

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

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

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Egart, A. 2012. Požarne krivulje in temperaturni profili AB prečnih prerezov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bratina, S., co-supervisor Hozjan, T.): 35 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVA

Kandidat:

ANŽE EGART

**POŽARNE KRIVULJE IN TEMPERATURNI PROFILI
AB PREČNIH PREREZOV**

Diplomska naloga št.: 17/B-GR

**FIRE CURVES AND TEMPERATURE PROFILES OF
REINFORCED CONCRETE SECTIONS**

Graduation thesis No.: 17/B-GR

Mentor:

doc. dr. Sebastjan Bratina

Somentor:

doc. dr. Tomaž Hozjan

Član komisije:

doc. dr. Živa Kristl

prof. dr. Aleš Krainer

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 21.09.2012

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Anže Egart izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Požarne krivulje in temperaturni profili AB prečnih prerezov«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 5. 9. 2012

Anže Egart

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	614.8:624.07:(043.2)
Avtor:	Anže Egart
Mentor:	doc. dr. Sebastjan Bratina
Somentor:	doc. dr. Tomaž Hozjan
Naslov:	Požarne krivulje in temperaturni profili AB prečnih prerezov
Tip dokumenta:	diplomsko delo
Obseg in oprema:	35 str., 16 preg., 30 sl., 40 en.
Ključne besede:	požarne krivulje, temperaturni profili, standardna požarna krivulja, parametrična požarna krivulja, temperaturna analiza

Izvleček

V diplomski nalogi predstavimo različne požarne krivulje. To so poenostavljene metode za opisovanje jakosti požara in podajajo spreminjanje temperature plinov v okolici elementa kot funkcijo časa. Ločimo nominalne in modelirane požarne krivulje. Nominalne požarne krivulje predstavljajo polno razvit požar v požarnem sektorju. Nekaj teh krivulj je podanih tudi v standardu SIST EN 1991-1-2, kot na primer standardna krivulja temperatura-čas. Modelirane požarne krivulje so poenostavljeni modeli naravnih požarov, ki temeljijo na specifičnih fizikalnih parametrih z omejeno možnostjo uporabe. Standard SIST EN 1991-1-2 podaja parametrično krivuljo temperatura-čas. Za izbrane požarne krivulje opravimo toplotno analizo, to pomeni, da določimo časovno razporeditev temperatur po AB prečnem prerezu. Prevajanje toplote po AB prerezu opišemo s parcialno diferencialno enačbo prvega reda, prehod toplote skozi zunanje površine zaradi konvekcije in radiacije pa upoštevamo z ustreznimi robnimi pogoji. Sistem rešimo z metodo končni elementov. V parametrični študiji analiziramo vpliv velikost in oblike prečnega prereza na časovno razporeditev temperatur in sicer pri uporabi različnih požarnih krivulj. Za obravnavane AB prečne prereze prikazujemo tudi temperaturne profile za naslednje karakteristične čase: $t=30$, 60 in 90 min.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	614.8:624.07:(043.2)
Author:	Anže Egart
Supervisor:	assist. prof. Sebastjan Bratina, Ph.D.
Cosupervisor:	assist. prof. Tomaž Hozjan, Ph.D.
Title:	Fire curves and temperature profiles of reinforce concrete sections
Document type:	Graduation Thesis
Notes:	35 p., 16 tab., 30 fig., 40 eq.
Key words:	fire curves, temperature profiles, standard fire curve, parameter fire curve, temperature analysis

Abstract

The thesis introduces variety of fire scenarios. This are simplified methods for describing the intensity of fire and they give the development of gas temperatures in the vicinity of the element as a function of time. We divide the nominal and modelled fire curves. Nominal fire curves represent fully developed fire in a fire sector. Some of these curves are given in the SIST EN 1991-1-2 standard, like the standard curve temperature-time. Modelled fire curves are simplified model of natural fires, which are based on specific physical parameters with limited use. The parametric fire curve is also given in SIST EN 1991-1-2. For selected fire curves heat analysis is made, this means, that time distribution of the temperature across the reinforced cross section is determined. Heat conductors across reinforced section are described with partial differential equation of first order, translation of heat across the external surface due to convection and radiation is taken into account with the relevant border conditions. The system is solved with the finite element method. In a parametric study influence of the elements size and form of the cross sections on time distribution of the temperature with the use of fire curves is analysed. The temperature profiles of present reinforced cross sections are drawn for next characteristic periods: $t=30$ min, $t=60$ min and $t=90$ min.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Sebastjanu Bratini in somentorju doc. dr. Tomažu Hozjanu. Zahvaljujem se tudi vsem, ki so mi kakorkoli pomagali pri diplomski in v času študija.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

MKE	Metoda končnih elementov
KE	Končni element

KAZALO

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	VI
1 UVOD	1
2 POŽARNI SCENARIJ	2
2.1 Nazivne krivulje temperatura-čas	2
2.1.1 Standardna krivulja temperatura-čas	2
2.1.2 Požarna krivulja zunanjega požara (SIST EN 1991- 1-2, 2004)	3
2.1.3 Ogljikovodikova krivulja (HC) (SIST EN 1991- 1-2, 2004)	3
2.1.4 Modificirana ogljikovodikova krivulja (HCM) (Promat, 2012)	3
2.1.5 RABT ZTV krivulja (Promat, 2012)	3
2.1.6 RWS požarna krivulja (Promat, 2012)	4
2.2 Modeli naravnih požarov	5
2.3 Poenostavljen model naravnega požara, ki zajame celoten sektor	6
2.4 Vpliv parametrov na parametrično požarno krivuljo temperatura-čas	10
3 TEMPERATURNA ANALIZA IN TEMPERATURNI PROFIL AB PREČNIH PREREZOV	15
3.1 Osnovne enačbe prevajanja toplote	15
3.2 Lastnosti betona pri povišani temperaturi, ki jih podaja standard	17
3.3 Računski primeri temperaturnih profilov	19
3.3.1 Lastnosti materiala	19
3.3.2 Računska metoda	20
3.3.3 Požarna obremenitev in karakteristični temperaturni profili	21

3.3.4	Temperaturna analiza AB stebra	22
3.3.5	Temperaturna analiza AB nosilca.....	26
3.3.6	Temperaturna analiza AB plošče.....	30
4	ZAKLJUČKI	34
VIRI	35

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Koordinate, ki definirajo RABT ZTV (vlak) in RABT ZTV (avto) krivulji temperatura-čas.....	4
Preglednica 2: Koordinate, ki definirajo RWS požarno krivuljo temperatura-čas.....	4
Preglednica 3: Izračunane geometrijske karakteristike prostora.....	10
Preglednica 4: Faktorji, ki upoštevajo uporabo različnih aktivnih tipov gašenja.....	10
Preglednica 5: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore namenjenim za stanovanja.....	11
Preglednica 6: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore namenjenim pisarnam.....	12
Preglednica 7: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore v nakupovalnih središčih.....	12
Preglednica 8: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore namenjenih knjižnicam.....	13
Preglednica 9: Vrednosti za prestopni koeficient α_c [W/m ² K], ki jih podaja SIST EN 1991-1-2.....	16

KAZALO SLIK

Slika 1: Grafi nominalnih krivulj temperatura-čas.	5
Slika 2: Grafi požarnih krivulj za primere izračunane v poglavju (2.4)	14
Slika 3: Graf specifične toplote v odvisnosti od temperature, ki ga podaja SIST EN 1992-1-2 in uporabljena specifična toplota pri izračunu.	17
Slika 4: Graf padanja gostote betona po SIST EN 1992-1-2.	18
Slika 5: Graf zgornje in spodnje meje toplotne prevodnosti betona v odvisnosti od temperature (SIST EN 1992-1-2, 2005).	19
Slika 6: Požaru izpostavljene strani, razdelitev stebra na simetrične dele in pripadajoča mreža končnih elementov.	20
Slika 7: Požaru izpostavljene strani, razdelitev nosilca na simetrične dele in pripadajoča mreža končnih elementov.	20
Slika 8: Požaru izpostavljene strani plošče in pripadajoča mreža končnih elementov.	21
Slika 9: Graf požarnih krivulj, ki jih uporabimo za izračun temperaturnih profilov.	22
Slika 10: Temperaturni profili betonskega stebra 25/25 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-384.	23
Slika 11: Temperaturni profili betonskega stebra 25/25 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.	23
Slika 12: Temperaturni profili betonskega stebra 25/25 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.	24
Slika 13: Temperaturni profili betonskega stebra 50/50 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-834.	24
Slika 14: Temperaturni profili betonskega stebra 50/50 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.	25
Slika 15: Temperaturni profili betonskega stebra 50/50 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.	25
Slika 16: Temperatura točke (5, 5) cm v stebri za različne prereze in krivulje.	26
Slika 17: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-384.	27
Slika 18: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.	27
Slika 19: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.	28
Slika 20: Temperaturni profili betonskega nosilca 50/80 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-384.	28
Slika 21: Temperaturni profili betonskega nosilca 50/80 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.	29
Slika 22: Temperaturni profili betonskega nosilca 50/80 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.	29
Slika 23: Temperatura točke (5, 5) cm v nosilcu za različne prereze in krivulje.	30
Slika 24: Temperaturni profili betonske plošče $d=15$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-834.	30
Slika 25: Temperaturni profili betonske plošče $d=15$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.	31

Slika 26: Temperaturni profili betonske plošče $d=15$ cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.....	31
Slika 27: Temperaturni profili betonske plošče $d=25$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-834.....	32
Slika 28: Temperaturni profili betonske plošče $d=25$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.....	32
Slika 29: Temperaturni profili betonske plošče $d=25$ cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.....	33
Slika 30: Temperatura točke (5, 5) cm v plošči za različne prereze in krivulje.....	33

1 UVOD

Konstrukcije so v svojem življenjskem obdobju izpostavljene najrazličnejšim vplivom. Poleg običajnih vplivov, ki na konstrukcijo delujejo večino časa, poznamo tudi nezgodne vplive. Eden izmed teh vplivov je požar, ki je dokaj pogost pojav. Z najrazličnejšimi ukrepi želimo preprečiti nastanek požara oziroma zmanjšati možnost, da do le tega pride. V primeru požara pa želimo čim bolj omejiti njegove posledice. Pri omejevanju posledic ima najpomembnejšo vlogo varovanje človeških življenj.

V zgodovini je požar dostikrat uničeval cela mesta in posledično terjal tudi veliko število človeških življenj. Zato se je razvila potreba po požarno odporni gradnji, ki bi preprečevala širjenje požara in bi zagotavljala varen umik ljudi na varno. Današnje konstrukcije morajo ustrezati požarno odporni gradnji, da omogočamo varno evakuacijo ljudi ter preprečujemo širjenje požara izven požarnega sektorja.

Pri projektiranju požarno odpornih gradenj se navezujemo na standard Evrokod. Za določanje vpliva požara na konstrukcije se uporablja standard SIST EN 1991-1-2. Pri projektiranju konstrukcij pa uporabljamo standard, ki obravnava določen tip konstrukcije. Za betonske konstrukcije je to SIST EN 1992-1-2. V standardu so definirane tri odpornosti, ki jim mora konstrukcija ali element zadostovati:

- Nosilnost (R): konstrukcija ali element mora pri določenih pogojih požara ohraniti nosilno funkcijo.
- Celovitost(E): ločilni elementi morajo pri določenih pogojih požara ohraniti ločilno funkcijo, da se prepreči širjenje požara v druge požarne sektorje.
- Izolativnost (I): ločilni elementi morajo pri določenih pogojih požara ohraniti dvig temperature na neizpostavljeni strani pod določeno mejo.

Pri metodah podanih v Evrokodih se požarno analizo konstrukcij izvaja v dveh delih. Najprej se določi temperaturne vplive na konstrukcijo. Ko imamo temperaturne vplive znane, določimo še odziv konstrukcije na sočasno delovanje mehanske in temperaturne obtežbe. V prvem delu diplomske naloge prikažemo različne metode opisa požara oziroma razvoj temperature plinov v požarnem sektorju. V drugem delu pa se posvetimo izdelavi temperaturnih profilov za različne AB prezeze.

2 POŽARNI SCENARIJ

Opis naravnega požara z natančnimi matematičnimi modeli je kompleksno in zahtevno delo. Za določanje jakosti požara se tako lahko uporablja različne poenostavljene in natančnejše modele. Tako poznamo:

- Nazivne krivulje temperatura-čas (standardna krivulja temperatura-čas, HC, HCM...)
- Modeli naravnih požarov (parametrična krivulja temperatura-čas, enoconski model, dvoconski model...)

2.1 Nazivne krivulje temperatura-čas

Nazivne ali standardne požarne krivulje predstavljajo najenostavnejši način za opis požara, so odvisne samo od časa in ne zajemajo nobenega parametra, ki bi zajemal vpliv prezračevanja ali obodnih lastnosti požarnega sektorja. Razvite so bile z namenom določitve požarne odpornosti gradbenih elementov in materialov. Te krivulje ne predstavljajo realnega požara. Z njimi namreč na upoštevamo ključnih parametrov pri razvoju požara kot so hitrost ogrevanja, intenziteta oziroma jakost požara in čas trajanja požara. Prav tako z nazivnimi požarnimi krivuljami vedno ne zajamemo najhujših razmer, ki se lahko razvijejo v realnem požaru. Na primer, sodobne pisarne pogosto vsebujejo velike količine ogljikovodikov v obliki dekoracije, pohištva, računalnikov in električnih naprav, v obliki polimerov, plastike usnja in umetnih laminatov itd. Posledično je ogenj intenzivnejši od običajnega standardnega požara.

Poznamo več vrst nazivnih požarnih krivulj. Uporaba je odvisna od tega, kakšen požar želimo simulirati oziroma v kakšnih okoliščinah. Značilnosti požarnih krivulj je tudi ta, da večina izmed njih ne zajema faze ohlajanja.

2.1.1 Standardna krivulja temperatura-čas

Standardna krivulja temperatura-čas predstavlja polno razvit požar v požarnem sektorju s požarno obtežbo celuloznega tipa. Definirana je v standardu EN 13501-2. Podana je z izrazom:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1), \quad (2.1)$$

pri čemer je θ_g temperatura v požarnem sektorju [$^{\circ}\text{C}$], t pa čas v [min].

2.1.2 Požarna krivulja zunanjega požara (SIST EN 1991- 1-2, 2004)

Ta model požara uporabljamo za zunanje dele stavb, ki so izpostavljeni požaru iz različnih smeri. Krivulja je podana z izrazom:

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20, \quad (2.2)$$

pri čemer je θ_g temperatura v požarnem sektorju [$^{\circ}\text{C}$], t pa čas v [min].

