

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:

Alič, H., 2014. Vpliv oglenenja na požarno odpornost lesenih stebrov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Schnabl, S., somentor Planinc, I.): 59 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:

Alič, H., 2014. Vpliv oglenenja na požarno odpornost lesenih stebrov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Schnabl, S., co-supervisor Planinc, I.): 59 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  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

**HARIS ALIČ**

**VPLIV OGLENENJA NA POŽARNO ODPORNOST  
LESENIH STEBROV**

Diplomska naloga št.: 3378/KS

**INFLUENCE OF CHARRING ON THE FIRE  
RESISTANCE OF TIMBER COLUMNS**

Graduation thesis No.: 3378/KS

**Mentor:**

doc. dr. Simon Schnabl

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

prof. dr. Igor Planinc

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

izr. prof. dr. Jože Panjan

Ljubljana, 28. 03. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Haris Alič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom » Vpliv oglenjenja na požarno odpornost lesenih stebrov«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, Marec 2014

Haris Alič

## **BIBLIOGRAFSKO DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>614.84:624.011.1(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Haris Alič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Simon Schnabl</b>
<b>Somentor:</b>	<b>prof. dr. Igor Planinc</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Vpliv oglenjenja na požarno odpornost lesenih stebrov</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – UNI</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>59 str., 24 pregl., 36 sl., 71 en., 9 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>požar, oglenenje lesa, empirični in numerični modeli oglenjenja, toplotna analiza, uklon</b>

### **IZVLEČEK**

Diplomska naloga obravnava vpliv oglenjenja lesa na požarno odpornost lesenih stebrov. Poleg uvoda v prvem poglavju je v drugem poglavju podan opis oglenjenja lesa ter pojav pirolize v lesu. Poleg tega je podan tudi pregled literature s področja empiričnih in numeričnih modelov oglenjenja lesa. V tretjem poglavju so opisane glavne zakonitosti projektiranja požarnovarnih konstrukcij na uklon v skladu z EN 1995-1-1:2005. V četrtem poglavju je dodatno obrazložena uporaba numeričnih in empiričnih modelov z uporabo računskih primerov. Računski primeri za kompleksen numerični primer so bili izvedeni s programom izdelanim v programskem okolju Matlab. Izračuni za empirične modele so bili izvedeni s pomočjo programa MS Excel.

Na podlagi toplotne analize pri numeričnem primeru izračunamo razporeditev oglja po prerezu. Razporeditev oglja po prerezu v primeru empiričnih modelov izračunamo s pomočjo enačb podanih v drugem poglavju. Izračunano razporeditev oglja uporabimo za izračun uklonske nosilnosti stebra v primeru požara. V petem poglavju primerjamo izbrane empirične in numerične modele. Zaključki dela so podani v šestem poglavju.

**BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>614.84:624.011.1(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Haris Alič</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>assist. Prof. Simon Schnabl, Ph. D.</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>prof. Igor Planinc, Ph. D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Influence of charring on the fire resistance of timber columns</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Notes:</b>	<b>59 p., 24 tab., 39 fig., 71 eq., 9 ann.</b>
<b>Key words:</b>	<b>fire, timber charring, empirical and numerical charring models, thermal analysis, buckling</b>

**ABSTRACT**

Influence of charring on the fire resistance of timber columns is under consideration in this Graduation thesis. In the second section timber charring and the phenomenon of the pyrolysis of timber is explained. Further, the literature review in the field of empirical and numerical models of timber charring is given. In the third section, the main procedures of the structural fire-buckling design in accordance with EN 1995-1-1:2005 are analysed. In the fourth section, the numerical and empirical models are further explained through numerical examples. The calculations in numerical examples are carried out with a computer program developed in Matlab environment. The empirical models are carried out using program MS Excel.

Based on the heat transfer analysis in the numerical model a distribution of char is calculated. The empirical equations for determination of char distribution are given in the second section. The calculated distribution of char is used then to calculate the buckling capacity of timber columns exposed to fire. In the fifth section the selected empirical and numerical models are compared to each other. The conclusions are given in the last section.

## **ZAHVALA**

*Težko se je na tem mestu zahvaliti vsem, ki so mi med študijem in ob pripravi diplomske naloge stali ob strani.*

*Vendarle sem posebno zahvalo dolžan svojemu mentorju doc. dr. Simonu Schnablu. Hvala vam za vse koristne nasvete in ideje, za vso pomoč in podporo pri izdelavi naloge.*

*Svojo hvaležnost bi izrekel tudi svojim staršem in bratu za njihovo brezpogojno podporo, pomoč in vse spodbudne besede, ki sem jih bil deležen vsa leta študija. Ne smem pozabiti niti na moja stara starša. Hvala!*

*Iskreno se zahvaljujem tudi vsem kolegom in prijateljem, ki so mi bili pri nastajanju tega dela bili v kakršnokoli pomoč in za nepozabna študentska leta.*

**KAZALO VSEBINE**

Izjava o avtorstvu.....	II
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček.....	III
Bibliographic – documentalistic information and abstract.....	IV
Zahvala.....	V
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 Vsebina dela in namen naloge .....	3
<b>2 OGLENIENJE LESA IN MODELI OGLENIENJA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Empirični modeli ogljenja in standardni požari.....	6
2.1.1 Avstralski standard AS 1720.4 [9].....	8
2.1.2 Evrokod 5 [5].....	9
2.1.3 Schaffer [10].....	10
2.1.4 White in Nordheim [10].....	12
2.2 Numerični modeli ogljenja.....	13
2.2.1 Luikov [13].....	13
2.2.2 Takeda [14].....	16
2.2.3 Fredlund [15].....	16
2.2.4 Janssens [8].....	17
2.2.5 Schnabl in Turk [6].....	18
2.2.6 Predlagani numerični model .....	20
2.2.6.1 Metoda končnih diferenc .....	21
<b>3 PROJEKTIRANJE POŽARNOVARNIH KONSTRUKCIJ NA UKLON V SKLADU Z EVROKODOM 5 .....</b>	<b>24</b>
3.1 Splošno.....	24
3.1.1 Kombinacija vplivov .....	24
3.1.2 Materialne lastnosti.....	25
3.1.3 Uklonska nosilnost lesenega stebra izpostavljenega požarni obtežbi .....	25
3.2 Poenostavljene metode .....	27
3.2.1 Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom .....	27
3.2.2 Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami .....	28
<b>4 RAČUNSKI PRIMERI .....</b>	<b>29</b>
4.1 Empirični modeli.....	30
4.1.1 Evrokod 5 [5]-Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom .....	31



4.1.2	Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami .....	35
4.1.3	White in Nordheim [10].....	38
4.1.4	Avstralski standard [9].....	41
4.1.5	Schaffer [10].....	44
4.2	Numerični model.....	47
<b>5</b>	<b>PRIMERJAVA RAZLIČNIH MODELOV ZA IZRAČUN POŽARNE ODPORNOSTI LESENIH STEBROV.....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>57</b>
<b>VIRI</b>	<b>.....</b>	<b>58</b>

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Požar v Londonu 1666 [2].....	1
Slika 2: Primerjava nosilnosti nezaščitenega jekla in lesa v primeru požara [3].....	2
Slika 3: Toplotna degradacija lesa [7] .....	5
Slika 4: Prehod toplote in vlage [8] .....	6
Slika 5: Požarni krivulji ISO 834 [11] in ASTM E 119 [12] .....	8
Slika 6: Rezidualni ter efektivni prečni prerez v skladu z Evrokodom 5 [5].....	9
Slika 7: Primerjava empiričnih modelov enodimenzijskega oglečenja.....	13
Slika 8: Diferenčna mreža v dveh zaporednih časovnih korakih $k$ in $k+1$ .....	22
Slika 9: Deformacijske oblike ter uklonske dolžine za različne načine podpiranja stebrov [20] .....	27
Slika 10: Leseni steber, ki je izpostavljen standardnemu požaru [11] .....	29
Slika 11: Vrednosti uklonskih dolžin .....	30
Slika 12: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Evrokodu 5 [5], po metodi zmanjšane prereza za različne načine podpiranja in čase trajanja požara.....	31
Slika 13: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Evrokodu 5 [5], po metodi zmanjšane prereza za različne načine podpiranja in čase trajanja požara.....	32
Slika 14: Požarna odpornost stebrov iz lepljenega lesa po Evrokodu 5 [5], po metodi zmanjšane prereza za različne načine podpiranja in čase trajanja požara.....	33
Slika 15: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po Evrokodu 5 [5], po metodi zmanjšane prereza za primer A in različne čase trajanja požara.....	34
Slika 16: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Evrokodu 5 [5], primerjava metode zmanjšane prereza in metode zmanjšane trdnosti .....	35
Slika 17: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Evrokodu 5 [5], primerjava metode zmanjšane prereza in metode zmanjšane trdnosti .....	36
Slika 18: Požarna odpornost stebrov iz lepljenega lesa po Evrokodu 5 [5], primerjava metode zmanjšane prereza in metode zmanjšane trdnosti .....	37
Slika 19: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po White in Nordheim [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara.....	38
Slika 20: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po White in Nordheim [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara.....	39
Slika 21: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po White in Norheim [10], za primer A in različne čase trajanja požara .....	40

---

Slika 22: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Avstralskem standardu [9], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara .....	41
Slika 23: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Avstralskem standardu [9], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara .....	42
Slika 24: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po Avstralskem standardu [9], za primer A in različne čase trajanja požara .....	43
Slika 25: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Schafferju [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara .....	44
Slika 26: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Schafferju [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara .....	45
Slika 27: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po Schafferju [10], za primer A in različne čase trajanja požara .....	46
Slika 28: Porazdelitev temperature in oglja po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 5 in 15 min .....	47
Slika 29: Porazdelitev temperature in oglja po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 30 in 60 min .....	48
Slika 30: Redukcija elastičnega modula lesa zaradi požara v skladu z Evrokodom 5 [5] .....	49
Slika 31: Redukcija tlačne trdnosti lesa zaradi požara v skladu z Evrokodom 5 [5] .....	49
Slika 32: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava numeričnih modelov .....	50
Slika 33: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava empiričnih modelov .....	52
Slika 34: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev, primerjava empiričnih modelov .....	53
Slika 35: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava empiričnih in numeričnih modelov .....	54
Slika 36: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava empiričnih in numeričnih modelov .....	55

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Stopnje oglenjenja $\beta_0$ in $\beta_n$ , za različne tipe lesa .....	10
Preglednica 2: Vrednosti regresijskih konstant za različne vrste lesa .....	11
Preglednica 3: Materialni podatki za različne vrste lesa .....	30
Preglednica 4: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-iglavci.....	31
Preglednica 5: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-listavci .....	32
Preglednica 6: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-lepljeni les .....	33
Preglednica 7: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava različnih vrst lesa....	34
Preglednica 8: Požarna odpornost stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava metod-iglavci .....	36
Preglednica 9: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava metod-listavci .....	37
Preglednica 10: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava metod-lepljeni les	37
Preglednica 11: Požarna odpornost lesenega stebra po White in Nordheim [10]-iglavci.....	38
Preglednica 12: Požarna odpornost lesenega stebra po White in Nordheim [10]-listavci .....	39
Preglednica 13: Rezultati požarne odpornosti lesenega stebra po White in Nordheim [10]-primerjava različnih vrst lesa.....	40
Preglednica 14: Požarna odpornost lesenega stebra po Avstralskem standardu [9]-iglavci .....	41
Preglednica 15: Požarna odpornost lesenega stebra po Avstralskem standardu [9]-listavci .....	42
Preglednica 16: Požarna odpornost lesenega stebra po Avstralskem standardu [9]-primerjava različnih vrst lesa .....	43
Preglednica 17: Požarna odpornost lesenega stebra po Schafferju [10] -iglavci.....	44
Preglednica 18: Požarna odpornost lesenega stebra po Schafferju [10]-listavci .....	45
Preglednica 19: Požarna odpornost lesenega stebra po Schafferju [10]-primerjava različnih vrst lesa.	46
Preglednica 20: Požarna odpornost lesenega stebra - Numerični primeri .....	50
Preglednica 21: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih modelov-iglavci.....	52
Preglednica 22: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih modelov-listavci.....	53
Preglednica 23: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih in numeričnih modelov....	55
Preglednica 24: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih in numeričnih modelov....	56

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

EC	Evrokod
Avs	Avstralski standard
M-prereza	Metoda zmanjšane prereza
M-togosti	Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami
$R_d$	projektna odpornost/nosilnost
$E_{d,t,fi}$	projektna vrednost obremenitev



## 1 UVOD

Les je eden najstarejših gradbenih materialov, kar jih pozna človeštvo. Zaradi lahke dostopnosti, enostavne obdelave, dobrih mehanskih in toplotno-izolativnih ter akustičnih lastnosti je vsestransko uporaben gradbeni material. Kljub vsem tem lastnostim so z lesom še vedno povezani precejšnji predsodki. Zelo razširjeno je prepričanje, da so lesene konstrukcije "glasne", da je v njih preprih, zanje naj bi bilo značilno tudi hitro preperevanje, sploh pa naj bi gorele kot bakle [1].

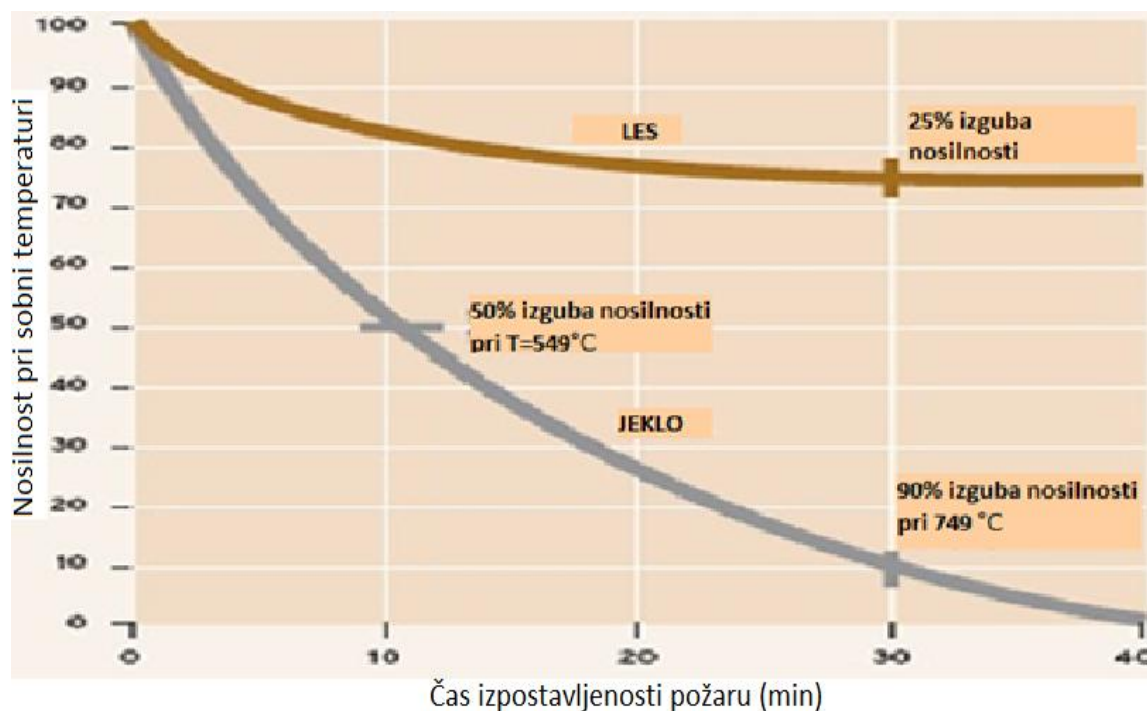


**Slika 1: Požar v Londonu 1666 [2]**

Zaradi požarov se je skozi zgodovino uporaba lesa v gradbeništvu močno zmanjšala. Primer je požar iz leta 1666 v mestu London, ki je gorelo pet dni in zgorelo do tal (slika 1). Posledica tega požara je bil nov predpis, ki je prepovedal uporabo lesa v gradnji hiš in ostalih objektov v mestih. Za gradnjo so od tedaj dalje v praksi uporabljali opeko in kamen. Prevladalo je namreč mnenje, da lesene konstrukcije niso požarno varne ter zato njihova uporaba ni smotrna.

Novejše raziskave tem spoznanjem oporekajo. Rezultati kažejo, da je požar v lesenih konstrukcijah veliko bolj obvladljiv in manj nevaren kot v konstrukcijah iz drugih materialov. S sliko 2 je podana temperaturna/časovna odvisnost nosilnosti lesa in jekla v primeru izpostavljenosti standardnim pogojem požara. Vidimo lahko, da les v primerjavi z jeklom pri enakih temperaturah veliko počasneje izgublja nosilnost. Pri gorenju lesa namreč nastane na površini zoglenela plast, ki deluje kot toplotna izolacija. Posledica tega je, da ima les le nekaj milimetrov pod ogljem praktično sobno temperaturo. S

tem les obdrži svoje mehanske lastnosti dalj časa kot jeklo, ki se zaradi visoke toplotne prevodnosti hitro segreje in s tem izgubi svojo nosilnost.



Slika 2: Primerjava nosilnosti nezaščitenega jekla in lesa v primeru požara [3]

Les je naraven in gorljiv material. Pri dimenzioniranju lesenih konstrukcij moramo to lastnost upoštevati pri zagotavljanju njegove požarne varnosti. Z naraščanjem temperatur v konstrukcijah med požarom se njihova nosilnost zmanjšuje, deformabilnost pa povečuje. Konstrukcije morajo biti zasnovane tako, da za določen čas požarne izpostavljenosti ohranijo nosilno funkcijo. Da se požar ne širi po zgradbi, je potrebno njene dele razdeliti na požarne sektorje. Pri tem morajo elementi, ki tvorijo meje požarnega sektorja, vključno s stiki, ohraniti ločevalno funkcijo (preprečiti vdor ognja, dimov, vročih plinov). Elementi morajo tako ohraniti celovitost in izolativnost, na neizpostavljeni strani pa mora biti omejeno tudi toplotno sevanje [4].

Pri gorenju lesa potekajo v lesu različni zapleteni kemični procesi. Tvorijo se različne snovi (ogljikov monoksid, ogljikov dioksid, metan, acetilenska kislina, katran, itd.). Pride do pojava toplotne degradacije ali pirolize, les začne pokati, se deformirati, nosilnost se zmanjšuje, na površini pa nastane plast oglja.



Dokazovanje varnosti lesenih konstrukcij je zato v primeru požara zelo pomembno. Požarno odpornost lahko določimo ali ocenimo s pomočjo preizkusov, naprednih računskih metod ali s poenostavljenimi metodami. Preizkusi se izvajajo v požarnih laboratorijih, kjer so stroški izvajanja visoki in je zato število preizkusov običajno majhno. Majhno število preizkusov in s tem majhno število vzorcev ter dejstvo, da les ni homogeni material, rezultira v velikem raztrosu meritev rezultatov, kar pa otežuje nadaljnjo analizo le teh.

Posledica dragih meritev je bila težnja po razvoju cenejših matematičnih modelov, ki bi opisali med drugim tudi mehanski odziv konstrukcij v primeru požara. Matematični modeli opisujejo kompleksne procese, ki se dogajajo v lesu, ko le ta gori. Račun običajno poenostavimo tako, da izvajamo posamezne analize ločeno za kemijske, toplotne, vlažnostne in mehanske procese.

Zaradi kompleksnosti matematičnih modelov, predvsem s stališča uporabe, jih v strokovni praksi ne srečujemo prav pogosto. Pri projektiranju se za oceno požarne varnosti uporabljajo poenostavljene metode, ki temeljijo na empiričnih modelih oglenenja in so predpisane z različnimi predpisi ter standardi. Te metode so namenjene le približni oceni požarne varnosti enostavnih konstrukcijskih elementov. V skladu z Evrokodi toplotna analiza pri poenostavljenih računskih metodah ni obvezna.

## **1.1 Vsebina dela in namen naloge**

V diplomskem delu nas zanima uklonsko dimenzioniranje lesenih stebrov v primeru požara. Največjo pozornost namenjamo modelom oglenenja lesa, ki predstavljajo osnovno orodje pri dimenzioniranju konstrukcij za primere požara. Zanima nas primerjava kompleksnih matematičnih (numeričnih) modelov oglenenja z empiričnimi modeli. Matematični modeli zagotavljajo večjo natančnost pri določanju debeline oglja in s tem hitrosti oglenenja, vendar so kompleksni za uporabo, saj zahtevajo veliko vhodnih podatkov, znanja in računskega časa. Empirični modeli, ki jih običajno srečujemo v praksi, so manj natančni, vendar kljub temu dovolj natančni pri oceni debeline oglja, da se uporabljajo v praksi.

Boljši matematični opis pomembnih kemijskih, toplotnih, vlažnostnih in mehanskih procesov, ki se dogajajo v lesu v času požara, prinaša večjo natančnost pri določanju debeline oglja in potek temperature ter vlage v prečnem prerezu lesenega stebra.

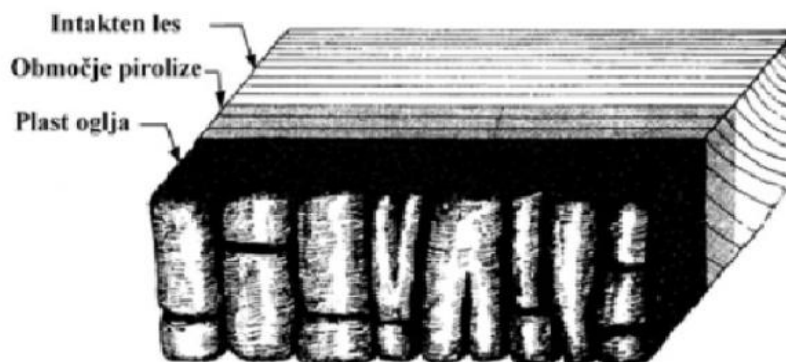
Zanima nas, kaj pridobimo oziroma koliko pridobimo na natančnosti z uporabo kompleksnih matematičnih modelov v primerjavi z empiričnimi modeli.

V drugem poglavju je podan opis oglečenja lesa ter pojav pirolize v lesu. Prav tako je v tem poglavju podan pregled literature s področja empiričnih in numeričnih modelov. V tretjem poglavju opišemo glavne zakonitosti projektiranja požarnovarnih konstrukcij na uklon v skladu z Evrokodom 5 [5]. V četrtem poglavju je s pomočjo računskih primerov dodatno obrazložena uporaba numeričnih in empiričnih modelov. V petem poglavju primerjamo izbrane empirične in numerične modele. Zaključki so podani v šestem poglavju.

## 2 OGLENEENJE LESA IN MODELI OGLENEENJA

Les, ki je izpostavljen visokim temperaturam oziroma požaru, je podvržen toplotni degradaciji oziroma procesu pirolize [6] (slika 3). Piroliza je izjemno zapleten proces, kjer se prepletajo različni kemijski procesi ob sočasnem prehodu toplote in vlage ter še nekaterih drugih snovi. Proces pirolize se vrši v območju, kjer ni kisika oziroma ga je zelo malo.

