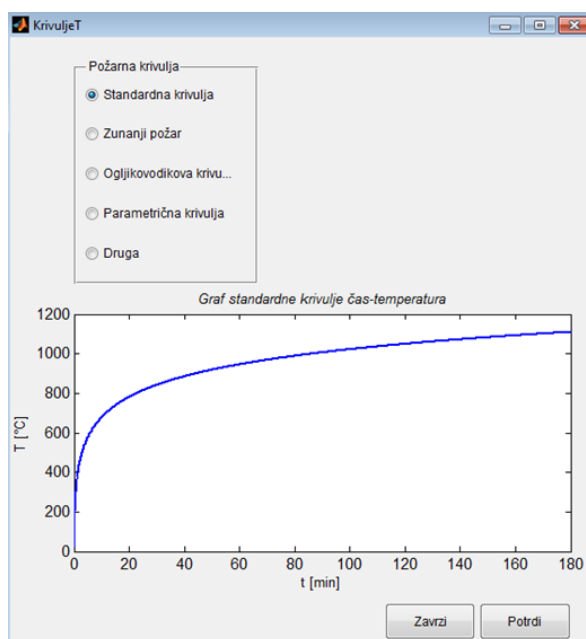
### C2.2.2.1.1 Primer: Model požara - krivulja ISO 834

Podobno kot pri lesu, si izberemo statični sistem (prostoležeči nosilec, konzola). Za kombinacijski faktor si izberem  $\psi_2 = 0.3$  (kategorija A: stanovanja). Na spodnji sliki lahko vidimo podatke (Slika C – 21).

Slika C - 21: Podatki za prostoležeči nosilec.

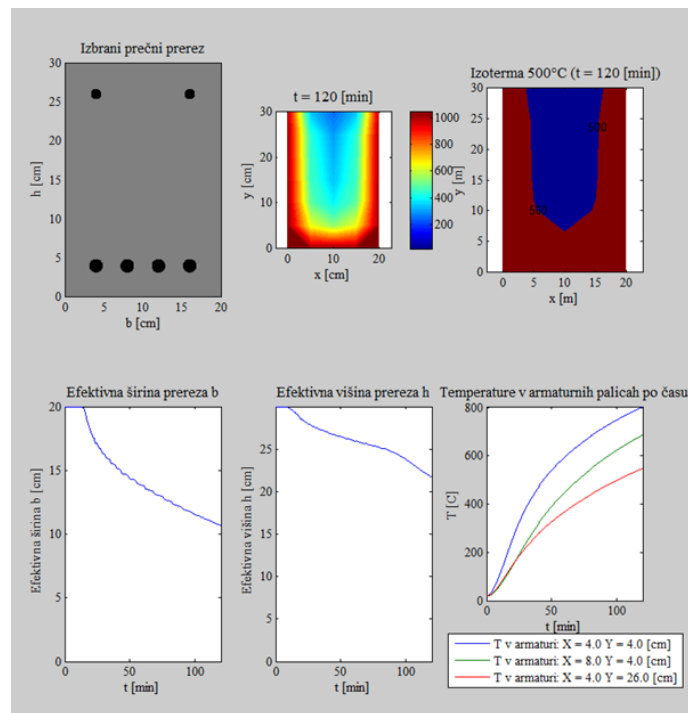
Izberemo si tudi požarni scenarij. Tukaj imamo poleg standardne in parametrične krivulje, na možnost izbrati še ogljikovodikovo in zunanjo krivuljo.

Izberem si standardno požarno krivuljo. Programski vmesnik nas ob izbiri požarnega scenarija opozori, da lahko temperaturna analiza traja tudi nekaj minut.