2.1.3 Ogljikovodikova krivulja (HC) (SIST EN 1991- 1-2, 2004)

Predstavlja polno razvit požar v požarnem sektorju pri gorenju ogljikovodikov. Ogljikovodikova krivulja temperatura-čas je podana z izrazom:

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20, \quad (2.3)$$

pri čemer je θ_g temperatura v požarnem sektorju [$^{\circ}\text{C}$], t pa čas v [min].

2.1.4 Modificirana ogljikovodikova krivulja (HCM) (Promat, 2012)

Ima povišano maksimalno doseženo temperaturo glede na HC krivuljo. Maksimalna temperatura se poviša iz $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hitrost naraščanja temperature je v začetnem delu večja kot pri HC krivulji, ter povzroča večji temperaturni šok. Modificirana ogljikovodikova krivulja je podana z izrazom:

$$\theta_g = 1280 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20, \quad (2.4)$$

pri čemer je θ_g temperatura v požarnem sektorju [$^{\circ}\text{C}$], t pa čas v [min].

2.1.5 RABT ZTV krivulja (Promat, 2012)

Krivulja je bila razvita v Nemčiji. Temperatura se v 5-ih minutah povzpne na $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar je tudi največja temperatura. Od ostalih ogljikovodikovih krivulj se razlikuje v tem, da je čas izpostavljenosti elementov maksimalni temperaturi krajši. Glede na to, ali gre za avtomobilski požar ali pa gori vlak, je

odvisen čas trajanja maksimalne temperature. Značilnost RABT ZTV krivulje temperatura-čas je faza ohlajanja. V fazi ohlajanja temperatura pade na začetno vrednost in traja 110 min. Krivulji sta definirani z koordinatami točk, ki so podane v preglednici 1. Potek temperature med točkami je linearen.

Preglednica 1: Koordinate, ki definirajo RABT ZTV (vlak) in RABT ZTV (avto) krivulji temperatura-čas.

RABT ZTV krivulja (vlak)		RABT ZTV krivulja (avto)	
Čas [min]	Temperatura [C°]	Čas [min]	Temperatura [C°]
0	15	0	15
5	1200	5	1200
60	1200	30	1200
170	15	140	15

2.1.6 RWS požarna krivulja (Promat, 2012)

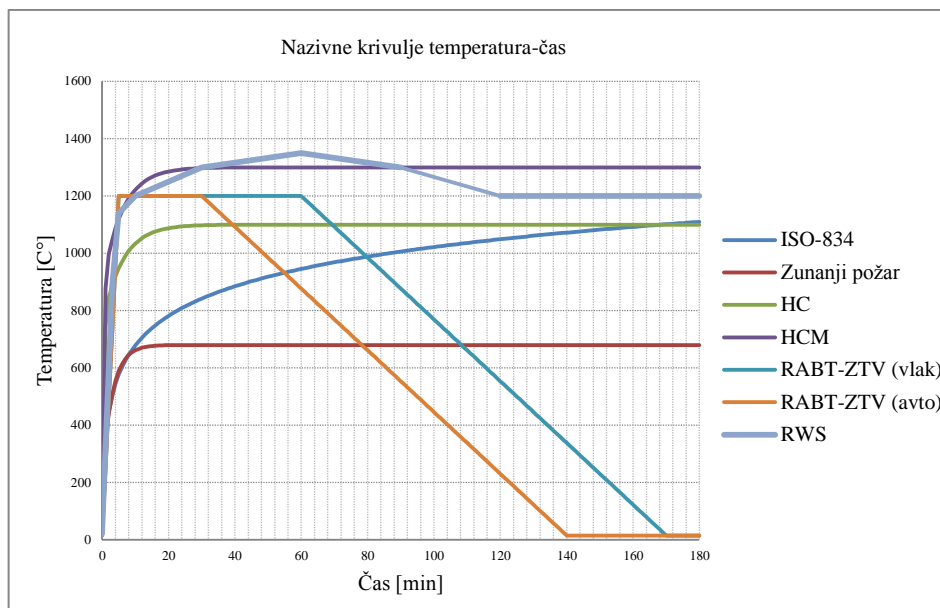
Požarna krivulja je bila razvita na Nizozemskem in se uporablja za predore. Predstavlja najhujši možen scenarij, ki je predviden, da zagori 50 m³ goriva in da požar traja več kot 120 min. Predvidena požarna obtežba je 300 MW. Ogljikovodikova krivulja predpostavlja požar na odprtem območju, kjer se pojavi disipacija temperature. RWS krivulja pa predpostavlja, da disipacija temperature v atmosfero ni mogoča. V drugi preglednici je opis RWS krivulje temperatura-čas.

Preglednica 2: Koordinate, ki definirajo RWS požarno krivuljo temperatura-čas.

RWS, RijksWaterStaat									
Čas [min]	0	3	5	10	30	60	90	120	180
Temperatura [C°]	20	890	1140	1200	1300	1350	1300	1200	1200

Leta 2003 so bili na Norveškem izvedeni poizkusi v zapuščenem cestnem predoru. Testi so bili izvedeni v naravnem merilu. Za gorivo so uporabljali lesene palete in plastične izdelke. Pri poizkusi so izmerili maksimalno temperaturo plinov 1365 C°, ter hitrost sproščanja toplote 223 MW. Najvišji izmerjeni temperaturi, pri preizkusu v predoru, se najbolj približa RWS krivulja.

Na sliki 1 so na grafu prikazane požarne krivulje, ki so opisane v poglavjih 2.1.1 – 2.1.6.



Slika 1: Grafi nominalnih krivulj temperatura-čas.

2.2 Modeli naravnih požarov

S temi modeli se poizkušamo čim bolj približati dejanskemu požaru. Krivulje so odvisne od fizikalnih parametrov, ki opisujejo potek požara so lahko enostavnejši ali zahtevnejši oziroma natančnejši. Enostavni modeli imajo omejeno uporabo. Pri natančnejših modelih se upošteva izmenjava mase, energije in lastnosti plinov.

Poenostavljene modele naravnih požarov definirane v SIST EN 1991- 1-2

Poenostavljeni požarni modeli temeljijo na nekaterih fizikalnih parametrih in imajo omejeno uporabo. Za sektorske požare se predvideva enakomerna porazdelitev temperature po prostoru. Različno temperaturo v požarnem sektorju predvidevamo zgolj za lokalizirane požare. Osnovni parameter teh požarnih krivulj so prezračevanje požarnega sektorja in gostota požarne obtežbe. Podrobneje si bomo ogledali model za izračun temperature plinov pri sektorskem požaru.

Točnejši modeli naravnih požarov

Pri točnejših modelih je potrebno upoštevati lastnosti plinov, izmenjavo mase in izmenjavo energije. Izbira se med enoconskim, dvoconskim in hidrodinamičnimi računskimi modeli. Ti modeli naravnih požarov so najboljši približek naravnega požara.

2.3 Poenostavljen model naravnega požara, ki zajame celoten sektor

Parametrična krivulja temperatura-čas (SIST EN 1991- 1-2, 2004)

Za uporabo tega požarnega modela talna površina ne sme presegati 500 m², strop mora biti brez odprtih in višina stropa ne sme presegati 4 m. Predpostavlja se, da požarna obtežba zgori v celoti. Krivulje temperatura-čas v fazi segrevanja so podane z izrazom:

$$\theta_g = 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) + 20, \quad (2.5)$$

pri čemer je θ_g temperatura v požarnem sektorju [C°], t^* [h] pa je definirana z izrazom:

$$t^* = t \cdot \Gamma, \quad (2.6)$$

pri tem je t čas [h]. Γ [-] je podan z izrazom:

$$\Gamma = \left(\frac{O}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2, \quad (2.7)$$

kjer je O faktor odprtih [m^{1/2}], b pa upošteva toplotne lastnosti oboda [J/m² s^{1/2} K].

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t, \quad \text{omejitev: } 0,02 \leq O \leq 0,20, \quad (2.8)$$

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}, \quad \text{omejitev: } 100 \leq b \leq 2200, \quad (2.9)$$

pri čemer je A_v površina navpičnih odprtih v vseh stenah [m²], h_{eq} utežno povprečje višin oken v teh stenah [m], A_t celotna površina oboda vključno z odprtinami [m²], ρ gostota ločilnega oboda [kg/m³], c specifična toplota ločilnega oboda [J/kg K] in λ toplotna prevodnost ločilnega oboda [W/m K].

Večina stavb ima sestavljene obode zato je potrebno to zajeti v računu. Izraz za b pri sestavljenem obodu se tako glasi:

$$b = \begin{cases} b_1 & \text{za } b_1 < b_2 \\ b^* & \text{za } b_1 > b_2' \end{cases} \quad (2.10)$$

$$b^* = \begin{cases} b_1 & \text{za } s_1 > s_{\text{lim}} \\ \frac{s_1}{s_{\text{lim}}} \cdot b_1 + b_2 \cdot \left(1 - \frac{s_1}{s_{\text{lim}}}\right) & \text{za } s_1 < s_{\text{lim}} \end{cases} \quad (2.11)$$

pri čemer je:

$$s_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{\text{max}} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}}, \quad (2.12)$$

pri tem indeks 1 pomeni plast izpostavljena neposredno požaru indeks 2 pa naslednja plast. Oznaka s_i pomeni debelino i -te plasti [m], t_{max} ja podan z enačbo (2.16). Toplotne lastnosti i -te plasti oboda se izračuna po enačbi:

$$b_i = \sqrt{\rho_i \cdot c_i \cdot \lambda_i}, \quad (2.13)$$

pri čemer je ρ_i gostota i -te plasti [kg/m^3], c_i specifična toplota i -te plasti [$\text{J}/\text{kg K}$] in λ_i toplotna prevodnost i -te plasti oboda [$\text{W}/\text{m K}$].

Tla, stene in stropi imajo različne toplotne lastnosti. Zato faktor b izračunamo po enačbi:

$$b = (\sum(b_j \cdot A_j)) / (A_t - A_v), \quad (2.14)$$

pri čemer je A_j površina obodne ploskve j brez odprtin [m^2], b_j pa toplotne lastnosti j -te ploskve.

Najvišja temperatura plinov Θ_{max} [$^{\circ}\text{C}$] nastopi pri $t^* = t_{\text{max}}^*$ [h].

$$t_{\text{max}}^* = t_{\text{max}} \cdot \Gamma, \quad (2.15)$$

$$t_{\text{max}} = \max[(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{\text{t,d}}/0); t_{\text{lim}}], \quad (2.16)$$

pri čemer je t_{lim} [h] odvisen od hitrosti razvoja požara in je podan v enačbi (2.18). Projektna vrednost gostote požarne obtežbe $q_{\text{t,d}}$ [MJ/m^2] se izračuna po naslednji enačbi:

$$q_{\text{t,d}} = q_{\text{f,d}} \cdot A_{\text{f}}/A_{\text{t}}, \quad \text{omejitev: } 50 \leq q_{\text{t,d}} \leq 1000, \quad (2.17)$$

pri tem je $q_{t,d}$ projektna gostota požarne obtežbe na površino tal [MJ/m^2].

$$t_{\text{lim}} = \begin{cases} 25 \text{ min} & \text{za počasi razvijajoč požar} \\ 20 \text{ min} & \text{za srednje hitro razvijajoč požar,} \\ 15 \text{ min} & \text{za hitro razvijajoč požar} \end{cases} \quad (2.18)$$

Stopnjo hitrosti razvijanja požara, za določitev t_{lim} dobimo SIST EN 1991- 1-2. Pri $t_{\text{lim}} = t_{\text{max}}$ se t^* [h] v enačbi (2.5) nadomesti z izrazom:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\text{lim}}, \quad (2.19)$$

pri čemer je:

$$\Gamma_{\text{lim}} = \begin{cases} k \cdot \left(\frac{O_{\text{lim}}}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 & \text{če je } (O > 0,4 \wedge q_{t,d} < 75 \wedge b < 1160) \\ \left(\frac{O_{\text{lim}}}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 & \text{sicer} \end{cases}. \quad (2.20)$$

O_{lim} je podan kot:

$$O_{\text{lim}} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{\text{lim}}, \quad (2.21)$$

k pa z enačbo:

$$k = 1 + \left(\frac{O-0,04}{0,04}\right) \cdot \left(\frac{q_{t,d}-75}{75}\right) \cdot \left(\frac{1160-b}{1160}\right). \quad (2.22)$$

Parametrična krivulja temperatura-čas ima poleg faze segrevanja tudi fazo ohlajanja. Enačba v fazi ohlajanja, ki sledi takoj za časom t_{max} kjer plini dosežejo maksimalno temperaturo θ_g , je:

$$\theta_g = \begin{cases} \theta_{\text{max}} - 625 \cdot (t^* - t_{\text{max}}^* \cdot x) & \text{za } t_{\text{max}}^* \leq 0,5 \\ \theta_{\text{max}} - 250 \cdot (3 - t_{\text{max}}^*) \cdot (t^* - t_{\text{max}}^* \cdot x) & \text{za } 0,5 < t_{\text{max}}^* < 2, \\ \theta_{\text{max}} - 250 \cdot (t^* - t_{\text{max}}^* \cdot x) & \text{za } t_{\text{max}}^* \geq 2 \end{cases} \quad (2.23)$$

t^* je določen v enačbi (2.6), za x vzamemo vrednost iz enačbe (2.25), t_{max}^* pa je podan z enačbo:

$$t_{\text{max}}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma. \quad (2.24)$$

$$x = \begin{cases} 1,0 & \text{za } t_{\max} > t_{\lim} \\ t_{\lim} \cdot \Gamma / t_{\max}^* & \text{za } t_{\max} = t_{\lim} \end{cases} \quad (2.25)$$

t_{\lim} je podan v enačbi (2.18), Γ pa v enačbi (2.7).

Pri parametrični krivulji temperatura-čas, ki smo jo opisali, nam je ostal neznan še parameter $q_{f,d}$, ki je definiran (SIST EN 1991- 1-2, 2004) na naslednji način:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n, \quad (2.26)$$

pri čemer je $q_{f,d}$ projektna vrednost požarne obtežbe [MJ/m^2], $q_{f,k}$ karakteristična vrednost požarne obtežbe [MJ/m^2], m zgorevalni faktor in je odvisen glede na rabo in vrsto požarne obtežbe, za požarno obtežbo pretežno celuloznega tipa se lahko predpostavi $m=0,8$ (SIST EN 1991- 1-2, 2004). Faktorja, ki upoštevata nevarnost za nastanek požara, sta δ_{q1} , ki je odvisen od velikosti požarnega sektorja ter δ_{q2} , ki je odvisen od rabe, δ_n pa je faktor, ki upošteva različne aktivne ukrepe uporabljene pri preprečevanju požara in se izračuna po naslednji enačbi:

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}, \quad (2.27)$$

pri čemer se za δ_{ni} privzame vrednost 1,0, če se požar preprečuje z normalnimi ukrepi, ki morajo biti vedno prisotni, če pa ti ukrepi niso prisotni, pa se za δ_{ni} privzame vrednost 1,5. Faktorji δ_{ni} so podani v standardu SIST EN 1991-1-2. Karakteristična požarna obtežba je definirana na deterministični način (Toplotni in mehanski..., 2012). Pohištvo, stene in obloge so sestavni del obtežbe. Karakteristična požarna obtežba $Q_{fi,k,i}$ [MJ] je podana z enačbo:

$$Q_{fi,k,i} = \sum M_{k,i} \cdot H_{u,i} \cdot \psi_i, \quad (2.28)$$

pri čemer so $M_{k,i}$ [kg] količina gorljivega materiala, $H_{u,i}$ [MJ/kg] neto kalorična vrednost (2.29), ψ_i koeficient zaščitene požarne obtežbe.