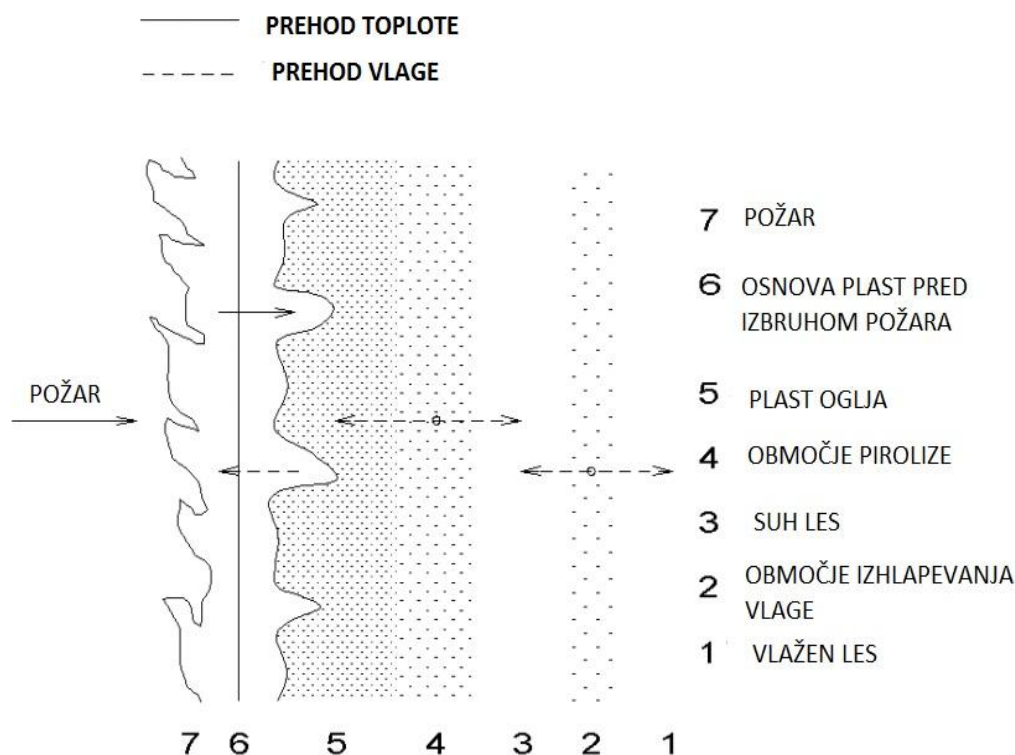
Pri izpostavljenosti požaru oziroma temperaturam do 100 °C, pride v lesu do izhlapevanja in izparevanje proste vode, ki jo je v zračno suhem lesu od 10 do 20 %. V območju med 100 °C do 220 °C v lesu začne izparevati kemijsko vezana voda. Pretežni del vodne pare potuje v smeri požaru izpostavljene zunanje površine (slika 4), manjši del pa v nasprotni smeri, kjer se pri temperaturah pod 100°C ponovno kondenzira.



Slika 3: Toplotna degradacija lesa [7]

V temperaturnem območju lesa med 110 °C in 200 °C, poteka razkroj najmanj stabilnih vlaken, medtem ko bolj stabilna vlakna začnejo razpadati v območju med 200 °C in 270 °C. Zaradi razkroja vlaken pride do nastanka različnih snovi (ogljikov monoksid, ogljikov dioksid, metan, mravljična in acetilenska kislina, katran, itd.). Pri temperaturah nekje med 270 °C in 300 °C les začne ogleneti in se lahko vname in nastane plamen. Volumen nastalega oglja je manjši od začetnega volumna lesa. Sloj nastalega oglja zaradi svojih materialnih lastnosti predstavlja izolacijski sloj. Pri nadaljnjem povečanju temperature oglje dodatno razpoka. Razpokanost oglja vpliva na povečan prehod toplote in vlage ter drugih snovi med okoljem (ognjem) in materialom. V temperaturnem območju med 300 °C in 500 °C vnetljive snovi (metan, formaldehid, metanol, itd.), razredčene z ogljikovim dioksidom in vodno paro, izparijo. Pri temperaturah nad 500 °C od lesa ostane samo še pepel.

Hitrost oglečenja je odvisna od več različnih parametrov, med katerimi so najbolj pomembni vrsta gorljivega materiala, geometrija prereza, vsebnost vlage v lesu, količina kisika v zraku, temperatura požarnega prostora, velikost razpok, itd.



Slika 4: Prehod toplote in vlage [8]

## 2.1 Empirični modeli oglečenja in standardni požari

Pojav oglečenja lesa v lesenih konstrukcijah je predmet intenzivnih raziskav že mnogo let. Pojav opisujejo številni empirični modeli (Evrokod [5], Avstralski standard [9], Schaffer [10], White in Nordheim [10], itd.) za določitev hitrosti oglečenja oziroma debeline oglja v požaru izpostavljenih lesenih elementih.

V splošnem lahko opišemo oglečenje lesa s hitrostjo zmanjševanja mase lesa (g/s) ali s hitrostjo širjenja oglja (mm/s) v notranjost prereza. Slednji način se tudi največkrat uporablja pri dimenzioniranju lesenih konstrukcij, saj z njim lahko določimo zmanjševanje prereza skozi čas.

S pomočjo eksperimentov je raziskovalcem uspelo razviti empirične modele, ki opisujejo oglenenje lesa. V splošnem je oblika modelov naslednja:

$$\frac{\partial x}{\partial t} \approx at^n, \quad (2.01)$$

kjer  $\frac{\partial x}{\partial t}$  pomeni hitrost oglenjenja,  $t$  čas izpostavljenosti požaru,  $x$  je debelina oglja,  $a$  in  $n$  pa sta pa regresijski konstanti.

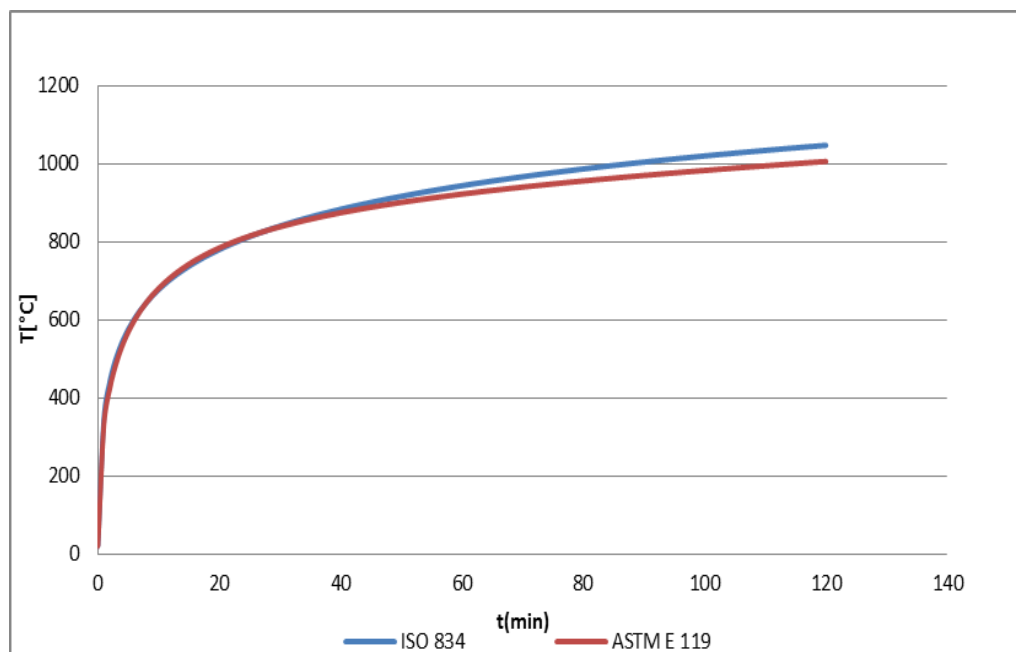
Pri oceni požarne odpornosti celotne konstrukcije ali njenega dela uporabljamo standardizirane načine segrevanje prostora, ki jih modeliramo s pomočjo standardnih požarnih krivulj. Najosnovnejša je standardna požarna krivulja ISO 834 (slika 5) [11], s katero opišemo časovni razvoj temperature požarnega prostora. Z njo predpostavimo, da temperatura požarnega prostora med požarom ves čas narašča v skladu z izrazom:

$$T_g = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (2.02)$$

kjer je  $T_0$  (°C) temperatura okoliškega zraka ob nastopu požara,  $T_g$  (°C) pa pomeni povprečno temperaturo prostora ter  $t$  (min) čas izpostavljenosti požaru.

Zelo podobna krivulji ISO 834 [11] je krivulja ASTM E119 (slika 5) [12], ki se večinoma uporablja v Severni Ameriki, podana pa je z izrazom:

$$T_g = T_0 + 750 \left(1 - e^{-0.49\sqrt{t}}\right) + 22\sqrt{t}. \quad (2.03)$$



Slika 5: Požarni krivulji ISO 834 [11] in ASTM E 119 [12]

Veljavnost empiričnih modelov oglenjenja lesa je večinoma omejena na enodimenzionalne primere s preprosto geometrijo, konstantnimi materialnimi karakteristikami ter standardnimi požarnimi obtežbami.

### 2.1.1 Avstralski standard AS 1720.4 [9]

Avstralski standard AS 1720.4 [9] predpisuje zahteve pri dimenzioniranju lesenih konstrukcij, izpostavljenih standardni požarni obtežbi ISO 834 [10]. Izraz za hitrost oglenjenja je podan z izrazom:

$$\dot{c} = 0.4 + \left(\frac{280}{\rho}\right)^2, \quad (2.04)$$

kjer je  $\dot{c}$  hitrost oglenjenja (mm/min),  $\rho$  predstavlja specifično gostoto lesa ( $\text{kg/m}^3$ ) z vsebnostjo vlage 12 %. Efektivna globina oglja je tako določena z izrazom:

$$d_c = \dot{c}t + 7.5, \quad (2.05)$$

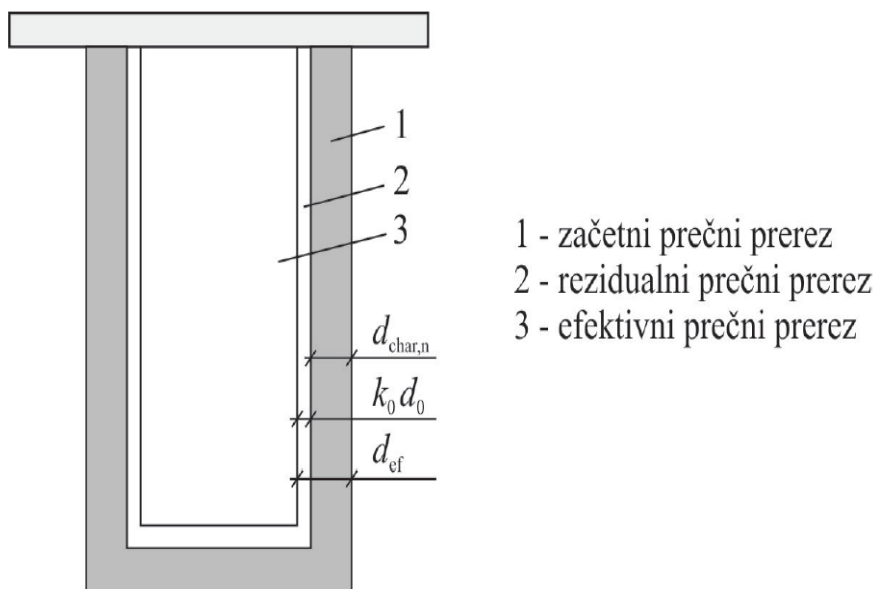
kjer je  $d_c$  (mm) efektivna globina oglja,  $t$  (min) pa predstavlja čas izpostavljenosti požarni obtežbi določeni v standardnem požarnem testu AS 1530.4 [9].

### 2.1.2 Evrokod 5 [5]

V standardu Evrokod 5 [5] je debelina oglja označena z  $d_{char,0}$  (slika 6). V vogalih prečnega prereza je zaradi izpostavljenosti stebra visokim temperaturam z dveh strani hitrost ogljenja in s tem tudi debelina oglja večja. V primeru, da vogalnih zaokrožitev ne upoštevamo, moramo debelino zoglenega dela lesa ustrezno povečati. Novo debelino označimo z  $d_{char,n}$  (slika 6). Izraz za izračun oglja v obeh primerih je naslednji:

$$d_{char,0(n)} = \beta_{0(n)}t, \quad (2.06)$$

kjer je  $t$  (min) čas izpostavljenosti požaru,  $\beta_0$  (mm/min) je hitrost enodimenzionalnega ogljenja,  $\beta_n$  (mm/min) je hitrost ogljenja, kjer je upoštevan vpliv ogljenja vogalov ter vpliv razpok.



Slika 6: Rezidualni ter efektivni prečni prerez v skladu z Evrokodom 5 [5]

Vrednosti obeh parametrov so podane v preglednici 1 [5].

**Preglednica 1: Stopnje oglenjenja  $\beta_0$  in  $\beta_n$ , za različne tipe lesa**

	$\beta_0$	$\beta_n$
	mm/min	mm/min
a) Mehak les in bukev		
lameliran lepljen les, $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.70
masiven les, $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.80
b) Trdi les		
masiven ali lepljen les, $\rho_k = 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.70
masiven ali lepljen les, $\rho_k \geq 450 \text{ kg/m}^3$	0.50	0.55

Efektivni prečni prerez se izračuna z upoštevanjem zmanjšanja začetnega prečnega prereza za vrednost efektivne debeline oglja  $d_{ef}$  (mm). Efektivno debelino oglja izračunamo s pomočjo naslednjega izraza:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0, \quad (2.07)$$

kjer je  $d_0 = 7 \text{ mm}$ , s parametrom  $k_0$  pa upoštevamo manjšo hitrost oglenjenja lesa zaradi vlage v prvih dvajsetih minutah požara. Vrednosti parametra  $k_0$  so podane z naslednjim izrazom:

$$k_0 = \begin{cases} \frac{t}{20}, & t < 20 \text{ min} \\ 1.0, & t \geq 20 \text{ min} \end{cases}. \quad (2.08)$$

### 2.1.3 Schaffer [10]

Model, ki ga je razvil Schaffer [10], temelji na linearni odvisnosti med časom in debelino oglja pri izpostavljenosti standardni požarni obtežbi ASTM E 119 [12]. Model je poleg ostalih modelov predstavljen na sliki 7 in ga opisuje enačba

$$t = Bx, \quad (2.09)$$



kjer  $t$  (min) predstavlja čas izpostavljenosti požaru,  $x$  (mm) debelino oglja, medtem ko  $B$  (min/inch) predstavlja recipročne hitrosti oglečenja različnih vrst lesa v odvisnosti od vlažnosti lesa  $M$  (%), ter njegove gostote  $\rho$  (lb/inch<sup>3</sup>). Izraz za  $B$  je podan kot,

$$B = 2[(a + bM)\rho + c], \quad (2.10)$$

kjer  $a$ ,  $b$  in  $c$  predstavljajo regresijske konstante dobljene na podlagi eksperimentov. Vrednosti omenjenih konstant so podane v preglednici 2.

**Preglednica 2: Vrednosti regresijskih konstant za različne vrste lesa**

Vrsta lesa	Regresijske konstante		
	a	b	c
Jelka	5.832	0.12	12.862
Bor	28.726	0.578	4.187
Hrast	20.036	0.403	7.519

Z vstavitvijo vrednosti regresijskih konstant v enačbo (2.10) dobimo naslednje izraze za različne vrste lesa:

$$B = 2[(28.726 + 0.578M)\rho + 4.187], \quad \text{jelka} \quad (2.11)$$

$$B = 2[(5.832 + 0.012M)\rho + 12.862], \quad \text{bor} \quad (2.12)$$

$$B = 2[(20.036 + 0.403M)\rho + 7.519]. \quad \text{hrast} \quad (2.13)$$

Z uporabo SI enot za regresijske konstante, enačbe (2.10) dobijo naslednjo obliko:

$$B = [(0.002269 + 0.0000457M)\rho + 0.331], \quad \text{jelka} \quad (2.14)$$

$$B = [(0.000461 + 0.0000095M)\rho + 1.016], \quad \text{bor} \quad (2.15)$$

$$B = [(0.00d1583 + 0.0000318M)\rho + 0.594]. \quad \text{hrast} \quad (2.16)$$

#### 2.1.4 White in Nordheim [10]

Raziskovalca White in Nordheim [10] sta model oglenjenja določila s pomočjo regresijske analize rezultatov štiridesetih eksperimentov na lesenih nosilcih iz osmih različnih vrst lesa (tako iglavci kot listavci), ki so bili izpostavljeni standardni požarni obtežbi ASTM E119 [12]. Izraz za debelino oglja ima obliko:

$$t = mx_c^{1.23}, \quad (2.17)$$

ali zapisano v logaritemski obliki :

$$\ln t = 1.23 \ln x_c + \ln m, \quad (2.18)$$

kjer je  $t$  (min) čas izpostavljenosti požaru,  $x_c$  (mm) globina oglja,  $m$  (min/mm) pa recipročna vrednost hitrosti oglenjenja, ki je podana z naslednjim izrazom:

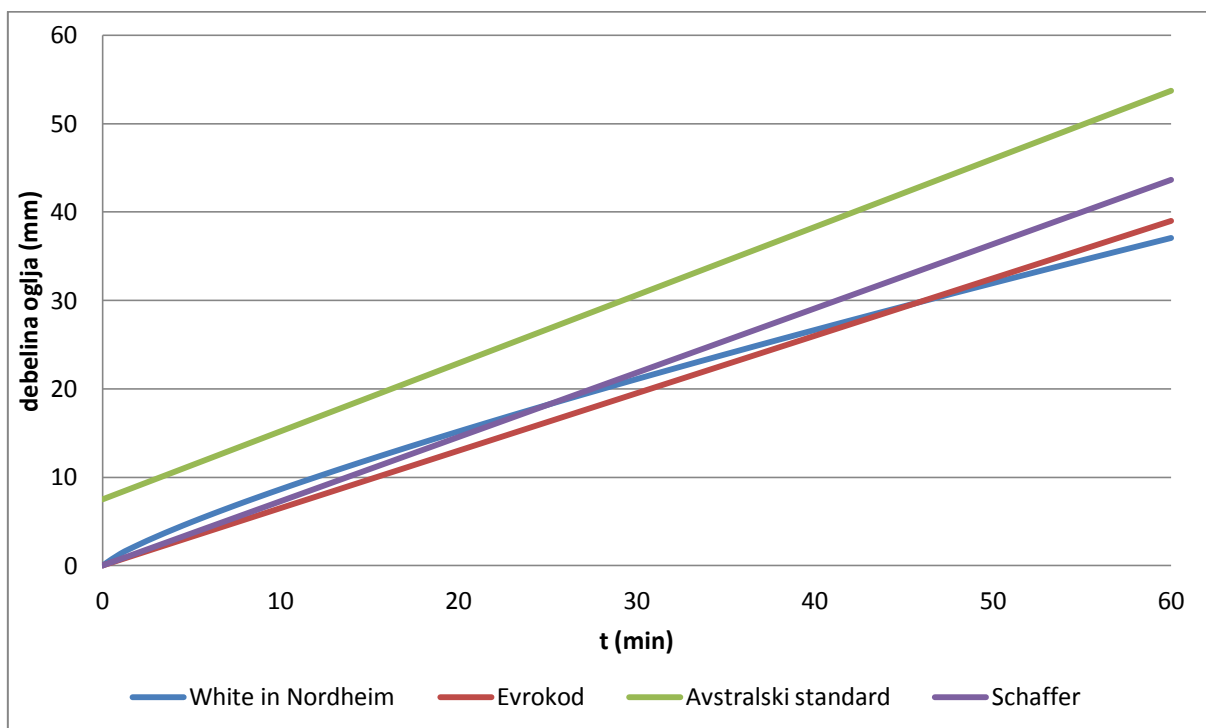
$$m = -0.147 + 0.000564\rho + 0.0121u + 0.532f_c, \quad (2.19)$$

kjer je  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) specifična gostota v peči sušenega lesa,  $u$  (%) vlažnost lesa,  $f_c$  pa predstavlja faktor skrčitve odvisnosti od razmerja debeline oglja na koncu požara ter debeline lesa, ki v požaru ogleni. S pomočjo regresijske analize sta v odvisnosti od vrste lesa, raziskovalca določila izraz za  $f_c$ , ki je podan z naslednjim izrazom:

$$f_c = 0.732 - 0.00423d + 0.203c - 0.00164cd - 0.27\rho c, \quad (2.20)$$

kjer je  $c$  klasifikacijski faktor za vrsto lesa (-1 za les listavcev, 1 za les iglavcev) in  $d$ (mm) predstavlja debelino globinske zaščite lesa z različnimi premazi ( $d = 3$  za malo in  $d = 36$  za dobro zaščitene vrste lesa).

Primerjavo modelov prikazuje slika 7. Večina modelov (Evrokod [5], Avstralski standard [9] in Schaffer [10]) uporablja konstantno hitrost oglenjenja. Nelinearni model oglenjenja sta razvila White in Nordheim [10]. Opazimo dobro ujemanje modelov, ki jih predlagajo Evrokod [5], Schaffer [10] ter White in Nordheim [10]. Razlike v debelini oglja se s časom povečujejo, razlika v debelini oglja, ki jo predlaga Avstralski standard, pa znaša v primerjavi z ostalimi že v izhodišču skoraj 10 mm.



Slika 7: Primerjava empiričnih modelov enodimenzijskega oglenjenja

## 2.2 Numerični modeli oglenjenja

Na podlagi modela prevajanja toplote in vlage skozi porozno snov (Luikov [13]), so različni avtorji razvili numerične modele za oglenenje lesa (Luikov [13]). Večina teh modelov ne upošteva prehoda vlage, nekateri modeli pa poleg prehoda toplote in mase, upoštevajo tudi nekatere druge parametre kot so koncentracija kisika v zraku ter krčenje oglja. Razlikujejo se tudi po tem, kako upoštevajo različne faze oglenjenja lesa ter pogoje, ki določajo prehode med njimi. V nadaljevanju opišemo model, ki ga je razvil Luikov [13], ki je osnova modelu, ki sta ga razvila Schnabl in Turk [6] in je osnova tudi numeričnemu modelu, ki smo ga uporabili v diplomski nalogi.

### 2.2.1 Luikov [13]

Beloruski znanstvenik Luikov [13] je z uporabo metod neuravnotežene termodinamike razvil model povezanega prenosa toplote in vlage v kapilarno poroznih materialih. V diplomski nalogi podajamo le osnovne zakonitosti, ki so potrebne za razumevanje v diplomski nalogi obravnavane snovi. Model opišemo s pomočjo dveh nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb, ki sta izpeljani s pomočjo zakona o ohranitvi energije in mase infinitezimalno majhnega dela snovi. Z upoštevanjem naslednjih predpostavk:

- homogen in ortogonalno anizotropen material,
- gravitacijske sile zanemarimo, ker so veliko manjše od sil, ki nastopajo v kapilarah,
- krčenje in nabrekanje ter ostale mehanske spremembe lesa in oglja zanemarimo,
- maso plinov oziroma hlapov zanemarimo, masni tok je sestavljen le iz toka kapljevine,
- hitrost pretoka kapljevine skozi snov zanemarimo,
- izparevanje ali kondenziranje vode deluje kot energijski izvor,
- nosilec se nahaja v okolju s konstantnim zračnim tlakom,

se enačbe, ki opisujejo povezan problem prehoda toplote in vlage skozi kapilarno porozno snov, glasijo

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} - (\varepsilon h_{LV} + \gamma) \frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \text{div}(k \text{grad } T) \quad (2.21)$$

in

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \text{div}(D_m \text{grad } w + D_T \text{grad } T) \quad (2.22)$$

oziroma v komponentni obliki v primeru dvodimenzionalnega prehoda kot

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} - (\varepsilon h_{LV} + \gamma) \frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.22)$$

ter

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{my} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{mz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{my} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.23)$$

Člena  $k_y$ ,  $k_z$  predstavljata koeficienta toplotne prevodnosti (W/mK) v dveh pravokotnih smereh pravokotnega prečnega prereza. Podobno  $D_{my}$  in  $D_{mz}$  predstavljata prevodnostna koeficienta vlage (kg/ms<sup>2</sup>M),  $\rho$  je specifična gostota snovi (kg/m<sup>3</sup>),  $c_p$  je specifična toplota snovi (J/kgK),  $c_m$  je specifična vlaga snovi (kg/kg<sup>2</sup>M),  $\delta_y$  in  $\delta_z$  predstavljata termogradientna koeficienta (°M/K) snovi v dveh pravokotnih smereh  $y$  in  $z$ ,  $\varepsilon$  je delež vlage v plinastem stanju,  $h_{LV}$  je izparilna toplota snovi

(J/kg),  $\gamma$  je toplota sorbcije in desorbcije (J/kg),  $T$  je temperatura snovi,  $w$  (°M) je potencial vlage ter  $t$  je čas (s).