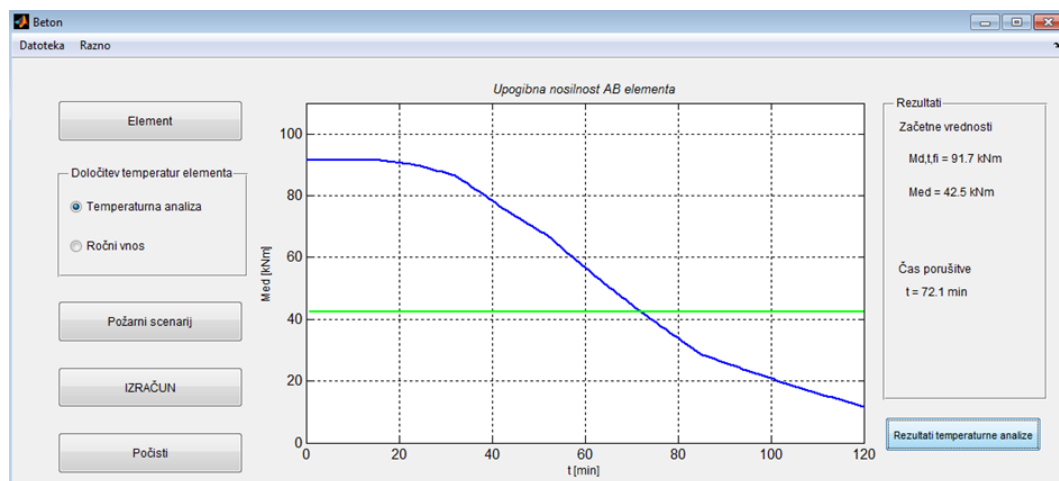
Slika C - 22: Izbira požarne krivulje-standardna požarna krivulja.

Na možnost imamo pregledati rezultate temperaturne analize. V okencu se prikaže slika izbranega prečnega prereza, sliko izračunane temperature v prerezu pri času 120 minut in sliko območja, kjer je temperatura manjša od  $500^{\circ}\text{C}$  pri času 120 minut, sliki spreminjanja efektivne širine in višine prereza ter sliki spreminjanja temperature v armaturnih palicah. Rezultati temperaturne analize so odvisni od določenih geometrijskih podatkov elementa. Tako je potrebna ob katerikoli spremembi teh podatkov ponovno zagnati temperaturno analizo.



Slika C - 23: Okence za rezultate temperaturne analize.

Po stisku na gumb izračun se izriše krivulja padanja nosilnosti armiranobetonskega elementa in linija učinka vpliva (upogibni moment). Podobno kot pri lesenih elementih predstavlja ordinatna os vrednost upogibnega momenta in abscisna os čas v minutah.

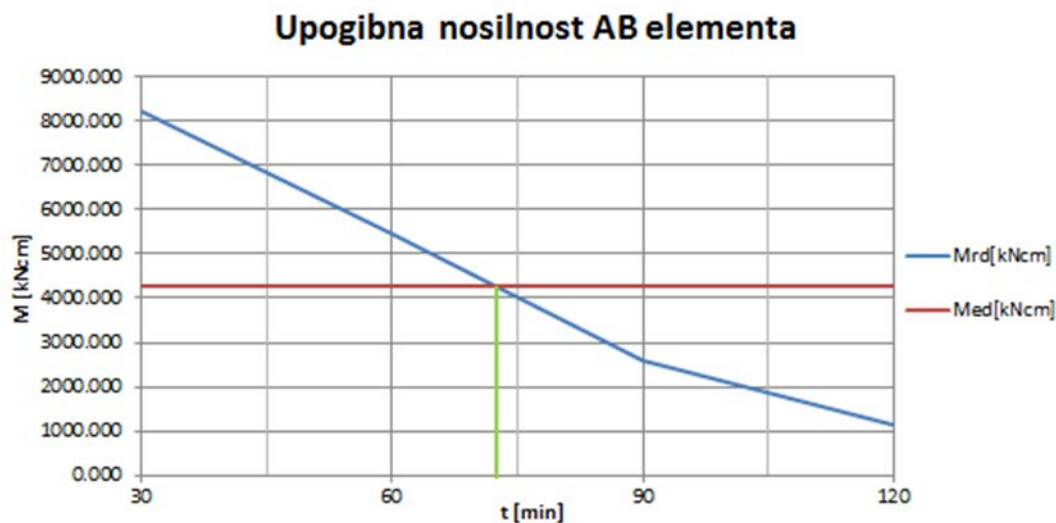


Slika C - 24: Rezultati izračunov programskega vmesnika: prostoležeči AB nosilec izpostavljen standardni požarni krivulji.