Kalorična vrednost gorljivega materiala je odvisna od vrste materiala in vlage v njem. Podana je z izrazom:

$$H_u = H_{u0} \cdot (1 - 0,01 \cdot u) - 0,025 \cdot u, \quad (2.29)$$

pri čemer je u [%] vlaga v materialu, H_{u0} [MJ/kg] neto kalorična vrednost suhega materiala

Gostota karakteristične obtežbe pa je definirana z izrazom:

$$q_{f,k} = Q_{fi,k}/A_f \quad (2.30)$$

2.4 Vpliv parametrov na parametrično požarno krivuljo temperatura-čas

Vpliv različne rabe prostorov

Za vse primere bomo privzeli enako geometrijo požarnega sektorja. Ravno tako bodo enaki aktivni ukrepi za preprečevanje požara. Za karakteristično požarno obtežbo bom uporabili podatke iz preglednice 4, zato morata biti faktorja $m=0,8$ in $\delta_{q2}=1,0$. Prostor je velikosti 16 m x 12 m, višina prostora je 3,8 m. Na zunanjih stenah je 9 oken velikosti 1,4 m x 2,6 m. V prostor vodi dvojje vrat velikosti 2,2 m x 2,8 m. Materialne lastnosti oboda vzamemo pri sobni temperaturi (Toplotni in mehanski..., 2012) in sicer $\rho_c=2400$ kg/m³, $\lambda_c=1,6$ W/m K, $c_c=900$ J/kg K (SIST EN 1992-1-2, 2005). V preglednici 3 so izračunane geometrijske karakteristike prostora, v preglednici 4 pa so podani faktorji, ki pripadajo izbranim ukrepom aktivnega gašenja požara (SIST EN 1991-1-2, 2004).

Preglednica 3: Izračunane geometrijske karakteristike prostora.

Celotna površina tal A_f [m ²]	Celotna površina odprtín A_v [m ²]	Celotna površina oboda A_t [m ²]
192	45,08	596,8

Preglednica 4: Faktorji, ki upoštevajo uporabo različnih aktivnih tipov gašenja.

Uporaba aktivnih tipov gašenja		
δ_{n1}	1	Avtomatski vodni gasilni sistem
δ_{n2}	1	Neodvisna preskrba z vodo
δ_{n3}	0,87	Avtomatsko zaznavanje požara z toploto
δ_{n4}	1	Avtomatsko zaznavanje požara z dimom
δ_{n5}	0,87	Avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto
δ_{n6}	1	Lastna gasilska enota

Se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 4

δ_{n7}	0,78	Zunanja gasilska enota
δ_{n8}	1	Varne intervencijske poti
δ_{n9}	1	Gasilski pripomočki
δ_{n10}	1,5	Sistem za odvod dima
δ_n	0,885573	Faktor, ki upošteva zgoraj navedene aktivne ukrepe gašenja
Faktorja, ki upoštevatata nevarnost nastanka požara		
δ_{q1}	1,44	Glede na talno površino A_f (interpolacija)
δ_{q2}	1	Glede na rabo
Podatki, ki izhajajo iz rabe prostora		
m	0,8	Faktor izgorevanja

Za različne rabe prostorov po enačbi (2.26) izračunamo projektno vrednost gostote požarne obremenitve. Nato za to požarno obtežbo in zgoraj navedene podatke o požarnem sektorju izračunamo parametrično krivuljo temperatura-čas po enačbi (2.5).

Preglednica 5: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore namenjenim za stanovanja.

Stanovanja		Raba prostorov
$q_{t,k}$ [MJ/m ²]	948	Karakteristična vrednost gostote požarne obtežbe
$q_{t,d}$ [MJ/m ²]	968,0	Projektna vrednost gostote požarne obtežbe
h_{eq} [m]	2,654	Povprečno utežno razmerje odprtin v vseh stenah
b [J/m ² s ^{1/2} K]	1859,0	Toplotne lastnosti oboda
O [m ^{1/2}]	0,123	Faktor odprtin
Γ	3,685	
t^*_{max}	1,865	
t_{max} [min]	30,4	Čas, ko dosežemo maksimalno temperaturo
Γ_{lim}	2,124	

Se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 5

t_{lim} [min]	20	Pri $t_{lim} = t_{max}$ je požar odvisen od razpoložljivega gorljivega materiala, sicer pa je ventilacijsko kontroliran
$q_{t,d}$	311,4	Projektna vrednost požarne obremenitve glede na skupno površino oboda
T_{max} [C°]	1038	Maksimalna temperatura

Preglednica 6: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore namenjenim pisarnam.

Pisarne		Raba prostorov
$q_{t,k}$ [MJ/m ²]	511	Karakteristična vrednost gostote požarne obtežbe
$q_{t,d}$ [MJ/m ²]	521,8	Projektna vrednost gostote požarne obtežbe
h_{eq} [m]	2,654	Povprečno utežno razmerje odprtín v vseh stenah
b [J/m ² s ^{1/2} K]	1859,0	Toplotne lastnosti oboda
O [m ^{1/2}]	0,123	Faktor odprtín
Γ	0,617	
t_{max}^*	1,005	
t_{max} [min]	20,0	Čas, ko dosežemo maksimalno temperaturo
Γ_{lim}	0,617	
t_{lim} [min]	20	Pri $t_{lim} = t_{max}$ je požar odvisen od razpoložljivega gorljivega materiala, sicer pa je ventilacijsko kontroliran
$q_{t,d}$	167,9	Projektna vrednost požarne obremenitve glede na skupno površino oboda
T_{max} [C°]	730	Maksimalna temperatura

Preglednica 7: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore v nakupovalnih središčih.

Nakupovalna središča		Raba prostorov
$q_{t,k}$ [MJ/m ²]	730	Karakteristična vrednost gostote požarne obtežbe
$q_{t,d}$ [MJ/m ²]	745,4	Projektna vrednost gostote požarne obtežbe
h_{eq} [m]	2,654	Povprečno utežno razmerje odprtín v vseh stenah
b [J/m ² s ^{1/2} K]	1859,0	Toplotne lastnosti oboda
O [m ^{1/2}]	0,123	Faktor odprtín

Se nadaljuje...

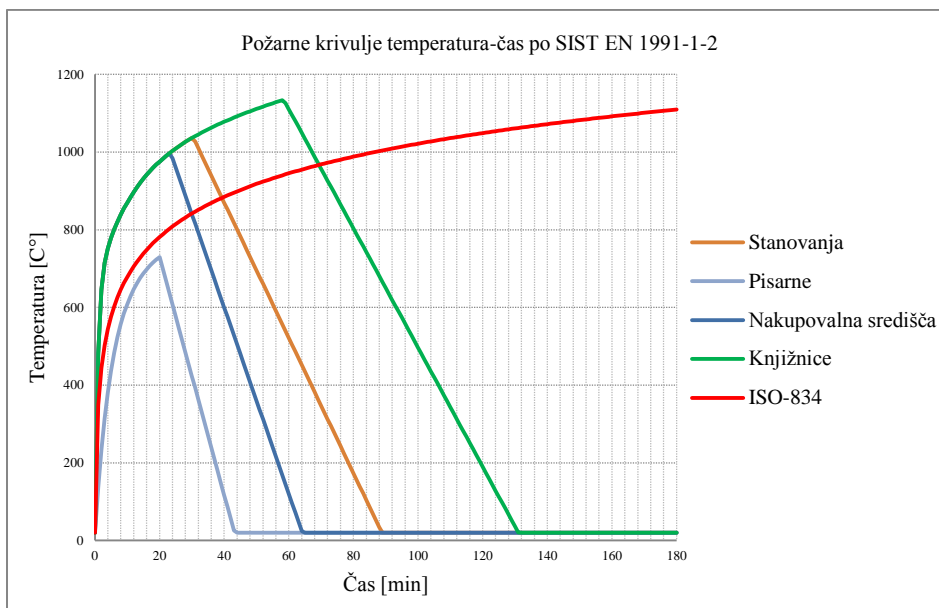
... nadaljevanje preglednice 7

Γ	3,685	
t_{\max}^*	1,436	
t_{\max} [min]	23,4	Čas, ko dosežemo maksimalno temperaturo
Γ_{\lim}	2,239	
t_{\lim} [min]	15	Pri $t_{\lim} = t_{\max}$ je požar odvisen od razpoložljivega gorljivega materiala, sicer pa je ventilacijsko kontroliran
$q_{t,d}$	239,8	Projektna vrednost požarne obremenitve glede na skupno površino oboda
T_{\max} [C°]	999	Maksimalna temperatura

Preglednica 8: Izračunane količine za standardno krivuljo temperatura-čas za prostore namenjenih knjižnicam.

Knjižnice		Raba prostorov
$q_{f,k}$ [MJ/m ²]	1824	Karakteristična vrednost gostote požarne obtežbe
$q_{t,d}$ [MJ/m ²]	1862,5	Projektna vrednost gostote požarne obtežbe
h_{eq} [m]	2,654	Povprečno utežno razmerje odprtín v vseh stenah
b [J/m ² s ^{1/2} K]	1859,0	Toplotne lastnosti oboda
O [m ^{1/2}]	0,123	Faktor odprtín
Γ	3,685	
t_{\max}^*	3,589	
t_{\max} [min]	58,4	Čas, ko dosežemo maksimalno temperaturo
Γ_{\lim}	13,980	
t_{\lim} [min]	15	Pri $t_{\lim} = t_{\max}$ je požar odvisen od razpoložljivega gorljivega materiala, sicer pa je ventilacijsko kontroliran
$q_{t,d}$	599,2	Projektna vrednost požarne obremenitve glede na skupno površino oboda
T_{\max} [C°]	1135	Maksimalna temperatura

Parametrične požarne krivulje, ki smo jih izračunali za različno rabo prostorov, so prikazane na sliki 2. Za primerjavo je dodana še standardna krivulja temperatura-čas.



Slika 2: Graf požarnih krivulj za primere izračunane v poglavju (2.4)

Pri parametričnih požarnih krivuljah (SIST EN 1991-1-2, 2004) se glede na parametre spreminja tako maksimalna temperatura kot čas trajanja požarov. Od podanih fizikalnih parametrov je odvisna tudi faza ohlajanja, čeprav se temperatura v tej fazi spreminja linearno. Razlike so očitne, čeprav spreminjamo samo rabo prostorov (slika 2). Ko je $F=1$ se približamo standardni krivulji temperatura-čas. Požarne krivulje za stanovanja, nakupovalna središča, knjižnice imajo pri obravnavanih računskih primerih enako spremembo temperature v fazi segrevanja (slika 2). Kakšen je prirastek temperature je odvisno od parametra F , ki je časovni faktor in je funkcija faktorja odprtin O in toplotne absorptivnosti b . Pri konstantnih temperaturnih lastnosti oboda in konstantnem faktorju odprtin je časovni faktor enak, če smo znotraj istih mej. Opazimo, da se potek parametrične krivulje razlikuje od poteka standardne krivulje temperatura-čas. V primerjavi z standardno krivuljo temperatura-čas ima parametrična krivulja v treh primerih večji prirastek toplote. Parametrična krivulja je boljši približek naravnemu požaru, ki bi nastopil v tem požarnem sektorju. Požarni model za pisarne (slika 2) je kontroliran v odvisnosti od razpoložljivega gorljivega materiala (gostote požarne obtežbe), ostali trije požari pa so kontrolirani ventilacijsko. To pomeni, da je maksimalna hitrost sproščanja toplote (faktor RHR [W]) odvisna od dotoka zraka (kisika), ki ga požar potrebuje za gorenje (Toplotni in mehanski..., 2012). S tem ko je požar ventilacijsko omejen, se hitrost naraščanja toplote plinov v požarnem sektorju upočasni v primerjavi z naraščanjem požarne krivulje, ki ni omejena z dovodom kisika.

3 TEMPERATURNANALIZA IN TEMPERATURNI PROFIL AB PREČNIH PREREZOV

Kot smo ugotovili je požarna odpornost konstrukcij zelo pomembna. Vsak gradbenik se bo kdaj srečal s problemom nosilnosti konstrukcije pri požaru. Nosilnost konstrukcije lahko določamo z naprednimi programi, ki nam omogočajo določanje požarne obtežbe in vpliv obtežbe na konstrukcijo. Ti programi delujejo na osnovi MKE in z njimi obravnavamo kompleksne modele. Omogočajo nam, da delamo globalno analizo konstrukcije. V SIST EN 1991-1-2 in SIST EN 1992-1-2 pa so podani tudi poenostavljeni postopki za določanje požarne obtežbe in določanje požarne odpornosti AB elementov. Dimenzioniranje AB elementov je mogoče po poenostavljenih postopkih. Elemente lahko dimenzioniramo z uporabo tabelarnih vrednosti, izoterme 500 in metodo območij (SIST EN 1992-1-2, 2005). Za zadnji dve metodi moramo poznati temperaturo v prečnem prerezu. Za določanje temperature v prerezu si lahko pomagamo z temperaturnimi profili, ki so podani v SIST EN 1992-1-2. Temperaturne profile lahko izdelamo tudi sami, in pri tem nismo omejeni z prerezi in požarno obtežbo. V tem poglavju si bomo ogledali osnovne enačbe za prehod toplote. Nato bomo izdelali nekaj temperaturnih profilov za različne požarne krivulje.

3.1 Osnovne enačbe prevajanja toplote

Prenos toplote poteka na naslednje načine: s kondukcijo oz. prevajanjem, konvekcijo in z radiacijo oz. sevanjem. Pri kondukciji se toplota po snovi prenaša iz mesta z višjo temperaturo do mesta z nižjo. Pri sevanju se energija prenaša s pomočjo elektromagnetnega valovanja. Prenašanje energije z gibanjem delcev z različno temperaturo se imenuje konvekcija. Pri požaru se po konstrukciji prenese največ toploto s prevajanjem. Ta prenos toplote opišemo z Fourierjevo parcialno diferencialno enačbo.

$$V: \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(\lambda_{ij} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + Q - \rho \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0, \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3.1)$$

pri čemer je θ [°C] temperatura posamezne točke, t [s] čas, ρ [kg/m³] gostota snovi, c [J/kg K] specifična toplota, λ_{ij} [W/m K] komponente prevodnostnega tenzorja, Q [W/m²] specifični prostorninski toplotni tok.