Toplota se ne pretaka samo zaradi gradientov temperature. Poleg konstitucijskih enačb toplote, ki so izražene preko Fourierjevega zakona kondukcije toplote, upošteva enačba prehoda toplote tudi vpliv latentne toplote izparevanja in vliv spremembe potenciala vlage na potek temperature. Poleg konstitucijskih enačb za vlago, upoštevata tudi pretok mase (vlage), ki je posledica gradienta temperature.

Če želimo rešiti sistem dveh parcialnih diferencialnih enačb (2.21) in (2.22) oziroma (2.23) ter (2.24), moramo poznati ustrezne robne in začetne pogoje. Začetni pogoji predpisujejo temperaturo in potencial vlage po prečnem prerezu ob začetnem času  $t = 0$

$$T(y, z, 0) = T_0(y, z) \quad (2.24)$$

in

$$w(y, z, 0) = w_0(y, z). \quad (2.25)$$

Robni pogoji so lahko različnih tipov in sicer:

- predpisana temperatura in potencial vlage na robu,
- predpisana toplotni in vlažnostni tok na površini,
- toplotni in vlažnostni tok sta linearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici (naravna ali prisiljena konvekcija)
- toplotni in vlažnostni tok sta nelinearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici.

Robni pogoji za poljubne poševne robove se glasijo

$$-n^T \mathbf{k} \text{grad} T = h_c(T - T_A) + \varepsilon_R \sigma(T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon) h_{LV} h_m(w - w_A), \quad (2.26)$$

$$-n^T D_m \text{grad} w - n^T D_T \text{grad} T = h_m(w - w_A). \quad (2.27)$$

Oziroma v komponentni obliki

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} - k_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = h_c(T - T_A) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon) h_{LV} h_m (w - w_A), \quad (2.28)$$

$$D_{my} \frac{\partial w}{\partial y} e_{ny} + D_{mz} \frac{\partial w}{\partial z} e_{nz} + D_{my} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + D_{mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = -h_m (w - w_A). \quad (2.29)$$

V enačbah (2.26-2.27) predstavlja  $n$  zunanjo normalo na mejno ploskve.  $e_{ny}$  in  $e_{nz}$  v enačbah (2.28-2.29) sta tako komponenti zunanje normale  $n$ .  $h_c$  in  $h_m$  predstavljata toplotni prestopni koeficient ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) in vlažnostni prestopni koeficient ( $\text{kg/s m}^2\text{°M}$ ),  $T_A$  in  $w_A$  sta temperatura in potencial vlažnosti okolice. Drugi člen na desni strani enačb (2.26) in (2.27) predstavlja vpliv radiacije, kjer je  $\varepsilon_R$  efektivna površinska emisivnost zunanje strani stebra in  $\sigma$  je Stephan-Boltzmannova konstanta radiacije. Temperaturni robni pogoj dodatno upošteva vpliv latentne toplote izparevanja, vlažnostni robni pogoj pa vpliv temperaturnega gradienta.

### 2.2.2 Takeda [14]

Takeda [4] je razvil dvodimenzionalni model za računanje razporeditve temperature in s tem tudi oglja v primeru mavčnih in lesenih desk. Razviti model temelji na osnovni enačbi dvodimenzionalnega prevajanja toplote skozi snov

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.30)$$

kjer je za toplotno odvisne materialne parametre ( $c_p$ ,  $\rho$ ,  $k$ ) upošteval eksperimentalne rezultate, ki jih je dobil v literaturi. V robnih pogojih je upošteval prevajanje toplote s konvekcijo in radiacijo. Pomembna omejitev modela je, da ne upošteva vsebnosti vlage na razporeditev temperature po snovi in s tem tudi na sam proces oglenjenja.

### 2.2.3 Fredlund [15]

Fredlund [15] je razvil izredno izpopolnjeni model oglenjenja. Pri tem je upošteval tako pretok energije kot tudi mase. Upošteval je pretok energije zaradi prevajanja toplote (kondukcija) skozi snov kot tudi zaradi konvekcijskega toka produktov pirolize in vodne pare skozi pore obravnavanega lesa. Pri tem je

upošteval, da je v vsaki točki obravnavanega telesa izpolnjeno termodinamično ravnovesje. Originalno vlažen les je razdelil na štiri različne faze: les, oglje, vodno paro in vodo. Količina energije na enoto volumna je tako enaka vsoti energij posameznih komponent. Toplotne lastnosti materiala v določeni točki je izračunal kot povprečno vrednost toplotnih lastnosti posameznih materialnih komponent. Osnovna enačba o ohranitvi energije ima tako v dveh dimenzijah obliko

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} - \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} + Q_1^* + Q_2^*, \quad (2.31)$$

kjer  $T$  pomeni temperaturo,  $c$  specifično toploto,  $\lambda$  koeficient toplotne prevodnosti,  $\kappa$  je konvekcijski koeficient ( $\text{W/m}^2$ ),  $Q_1^*$  in  $Q_2^*$  pa sta izvora energije zaradi pirolize lesa ter izhlapevanje vode oziroma vodne pare. Prehod vlage skozi snov (les) lahko poteka na dva načina: s pretokom pare in tokom tekočine. Gonilne sile, ki povzročajo prehod vlage skozi snov so gradienti vlage, pritiska in temperature po snovi. Poleg tega dodatno upošteva, da je masni tok vlage v obliki tekočine zaradi majhnih hitrosti zanemarljiv. Osnovna enačba masnega pretoka je tako

$$\omega \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \phi_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \phi_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \psi_x P + G^*, \quad (2.32)$$

kjer je  $P$  pritisk (pa),  $\omega$  je masna kapaciteta (mol/J),  $\phi$  je koeficient masnega pretoka (mol s/kg),  $\psi$  je koeficient toplotnega raztezka (mol/Js). Za rešitev enačb (2.31) in (2.32) so potrebni robni pogoji. Robni pogoji v primeru enačbe predstavljajo izmenjavo energije telesa z okolico in so podani kot predpisani toplotni tok ali temperatura na robu. Robni pogoji pri enačbi (2.32) pa imajo predpisani masni tok na robovih elementa.

#### 2.2.4 Janssens [8]

Janssens [8] je razvil model oglenjenja, ki upošteva enačbo enodimenzionalnega prehoda toplote skozi snov. Osnovni enačbi prevajanja toplote je dodal člen s katerim je zajel vpliv izparevanja in kondenziranja vode v lesu med požarom. Enačba se glasi:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - (\Delta h_v + \Delta h_w) \rho_0 \frac{du}{dt}, \quad (2.33)$$

kjer je  $\rho$  gostota suhega lesa ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u$  je vsebnost vlage v lesu (kg),  $\Delta h_v$  je latentna toplota izparevanja (J/kg) in  $\Delta h_w$  je toplota kondenzacije (J/kg). Model oglenjenja deluje na naslednjih

predpostavkah tako da upošteva materialne lastnosti lesa ( $T < 200^\circ\text{C}$ ), delno zogljenega lesa ( $200^\circ\text{C} < T < 800^\circ\text{C}$ ) in oglja ( $T > 800^\circ\text{C}$ ). Poleg tega upošteva še krčenje oglja, ter izparevanje vode pri  $T = 100^\circ\text{C}$ .

### 2.2.5 Schnabl in Turk [6]

V doktorski disertaciji Schnabla [6] je opisan matematični model, ki ni tako splošen kot model Fredlunda [15]. Model v procesu pirolize upošteva le dve materialni fazi: les in oglje, zanemari pa vpliv tlaka na povezan prehod toplote in vlage v porozni snovi ter vpliv konvekcijskega dela toka tekočine (vlage in drugih produktov pirolize) k energijskemu oziroma toplotnem toku skozi snov. Osnovni enačbi, ki opisujeta matematični model, sta enačbi Luikova [13] (2.22-2.23):

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} - (\varepsilon h_{LV} + \gamma) \frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.34)$$

ter

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{my} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{mz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{my} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.35)$$

oziroma v komponentni obliki v primeru dvodimenzionalnega prehoda kot

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} - (\varepsilon h_{LV} + \gamma) \frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.36)$$

ter

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{my} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{mz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{my} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.37)$$

Za rešitev sistema dveh parcialnih diferencialnih enačb (2.34) in (2.35) oziroma (2.36) ter (2.37), moramo poznati ustrezne robne in začetne pogoje. Začetni pogoji predpisujejo temperaturo in potencial vlage po prečnem prerezu ob začetnem času  $t = 0$

$$T(y, z, 0) = T_0(y, z) \quad (2.38)$$



in

$$w(y, z, 0) = w_0(y, z). \quad (2.39)$$

Robni pogoji so lahko različnih tipov in sicer:

- toplotni in vlažnostni tok sta linearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici (naravna ali prisiljena konvekcija)
- toplotni in vlažnostni tok sta nelinearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici.

Robni pogoj toplotnega prehoda dodatno upošteva vpliv latentne toplote izparevanja, vlažnostni robni pogoj pa vpliv temperaturnega gradienta. Robni pogoji na izpostavljenih zunanjih površinah izenačujejo toplotni pretok s prevajanjem in vlažnostni pretok po elementu s pretokom, ki je posledica radiacije in konvekcije toplote oziroma konvekcijo vlage med stebrom in okolico. Robni pogoji se glasijo

$$-n^T k \text{grad} T = h_c(T - T_A) + \varepsilon_R \sigma(T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon) h_{LV} h_m(w - w_A), \quad (2.40)$$

$$-n^T D_m \text{grad} w - n^T D_T \text{grad} T = h_m(w - w_A). \quad (2.41)$$

Oziroma v komponentni obliki

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} - k_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = h_c(T - T_A) + \varepsilon_R \sigma(T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon) h_{LV} h_m(w - w_A), \quad (2.42)$$

$$D_{my} \frac{\partial w}{\partial y} e_{ny} + D_{mz} \frac{\partial w}{\partial z} e_{nz} + D_{my} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + D_{mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = -h_m(w - w_A). \quad (2.43)$$

Pomen oznak smo že razložili v poglavju 2.2.1. Pri določitvi temperaturno-vlažnostnega stanja in oglenenja lesa v primeru požara, model upošteva povezan prehod toplote in vlage skozi snov. Pri tem omogoča upoštevanje poljubne požarne obtežbe in materialnih karakteristik materiala, ki so lahko odvisne od smeri materialnih vlaken, od temperature, nivoja vlage, gostote materiala, vrste lesa, itd. Tudi temperatura vnetišča lesa, to je temperatura, ko les začne goreti in nastane oglje, je poljubna. V večini primerov vzamemo, da je temperatura vnetišča lesa od 270 do 300 °C.

### 2.2.6 Predlagani numerični model

V diplomski nalogi uporabimo model, ki sta ga razvila Schnabl in Turk [6], z izjemo, da ne upoštevamo vpliva vsebnosti vlage na razporeditev temperatur po snovi in s tem na proces oglenjenja. Enačba Luikova [13] (2.29), zaradi posplošitve dobi sledečo obliko :

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.44)$$

Za poenostavitev smo se odločili, ker rezultati eksperimentov in drugih modelov kažejo na relativno majhen vpliv vlage na sam proces oglenjenja [16].

Izraz (2.44) predstavlja klasično Fourierjevo enačbo prevajanja toplote v dveh pravokotnih smereh. Osnovne enačbe modela sestavljajo tudi začetni in robni pogoji. Začetni pogoj predpisuje temperaturo po prečnem prerezu ob začetnem času  $t = 0$

$$T(y, z, 0) = T_0(y, z). \quad (2.45)$$

Model upošteva kombinacijo dveh robnih pogojev. Robni pogoj toplotnega prehoda dodatno upošteva vpliv latentne toplote izparevanja. Robni pogoji se za poljubne robove glasijo:

- toplotni tok je linearno odvisen od razlike med temperaturo na robu in v okolici.
- toplotni tok je nelinearno odvisen od razlike med temperaturo na robu in v okolici.

$$-n^T \mathbf{k} \text{grad} T = h_c (T - T_A) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_A^4). \quad (2.46)$$

Oziroma v komponentni obliki

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} - k_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = h_c (T - T_A) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_A^4). \quad (2.47)$$

V enačbi (2.46) predstavlja  $n$  zunanjo normalo na mejno ploskev,  $h_c$  predstavlja toplotni prestopni koeficient ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  $T_A$  je temperatura okolice. Drugi člen na desni strani enačbe (2.47) predstavlja vpliv radiacije, kjer je  $\varepsilon_R$  efektivna površinska emisivnost zunanje strani stebra in  $\sigma$  je Stephan-Boltzmannova konstanta radiacije.

### 2.2.6.1 Metoda končnih diferenc

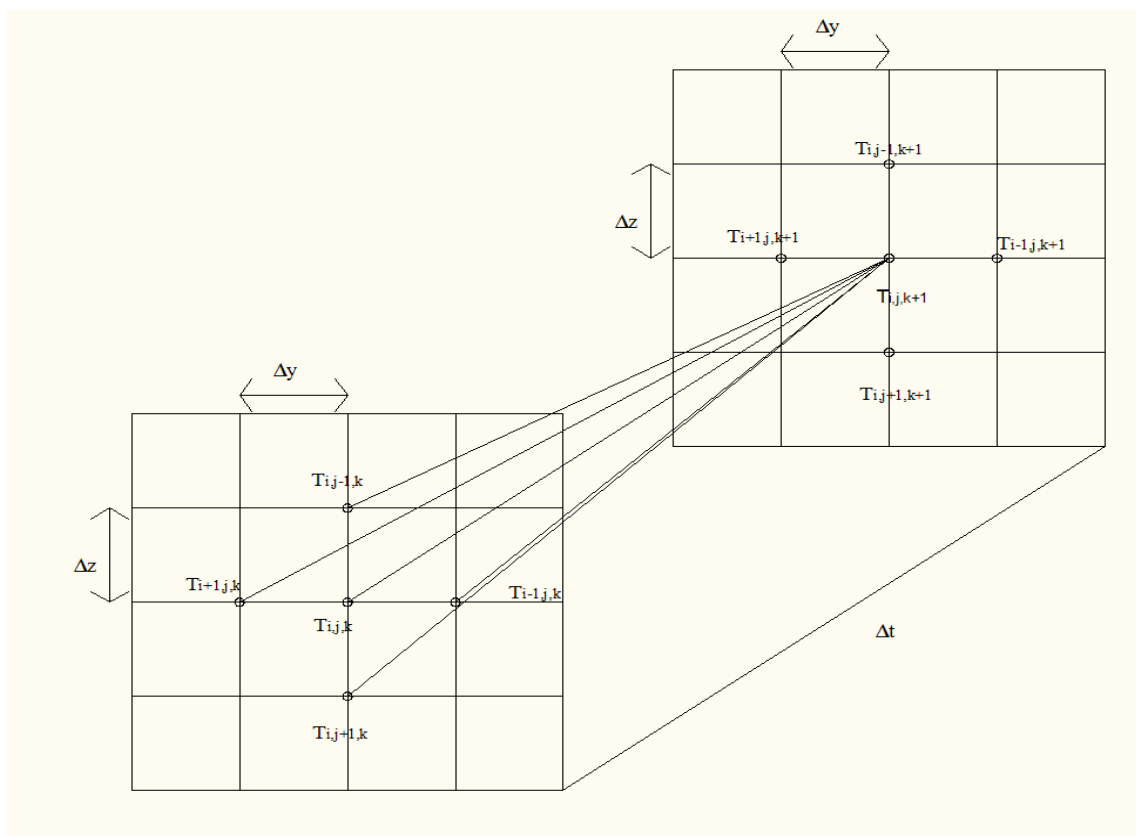
Prihod računalnika je omogočil numerično reševanje velikih sistemov enačb. Pred tem so si pomagali z analitičnimi metodami, kjer so račune poenostavili tako, da so zanemarili vpliv nekaterih količin.

Običajno za opis problema prenosa toplote in vlage analitična rešitev ne obstaja, zato se zatečemo k numerični rešitvi. Problem reševanja enačb se občutno zmanjša, če rešimo problem na določenem številu diskretnih točk, kot pa za vsako posamično točko posebej. Posledično je dobljena rešitev le približek oziroma aproksimacija točne rešitve. Na srečo lahko z zgoščevanjem mreže, oziroma z večanjem števila točk, pogosto dosežemo, da vrednosti konvergirajo k točni rešitvi. Običajno se uporablja metoda končnih diferenc, metoda končnih elementov in metoda robnih elementov.

Osrednja točka poglavja je diskretizacija začetnega robnega problema oziroma aproksimacija neznanih funkcij in izbira numerične metode s katero začetni-robni problem povezanega prehoda toplote preslikamo v algebrskega. V ta namen smo v nalogi izbrali metodo končnih diferenc. Osnovna ideja te metode je, da namesto odvodov uporabimo končne razlike točkovnih vrednosti iskanih funkcij. Rešitve v diskretnih točkah so le približne in v splošnem so približne tudi oblikovne funkcije. Glede na to da v enačbi (2.44) nastopa drugi odvod po kraju in prvi odvod po času, izberemo kvadratičen potek temperature in linearen potek količin po času. Z znanimi oblikovnimi funkcijami lahko temperaturo v poljubni točki zapišemo v odvisnosti od njenih vrednosti v diskretnih točkah mreže. V primeru dvodimenzionalnega problema se temperatura glasi:

$$T(y, z, t) = \sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \sum_{n=k}^{k+1} T_{l,m,n} N_{l,m} M_k, \quad (2.48)$$

kjer je  $T_{l,m,n}$  točkovna vrednost temperature v točkah diferenčne mreže,  $N_{l,m}$  so krajevne in  $M_k$  so časovne oblikovne funkcije. Indeks  $i$  v tem primeru označuje koordinato  $y$ , indeks  $j$  koordinato  $z$  ter indeks  $k$  časovno koordinato (slika 8).

Slika 8: Diferenčna mreža v dveh zaporednih časovnih korakih  $k$  in  $k+1$ 

V obravnavani enačbi (2.44) nastopajo odvodi prvega in drugega reda, ki jih v razviti obliki zapišemo na naslednji način

$$T = (1 - t_b)T_{i,j,k} + t_b T_{i,j,k+1}, \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta y} (T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{2\Delta y} (T_{i+1,j,k+1} - T_{i-1,j,k+1}), \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta z} (T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{2\Delta z} (T_{i+1,j,k+1} - T_{i-1,j,k+1}), \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{\Delta y^2} (T_{i+1,j,k+1} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i-1,j,k+1}), \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta z^2} (T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{\Delta z^2} (T_{i,j+1,k+1} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i,j-1,k+1}), \quad (2.53)$$

$$\rho = (1 - t_b)\rho_{i,j,k} + t_b\rho_{i,j,k+1}, \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial y} = \left(\frac{1 - t_b}{2\Delta y}\right) \left( (k_y)_{i+1,j,k} - (k_y)_{i-1,j,k} \right) + \left(\frac{t_b}{2\Delta y}\right) \left( (k_y)_{i+1,j,k+1} - (k_y)_{i-1,j,k+1} \right). \quad (2.53)$$

Z vstavitvijo izrazov (2.41-2.42) v (2.31-2.34) dobimo enačbe za notranje točke diferenčne mreže prereza.

V izrazih (2.36-2.42) smo pustili brezdimenzijski čas  $0 \leq t_b \leq 1$ , kot prosti parameter. Diferenčni metodi, ki brezdimenzijski čas upošteva kot prosti parameter, rečemo kombinirana diferenčna metoda.  $\Delta z$  predstavlja razdaljo med dvema točkama v diferenčni mreži glede na koordinato  $z$ ,  $\Delta y$  pa predstavlja razdaljo med dvema točkama glede na koordinato  $y$ .

### 3 PROJEKTIRANJE POŽARNOVARNIH KONSTRUKCIJ NA UKLON V SKLADU Z EVROKODOM 5

#### 3.1 Splošno

Požarno odpornost konstrukcij določimo oziroma ocenimo s preizkusi ali s pomočjo računskih metod. Ker je eksperimentalno ocenjevanje gradbenih konstrukcij drago in ker je sklepanje na maloštevilnih preizkušanih vzorcih nezanesljivo, je eden izmed bolj splošnih načinov za oceno požarne odpornosti konstrukcije uporaba matematičnih modelov oziroma računskih metod. S požarnimi analizami običajnih gradbenih konstrukcij obravnavamo kemijske, vlažnostne, toplotne in mehanske procese v konstrukcijah med požarom ločeno, kar pomeni, da časovno razporeditev temperatur v gradbenih konstrukcijah določimo s temperaturno analizo, ki je le posredno odvisna od preostalih kemijskih in fizikalnih procesov v konstrukcijah med požarom. Kljub relativno veliki poenostavitvi pa so take požarne analize, ki jih Evrokodi imenujejo napredne računske metode, zelo zahtevne in se pri projektiranju požarne odpornosti redko uporabljajo [17]. Pogosteje uporabljamo poenostavljene računske metode, ki pa so namenjene le približni oceni požarne odpornosti gradbenih konstrukcij. V diplomski nalogi obravnavamo tako poenostavljene kot tudi napredne računske metode.

##### 3.1.1 Kombinacija vplivov

Osnovno zahtevo za konstrukcije v primeru požara lahko zapišemo z osnovno neenačbo:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}, \quad (3.01)$$

ki izraža zahtevo, da mora biti projektna vrednost obremenitev ( $E_{d,t,fi}$ ), ki je določena v skladu s SIST EN 1991-1-2:2004 [18], v primeru požara, manjša ali kvečjemu enaka od nosilnosti ( $R_{d,t,fi}$ ).

Kombinirani učinek zunanjih vplivov ( $E_{d,t,fi}$ ) v požarnem projektnejem stanju zapišemo v skladu s standardom SIST EN 1990: 2004 [19] z izrazom :

$$\sum_{j=1} G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i}, \quad (3.02)$$

kjer  $G_{k,j}$  predstavlja stalne vplive,  $A_d$  nezgodne vplive (požar),  $Q_{k,1}$  predstavlja prevladujoči spremenljivi vpliv in  $Q_{k,i}$  ( $i > 1$ ) predstavlja druge spremenljive vplive zunanjih obtežb. V primeru delovanja več spremenljivih vplivov njihove vrednosti reduciramo s kombinacijskimi faktorji  $\psi$ .

### 3.1.2 Materialne lastnosti

Projektna vrednost togostnih in trdnostnih karakteristik je določena kot:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (3.03)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (3.04)$$

kjer je  $f_{d,fi}$  projektna trdnost,  $S_{d,fi}$  je togost (modul elastičnosti  $E_{d,fi}$  ali strižni modul  $G_{d,fi}$ ) v primeru požara.  $S_{20}$  je 20 % fraktila togosti (modul elastičnosti in strižni modul) pri sobni temperaturi,  $f_{20}$  je 20 % fraktila trdnosti pri sobni temperaturi,  $\gamma_{M,fi}$  je delni varnostni faktor za les v primeru požara,  $k_{mod,fi}$  je modifikacijski faktor za požar.

Vrednosti 20 % fraktil togosti in trdnosti so določene z naslednjima izrazoma:

$$S_{20} = k_{fi} S_{05}, \quad (3.05)$$

$$f_{20} = k_{fi} f_k, \quad (3.06)$$

kjer  $S_{05}$  predstavlja 5 % fraktilo togosti pri sobni temperaturi,  $f_k$  je karakteristična trdnost lesa pri sobni temperaturi,  $k_{fi}$  je modifikacijski faktor za les; vrednost za masiven les je 1.25, za lamelirani lepljeni les pa 1.15.