Prostoležeči nosilec se poruši pri času  $t = 72.1$  minut.

Sledi še prikaz rezultatov iz programa v Excelu. V tem delu je potrebno povedati, da lahko pride do manjših razlik v rezultatih. Razlika lahko nastane zaradi časovnega koraka. Pri temperaturni analizi v programskem vmesniku se poračuna stanje za vsakih 40 sekund, medtem ko se pri računu iz programa v Excelu (enako je pri ročnem vnosu v vmesniku), zaradi krajšega vnosa računa stanje samo pri že določenih časih (0, 30 min, 60 min, 90 min,...). Vmes je krivulja linearna, kar pripelje do neke razlike v času porušitve (krivulji se lahko sekata malo drugače).



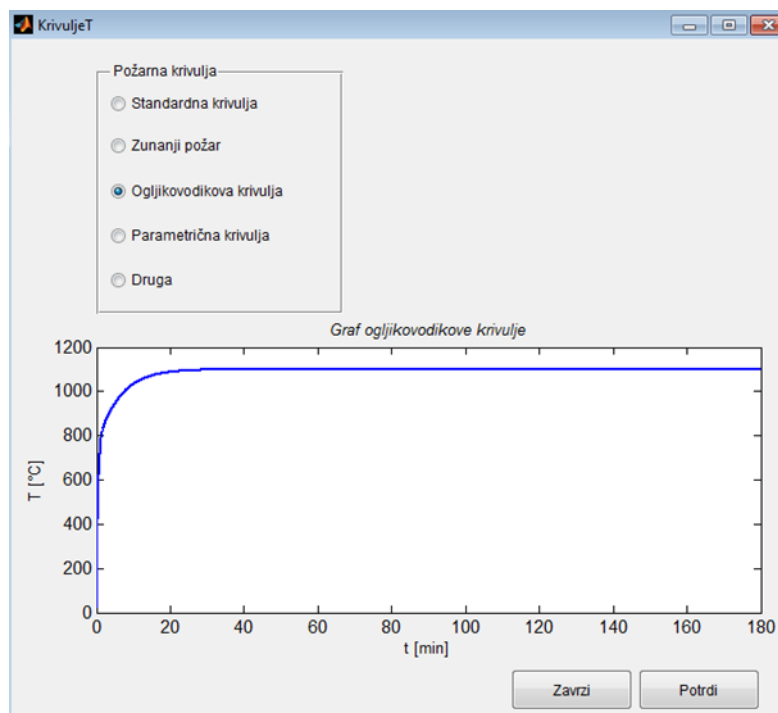
Slika C - 25: Rezultati izračunov s pomočjo Excel-a: prostoležeči AB nosilec izpostavljen standardni požarni krivulji.

Ob odčitku iz grafikona opazimo, da se rezultati dobro ujemajo.