Prehod toplote zaradi radiacije in konvekcije upoštevamo z robnimi pogoji ki so:

$$S_T: \theta_S - \theta_M = 0, \quad (3.2)$$

$$S_q: \lambda_{ij} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x_i} n_i + h_s = 0, \quad (3.3)$$

$$V: \theta(x_i, 0) = \theta_0(x_i), \quad (3.4)$$

kjer je V prostor obravnavanega elementa, S_q mejna ploskev kjer je predpisan specifični toplotni pretok h_s [W/m^2], θ_T [$^{\circ}\text{C}$] mejna ploskev kjer je spreminjanje temperature θ_S [$^{\circ}\text{C}$] predpisano s temperaturnim režimom, n_i komponente normale na ploskev, θ_0 [$^{\circ}\text{C}$] pa začetna temperatura. Pri toplotnih vplivih na površino je potrebno upoštevati prenos toplote s konvekcijo in s sevanjem:

$$h_s = h_c + h_r, \quad (3.5)$$

pri čemer je h_c [W/m^2] toplotni tok zaradi konvekcije in je odvisen od temperature plinov θ_g [$^{\circ}\text{C}$] ter temperature površine elementa θ_m [$^{\circ}\text{C}$]. Definiran je z izrazom:

$$h_c = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m), \quad (3.6)$$

kjer je α_c [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$] prestopni koeficient. SIST EN 1991-1-2 podaja različne vrednosti glede na to, katero požarno krivuljo izberemo (preglednica 9). Za požarno neobremenjene strani je $\alpha_c=9 \text{ W}/\text{m}^2 \text{K}$.

Preglednica 9: Vrednosti za prestopni koeficient α_c [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$], 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

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

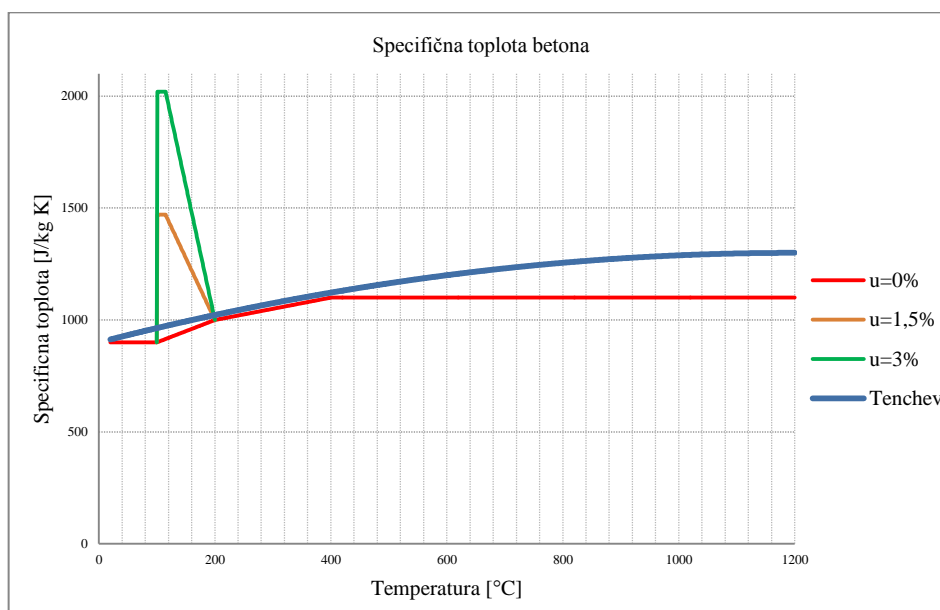
$$h_r = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4], \quad (3.7)$$

kjer je Φ oblikovni faktor, ki mora biti 1,0, če v referenčnih standardih za projektiranje (npr. SIST EN 1992) ni navedene drugačne vrednosti. ε_m je emisivnost površine in pri betonu znaša 0,7, ε_f pa emisivnost plamena, θ_r [$^{\circ}\text{C}$] je efektivna temperatura sevanja, Stefan-Boltzmannova konstanta pa je σ in znaša $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$].

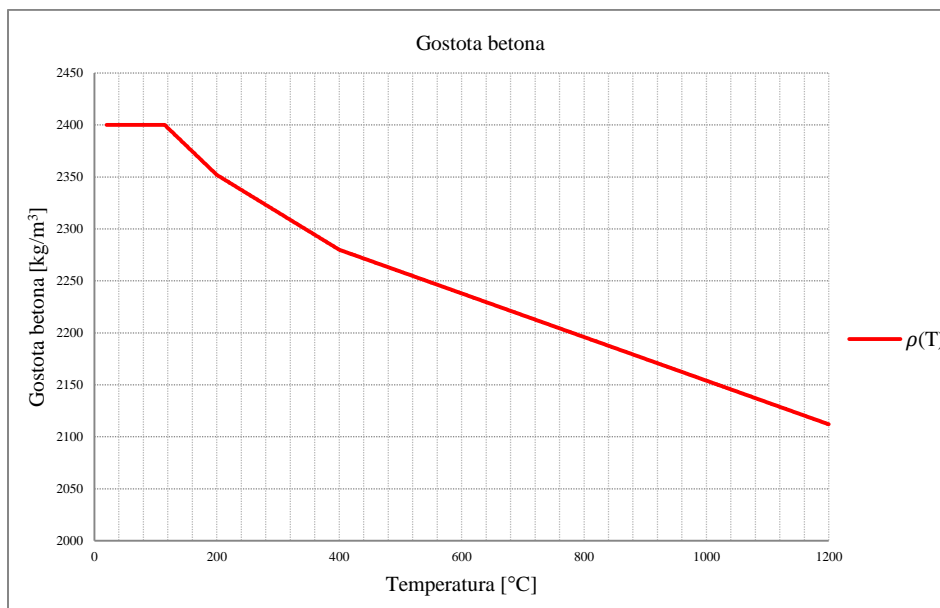
Enačbe za prevajanje toplote v splošnem niso analitično rešljive, zato jih rešujemo numerično s pomočjo MKE ali pa s kakšnimi drugimi numeričnimi postopki.

3.2 Lastnosti betona pri povišani temperaturi, ki jih podaja standard

V betonu se poleg prenosa toplote, pri tako povišani temperaturi, dogajajo tudi drugi procesi. V računu jih zanemarimo, saj so preveč kompleksni za vsakdanje računanje. Posredno upoštevamo izparevanje vode s tem, da se poveča specifična toplota v območju med 100 °C in 200 °C. Na sliki 3 vidimo, da se specifična toplota s temperaturo veča, močno pa se poveča v navedenem območju, zaradi izparevanja vode. Vidimo, da vlaga v betonu poveča specifično toploto in s tem ugoden vpliv na temperaturo betona, vendar pri večjih procentih vlage k [%] pride do eksplozivnega luščenja. Do $k=3$ % ne pride do tega problema (SIST EN 1992-1-2, 2005). V računu uporabimo izraz ki so ga uporabili Tenchev s sodelavci (2001). Od temperature betona je odvisna tudi njegova gostota (slika 4), z višanjem se mu zmanjšuje zaradi izparevanja vode.



Slika 3: Graf specifične toplote v odvisnosti od temperature, ki ga podaja SIST EN 1992-1-2 in uporabljena specifična toplota pri izračunu.



Slika 4: Graf padanja gostote betona po SIST EN 1992-1-2.

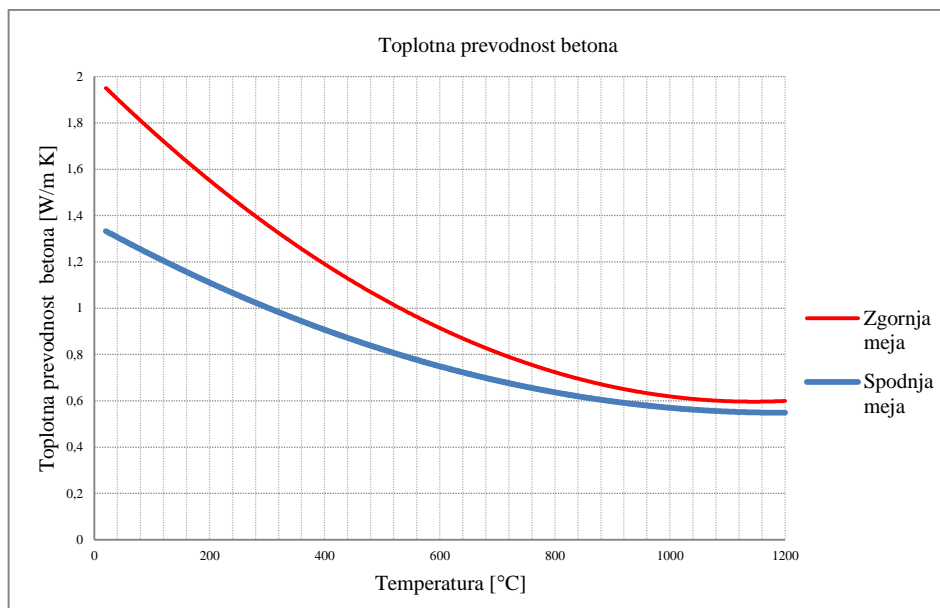
Toplotna prevodnost betona λ_c [W/m K] se z večanjem temperature θ [°C] zmanjšuje. V SIST EN 1992-1-2 sta podani dve meji, ki opisujeta zmanjševanje toplotne prevodnosti. Zgornja meja je podana s enačbo:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot (\theta/100) + 0,0107 \cdot (\theta/100)^2, \quad (3.8)$$

spodnja meja pa z enačbo (uporabljeno v izračunih):

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \cdot (\theta/100) + 0,0057 \cdot (\theta/100)^2. \quad (3.9)$$

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



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

3.3 Računski primeri temperaturnih profilov

Kot smo že omenili, če želimo dimenzionirati elemente z metodo izoterme 500 ali pa z metodo območij, potrebujemo temperaturni profil za dani prerez. V tem delu diplome bomo izdelali temperaturne profile za nekaj tipičnih elementov. Elemente bomo obremenili z različnimi požarnimi obtežbami in primerjali rezultate med seboj.

3.3.1 Lastnosti materiala

Vpliv armature na prevajanje toplote bomo zanemarili. Predpostavimo, da se eksplozivno luščenje betona ne pojavi, ker je vlaga v betonu manjša od 3%. Gostota normalno težkega betona pri sobni temperaturi je 2400 kg/m^3 . Gostota se s temperaturo spreminja po grafu na sliki 5. Specifična toplota betona, ki jo privzamemo (slika 3), je podana z enačbo (Tenchev s sodelavci, 2001):

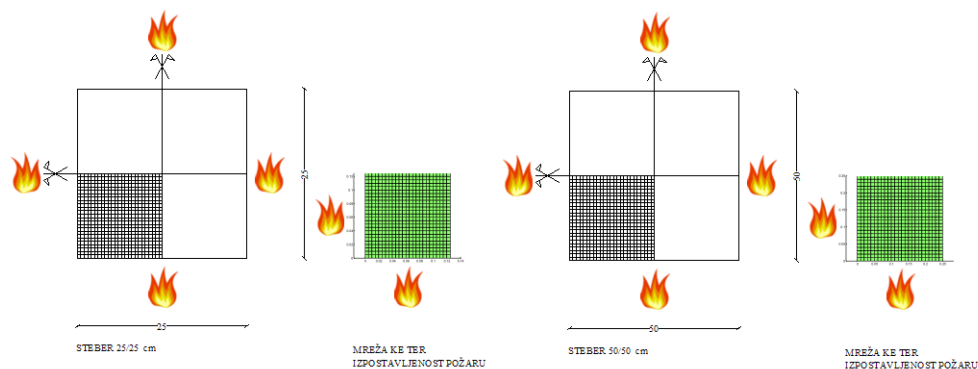
$$c_c = 900 + 80 \cdot \left(\frac{\theta}{120}\right) - 4 \cdot \left(\frac{\theta}{120}\right)^2, \quad (3.10)$$

pri čemer je θ [°C] temperatura obravnavanega delca. Za toplotno prevodnost betona vzamemo spodnjo mejo, kot jo priporoča SIST EN 1992-1-2, in jo vidimo na sliki 5.

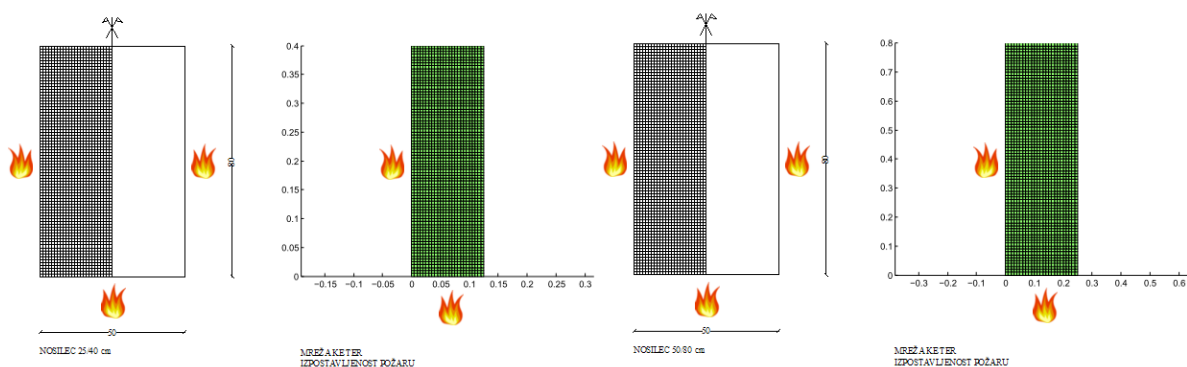
3.3.2 Računska metoda

Problem prevajanja toplote bomo reševali s pomočjo metode končnih elementov (MKE). Program, ki ga bomo uporabljali, je napisan v programskem okolju MATLAB in se imenuje HEATKO (Hozjan, 2009). Rezultati bodo, za karakteristične čase, podani grafično. Končni elementi bodo velikosti 1/1 cm in 0,5/0,5 cm, da bo omogočeno primerjanje temperature v določeni točki prereza. Zaradi simetrije, bomo pri vsakem prerezu računali zgolj potreben del prereza, ostali del pa bomo nadomestili z robnimi pogoji, ki upoštevajo simetrijo.