### 3.1.3 Uklonska nosilnost lesenega stebra izpostavljenega požarni obtežbi

V standardu z Evrokodom 5 [5] so podane naslednje omejitve za napetosti:

$$\sigma_{c,fi,d} = \frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq \begin{cases} f_{c,d,fi}; \lambda_{rel,ef} \leq 0,3 \\ k_c \cdot f_{c,d,fi}; \lambda_{rel,ef} > 0,3 \end{cases} \quad (3.07)$$

Pri tem je  $\lambda_{rel,ef}$  relativna vitkost elementa v primeru požara,  $k_{cy}$ ,  $k_{cz}$  pa uklonska koeficienta odvisna od  $\lambda_{rel,ef}$ . Relativna vitkost  $\lambda_{rel,ef}$  je odvisna od vitkosti elementa  $\lambda_{rel}$  in od trdnostnega razreda izbranega lesa ter jo izračunamo po naslednjem izrazu:

$$\lambda_{rel,ef,(z,y)} = \frac{\lambda_{ef(z,y)}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}}, \quad (3.08)$$

$$\lambda_{ef,z} = \frac{l_{u,z}}{i_{ef,z}}; \quad \lambda_{ef,y} = \frac{l_{u,y}}{i_{ef,y}}, \quad (3.09)$$

$$i_{ef,y(z)} = \sqrt{\frac{I_{ef,y(z)}}{A_{ef}}}. \quad (3.10)$$

Pri tem  $\lambda_{ef,z}$  pomeni vitkost elementa okoli osi  $z$  (indeks  $z$  pomeni, da se element ukloni okoli osi  $z$  oziroma se ukloni v smeri osi  $y$ ).  $\lambda_{ef,y}$  pomeni vitkost elementa okoli osi  $y$  (indeks  $y$  pomeni, da se element ukloni okoli osi  $y$  oziroma se pomakne v smeri osi  $z$ ).  $l_{u,y(z)}$  predstavlja uklonsko dolžino elementa, vrednosti pa se spreminjajo glede na način podpiranja. Vrednosti so podane na sliki 9.

Koeficient  $k_c$  je določen z naslednjimi izrazi:

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}}, \quad (3.11)$$


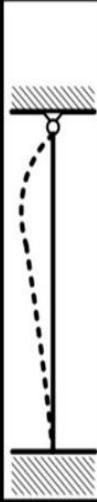




$$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,ef,z}^2}}, \quad (3.12)$$

$$k_y = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef,y} - 0.3) + \lambda_{rel,ef,y}^2), \quad (3.13)$$

$$k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef,z} - 0.3) + \lambda_{rel,ef,z}^2), \quad (3.14)$$

$$\beta_c = \begin{cases} 0.2; & \text{masiven les} \\ 0.1; & \text{lameliran les} \end{cases}$$



Deformacijska linija						
Analična vrednost	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Priporočena vrednost za les	0.65	0.80	1.2	1.0	2.0	2.0

Slika 9: Deformacijske oblike ter uklonske dolžine za različne načine podpiranja stebrov [20]

### 3.2 Poenostavljene metode

Poenostavljene računske metode projektiranja so namenjene hitri oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov. Z njimi določimo mehansko odpornost lesenega elementa pri požarni izpostavljenosti. Pri tem je potrebno poznati požarni scenarij ter čas izpostavljenosti požaru. Evrokod 5 [5] obravnava dve metodi za dokazovanje požarne varnosti in sicer: metodo z zmanjšanim prečnim prerezom ter metodo z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami. Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom prikazuje način kako določamo odpornost elementa ob upoštevanju redukcije prečnega prereza, ki je posledica oglenjenja lesa. Pri tem upoštevamo trdnostne in togostne karakteristike lesa pri sobni temperaturi. Pri metodi zmanjšanih materialnih karakteristik pa poleg zmanjšanja osnovnega prereza dodatno upoštevamo redukcijo togostnih in trdnostnih karakteristik lesa.

#### 3.2.1 Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom

Kot je že omenjeno se požarno odpornost lesenih elementov računa ob upoštevanju efektivnega prečnega prereza. Prečni prerez se med izpostavljenostjo požaru zmanjšuje. Evrokod 5 [5] predpostavlja, da zoglenela plast sama po sebi nima nobene trdnosti, zato se jo v računu odpornosti prereza ne upošteva. Dodatno se predpostavi, da je tudi material blizu cone oglenjenja brez togosti in trdnosti, tako da ne prispeva k nosilnosti prereza. Za preostali del prereza pa predpostavimo, da se

trdnostne in togostne karakteristike ne spreminjajo in so enake kot pri sobni temperaturi. Debelina zoglele plasti se izračuna s podanim izrazom (2.06).

### 3.2.2 Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami

Tako kot zgoraj omenjena metoda, tudi metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami upošteva reducirani prečni prerez, s to razliko, da upošteva nekoliko manjšo debelino oglja, podano z izrazom (2.05), vendar upošteva zmanjšanje trdnostnih in togostnih karakteristik materiala:

za tlačno trdnost:

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_r}, \quad (3.15)$$

za natezno trdnost in modul elastičnosti pa:

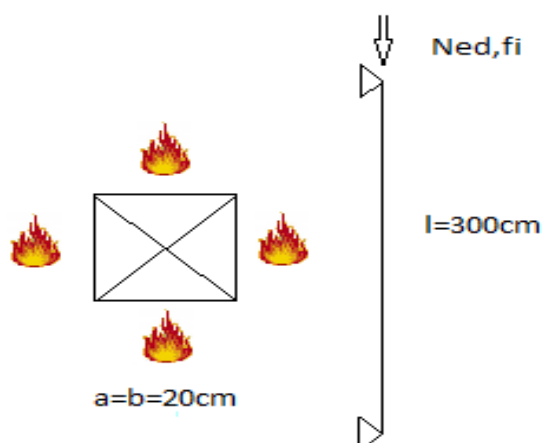
$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r}, \quad (3.16)$$

kjer  $p$  predstavlja obseg ognju izpostavljenega prečnega prereza v metrih,  $A_r$  pa predstavlja ploščino prečnega prereza v  $m^2$ .

## 4 RAČUNSKI PRIMERI

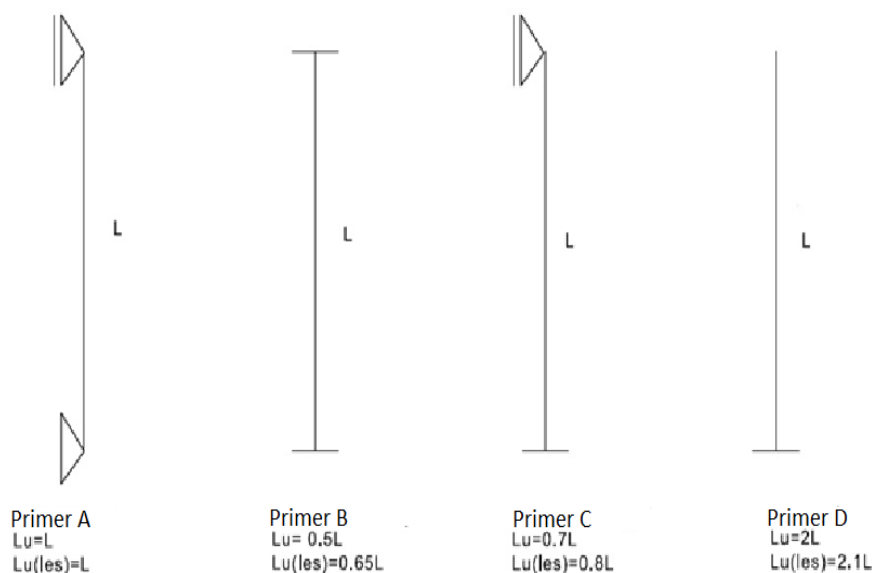
Računski primeri so razdeljeni v dva vsebinska dela, t.j. glede na tip modela za izračun debeline oglja in glede na tip uklonske nosilnosti v primeru požara. Obravnavamo empirične in numerične modele.

V računskih primerih prikažemo tako imenovani »peš izračun« za vse obravnavane modele, na primeru iglavcev (C30), za čas trajanja požara  $t = 30$  min (slika 10). V tabelah so podane vrednosti uklonske odpornosti stebra v primeru požara za čase  $t = 5, 15, 30$  in  $60$  min ter za različne načine podpiranja stebra (slika 11). V nadaljevanju prikažemo spreminjanje uklonske nosilnosti skozi čas trajanja standardnega požara [11].



Slika 10: Leseni steber, ki je izpostavljen standardnemu požaru [11]

V empiričnih modelih poleg iglavcev obravnavamo tudi listavce (D30), medtem ko lepljeni (GL24h) les obravnavamo samo v metodah, ki jih obravnava Evrokod 5 [5]. Vhodni podatki potrebni za izračun so v primeru empiričnih modelov podani v preglednici 3.



Slika 11: Vrednosti uklonskih dolžin

Preglednica 3: Materialni podatki za različne vrste lesa

	$f_{c,0,k}$	$E_{0,05}$	$k_{fi}$	$k_{mod,fi}$	$\gamma_{M,fi}$	$\beta_n$	$\beta_c$	$N_{ed,fi}$
C30	2.3 kN/cm <sup>2</sup>	800 kN/cm <sup>2</sup>	1.25	1.0	1.0	0.8	0.2	60 kN
D30	2.3 kN/cm <sup>2</sup>	800 kN/cm <sup>2</sup>	1.25	1.0	1.0	0.55	0.2	60 kN
GL24h	2.4 kN/cm <sup>2</sup>	940 kN/cm <sup>2</sup>	1.15	1.0	1.0	0.7	0.1	60 kN

V izračunih za primere Schaffer [10], White in Nordheim [10] ter Avstralski standard [9], uporabimo hitrosti oglenenja, kot je prikazano v drugem poglavju, medtem ko uklonsko nosilnost dimenzioniramo s pomočjo Evrokoda 5 [5]. Na podlagi toplotne analize pri numeričnem modelu, dobimo razporeditev oglja po prerezu. Uklonsko nosilnost pa prav tako dimenzioniramo s pomočjo Evrokoda 5 [5].

#### 4.1 Empirični modeli

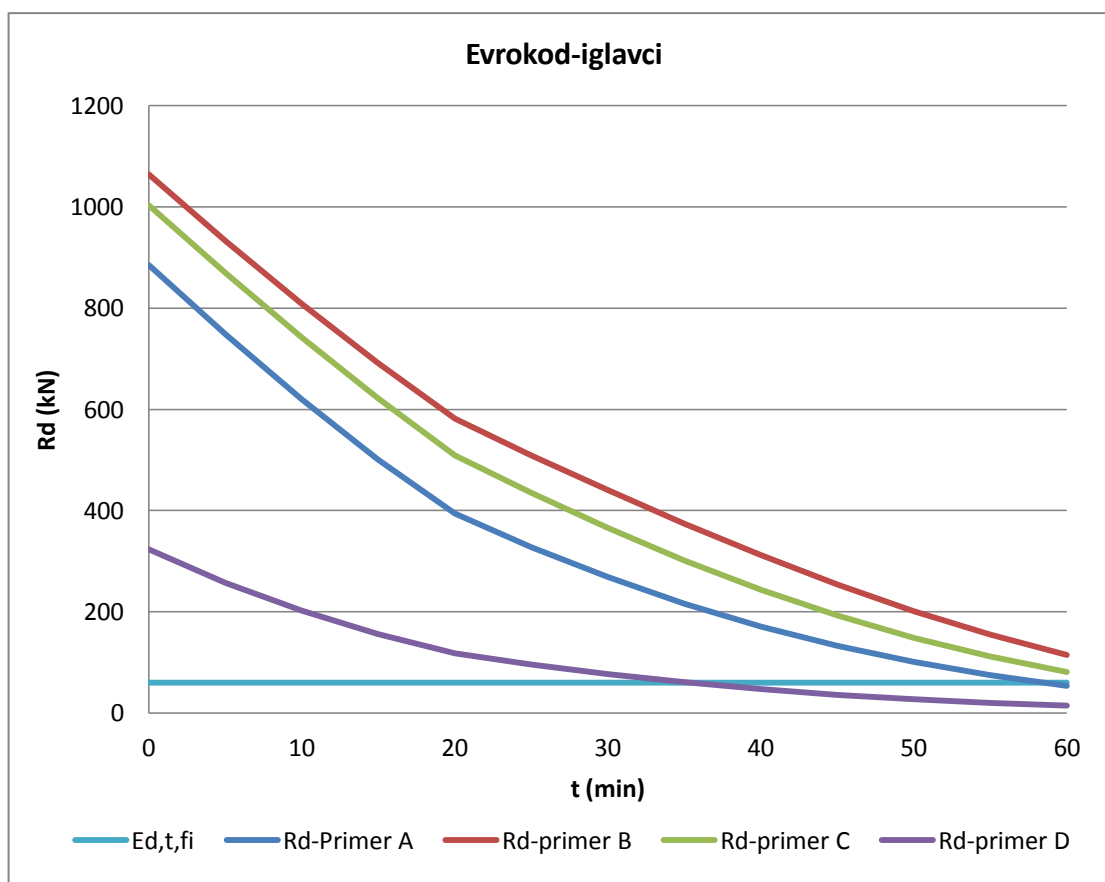
Kot je že omenjeno v tem poglavju obravnavamo Evrokod 5 [5], Avstralski standard [9] ter modela ki sta jih razvila Schaffer[10] in White in Nordehim [10]. Izrazi za izračun debeline oglja so podani v drugem poglavju, medtem ko jo postopek dimenzioniranja stebra na uklon v primeru požara podan v tretjem poglavju. Ponovno je potrebno omeniti, da izbrani empirični modeli uporabljajo standardizirane načine segrevanje prostora, ki jih modeliramo s pomočjo standardnih požarnih krivulj (ISO 834 [11] ali ASTM E119 [12]) ter da je oglenenje lesa večinoma omejeno na enodimenzionalne primere s preprosto geometrijo ter konstantnimi materialnimi lastnostmi.

#### 4.1.1 Evrokod 5 [5]-Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom

Tako imenovani »peš izračun« uklonske nosilnosti za stebre po metodi z zmanjšanim prečnim prerezom iz lesa iglavcev je podan v prilogi A, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min so podane v preglednici 4, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja pa je podan na sliki 12.

Preglednica 4: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-iglavci

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Rd-Primer A (kN)	748.10	500.45	268.34	53.87
Rd-Primer B(kN)	933.08	691.68	439.99	114.74
Rd-Primer C (kN)	869.27	621.86	365.69	80.87
Rd-Primer D (kN)	257.42	155.66	76.65	14.26



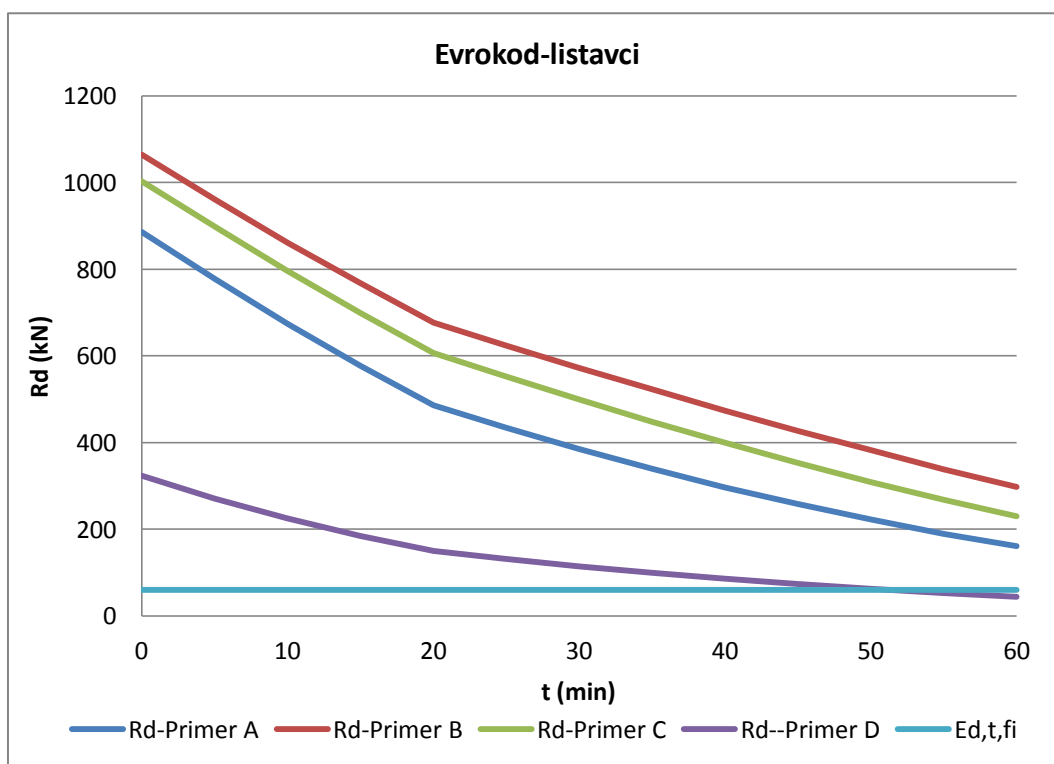
Slika 12: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Evrokodu 5 [5], po metodi zmanjšane prereza za različne načine podpiranja in čase trajanja požara

Uklonske nosilnosti pri vseh primerih enakomerno padajo. Do dvajsete minute nekoliko hitreje, nato uklonska sila začne počasneje padati. Razlike med različnimi primeri se s časom zmanjšujejo. Steber se ukloni, ko uklonska nosilnost doseže vrednost  $E_{d,t,fi}$ , ki v vseh primerih znaša 60 kN. Pričakovano ima največjo uklonsko nosilnost primer A, saj ima najkrajšo uklonsko dolžino, najmanjšo uklonsko nosilnost pa primer D. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se stebra iz primerov A in D uklonila.

Vrednosti uklonskih odpornosti pri stebrih iz lesa listavcev, za čase  $t=5, 15, 30$  in 60 min, so podane v preglednici 5, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja je podan na sliki 13.

Preglednica 5: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrogradu 5 [5]-listavci

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Rd-Primer A (kN)	777.32	576.61	385.15	160.92
Rd-Primer B (kN)	961.08	767.22	572.41	297.23
Rd-Primer C (kN)	897.81	699.51	499.37	230.30
Rd-Primer D (kN)	270.80	184.84	114.69	44.31



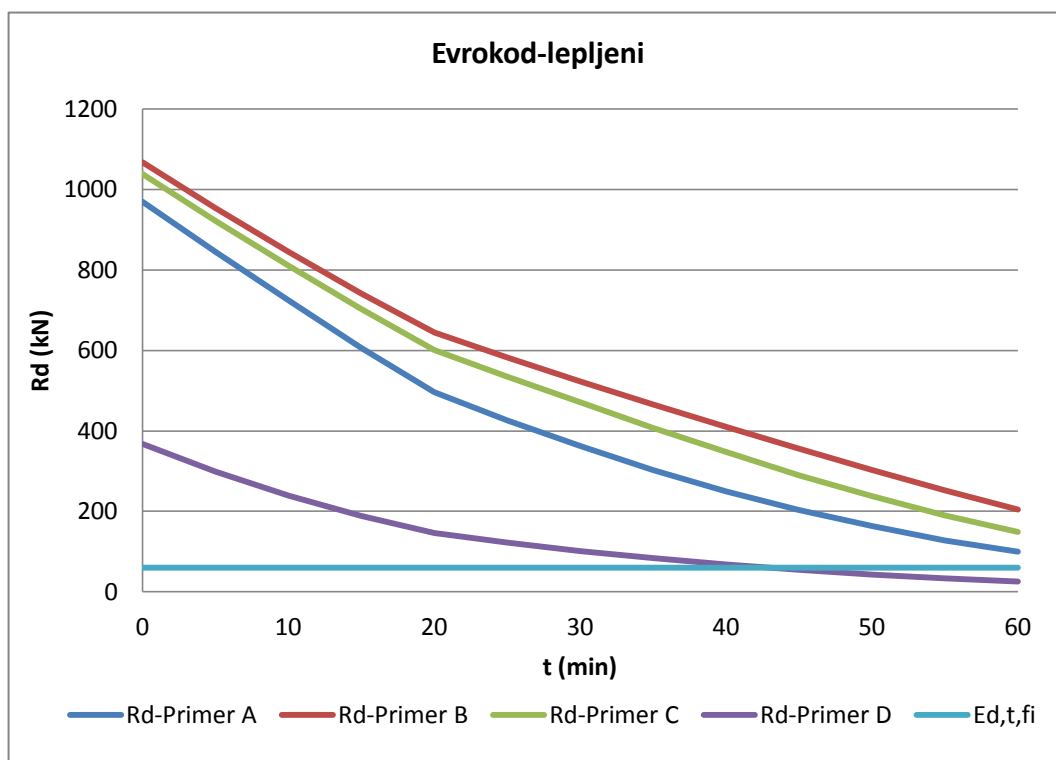
Slika 13: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Evrogradu 5 [5], po metodi zmanjšane preseka za različne načine podpiranja in čase trajanja požara

Tako kot pri iglavcih, tudi pri listavcih uklonske sile pri vseh primerih enakomerno linearno padajo. Do dvajsete minute nekoliko hitreje, nato uklonska sila začne počasneje padati. Vrednosti uklonskih sil nosilnosti skozi čas trajanja požara so nekoliko večje kot pri iglavcih. Razlog za to je razlika v predpisanih vrednostih hitrosti oglenenja  $\beta_n$ , ki pri iglavcih znaša 0,8 mm/min, pri listavcih pa 0,55 mm/min. Posledica tega je, da imajo listavci veliko večjo uklonsko nosilnost, kot iglavci. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se steber iz primera D uklonil.

Vrednosti uklonskih odpornosti pri stebrih iz lepljenega lesa, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 6, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja je podan na sliki 14.

**Preglednica 6: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-lepljeni les**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Rd-Primer A (kN)	844.76	606.67	361.61	99.26
Rd-Primer B (kN)	952.98	741.42	522.73	204.74
Rd-Primer C (kN)	921.41	703.55	470.43	148.76
Rd-Primer D (kN)	298.11	188.29	101.46	25.92



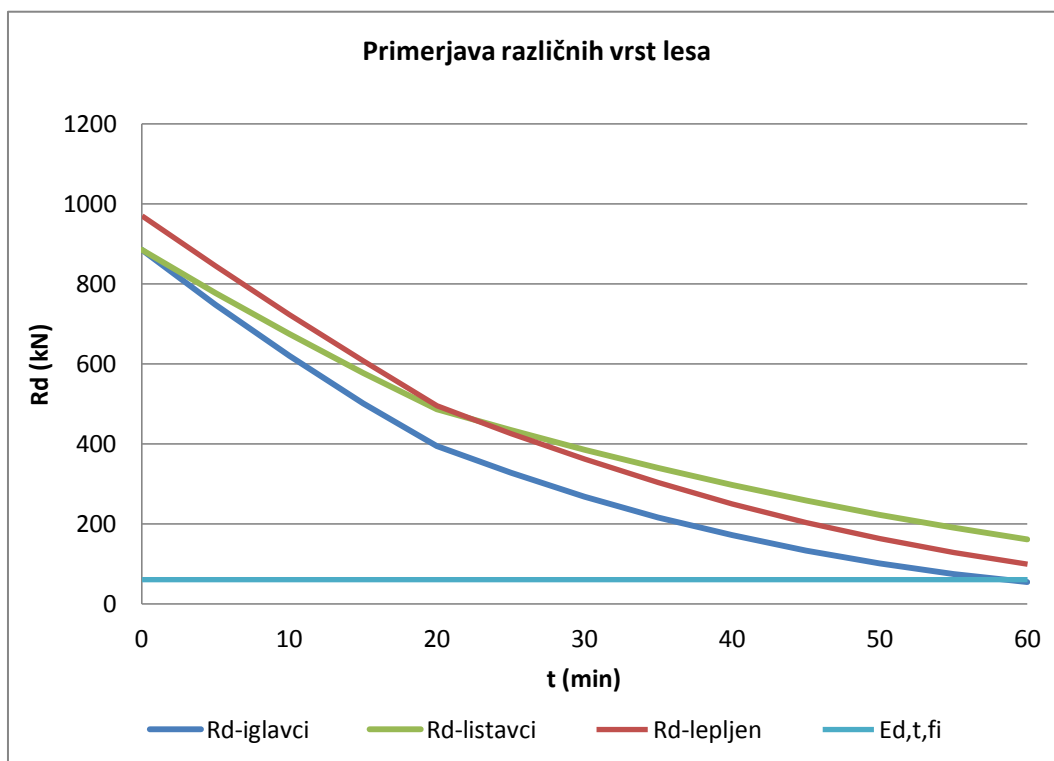
**Slika 14: Požarna odpornost stebrov iz lepljenega lesa po Evrokodu 5 [5], po metodi zmanjšane preseka za različne načine podpiranja in čase trajanja požara**

Tako kot pri iglavcih in listavcih dobimo pri lepljenem lesu podoben potek uklonske nosilnosti. Vsi stebri razen konzolno podprtega stebra bi zdržali 60 minutni računski požar. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se steber iz primera D uklonil.