#### C2.2.2.1.1 Primer: Model požara – ogljikovodikova krivulja

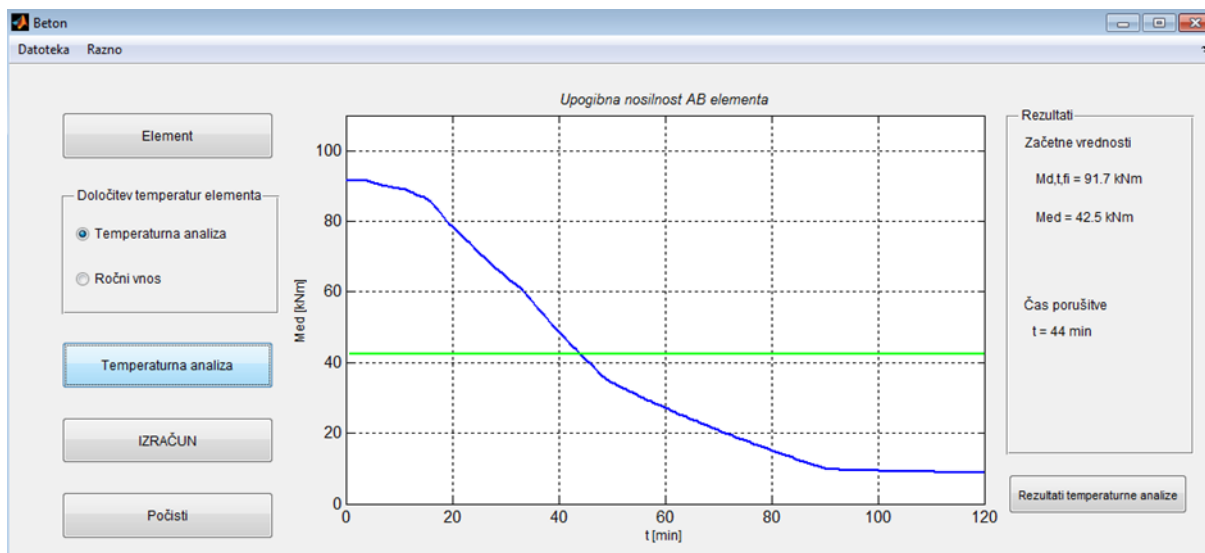
Uporabimo isti element, za požarni scenarij pa izberem ogljikovodikovo krivuljo. Pričakujemo, da se element poruši prej, saj so po tej krivulji predpostavljene višje temperature plinov v okolici elementa (Slika C – 26).





Slika C - 26: Izbira požarne krivulje-ogljikovodikova požarna krivulja.

Po temperaturni analizi imamo pripravljene vse podatke za izračun.

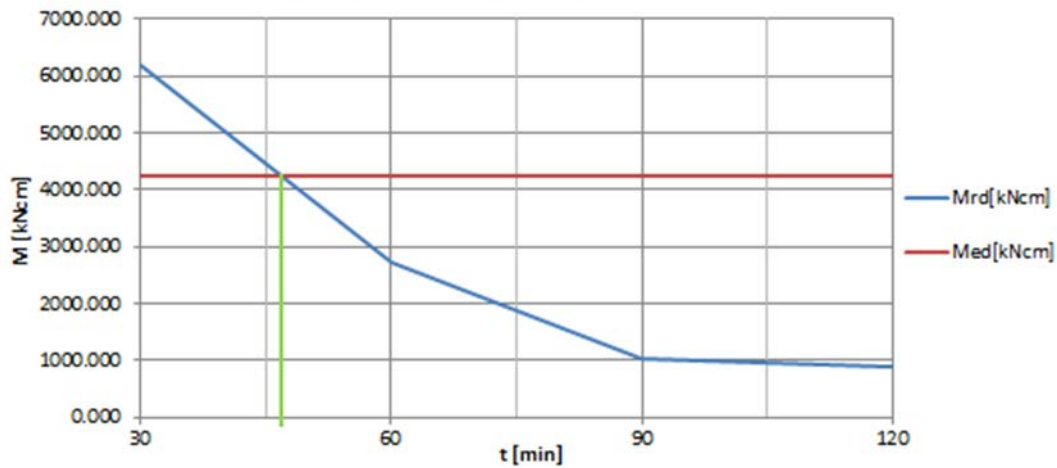


Slika C - 27: Rezultati izračunov programskega vmesnika: prostoležeči AB nosilec izpostavljen ogljikovodikovi požarni krivulji.

Element se poruši prej, in sicer pri  $t = 44$  min.