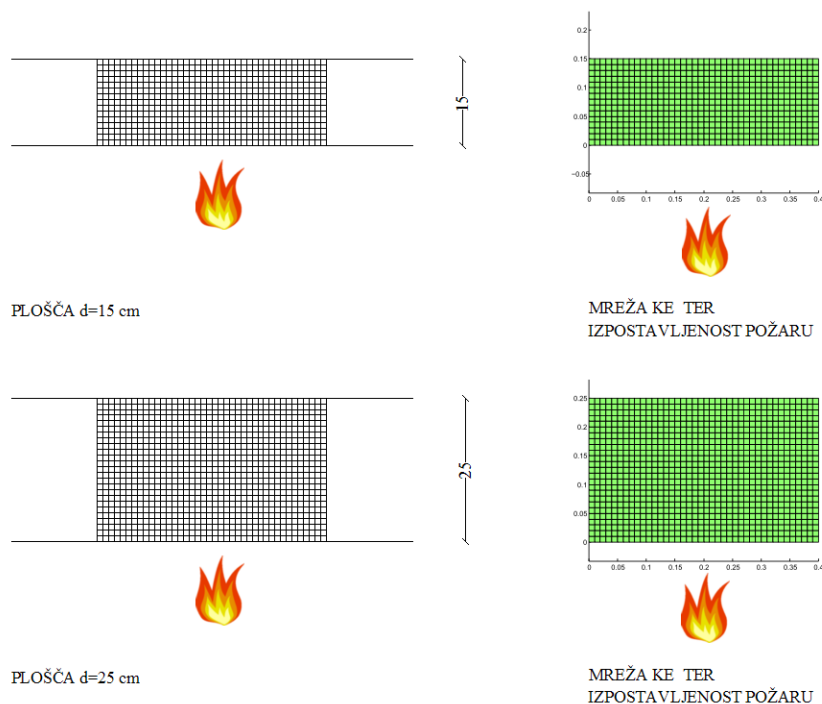
Obravnavali bomo naslednje računske primere: stebra (25/25 cm, 50/50 cm), nosilca (25/40 cm, 50/80 cm) in plošči ($d=15$ cm, $d=25$ cm). Vsak element, ki ga bomo obravnavali, razdelimo na simetrične dele (simetrične tako po geometriji kot po požarni obtežbi). Vsak del razdelimo na KE in mu podamo ustrezne robne pogoje, ki upoštevajo simetrijo in požarno obremenitev. Mrežo KE definiramo tako, kot je prikazano na slikah 6, 7 in 8. Prikazane so tudi stranice, ki so izpostavljene požaru.



Slika 6: Požaru izpostavljene strani, razdelitev stebra na simetrične dele in pripadajoča mreža končnih elementov.



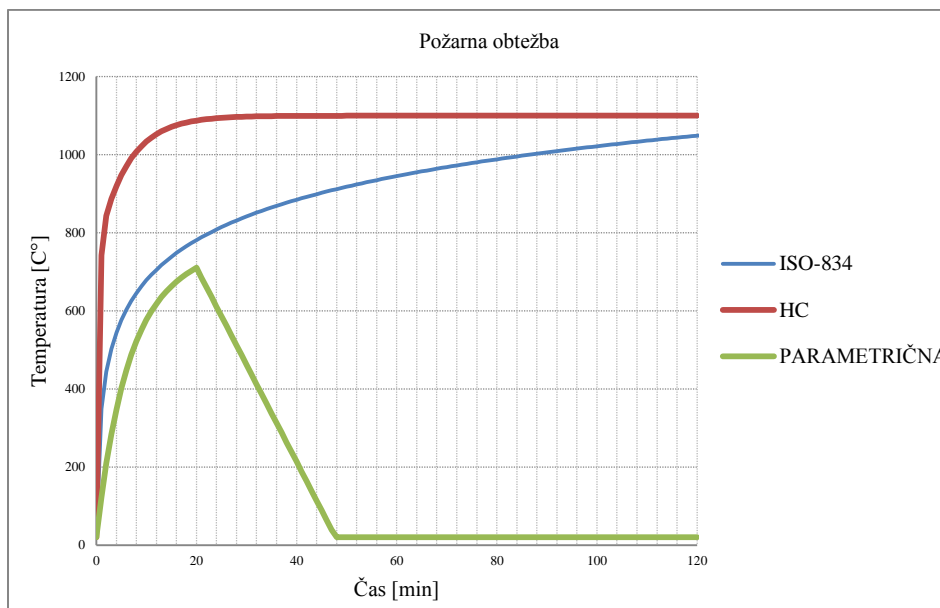
Slika 7: Požaru izpostavljene strani, razdelitev nosilca na simetrične dele in pripadajoča mreža končnih elementov.



Slika 8: Požaru izpostavljene strani plošče in pripadajoča mreža končnih elementov.

3.3.3 Požarna obremenitev in karakteristični temperaturni profili

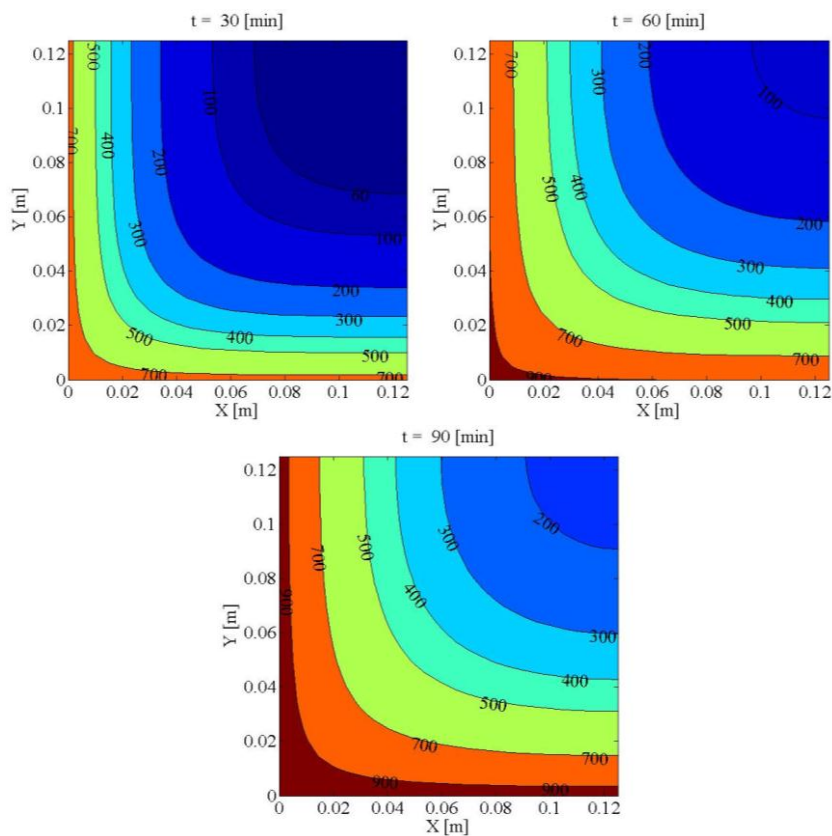
Za toplotno analizo prereza potrebujemo požarno obtežbo. Obtežbo podamo kot temperaturo plinov v okolici elementa. Predpostavimo, da je temperatura po celotnem sektorju konstantna in je podana s krivuljo temperatura-čas. Analizo bomo izvedli za standardno, ogljikovodikovo in parametrično krivuljo temperatura-čas. Požarni sektor, za izračun parametrične krivulje je velikosti 96 m^2 , višina stropa $3,2 \text{ m}$, površina odprtin $20,7 \text{ m}^2$, prostor pa je namenjen pisarnam. Na sliki 9 so prikazane tri požarne krivulje za katere bomo pri časih $t=30 \text{ min}$, $t=60 \text{ min}$ in $t=90 \text{ min}$ izračunali temperaturne profile.



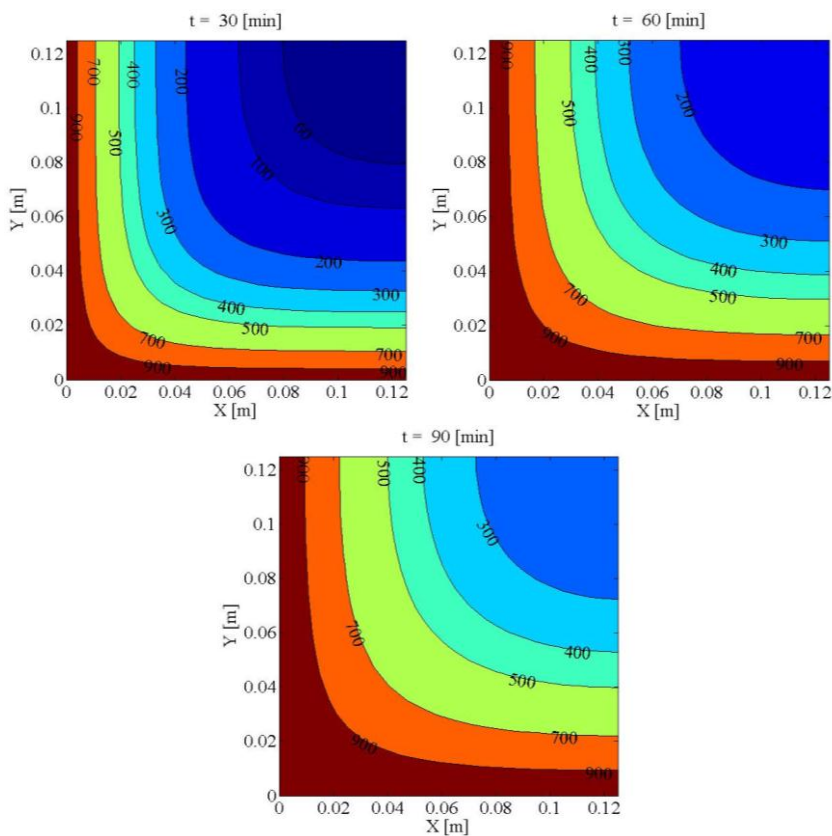
Slika 9: Graf požarnih krivulj, ki jih uporabimo za izračun temperaturnih profilov.

3.3.4 Temperaturna analiza AB stebra

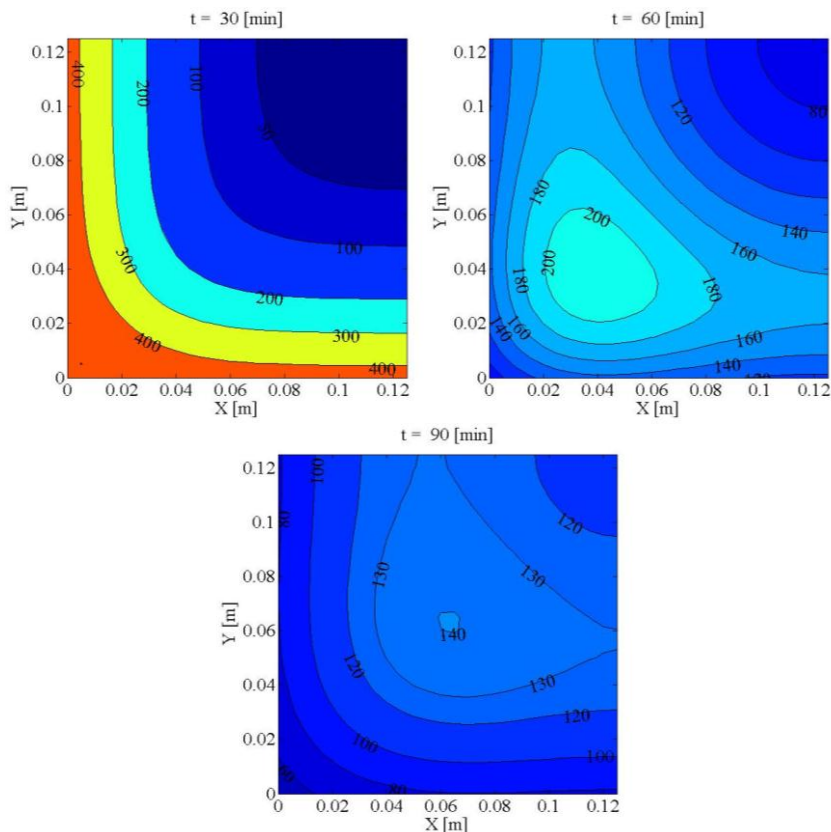
Temperaturno analizo bomo izvedli za stebra 25/25 cm in 50/50 cm, ki sta izpostavljena iz vseh strani. Temperaturne profile izračunamo najprej za standardno krivuljo, nato za HC in nazadnje za parametrično krivuljo. Na slikah 10 – 15 prikazujemo temperaturne profile AB stebra.



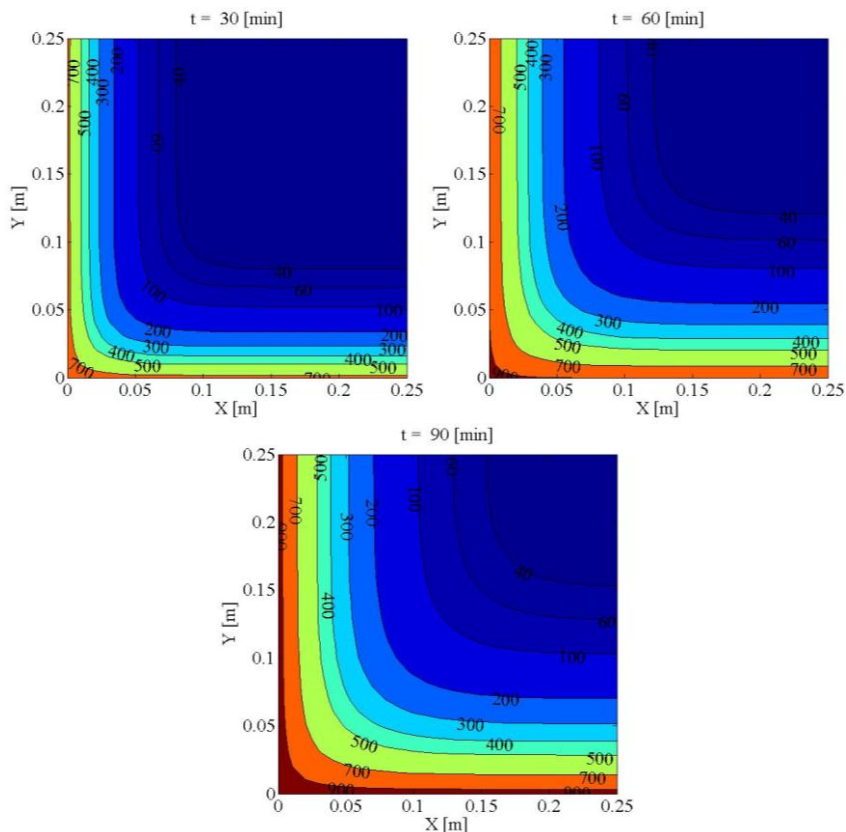
Slika 10: Temperaturni profili betonskega stebra 25/25 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-384.