V nadaljevanju primerjamo uklonsko nosilnost stebrov iz lesa iglavcev, listavcev in lepljenega lesa. Vrednosti uklonskih odpornosti za stebre iz vseh treh zgoraj naštetih vrst lesa, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podani v preglednici 7, časovni potek uklonske odpornosti je podan na sliki 15.

**Preglednica 7: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava različnih vrst lesa**

	$t=5$ min	$t=15$ min	$t=30$ min	$t=60$ min
iglavci (C30)	748.10	500.45	268.34	53.87
listavci (D30)	777.32	576.61	385.15	160.92
lepljen (GL24h)	844.76	606.67	361.61	99.26



**Slika 15: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po Evrokodu 5 [5], po metodi zmanjšane preseka za primer A in različne čase trajanja požara**

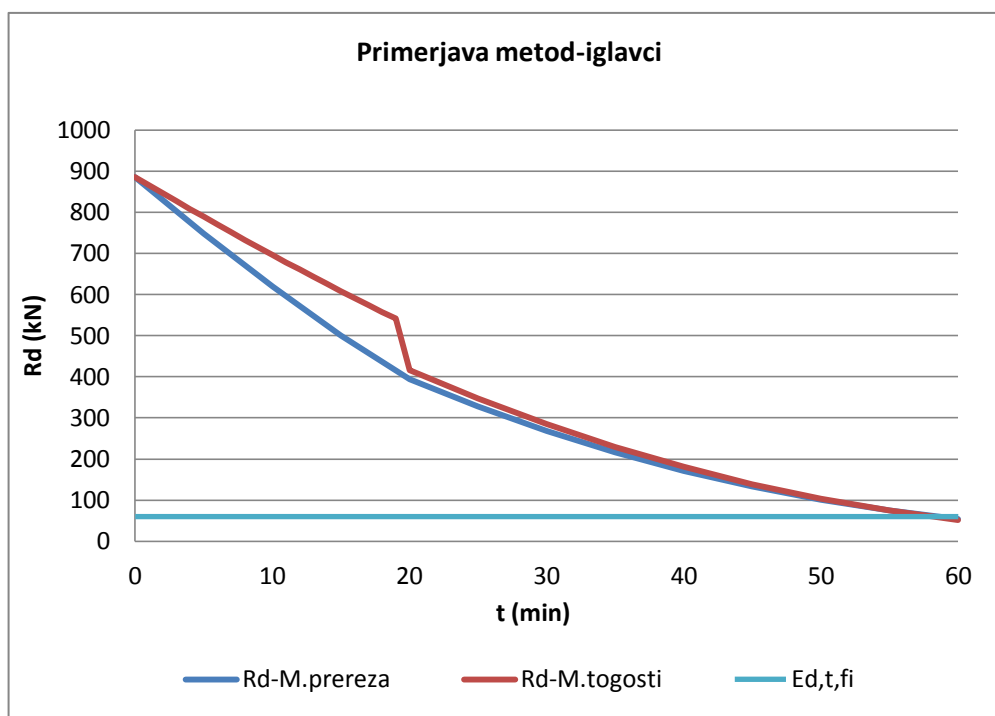
Primerjavo uklonske nosilnosti med iglavci, listavci in lepljenim lesom smo naredili na primeru A. Pri času  $t=0$  minut ima največjo uklonsko nosilnost lepljeni, nekoliko manjšo pa imata stebra iz iglavcev in listavcev. Pri času  $t=20$  minut imata lepljeni steber in steber narejen iz lesa listavcev enako



uklonsko nosilnost, kar je posledica hitrejšega oglenenja stebra iz lepljenega lesa. Pri času  $t=60$  minut ima največjo uklonsko nosilnost steber narejen iz lesa listavcev, najmanjšo pa steber iz lesa iglavcev. Najvišjo uklonsko nosilnost imajo stebri iz lesa listavcev, saj imajo tudi najmanjšo hitrost oglenenja.

#### 4.1.2 Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami

Tako kot zgoraj omenjena metoda, metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami upošteva reducirani prečni prerez, z s to razliko, da upošteva nekoliko manjšo debelino oglja, podano z izrazom (2.06), vendar upošteva zmanjšanje trdnostnih in togostnih karakteristik materiala (glej izraz 3.15). Tako imenovani »peš izračun« uklonske nosilnosti za stebre po metodi z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami iz lesa iglavcev je podan v prilogi B, časovni potek uklonske odpornosti pa je podan na sliki 16, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, pa so podani v preglednici 8. Ker sta metodi zelo podobni, metodo z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami samo primerjamo z metodo z zmanjšanim prečnim prerezom.



Slika 16: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Evrokodu 5 [5], primerjava metode zmanjšane prereza in metode zmanjšane trdnosti

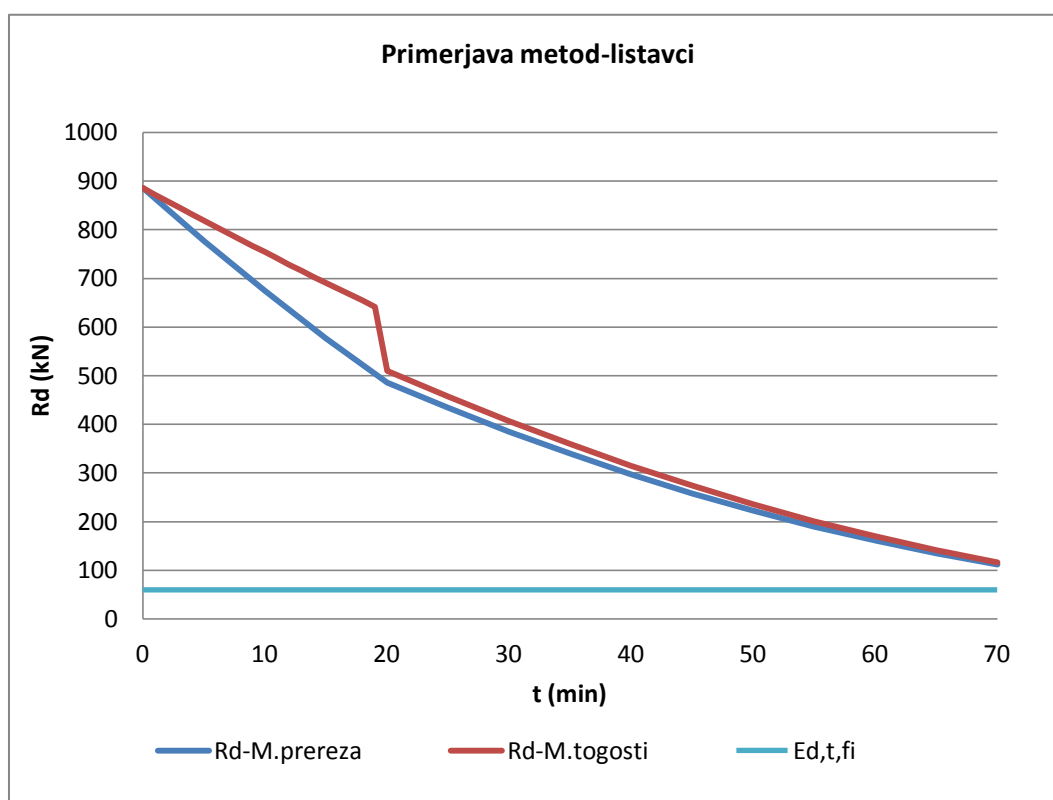
Iz izračuna uklonske nosilnosti v primeru požara vidimo, da sta obe poenostavljeni metodi po Evrokodu 5 [5] zelo podobni. Edina razlika nastane v prvih dvajsetih minutah gorenja prereza, kjer pri

metodi zmanjšane trdnosti dobimo višje vrednosti uklonskih sil. Razlika nastane, ker so pri metodi zmanjšane trdnosti, materialne karakteristika v prvih dvajsetih minutah požara konstante in se šele ob času  $t=20$  min začnejo spreminjati v skladu z enačbo (3.15).

**Preglednica 8: Požarna odpornost stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava metod-iglavci**

	t=5min	t=15min	t=30min	t=60min
M-prereza	748.10	500.45	268.34	53.87
M-togosti	789.12	608.40	284.80	51.63

Časovni potek uklonske odpornosti za stebre iz listavcev je podan na sliki 17, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, pa so podane v preglednici 9.



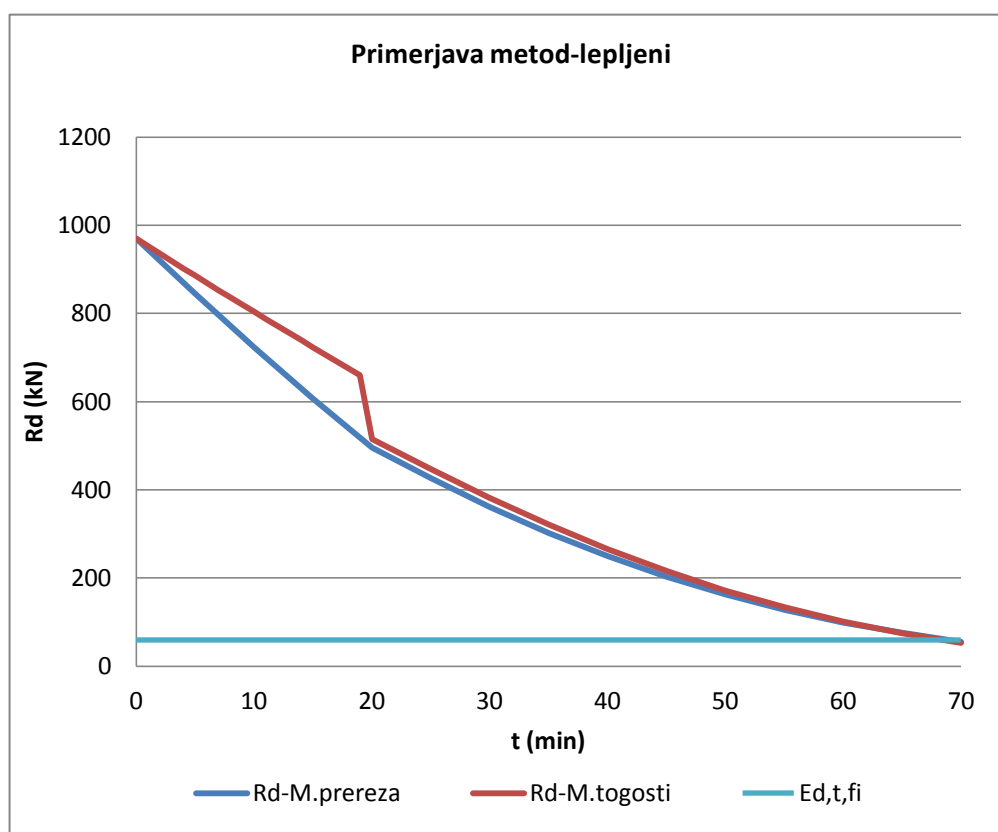
**Slika 17: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Evrokodu 5 [5], primerjava metode zmanjšane preseka in metode zmanjšane trdnosti**

Tako kot pri iglavcih so tudi pri listavcih rezultati dobljeni z obema analizama zelo podobni. Po času  $t = 20$  min so razlike v nosilnosti le nekaj odstotkov.

**Preglednica 9: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava metod-listavci**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
M-prereza	777.32	576.61	385.15	160.92
M-togosti	818.89	690.89	406.80	169.54

Časovni potek uklonske odpornosti za stebre iz lepljenega lesa je podan na sliki 18, vrednosti uklonskih odpornosti za čase t=5, 15, 30 in 60 min, pa so podane v preglednici 10.



**Slika 18: Požarna odpornost stebrov iz lepljenega lesa po Evrokodu 5 [5], primerjava metode zmanjšane trdnosti in metode zmanjšane prereza**

Prav tako kot pri listavcih in iglavcih, dobimo pri lepljenem stebri za obe metodi zelo podobne rezultate. V vseh primerih je metoda reduciranega prereza za malenkost bolj konzervativna.

**Preglednica 10: Požarna odpornost lesenega stebra po Evrokodu 5 [5]-primerjava metod-lepljeni les**

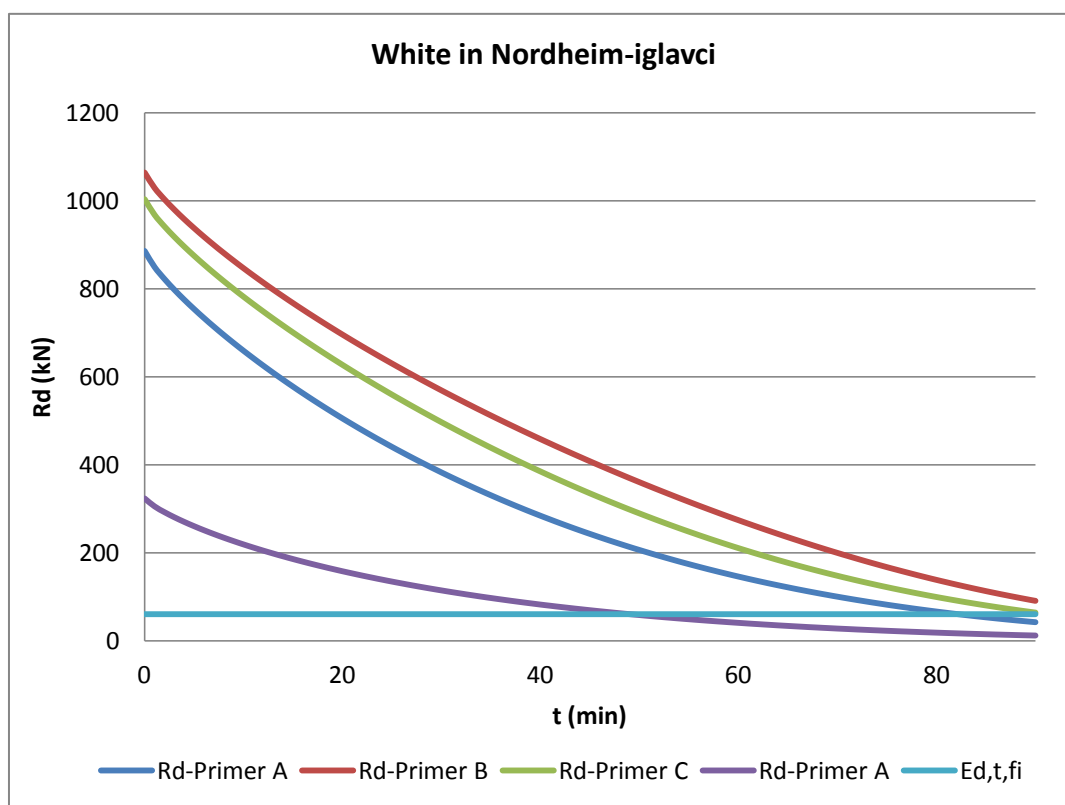
	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
M-prereza	844.76	606.67	361.61	99.26
M-togosti	885.91	723.68	381.84	101.61

#### 4.1.3 White in Nordheim [10]

Tako imenovani. »peš izračun« uklonske nosilnosti za stebre iz lesa iglavcev po White in Nordheim [10], je podan v prilogi C, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 11, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja je podan na sliki 19.

**Preglednica 11: Požarna odpornost lesenega stebra po White in Nordheim [10]-iglavci**

	$t=5$ min	$t=15$ min	$t=30$ min	$t=60$ min
Rd-Primer A (kN)	753.53	562.00	382.16	145.54
Rd-Primer B (kN)	938.29	752.86	569.19	274.08
Rd-Primer C (kN)	874.58	684.76	496.08	209.74
Rd-Primer D (kN)	259.89	179.11	113.67	39.86



**Slika 19: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po White in Nordheim [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara**

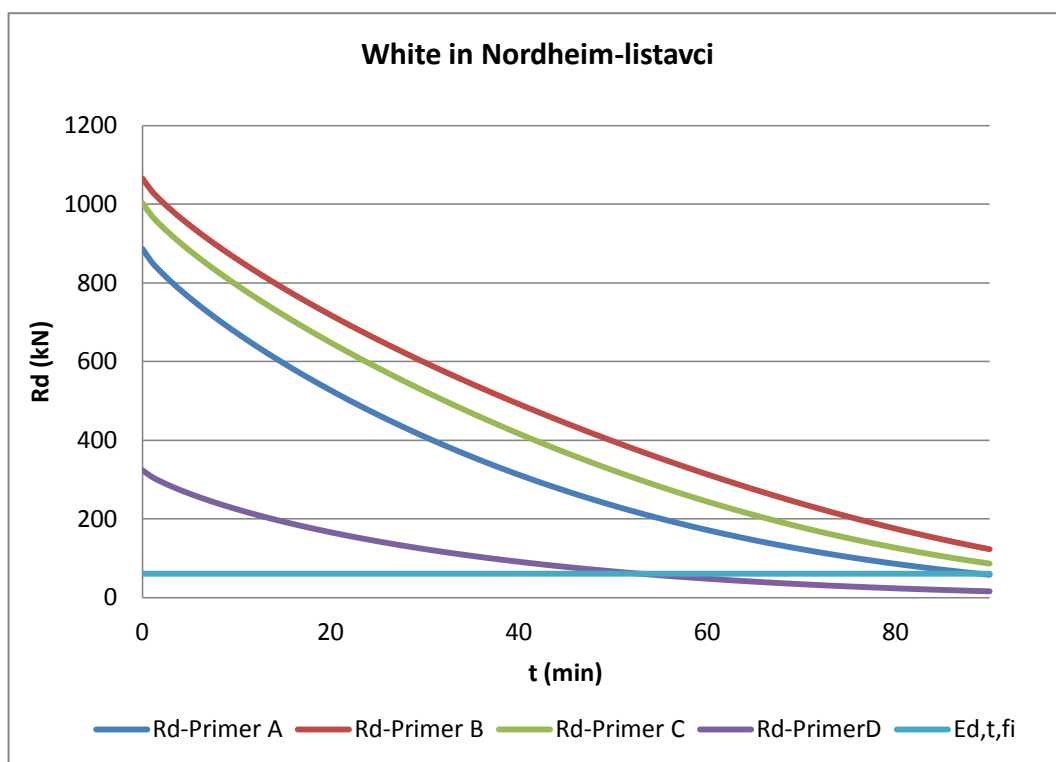
V primerjavi z metodama predstavljenima v prejšnji točki, uklonska nosilnost pri vseh primerih ne pada več linearno. Pričakovano ima najboljšo uklonsko nosilnost primer A, saj ima najkrajšo računsko uklonsko dolžino, najmanjšo pa ima primer D. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje

požara, po 60 minutah pa bi se steber iz primera D uklonil. Steber iz primera B bi zdržal tudi 90 minutno trajanje požara.

Vrednosti uklonskih odpornosti pri stebrih iz lesa listavcev, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 12, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja je podan na sliki 20.

**Preglednica 12: Požarna odpornost lesenega stebra po White in Nordheim [10]-listavci**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Rd-Primer A (kN)	761.64	595.04	408.15	171.40
Rd-Primer B (kN)	946.06	785.26	596.86	312.53
Rd-Primer C (kN)	882.50	718.02	524.41	244.13
Rd-Primer D (kN)	263.58	192.17	122.57	47.37



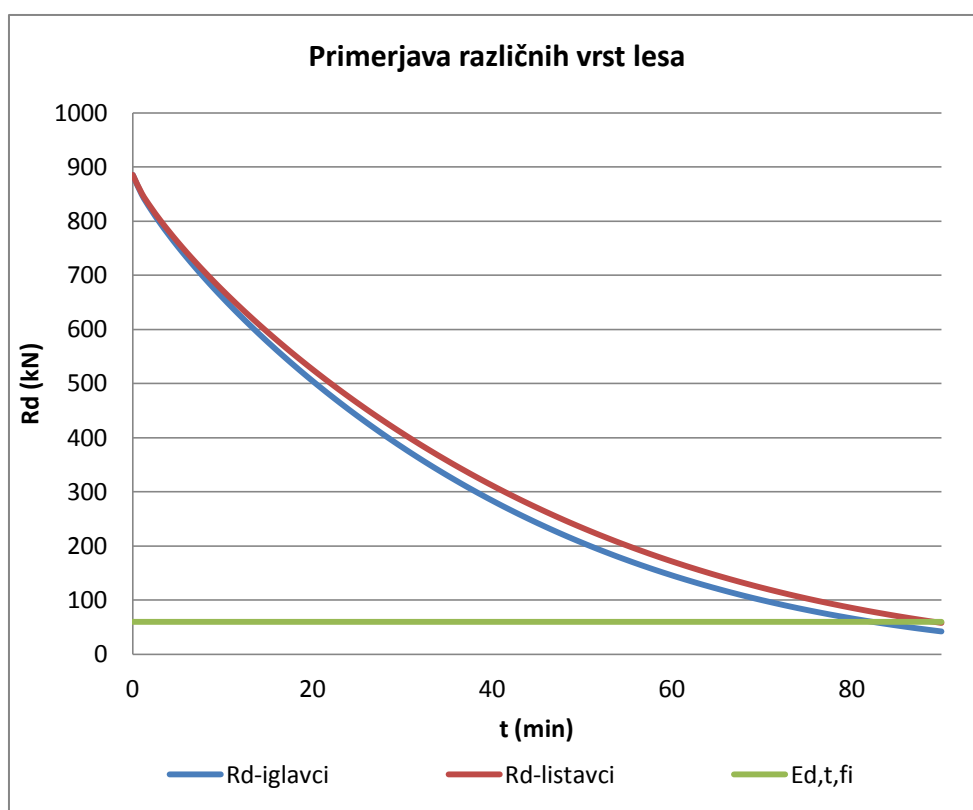
**Slika 20: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po White in Nordheim [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara**

Tako kot pri iglavcih, uklonska nosilnost pri vseh primerih ne pada več linearno. Vrednosti uklonskih sil nosilnosti so skozi čas trajanja požara malenkostno večje kot pri iglavcih. Višja hitrost oglenenja je posledica manjše gostote lesa kot pri listavcih. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se steber iz primera D uklonil. Steber iz primera B in C bi zdržal tudi 90 minutno trajanje požara.

V nadaljevanju primerjamo uklonsko nosilnost stebrov iz lesa iglavcev in listavcev. Vrednosti uklonskih odpornosti za stebre iz vseh zgoraj naštetih vrst lesa, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 13, časovni potek uklonske odpornosti je podan na sliki 21.