Sledi še prikaz rezultatov iz Excela.

## Upogibna nosilnost AB elementa



Slika C - 28: Rezultati izračunov s pomočjo Excel-a: prostoležeči AB nosilec izpostavljen ogljikovodikovi požarni krivulji.

Rezultat se dodobra ujema, tukaj se opazi majhna razlika v času porušitve. Kot smo opisali prej, lahko problem pripišemo različnemu časovnemu koraku v programskem vmesniku in programu v Excelu.

## VIRI

Huč, S. 2013. Analiza požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba S. Huč): 78 str.

Huč, S. 2014. Primer uporabe grafičnega vmesnika Pyrosim. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Grajeno okolje

Egart, A. 2012. Požarne krivulje in temperaturni profili AB prečnih prerezov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bratina, S., somentor Hozjan, T.): 35 str.

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

Tehnična smernica TSG -1-001: 2010. Požarna varnost v stavbah. Ministrstvo za okolje in prostor: 60 str.

Mayfield, C., Hopkin, D. 2011. Design fires for use in fire safety engineering. Garston, Watford, BRE Trust: 67 str.

Hietaniemi, J., Mikkola, E. 2010. Design Fires for Fire Safety Engineering. VTT: 101 str.

Bessmertnykh, A., Korostina, M., Sytchev, G., Zaitchenko, V. 2014. Biomass pyrolysis kinetics researching.

Beda, L., Szabó, A. 2013. Determination of thermal decomposition reaction characteristics (A, E) of wood samples for fire dynamics simulation.

Lautenberger, C. 2007. A generalized pyrolysis model for combustible solids. University of California, Berkeley

Matala, A., 2008. Estimation of pyrolysis model parametr for solid materials using termogravimetric data. VTT: 11 str.

Seung, H. 2006. Material property estimation method using a thermoplastic pyrolysis model. Worcester polytechnic institute, Fire protection engineering

Pyrosim air movement. 2013.

[www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2013/12/AirMovement.pdf](http://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2013/12/AirMovement.pdf)

(Pridobljeno 30.5.2014)



FDS mesh size calculator. 2008.

[www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/](http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/) (Pridobljeno 30. 5. 2014)

Pyrosim example guide. 2010.

[www.engr.utk.edu/nuclear/Ruggles/NRC\\_Fire\\_Course/NRC-Mod-05-Computer%20Fire%20Modeling%20using%20Field%20Models/Documentation/PyroSimExamples.pdf](http://www.engr.utk.edu/nuclear/Ruggles/NRC_Fire_Course/NRC-Mod-05-Computer%20Fire%20Modeling%20using%20Field%20Models/Documentation/PyroSimExamples.pdf) (Pridobljeno 30. 5. 2014)

Pyrosim Jet fan. 2013.

[www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2013/12/JetFan.pdf](http://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2013/12/JetFan.pdf) (Pridobljeno 30. 5. 2014)

SIST EN 1991-1-2. SIST EN 1991-1-2:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije. Dodatek E: Gostota požarne obtežbe: 52 str.

SIST EN 1991-1-2:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije.

EN 1995-1-2: 2004. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design

SIST EN 1992-1-2:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila – Projektiranje požarno varnih konstrukcij.

Pyrosim example guide. 2010.

[www.engr.utk.edu/nuclear/Ruggles/NRC\\_Fire\\_Course/NRC-Mod-05-Computer%20Fire%20Modeling%20using%20Field%20Models/Documentation/PyroSimExamples.pdf](http://www.engr.utk.edu/nuclear/Ruggles/NRC_Fire_Course/NRC-Mod-05-Computer%20Fire%20Modeling%20using%20Field%20Models/Documentation/PyroSimExamples.pdf) (Pridobljeno 30. 5. 2014)

Matlab Documentation Center. 2014.

<http://www.mathworks.com/help/matlab/> (Pridobljeno 2. 6. 2014)