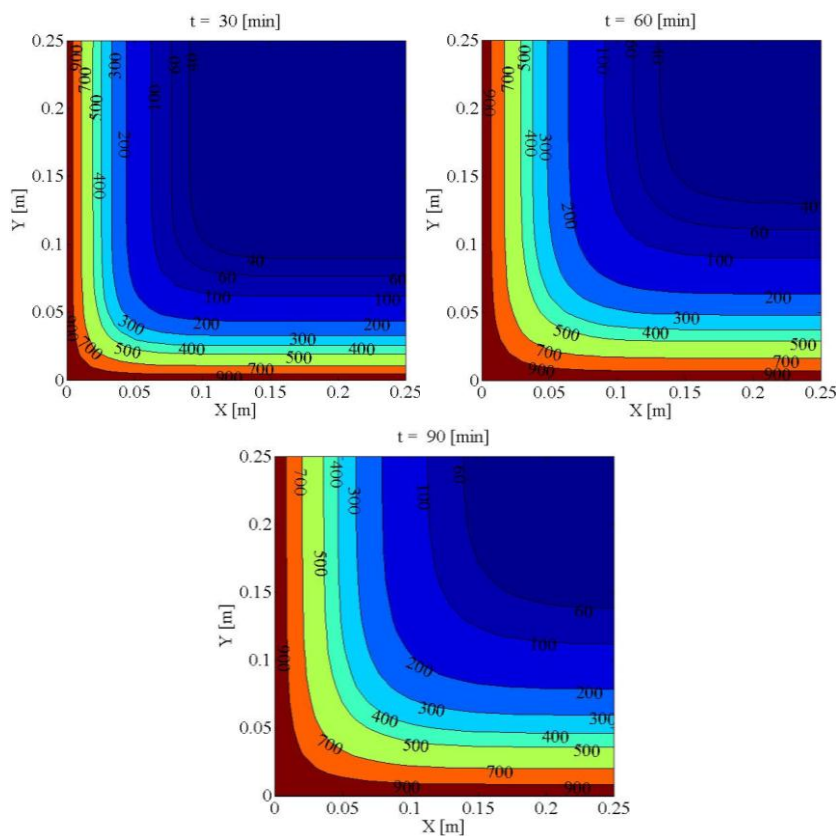
Slika 11: Temperaturni profili betonskega stebra 25/25 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.



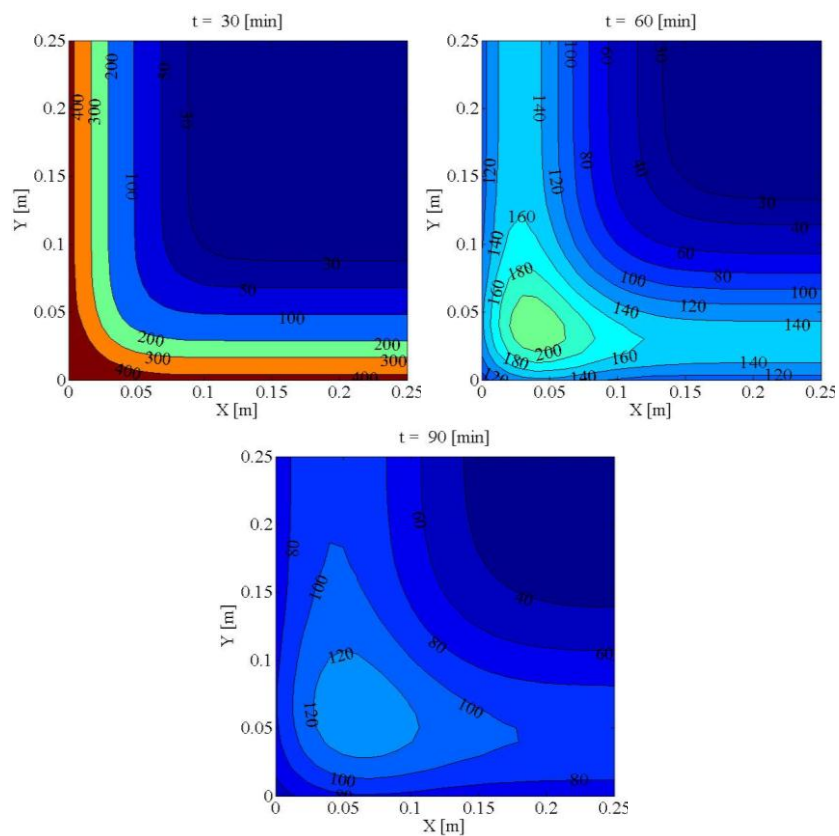
Slika 12: Temperaturni profili betonskega stebra 25/25 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.



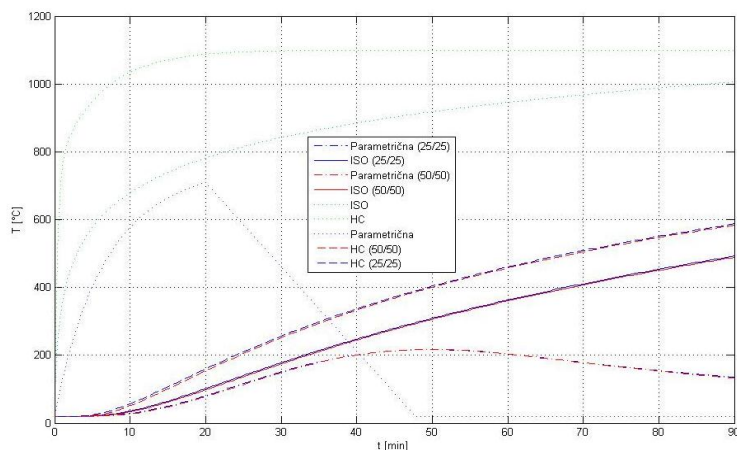
Slika 13: Temperaturni profili betonskega stebra 50/50 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-834.



Slika 14: Temperaturni profili betonskega stebra 50/50 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.



Slika 15: Temperaturni profili betonskega stebra 50/50 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.

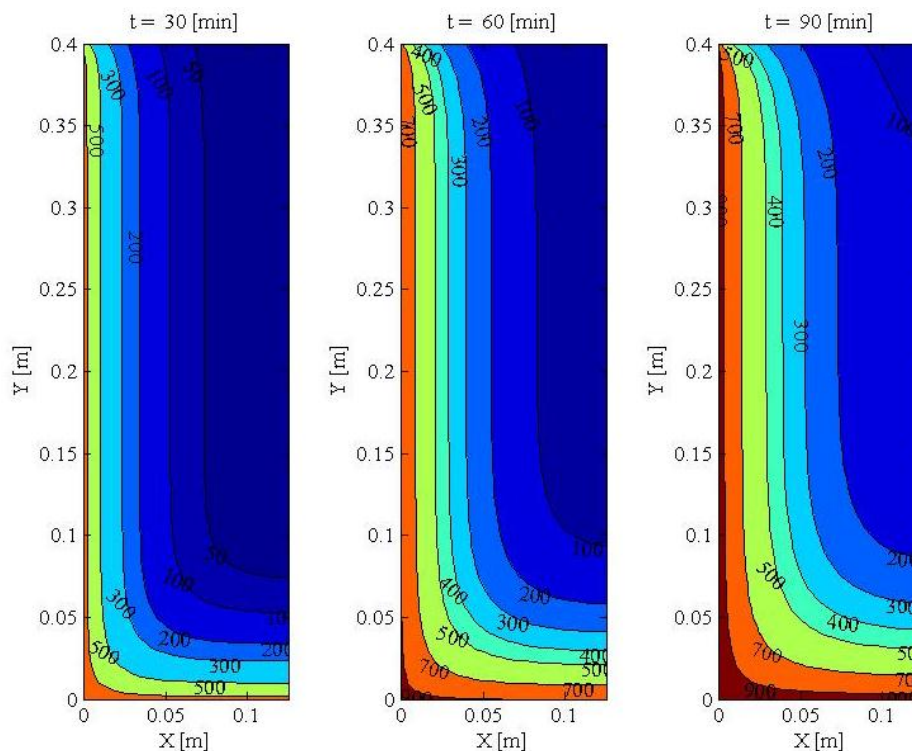


Slika 16: Temperatura točke (5, 5) cm v stebri za različne prerese in krivulje.

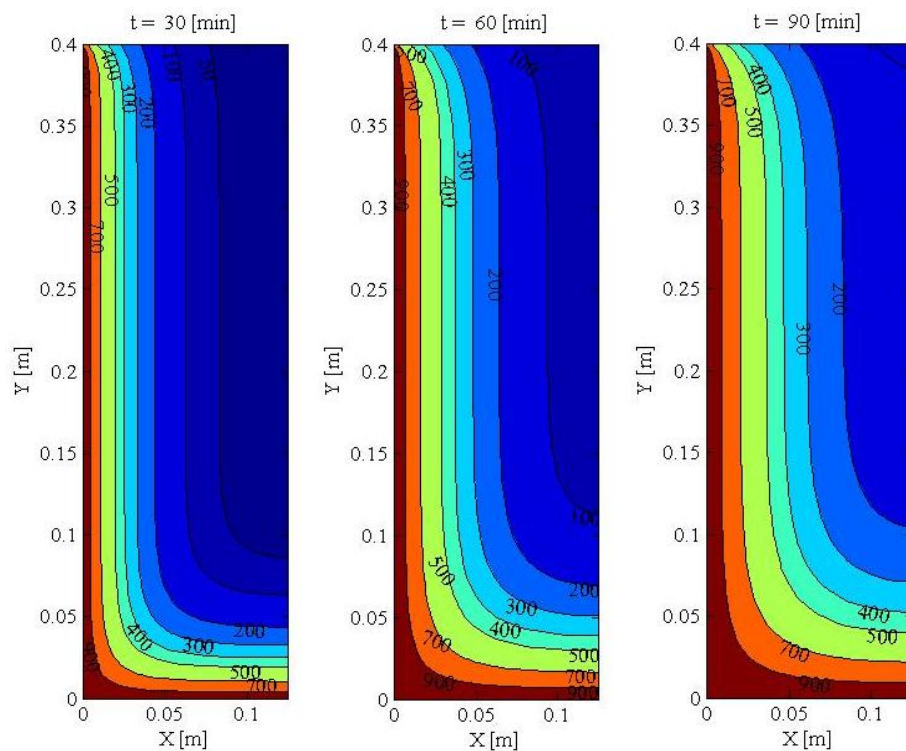
Iz analize ugotovimo, da je temperatura prereza v določeni točki močno odvisna od požarne krivulje, ki jo vzamemo za izračun temperature plinov. Temperatura blizu površju, kjer je armatura, se z velikostjo prereza ne zmanjša občutno, je le malo nižja zaradi večje toplotne kapacitete prereza. Pri poenostavljenih metodah preverjanja požarne odpornosti betonu z temperaturo nad 500 °C ne pripišemo nobene nosilnosti (SIST EN 1992-1-2, 2005). Pri večjih prerezih je manjši procent nenosilnega dela proti celotnemu prerezu, varnostni faktorji pa so pri požaru manjši in zaradi tega se z podaljševanjem odpornosti večajo prezezi elementa. Z analizo stebra pri poenostavljenem modelu naravnega požara opazimo, da se steber hladi z zamikom v primerjavi z temperaturo plinov v okolici. To se zgodi, ker je temperatura elementa še vedno nižja od temperature plinov in element še vedno prejema toploto. Bolj ko gremo v notranjost stebra večji je zamik, saj v začetku padanja temperature okolica še vedno greje del v notranjosti, ki ga opazujemo.

3.3.5 Temperaturna analiza AB nosilca

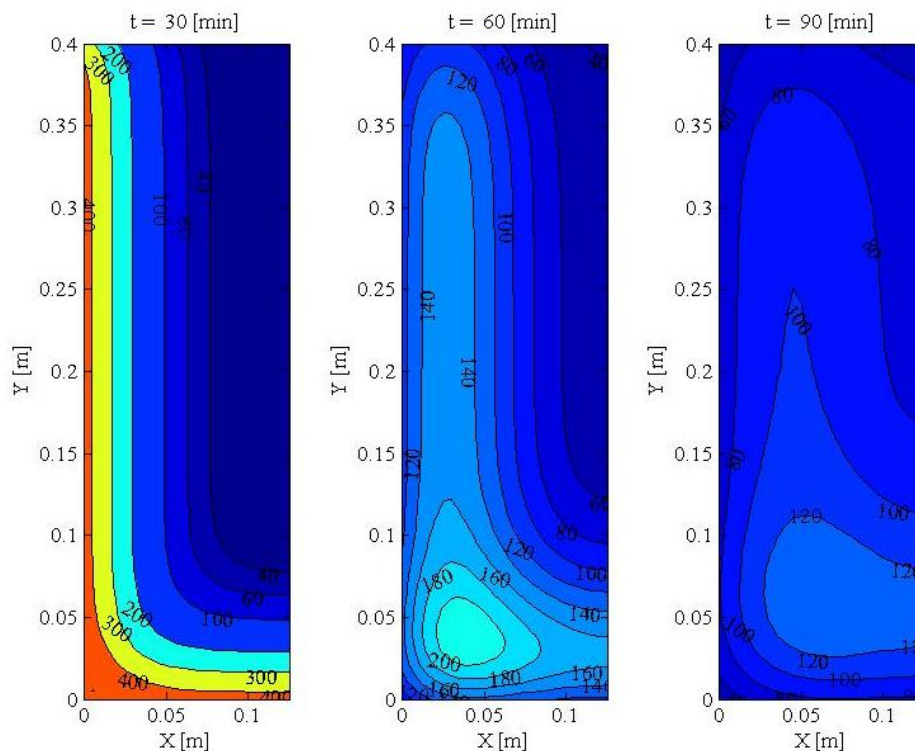
Analizo bomo naredili za armiranobetonska nosilca velikosti 25/40 cm in 50/80 cm, ki je požaru izpostavljen iz treh strani. Zgornja stran je neobremenjena. Kot pri analizi AB stebra je tu AB nosilec izpostavljen enakim požarnim vplivom, ki so opisani v poglavju 3.3.3. Na slikah 17 – 22 prikazujemo temperaturne profile AB nosilca.