**Preglednica 13: Rezultati požarne odpornosti lesenega stebra po White in Nordheim [10]-primerjava različnih vrst lesa**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
iglavci (C30)	753.53	562.0	382.16	145.54
listavci (D30)	761.64	595.04	408.15	171.40



**Slika 21: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po White in Norheim [10], za primer A in različne čase trajanja požara**

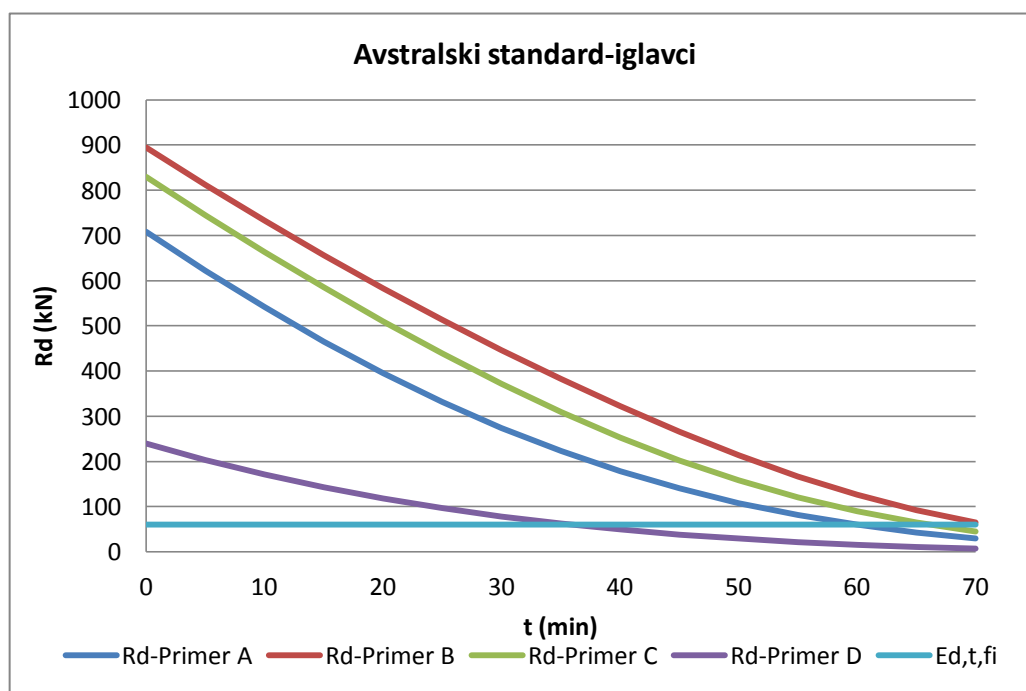
Razlike v hitrosti oglenjenja ter posledično uklonski nosilnosti lesenega stebra so zelo majhne. Uklonske nosilnosti iglavcev in listavcev se razlikujejo le za nekaj odstotkov. Do razlik pride zaradi večje gostote listavcev ter posledično počasnejšega oglenjenja.

#### 4.1.4 Avstralski standard [9]

Tako imenovani »peš izračun« uklonske nosilnosti za stebre iz lesa iglavcev po Avstralskem standardu [9], je podan v prilogi D, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 14, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja je podan na sliki 22.

Preglednica 14: Požarna odpornost lesenega stebra po Avstralskem standardu [9]-iglavci

	$t=5$ min	$t=15$ min	$t=30$ min	$t=60$ min
Rd-Primer A (kN)	622.34	465.54	273.73	59.97
Rd-Primer B (kN)	811.85	656.34	446.50	126.67
Rd-Primer C (kN)	745.30	585.51	372.13	89.78
Rd-Primer D (kN)	203.24	142.87	78.34	15.92



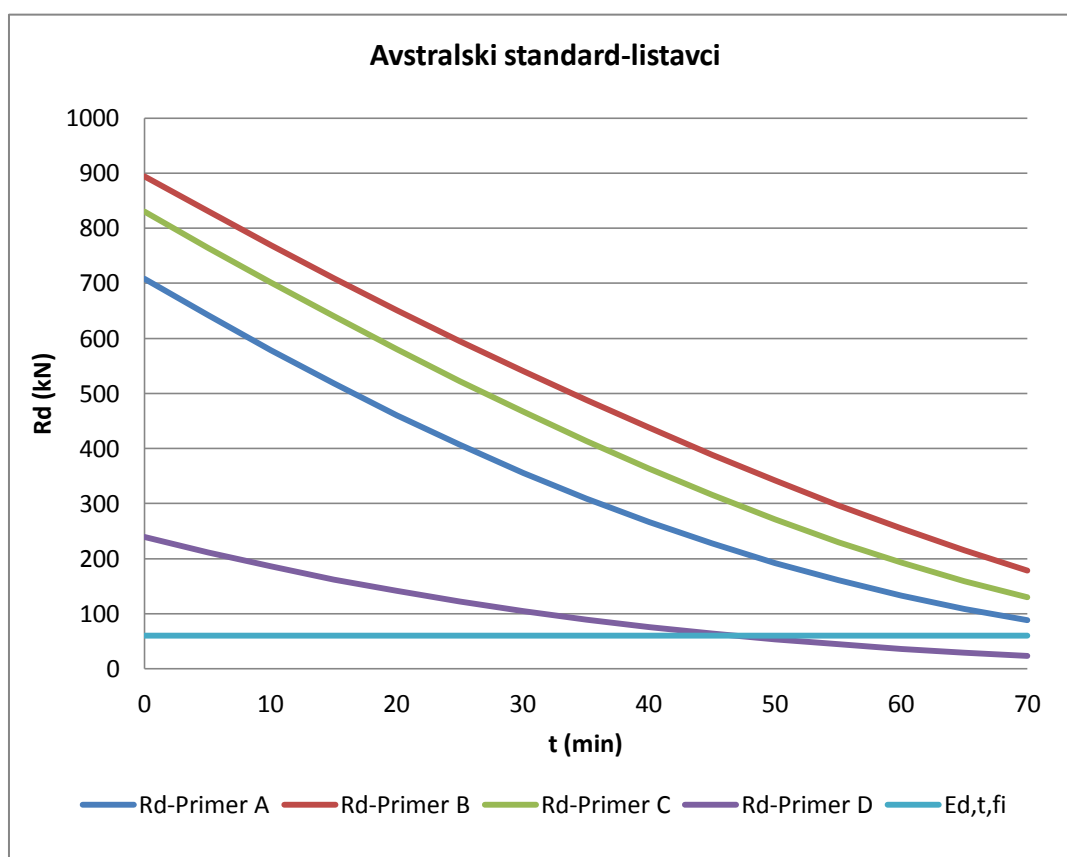
Slika 22: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Avstralskem standardu [9], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara

Uklonske sile nosilnosti pri vseh primerih enakomerno padajo. Razlike med različnimi primeri se s časom zmanjšujejo. Pričakovano ima najboljšo uklonsko nosilnost primer A, saj ima najkrajšo računsko uklonsko dolžino, najmanjšo pa ima primer D. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se stebra iz primerov A in D uklonila.

Vrednosti uklonskih odpornosti pri stebrih iz lesa listavcev, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 15, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja je podan na sliki 23.

**Preglednica 15: Požarna odpornost lesenega stebra po Avstralskem standardu [9]-listavci**

	$t=5$ min	$t=15$ min	$t=30$ min	$t=60$ min
Rd-Primer A (kN)	641.83	517.86	355.84	132.95
Rd-Primer B (kN)	830.76	709.12	540.61	254.49
Rd-Primer C (kN)	764.68	639.79	466.91	192.70
Rd-Primer D (kN)	211.29	162.18	104.84	36.26



**Slika 23: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Avstralskem standardu [9], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara**

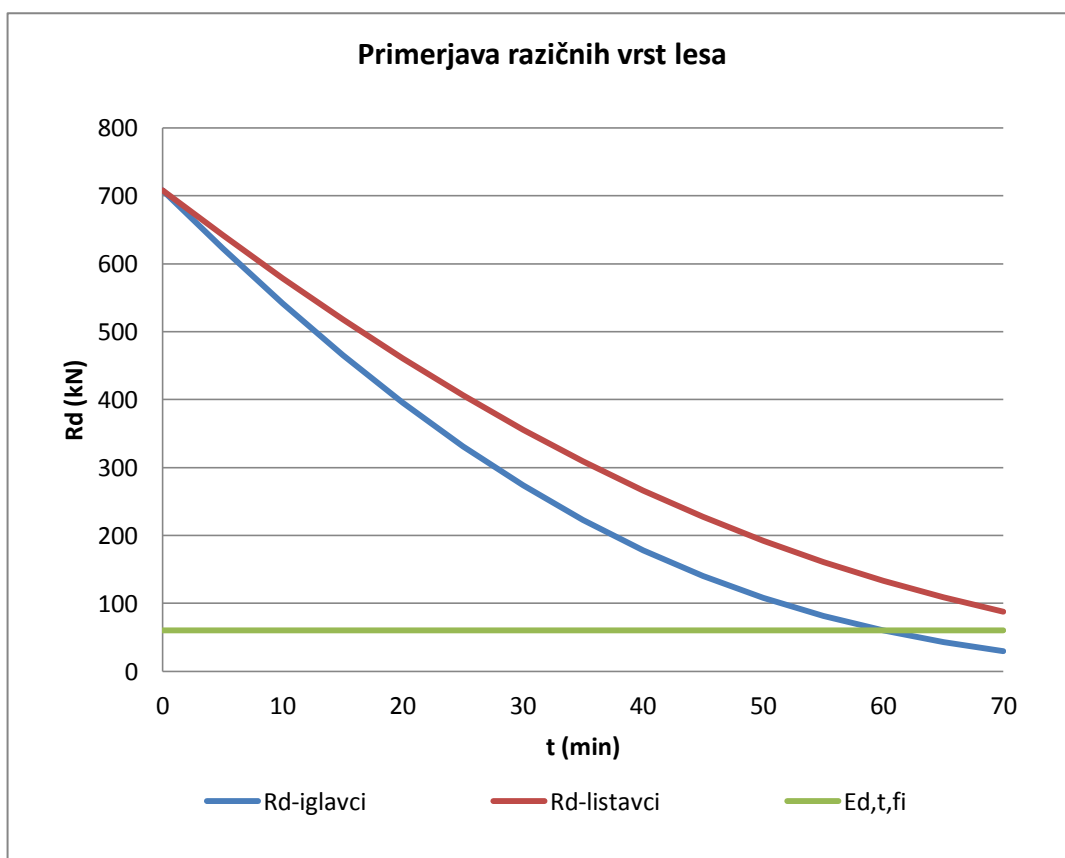
Tako kot pri iglavcih, uklonske sile nosilnosti pri vseh primerih enakomerno linearno padajo. Vrednosti uklonskih sil nosilnosti so skozi čas trajanja požara veliko večje kot pri iglavcih. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se steber iz primera D uklonil.



V nadaljevanju primerjamo uklonsko nosilnost stebrov iz lesa iglavcev in listavcev. Vrednosti uklonskih odpornosti za stebre iz vseh zgoraj naštetih vrst lesa, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 16, časovni potek uklonske odpornosti pa je podan na sliki 24.

**Preglednica 16: Požarna odpornost lesenega stebra po Avstralskem standardu [9]-primerjava različnih vrst lesa**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
iglavci (C30)	622.34	465.54	273.73	59.97
listavci (D30)	641.83	517.86	355.84	132.95



**Slika 24: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po Avstralskem standardu [9], za primer A in različne čase trajanja požara**

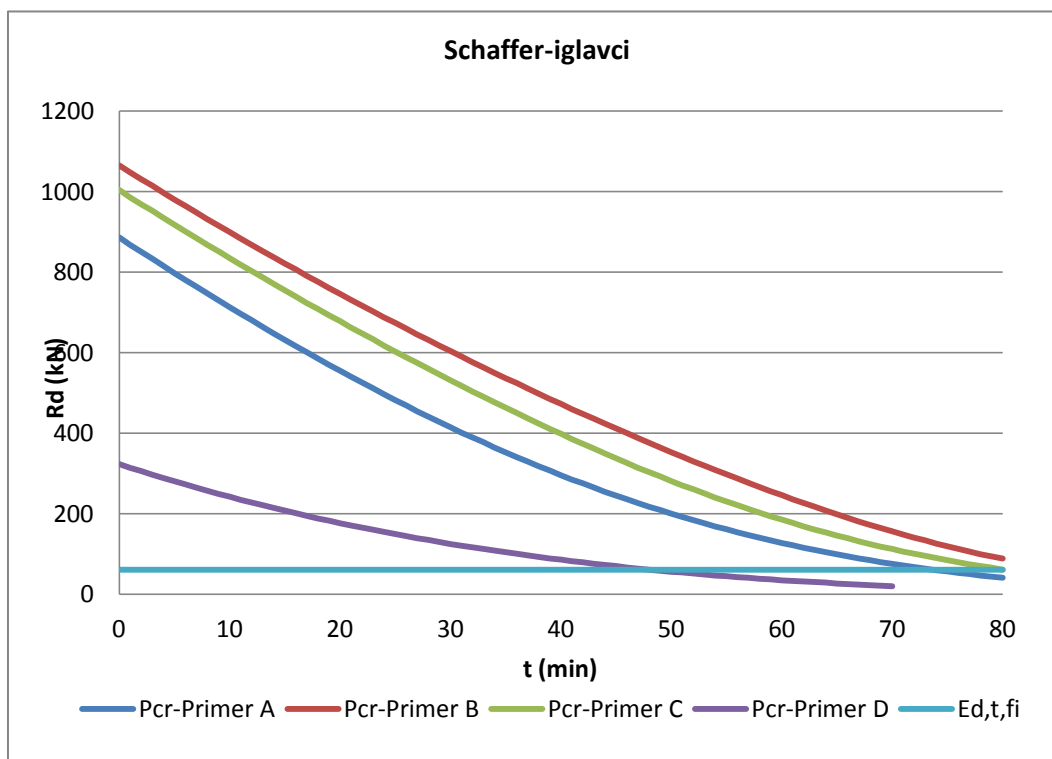
Razlika v uklonski nosilnosti s časom narašča, kar je posledica različnih hitrosti ogljenja, ki je pri iglavcih  $0,77$  mm/min pri listavcih  $0,59$  mm/min. Pri času  $t=60$  min je razlika več kot  $100\%$ .

#### 4.1.5 Schaffer [10]

Tako imenovani »peš izračun« uklonske nosilnosti za stebre iz lesa iglavcev po Schafferju [10], je podan v prilogi E, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 17, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja pa je podan na sliki 25.

**Preglednica 17: Požarna odpornost lesenega stebra po Schafferju [10] -iglavci**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Rd-Primer A (kN)	797.72	631.92	414.58	127.25
Rd-Primer B (kN)	980.62	821.15	603.63	245.40
Rd-Primer C (kN)	917.70	754.84	531.35	184.90
Rd-Primer D (kN)	280.32	207.18	124.80	34.63



**Slika 25: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev po Schafferju [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara**

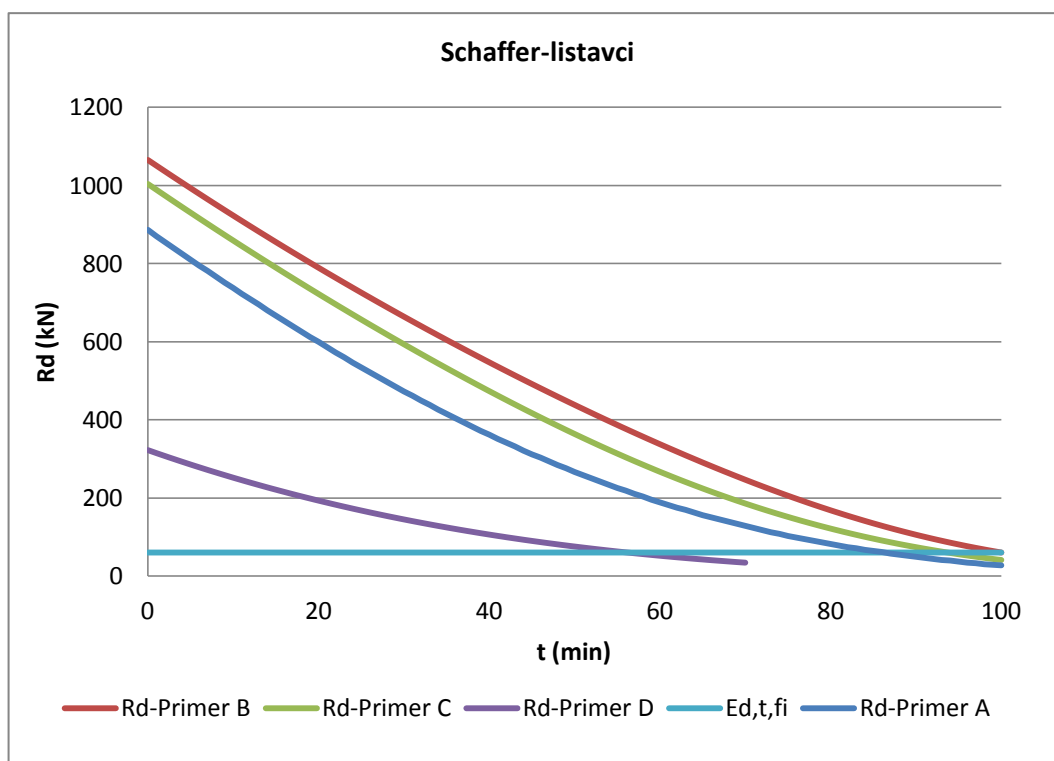
Uklonska nosilnost pri vseh primerih enakomerno pada. Razlike med različnimi primeri se s časom zmanjšujejo. Pričakovano ima najboljšo uklonsko nosilnost primer A, saj ima najkrajšo računsko

uklonsko dolžino, najmanjšo pa ima primer D. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se steber iz primera D uklonil.

Vrednosti uklonskih odpornosti pri stebrih iz lesa listavcev, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podani v preglednici 18, časovni potek uklonske odpornosti za različne načine podpiranja pa je podan na sliki 26.

**Preglednica 18: Požarna odpornost lesenega stebra po Schafferju [10]-listavci**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Rd-Primer A (kN)	810.25	666.63	472.98	189.06
Rd-Primer B (kN)	992.61	854.74	663.92	337.50
Rd-Primer C (kN)	929.90	789.23	593.31	267.11
Rd-Primer D (kN)	286.24	221.71	145.56	52.56



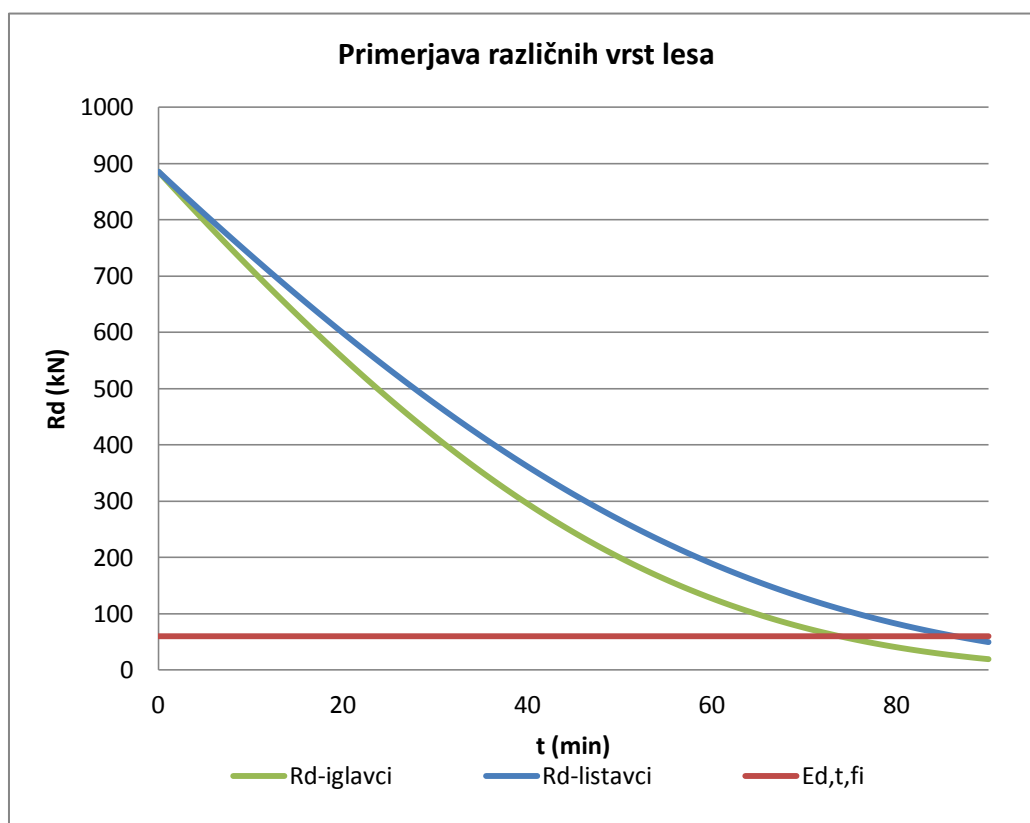
**Slika 26: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev po Schafferju [10], za različne načine podpiranja in čase trajanja požara**

Tako kot pri iglavcih, uklonska nosilnost pri vseh primerih enakomerno pada. Vrednosti uklonskih sil nosilnosti so skozi čas trajanja požara veliko večje kot pri iglavcih. V vseh primerih bi steber zdržal 30 minutno trajanje požara, po 60 minutah pa bi se steber iz primera D uklonil.

V nadaljevanju primerjamo uklonsko nosilnost stebrov iz lesa iglavcev in listavcev. Vrednosti uklonskih odpornosti za stebre iz vseh zgoraj naštetih vrst lesa, za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 19, časovni potek uklonske odpornosti pa je podan na sliki 27.

**Preglednica 19: Požarna odpornost lesenega stebra po Schafferju [10]-primerjava različnih vrst lesa**

	$t=5$ min	$t=15$ min	$t=30$ min	$t=60$ min
iglavci (C30)	797.72	631.92	414.58	127.25
listavci (D30)	810.25	666.63	472.98	189.06



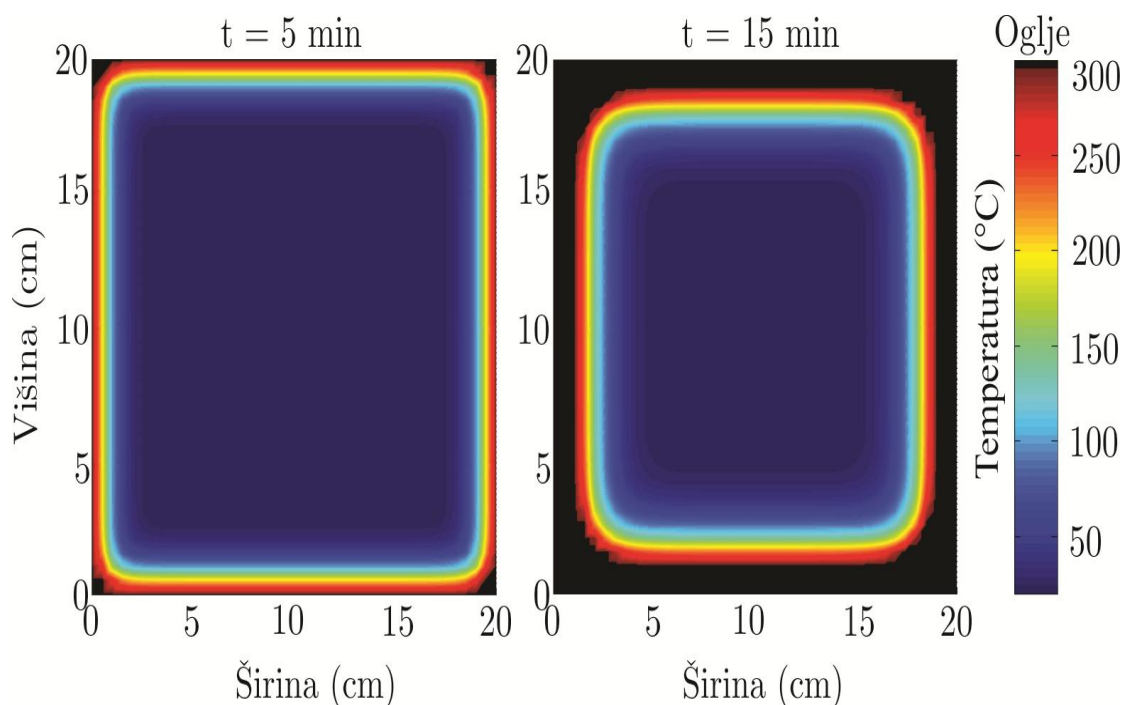
**Slika 27: Požarna odpornost stebrov iz različnih vrst lesa po Schafferju [10], za primer A in različne čase trajanja požara**

Razlike v hitrosti oglenenja ter posledično uklonski nosilnosti lesenega stebra, sta prvih dvajset minut zelo majhne. Pri času  $t=30$  min in  $t=60$  min je razlika nekoliko večja in znaša okoli 60 kN. V splošnem velja, da imajo listavci zaradi večje gostote lesa, nekoliko počasnejše oglenenje.