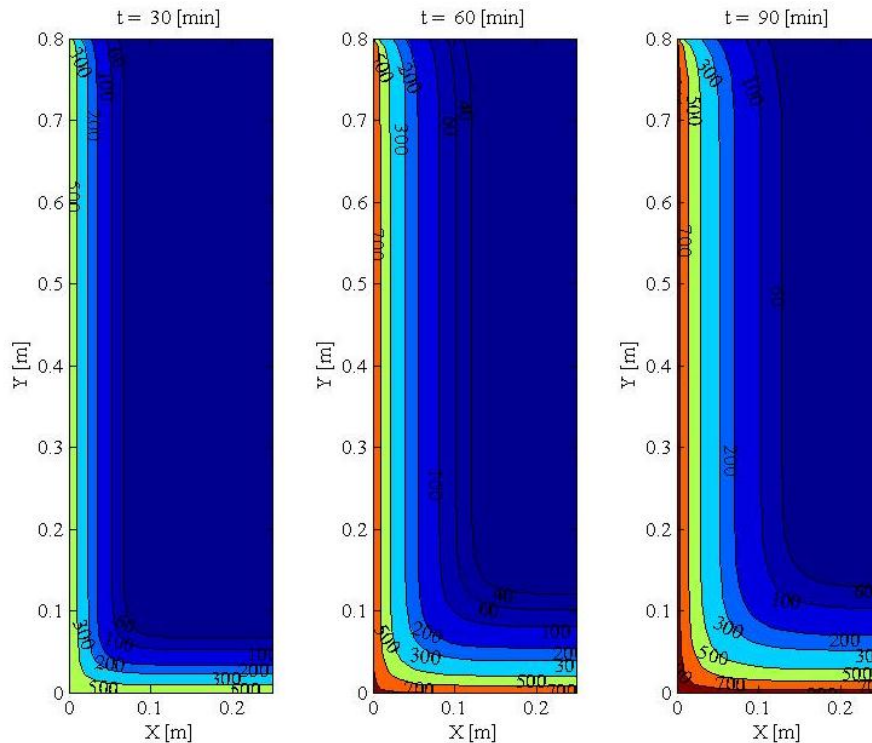
Slika 17: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-384.



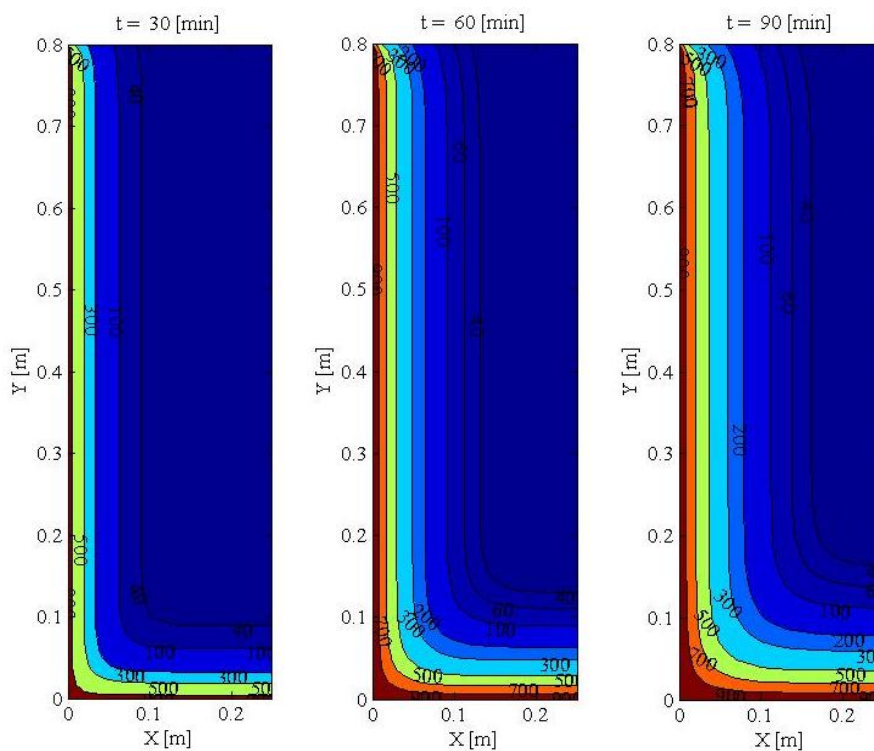
Slika 18: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.



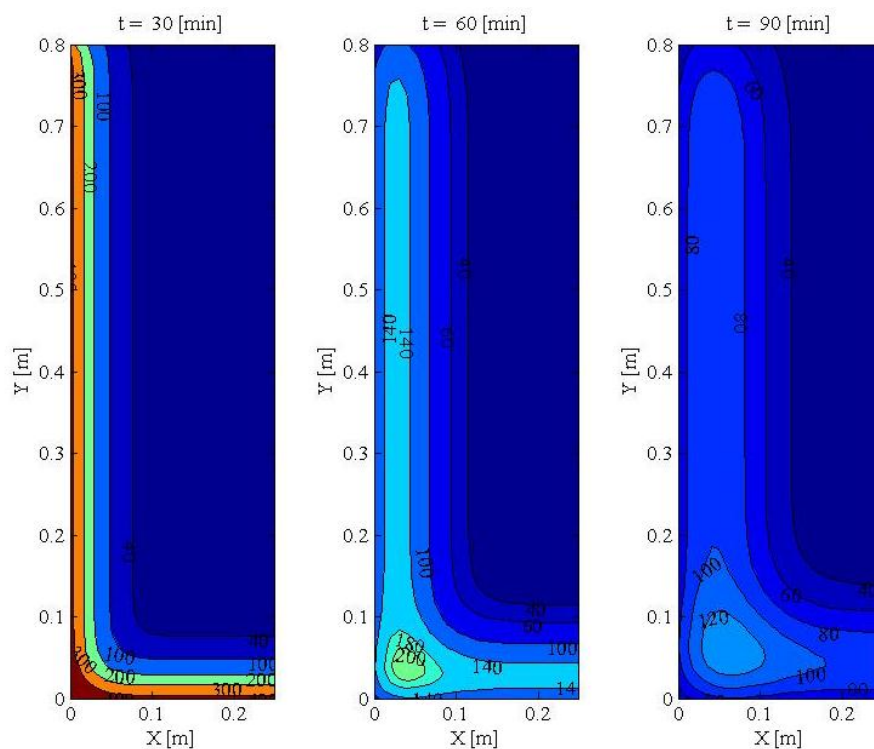
Slika 19: Temperaturni profili betonskega nosilca 25/40 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.



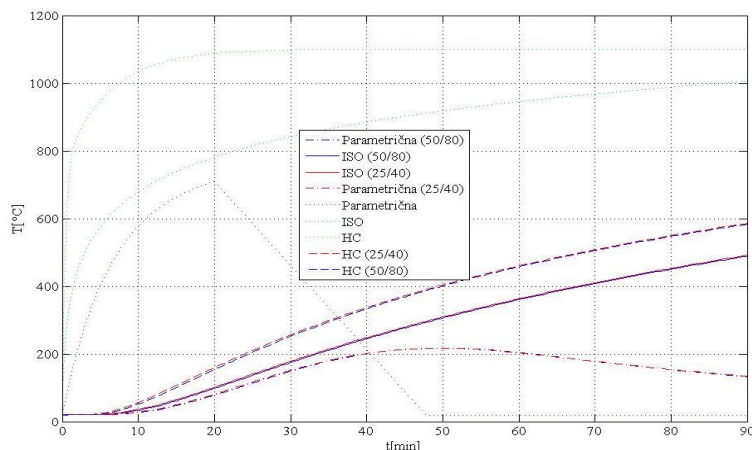
Slika 20: Temperaturni profili betonskega nosilca 50/80 cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-384.



Slika 21: Temperaturni profili betonskega nosilca 50/80 cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.



Slika 22: Temperaturni profili betonskega nosilca 50/80 cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.

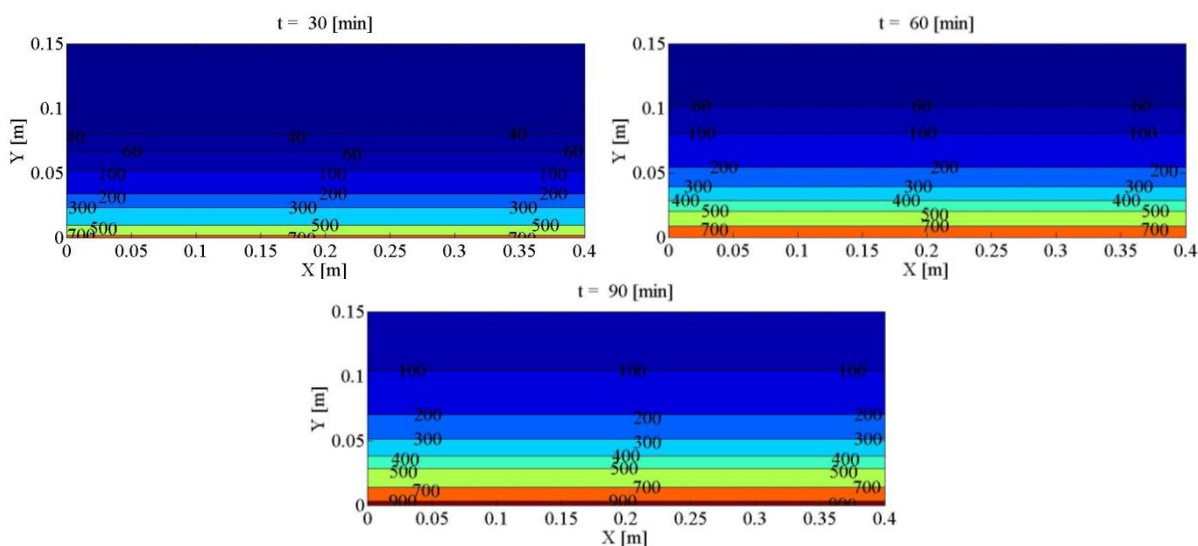


Slika 23: Temperatura točke (5, 5) cm v nosilcu za različne prereze in krivulje.

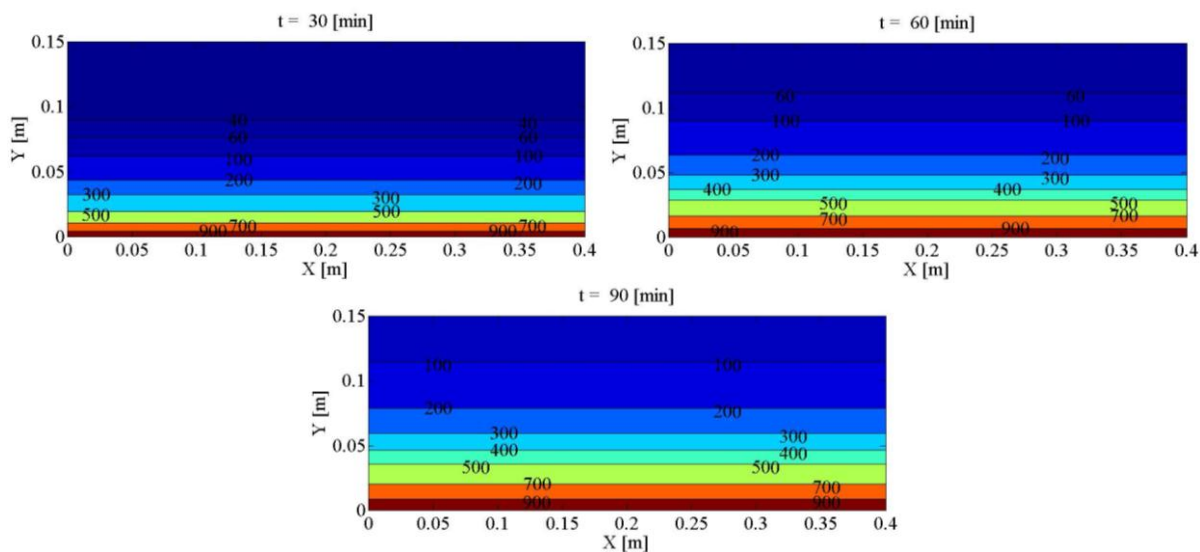
Iz slike 23 je razvidno, da velikost elementa in s tem povečana toplotna kapaciteta minimalno vpliva na temperaturo. Velik vpliv ima izbira požarnega modela. Iz temperaturnih profilov je razviden potek temperature po nosilcu. Na slikah 17 – 22 opazimo, da se izoterme se na vrhu nosilca ukrivijo navzven. To je posledica temperature plinov na neobremenjenem koncu. Tu toplota ne potuje več v eni smer, ampak se skozi gornjo ploskev hladi. Pri parametrični požarni krivulji, se nosilec v fazi ohlajanja ohlaja z zamikom.

3.3.6 Temperaturna analiza AB plošče

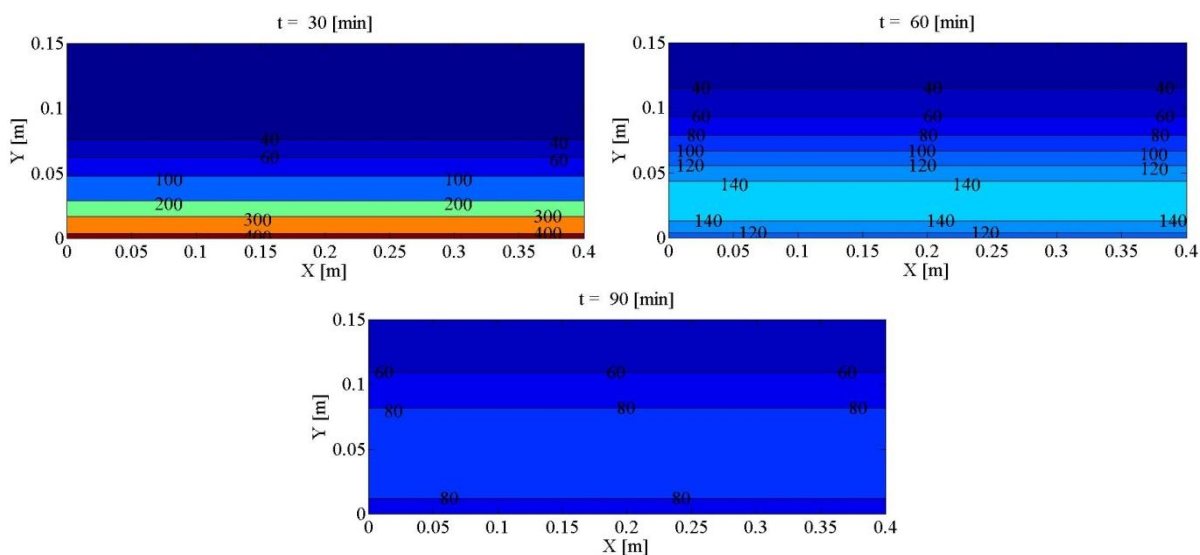
Analizirali bomo dve plošči debelin $d=15$ cm in $d=25$ cm. Plošče so praviloma požaru izpostavljene le iz spodnje strani. Izpostavljeni bosta požarom, ki so definirani v poglavju 3.3.3. Na slikah 24 – 29 prikazujemo temperaturne profile AB plošče.