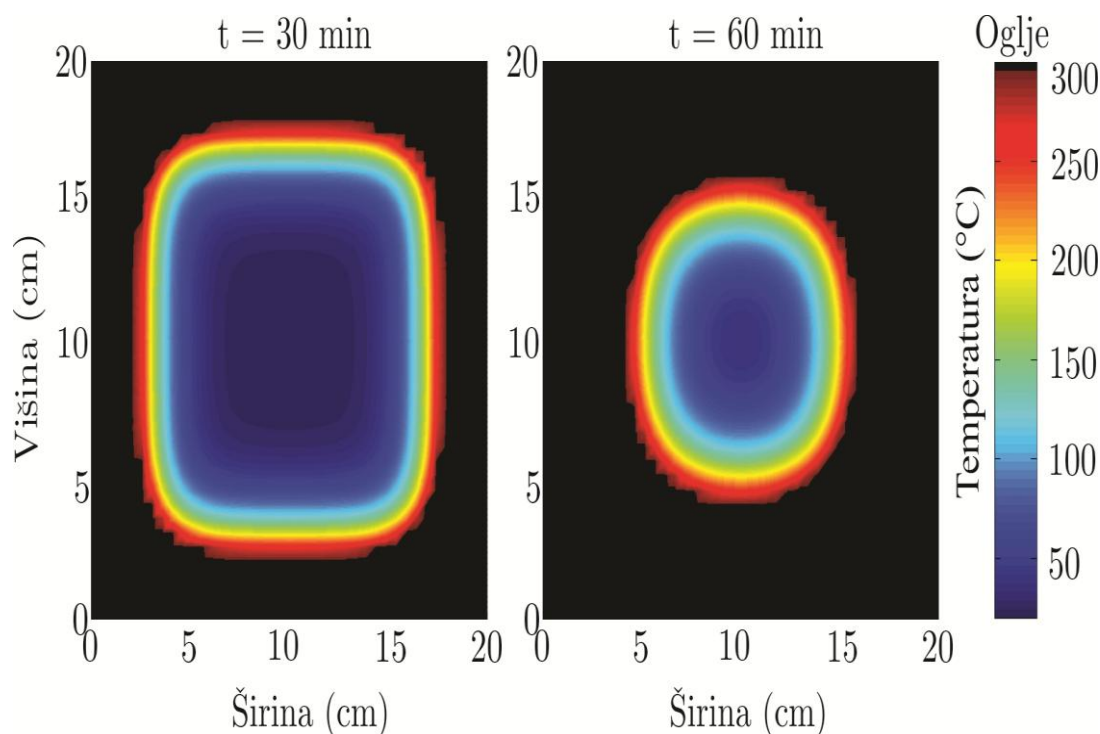
## 4.2 Numerični model

Za izračun uklonske nosilnosti stebra najprej potrebujemo razporeditev temperature in oglja po prerezu. V ta namen smo obravnavali dvodimenzionalno ogljenje smrekovega (C30) stebra, ki je izpostavljen standardni požarni obtežbi ISO 834 [11] s štirih strani (glej sliko 14). Prečni prerez stebra diskretiziramo z diferenčno mrežo 60 x 60 točk. Uporabimo enake materialne lastnosti kot pri empiričnih modelih. Dodatni podatki za izračun razporeditve oglja po prerezu pri numeričnem modelu so naslednji:  $T_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 460 \text{ kg/m}^3$ ,  $k_{\text{les}} = 0.12$ ,  $k_{\text{ogljje}} = 0.15 \text{ W/(mK)}$ ,  $h_c = 22.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $c_{\text{ples}} = 1530 \text{ J/(kgK)}$ ,  $c_{\text{pogljje}} = 1050 \text{ J/(kgK)}$ , kjer je  $T_0$  začetna temperatura prereza,  $k_{\text{les}}$  in  $k_{\text{ogljje}}$  sta koeficienta toplotne prevodnosti lesa in oglja,  $c_{\text{ples}}$  in  $c_{\text{pogljje}}$  predstavljata specifično toploto lesa in oglja.

Rezultati toplotne analize pri izpostavljenosti požaru so prikazani na slikah 28 in 29.



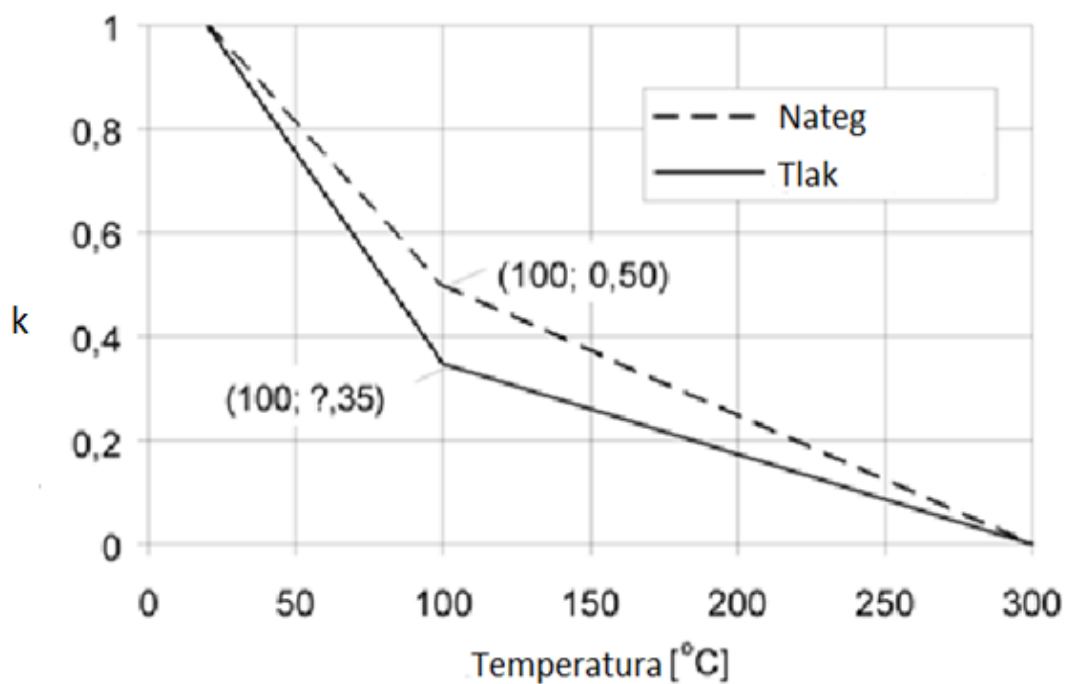
Slika 28: Porazdelitev temperature in oglja po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 5 in 15 min



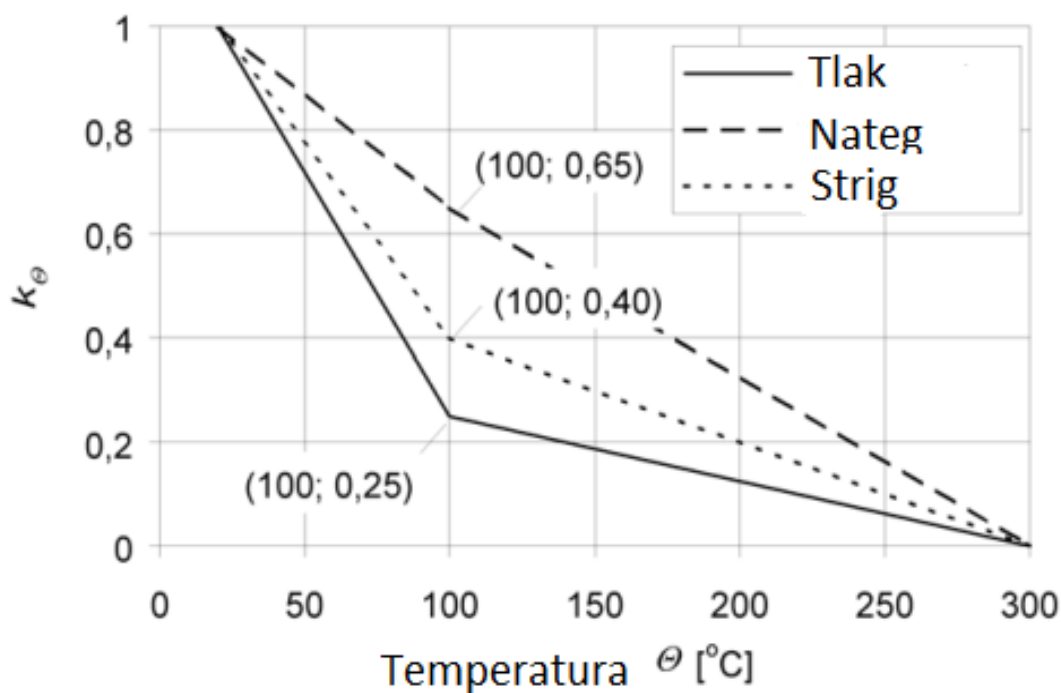
**Slika 29: Porazdelitev temperature in oglja po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 30 in 60 min**

Opazimo, da je najhitrejše oglečenje v vogalih prereza, zaradi prehoda toplote iz dveh pravokotnih strani (oziroma izpostavljenosti požaru iz dveh strani). Pojavi se t.i. zaokrožitveni efekt, kar pomeni da po nekaj minutah po začetku gorenja, prerez ni več pravokoten. Prav tako opazimo, da ima steber le nekaj milimetrov pod ogljem skoraj sobno temperaturo.

V tem poglavju obravnavamo štiri primere. V primeru I izračunamo uklonsko nosilnost stebra na podlagi razporeditve oglja po prerezu dobljenih s pomočjo toplotne analize. Prav tako upoštevamo konstante materialne karakteristike. Na podlagi temperature prereza v primeru II upoštevamo tudi redukcijo elastičnega modula (glej sliko 30), medtem ko v primeru III upoštevamo redukcijo tlačne trdnosti (glej sliko 31). V primeru IV upoštevamo obe redukciji. Na koncu poglavja podamo primerjavo dobljenih rezultatov.



Slika 30: Redukcija elastičnega modula lesa zaradi požara v skladu z Evrokodom 5 [5]

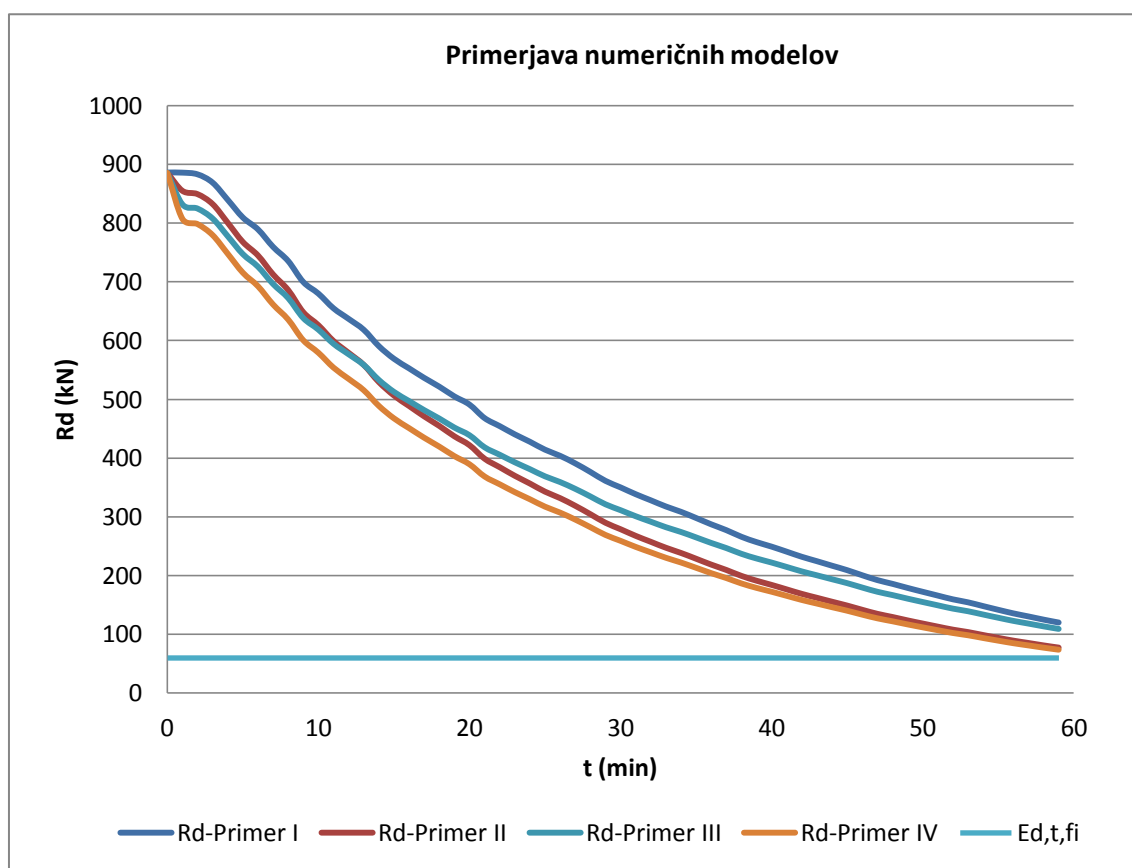


Slika 31: Redukcija tlačne trdnosti lesa zaradi požara v skladu z Evrokodom 5 [5]

Tako imenovani »peš izračun« uklonske nosilnosti za stebre iz lesa iglavcev za vse numerične primere (I, II, III, IV) je podan v prilogah F-I, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, so podane v preglednici 20, časovni potek uklonske odpornosti za vse primere pa je podan na sliki 32.

**Preglednica 20: Požarna odpornost lesenega stebra - Numerični primeri**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Rd-Primer I	809.19	568.85	350.07	120.17
Rd-Primer II	768.01	506.61	278.93	77.35
Rd-Primer III	747.35	512.7	311.24	108.95
Rd-Primer IV	715.71	467.6	258.93	73.45



**Slika 32: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava numeričnih modelov**

Pričakovano dobimo največjo uklonsko nosilnost v primeru I, saj upošteva konstante materialne karakteristike. Najbolj konzervativen je primer IV, kjer upoštevamo redukcijo elastičnega modula ter tlačne trdnosti skozi čas trajanja požara. V prvih dvajsetih minutah opazimo dobro ujemanje numeričnega primera II in III, nato se razlike med njima začnejo povečevati. Po tridesetih minutah



trajanja požara vidimo dobro ujemanje modela II in IV. Sklepamo da ima redukcija elastičnega modula večji vpliv na zmanjšanje uklonske nosilnosti stebra, kot pa redukcija tlačne trdnosti.

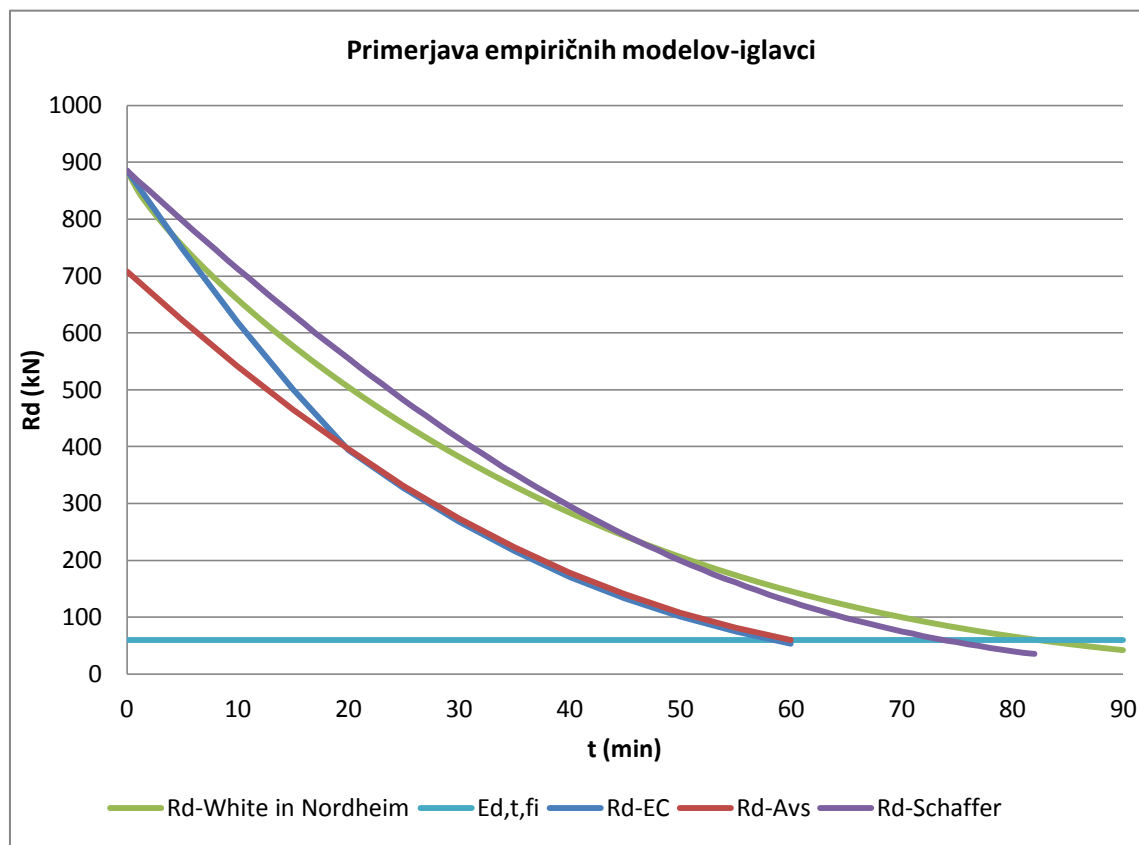
## 5 PRIMERJAVA RAZLIČNIH MODELOV ZA IZRAČUN POŽARNE ODPORNOSTI LESENIH STEBROV

S primerjavo rezultatov empiričnih modelov in numeričnih modelov želimo ugotoviti, kakšne so razlike v uklonskih odpornosti v obravnavanih modelih.

Vrednosti uklonskih odpornosti pri stebrih iz lesa iglavcev za vse empirične modele, za čase  $t=5$ , 15,30 in 60 min, so podane v preglednici 21, časovni potek uklonskih odpornosti pa je podan na sliki 33.

Preglednica 21: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih modelov-iglavci

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
EC [5]	748.1	500.45	268.34	53.87
Avs [9]	622.34	465.54	273.73	59.97
Schaffer [10]	797.72	631.92	414.58	127.25
White in Nordheim [10]	753.53	577.13	382.16	145.54



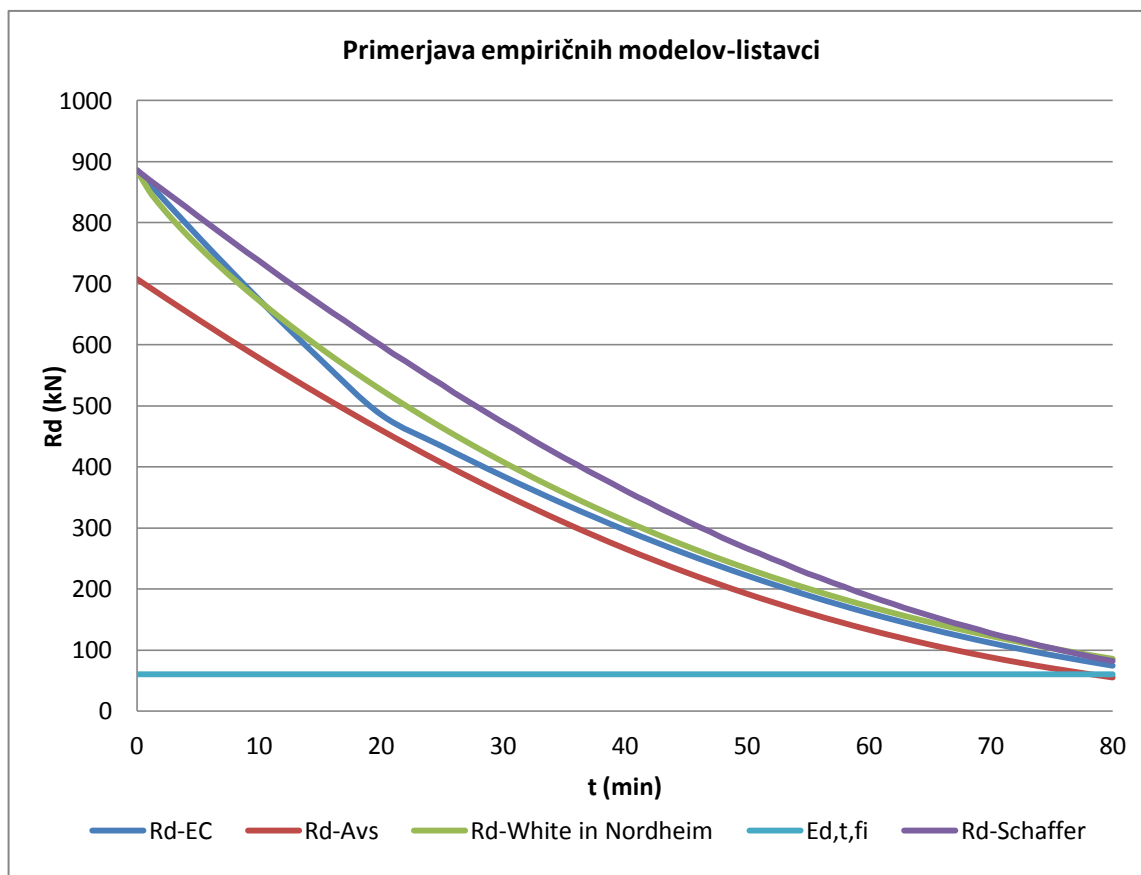
Slika 33: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava empiričnih modelov

Po 20 minutah trajanja požara opazimo zelo dobro ujemanja Avstralskega standarda [9] in Evrokoda 5 [5]. Razlike v uklonske nosilnosti so od dvajsete minute naprej le nekaj odstotkov. Prav tako opazimo dobro ujemanje modelov Schaffer [10] in White in Nordheim [10]. Razlika med Evrokodom 5 [5] in Schafferjem [10] oziroma Avstralskim standardom [9] in modelom White in Nordheim [10] je zelo velika. Pri času  $t=60$  min je razlika med Evrokodom 5 [5] in Schafferjem [10] več kot 60 kN.