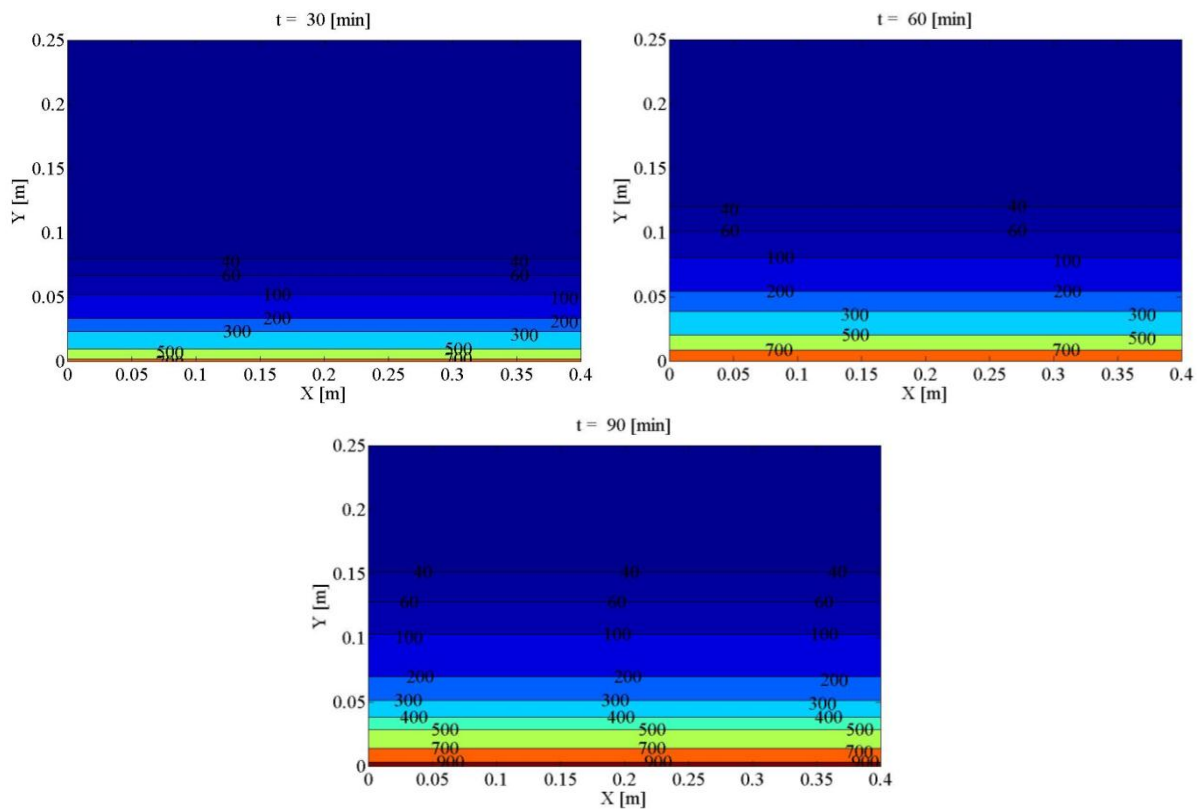
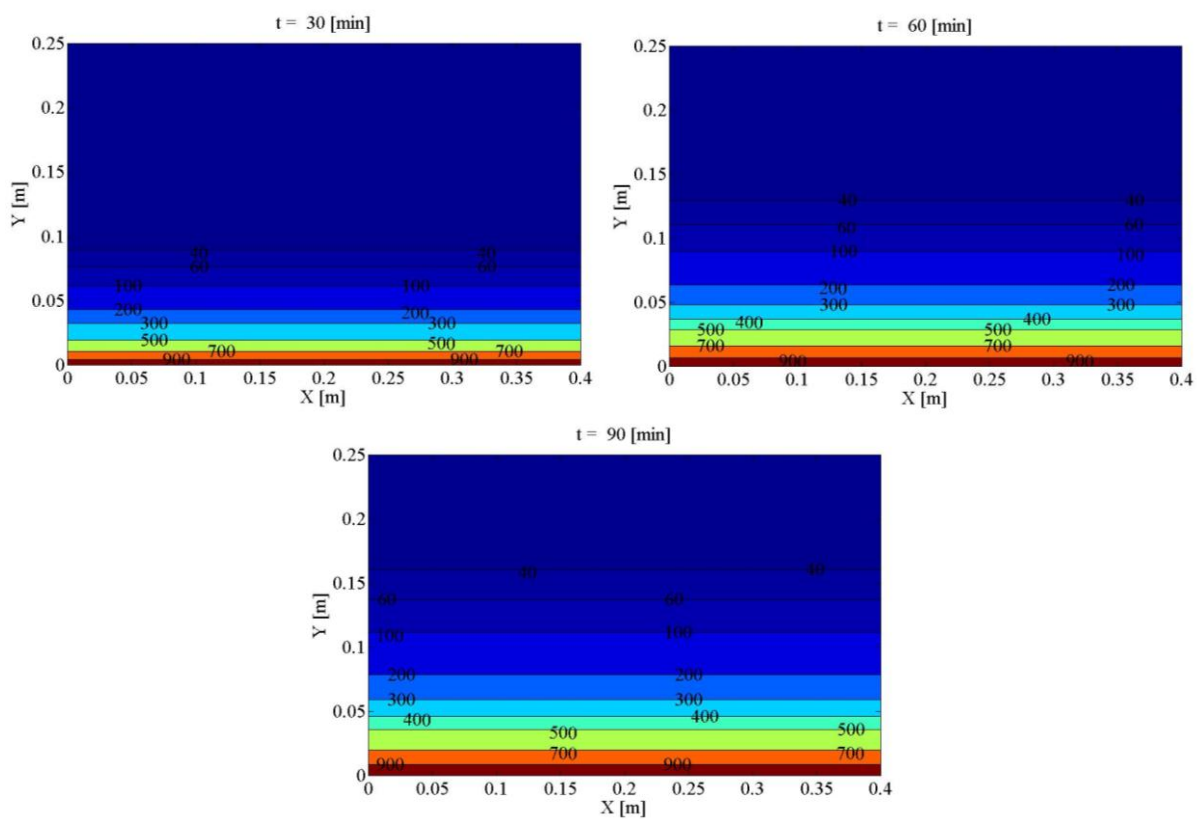
Slika 24: Temperaturni profili betonske plošče $d=15$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-834.

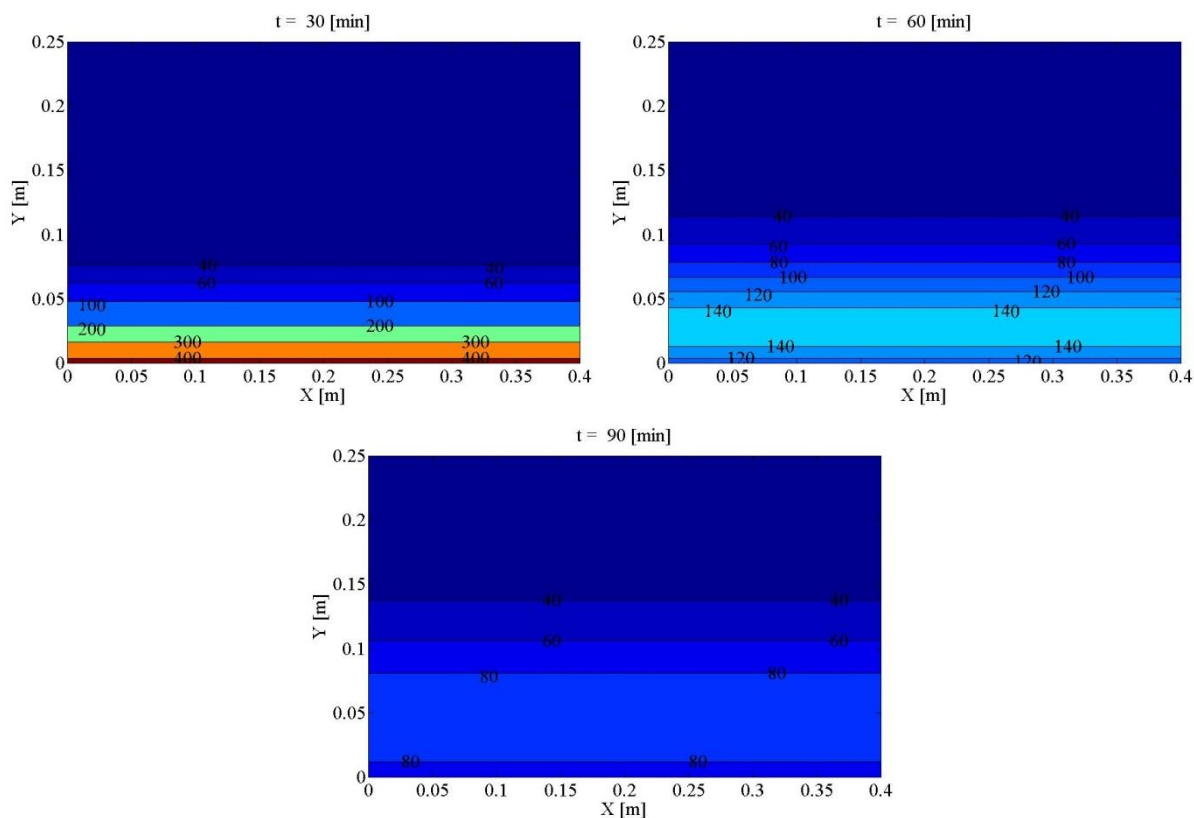


Slika 25: Temperaturni profili betonske plošče $d=15$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.

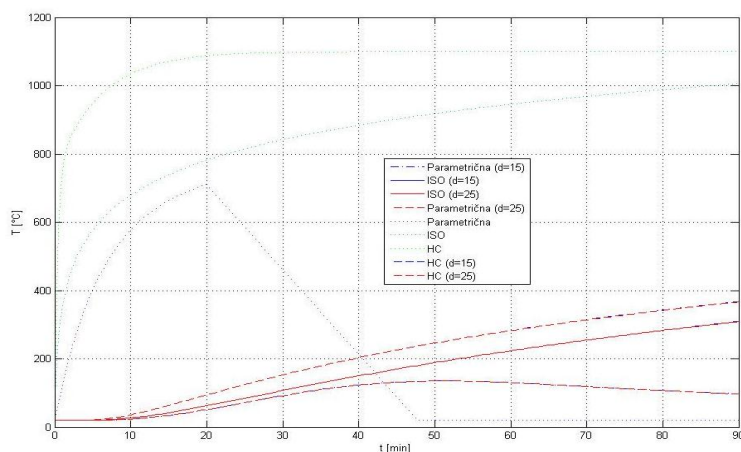


Slika 26: Temperaturni profili betonske plošče $d=15$ cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.

Slika 27: Temperaturni profili betonske plošče $d=25$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru ISO-834.Slika 28: Temperaturni profili betonske plošče $d=25$ cm za R30, R60 in R90 pri požaru HC.



Slika 29: Temperaturni profili betonske plošče $d=25$ cm za R30, R60 in R90 pri parametričnem požaru.



Slika 30: Temperatura točke (5, 5) cm v plošči za različne prezeze in krivulje.

Iz rezultatov (slike 24 – 29) vidimo, da so pri plošči izoterme ravne linije zaradi prehajanje toplote samo v eni smeri. Razlika v temperaturi v opazovani točki (slika 30) je med ploščama z različno debelino neopazna. Temperatura je zopet najbolj odvisna od požarnega modela. Padec temperature v prerezu se pri parametrični požarni krivulje zgodi z zamikom. Temperatura okolice je kljub padanju še vedno višja od opazovane točke, zaradi tega opazovani del še vedno prejema toploto, ki potuje iz mesta z višjo na mesto z nižjo temperaturo.

4 ZAKLJUČKI

V okviru diplomske naloge smo spoznali nekaj požarnih krivulj za opis razvoja temperature plinov v požarnem prostoru. Temperatura plinov je pri najbolj poenostavljenih modelih enaka v celotnem požarnem sektorju. Odvisna je samo od časa. Da bi zajeli lastnosti goriv in prostora, poznamo več vrst nominalnih požarnih krivulj. Z željo, da bi se bolj približali naravnim požarom, smo si ogledali parametrično požarno krivuljo skladno s SIST EN 1991-1-2, ki je odvisna od nekaterih fizikalnih parametrov. Fizikalni parametri opisujejo lastnosti požarnega sektorja, goriva in prezračevanja. Za te krivulje je značilno, da zajemajo tudi fazo ohlajanja. Čas pri katerem dosežemo maksimalno temperaturo je odvisen od vrste gorljivega materiala in od ventilacijskih pogojev. Poznamo pa tudi točnejše modele za opis razvoja požara, ki smo jih zgolj omenili. V drugem delu naloge smo s pomočjo programa HEATKO (Hozjan, 2009) izdelali nekaj temperaturnih profilov za različne konstrukcijske elemente. Analize so pokazale, da je hitrost segrevanja prereza odvisna od izpostavljenosti požaru. Pri plošči, ki je požaru izpostavljena samo s spodnje strani, je temperatura opazovane točke nižja kot pa pri nosilcu ali stebri, ki sta požaru izpostavljena iz dveh strani. Temperatura točke, ki smo jo opazovali, se pri stebri in nosilcu ne razlikuje, saj so robni pogoji v vogalu, kjer se opazovana točka nahaja, enaki. Na temperaturnih profilih je prikazan vpliv različnih vrst požarov za obravnavani AB element.

VIRI

Bratina, S. 2010. Požarna odpornost AB elementov skladno SIST EN 1992-1-2:2005. Osebna komunikacija. (7. 3. 2012)

Hozjan, T. 2009. 2D analiza prevajanje toplote po mediju: program HEATKO. Ljubljana, UL FGG.

Hozjan, T. 2009. Nelinearna analiza požara na sovprežne linijske konstrukcije. Doktorska disertacija. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Hozjan): 117 str.

Promat. 2012. Fire Curves.

<http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx#> (Pridobljeno 15. 8. 2012)

Tenchev, R.T., Li, L.Y., Purkiss, J.A. 2001. Finite element analysis of coupled heat and moisture transfer in concrete, subjected to fire. Num. Heat Transfer Part A, 39: 685–710.

Toplotni in mehanski vplivi v primeru požara. 2012.

http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/difisek/difisek_gradivo.pdf (Pridobljeno 15. 8. 2012)

Standardi:

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

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