Vrednosti uklonskih odpornosti pri stebrih iz lesa listavcev za vse empirične modele, za čase  $t=5$ , 15,30 in 60 min, so podane v preglednici 22, časovni potek uklonskih odpornosti pa je podan na sliki 34.

**Preglednica 22: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih modelov-listavci**

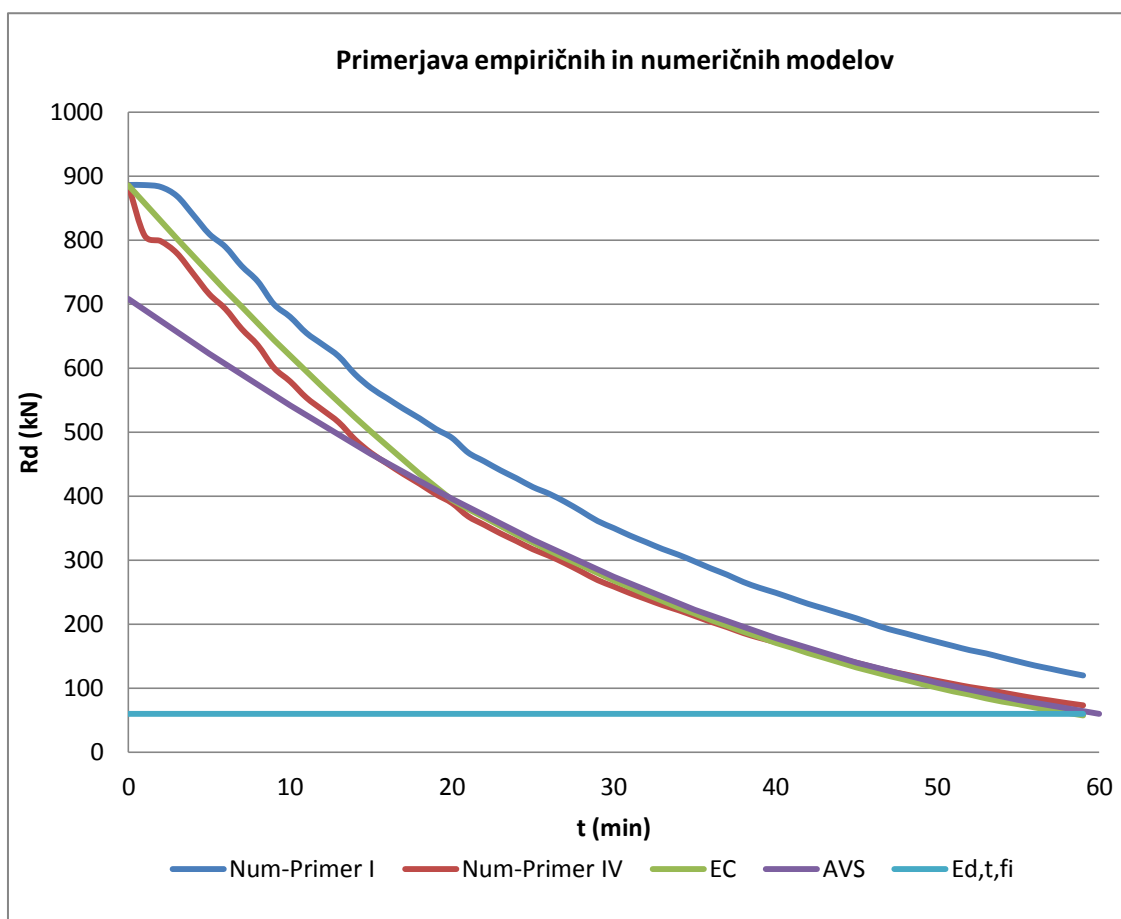
	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
EC [5]	777.31	576.61	385.15	160.92
Avs [9]	641.83	517.86	355.84	132.95
Schaffer [10]	810.25	666.63	472.98	189.06
White in Nordheim [10]	761.64	595.04	408.15	171.4



**Slika 34: Požarna odpornost stebrov iz lesa listavcev, primerjava empiričnih modelov**

V primerjavi z iglavci, dobimo pri listavcih veliko boljše ujemanje vseh modelov. Razlike med njimi so občutno manjše. Opazimo skoraj popolno ujemanja Evrokoda 5 [5] in modela White in Nordheim [10]. Najbolj konzervativen je v tem primeru Avstralski standard [9], največjo uklonsko nosilnost pa dobimo pri modelu Schaffer [10].

V nadaljevanju med seboj primerjamo še empirične in numerične modele. Časovna poteka uklonskih odpornosti sta podana na slikah 35 in 36, vrednosti uklonskih odpornosti za čase  $t=5, 15, 30$  in  $60$  min, pa so podane v preglednicah 23 in 24.

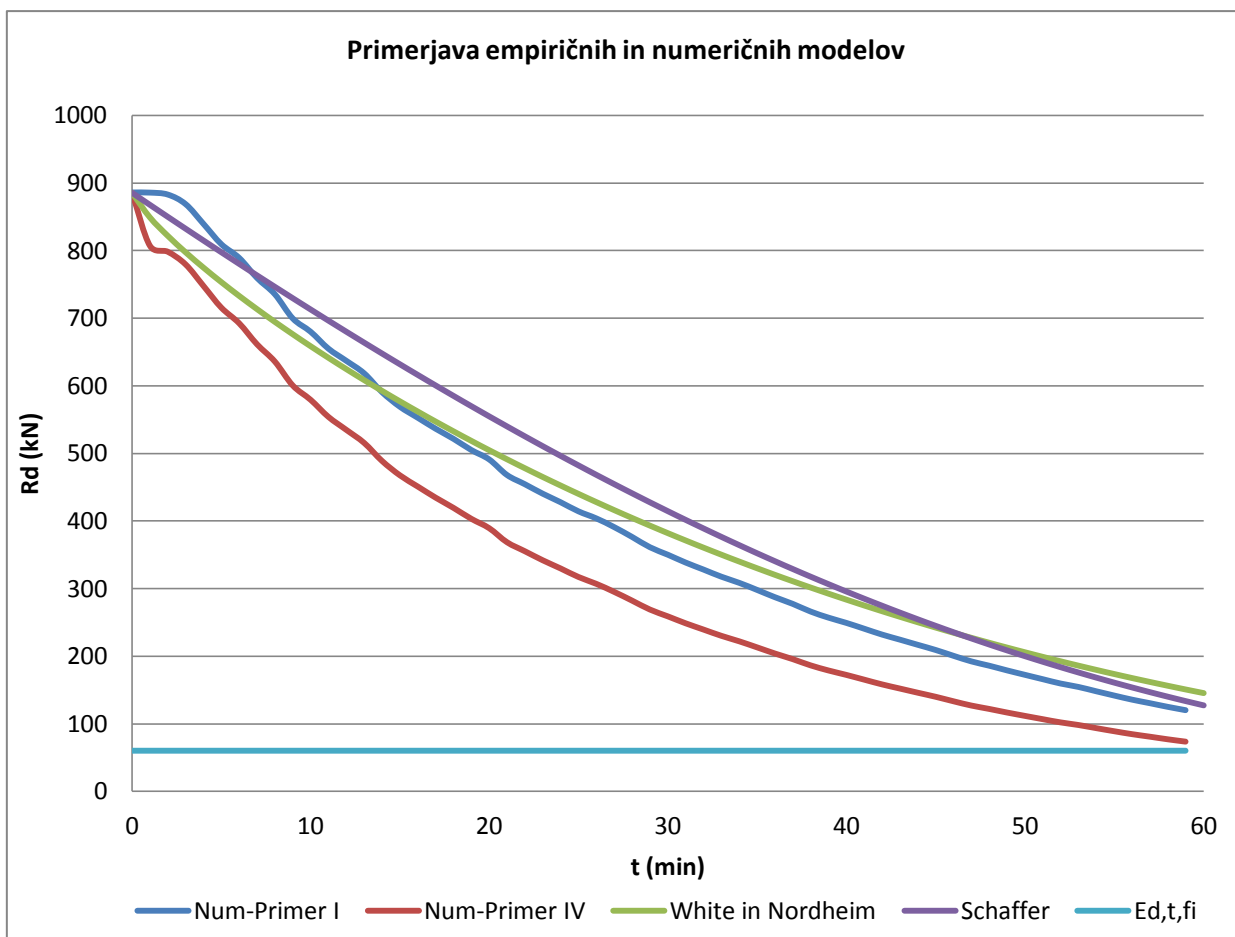


Slika 35: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava empiričnih in numeričnih modelov

Primerjava Avstralskega standarda [9], Evrokoda 5 [5] in numeričnega primera IV, pokaže zelo dobro ujemanje od časa  $t=20$  min. Razlike med njimi so le nekaj odstotkov. Numerični primer I in oba empirična modela upoštevata konstantne materialne karakteristike, vendar je razlika med njima pri času  $t=60$  min več kot 60 kN. Razlog je v tem, da na podlagi toplotne analize dobimo veliko bolj realno razporeditev oglja, kot pri empiričnih modelih.

**Preglednica 23: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih in numeričnih modelov**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
EC [5]	748.1	500.45	268.34	53.87
Avs [9]	622.34	465.54	273.73	59.97
Num-Primer I	809.19	568.85	350.07	120.17
Num-Primer IV	715.71	467.6	258.93	73.45



**Slika 36: Požarna odpornost stebrov iz lesa iglavcev, primerjava empiričnih in numeričnih modelov**

Primerjava obeh empiričnih modelov in numeričnega primera I, pokaže dobro ujemanje skozi celotno trajanje požara. Najbolj konzervativen je numerični model IV, ki upošteva redukcijo elastičnega modula in tlačne trdnosti.

**Preglednica 24: Požarna odpornost lesenega stebra-primerjava empiričnih in numeričnih modelov**

	t=5 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min
Schaffer [10]	797.72	631.92	414.58	127.25
White in Nordheim [10]	753.53	577.13	382.16	145.54
Num-Primer I	809.19	568.85	350.07	120.17
Num-Primer IV	715.71	467.6	258.93	73.45

## 6 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu smo obravnavali dimenzioniranje lesenih stebrov za primer požara. Največjo pozornost smo namenili modelom oglenenja lesa, ki predstavljajo osnovno orodje pri dimenzioniranju lesenih konstrukcij v primeru požara. Zanimala nas je primerjava kompleksnih numeričnih modelov oglenenja s preprostejšimi empiričnimi, njihov vpliv na uklonsko nosilnost lesenega stebra ter kolikšna je razlika pri določanju debeline oglja z uporabo numeričnih modelov.

Podan je opis oglenenja lesa ter pojav pirolize v lesu. Sledi pregled literature s področja empiričnih in numeričnih modelov oglenenja ter projektiranje požarnovarnih konstrukcij na uklon v skladu z Evrokodom 5 [5]. V četrtem poglavju je dodatno obrazložena uporaba numeričnih in empiričnih modelov. V petem poglavju primerjamo izbrane empirične in numerične modele za različne računske primere.

Ugotovili smo, da v primeru iglavcev dobimo zelo dobro ujemanje uklonske odpornosti pri Evrokodu [5] in Avstralskem standardu [9], medtem ko so vrednosti pri modelu Schaffer [10] ter White in Nordheim [10] nekoliko večje. Pri listavcih se dobro ujemata modela White in Nordheim [10] ter Evrokod [5]. Največjo uklonsko odpornost dobimo pri modelu Schaffer [10], najmanjšo pa pri Avstralskem standardu [9].

Pri uporabi empiričnih modelov oglenenja za dimenzioniranje lesenih stebrov v primeru požara dobimo zelo podobne rezultate kot z numeričnim modelom. Pri numeričnem modelu, kjer upoštevamo redukcijo materialnih karakteristik, dobimo skoraj enake rezultate kot pri Evrokodu [5] in Avstralskem standardu [9]. Prav tako pri numeričnem modelu s konstantnimi materialnimi karakteristikami dobimo zelo podobne rezultate, kot modela, ki so ju razvili Schaffer [10] ter White in Nordheim [10]. Za projektiranje lesenih konstrukcij je zato v primeru požara najbolj smotrna uporaba standarda Evrokod [5], saj je veliko bolj enostaven kot numerični model ter daje zelo podobne rezultate.

V diplomski nalogi smo obravnavali lesene stebre s kvadratnim prečnim prerezom, obremenjene z vseh štirih strani s standardno požarno obtežbo [11]. V primeru nestandardne požarne obtežbe in poljubne oblike prečnega prereza uporaba empiričnih modelov ni smiselna oziroma sploh ni mogoča. V takih primerih izberemo numerični model, saj nam le ta omogoča določitev razporeditve oglja v primeru nestandardnih in nesimetričnih požarov ter različnih oblik prereza. V takih primerih je uporaba numeričnih modelov veliko bolj zanesljiva in natančna.

**VIRI**

- [1] Društvo Cipra. 2014.  
<http://www.cipra.org/sl/trajnostna-gradnja/climalp-1/gradnja-sanacija/po-lesenih-poteh/les-kot-gradbeni-material> (Pridobljeno 6. 1. 2014.)
- [2] London fire brigade. 2014. The great fire of London. [www.london-fire.gov.uk/TheGreatFireOfLondon.asp](http://www.london-fire.gov.uk/TheGreatFireOfLondon.asp) (Pridobljeno 15. 1. 2014.)
- [3] New Covenant History is made: Fire melts steel. 2014.  
[http://rustylopez.typepad.com/newcovenant/2007/03/history\\_is\\_made.html](http://rustylopez.typepad.com/newcovenant/2007/03/history_is_made.html) (Pridobljeno 15. 1. 2014.)
- [4] Schnabl, S. 2013. Požarna odpornost lesenih elementov. Osebna komunikacija (15. 12. 2013.)
- [5] SIST EN 1995-1-1(2): 2005 Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij 1-1(2). del: Splošna pravila in pravila za stavbe, projektiranje požarnovarnih konstrukcij.
- [6] Schnabl, S. 2007. Mehanska in požarna analiza kompozitnih nosilcev. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Schnabl): 190 str.
- [7] Humar, M. 2007. Protipožarna zaščita lesa. [http://les.bf.uni-lj.si/fileadmin/datoteke\\_asistentov/mhumar/gradiva\\_vaje/Gorljivost.pdf](http://les.bf.uni-lj.si/fileadmin/datoteke_asistentov/mhumar/gradiva_vaje/Gorljivost.pdf) (Pridobljeno 22. 1. 2013.)
- [8] Janssens, M. L. 2004. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. Fire and Materials 18: 199-207.
- [9] Poon, L. 2003. Literature Review on the Contribution of fire resistant timber construction to heat release rate. Warrington fire research: 1-78.
- [10] White, R. H. 2000. Charring rate of composite timber products. Wood and fire safety: 353-363.
- [11] ISO 834 1999. Fire resistance test- Elements of building construction - Part 1. General Requirements. ISO 834-1. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [12] ASTM E-119-76. Standard methods of fire tests of building construction and materials. Annual book of ASTM standards, Part 18, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [13] Luikov, A.V., Mikhailov, Yu. A. 1966. Theory of energy and mass transfer. Oxford, Pergamon Press: 392 str.
- [14] Takeda, H. 2003. A model to predict fire resistance of wood-stud walls. Fire and Materials 27: 19-39.
- [15] Fredlund, B. 1993. Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire. Fire Safety Journal 20: 39-69.



- [16] Blatnik, Š. 2007. Temperaturna in vlažnostna analiza lesa. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Blatnik): 53 str.
- [17] Bratina, S., Planinc, I. 2009. Poenostavljene metode projektiranja požarnovarnih nosilcev. Gradbeni vestnik 58, 4:101-110.
- [18] SIST EN 1991-1-2: 2004. Vplivi na konstrukcije 1-2 del: Splošni vplivi–Vplivi na konstrukcije, izpostavljene požaru.
- [19] SIST EN 1990: 2004. Osnove projektiranja konstrukcij.
- [20] New world encyclopedia. 2014.  
<http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Column> (Pridobljeno 28. 1. 2014.)



## SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: EVROKOD 5 - METODA Z ZMANJŠANIM PREČNIM PREREZOM.

PRILOGA B: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: EVROKOD 5 - METODA Z ZMANJŠANIMI MATERIALNIMI KARAKTERISTIKAMI.

PRILOGA C: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: WHITE IN NORDHEIM.

PRILOGA D: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: AVSTRALSKI STANDARD.

PRILOGA E: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: SCHAFFER.

PRILOGA F: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL I.

PRILOGA G: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL II.

PRILOGA H: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL III.

PRILOGA I: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL IV.



**PRILOGA A: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: EVROKOD 5 - METODA Z ZMANJŠANIM PREČNIM PREREZOM.**

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_{c,0,k} = 1.25 \cdot 2.3 = 2.875 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot E_{0,05} = 1.25 \cdot 800 = 1000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{2.875}{1} = 2.875 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{1000}{1} = 1000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0.8 \frac{mm}{min} \cdot 30min = 24mm$$

$$d_{ef} = k_0 \cdot 7 + d_{char,n} = 1 \cdot 7mm + 24mm = 31mm$$

$$a_{ef} = b_{ef} = a - 2 \cdot d_{ef} = 20cm - 2 \cdot 3.1cm = 13.8cm$$

$$A_{ef} = a_{ef} \cdot b_{ef} = 13.8cm \cdot 13.8cm = 190.44cm^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = \frac{a_{ef} b_{ef}^3}{12} = \frac{a_{ef}^4}{12} = \frac{13.8^4}{12} = 3022.28cm^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{3022.28}{190.44}} = 3.98cm$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300cm}{3.98cm} = 75.38$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{75.38}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.875}{1000}} = 1.2871$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.2871 - 0.3) + 1.2871^2) = 1.427$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.427 + \sqrt{1.427^2 - 1.2871^2}} = 0.49011$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60kN}{190.44cm^2} \leq 2.875 \frac{kN}{cm^2} \cdot 0.49011$$

$$0.315 \frac{kN}{cm^2} \leq 1.41 \frac{kN}{cm^2}$$

**PRILOGA B: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: EVROKOD 5 - METODA Z ZMANJŠANIMI MATERIALNIMI  
KARAKTERISTIKAMI.**

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0.8 \frac{mm}{min} \cdot 30min = 24mm$$

$$a_{ef} = a - 2 \cdot d_{ef} = 20cm - 2 \cdot 2.4cm = 15.2cm$$

$$A_r = a_{ef} \cdot a_{ef} = 15.2cm \cdot 15.2cm = 231.04cm^2$$

$$p = 4 \cdot (a - d_{char,n}) = 4 \cdot (20cm - 2.4cm) = 70.4cm$$

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_{c,0,k} = 1.25 \cdot 2.3 = 2.875 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot E_{0,05} = 1.25 \cdot 800 = 1000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_r} = 1.0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{0.704m}{0.023104m^2} = 0.75623$$

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r} = 1.0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{0.704m}{0.023104m^2} = 0.9076$$

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 0.75623 \cdot \frac{2.875}{1} = 2.17 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 0.9076 \cdot \frac{1000}{1} = 907.6 \frac{kN}{cm^2}$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = \frac{a_{ef} b_{ef}^3}{12} = \frac{a_{ef}^4}{12} = \frac{15.2^4}{12} = 4448.29cm^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{4448.29}{231.04}} = 4.387cm$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300\text{cm}}{4.387\text{cm}} = 68.38$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{68.38}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.875}{1000}} = 1.167$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.167 - 0.3) + 1.167^2) = 1.268$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.268 + \sqrt{1.268^2 - 1.167^2}} = 0.5669$$

Kontrola:

$$E_{d,tfi} \leq R_{d,tfi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_r} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60\text{kN}}{231.04\text{cm}^2} \leq 2.17 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 0.5669$$

$$0.2597 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 1.23 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$



**PRILOGA C: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: WHITE IN NORDHEIM.**

$m = 0.612 \text{ mm/min}$  (glej tabela 2 [10])

$$t = mx_c^{1.23} \rightarrow x_c = \left(\frac{t}{m}\right)^{\frac{1}{1.23}} = \left(\frac{30 \text{ min} \cdot \text{mm}}{0.612 \text{ mmmin}}\right)^{\frac{1}{1.23}} = 23.67 \text{ mm}$$

$$a_{ef} = b_{ef} = a - x_c = 20 \text{ cm} - 2 \cdot 23.67 = 15.26 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = a_{ef} \cdot b_{ef} = 15.26 \text{ cm} \cdot 15.26 \text{ cm} = 232.86 \text{ cm}^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = \frac{a_{ef} b_{ef}^3}{12} = \frac{a_{ef}^4}{12} = \frac{15.26^4}{12} = 4524.94 \text{ cm}^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{4524.94}{232.86}} = 4.4 \text{ cm}$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300 \text{ cm}}{4.4 \text{ cm}} = 68.07$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{68.07}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.875}{1000}} = 1.16$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.16 - 0.3) + 1.16^2) = 1.26$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.26 + \sqrt{1.26^2 - 1.19^2}} = 0.57$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_r} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60 \text{ kN}}{232.86 \text{ cm}^2} \leq 0.57 \cdot 2.875 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$0.25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 1.64 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

**PRILOGA D: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: AVSTRALSKI STANDARD.**

$$\dot{c} = 0.4 + \left(\frac{280}{\rho}\right)^2 = 0.4 + \left(\frac{280}{460}\right)^2 = 0.7705 \frac{mm}{min}$$

$$d_c = \dot{c}t + 7.5 = 0.7705 \frac{mm}{min} \cdot 30min + 7.5 = 30.61mm = 3.061cm$$

$$a_{ef} = b_{ef} = a - 2 \cdot d_c = 20cm - 2 \cdot 3.061cm = 13.878cm$$

$$A_{ef} = a_{ef} \cdot b_{ef} = 13.878cm \cdot 13.878cm = 192.59cm^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = \frac{a_{ef}b_{ef}^3}{12} = \frac{a_{ef}^4}{12} = \frac{13.878^4}{12} = 3090.248cm^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{3090.248}{192.59}} = 4.0cm$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300cm}{4.0cm} = 75.0$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{75.0}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.875}{1000}} = 1.278$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.278 - 0.3) + 1.278^2) = 1.415$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.415 + \sqrt{1.415^2 - 1.278^2}} = 0.494$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60kN}{192.59cm^2} \leq 2.875 \frac{kN}{cm^2} \cdot 0.494$$

$$0.311 \frac{kN}{cm^2} \leq 1.42 \frac{kN}{cm^2}$$

**PRILOGA E: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: SCHAFFER.**

$$B = [(0.002269 + 0.0000457M)\rho + 0.331]$$

$$B = [(0.002269 + 0.0000457 \cdot 0) \cdot 460 + 0.331] = 1.37 \text{ mm/min}$$

$$x_i = t \cdot \frac{1}{B} = 30 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ mm}}{1.37 \cdot \text{min}} = 21.89 \text{ mm}$$

$$a_{ef} = b_{ef} = a - x_i = 20 \text{ cm} - 2 \cdot 2.189 = 15.63 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = a_{ef} \cdot b_{ef} = 15.63 \text{ cm} \cdot 15.63 \text{ cm} = 244.47 \text{ cm}^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = \frac{a_{ef} b_{ef}^3}{12} = \frac{a_{ef}^4}{12} = \frac{15.63^4}{12} = 4980.46 \text{ cm}^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{4980.46}{244.47}} = 4.51 \text{ cm}$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300 \text{ cm}}{5.51 \text{ cm}} = 66.46$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{66.468}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.875}{1000}} = 1.13$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.13 - 0.3) + 1.13^2) = 1.22$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.22 + \sqrt{1.22^2 - 1.13^2}} = 0.589$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60 \text{ kN}}{244.47 \text{ cm}^2} \leq 2.875 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 0.589$$

$$0.24 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 1.69 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

**PRILOGA F: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL I.**

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_{c,0,k} = 1.25 \cdot 2.3 = 2.875 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot E_{0,05} = 1.25 \cdot 800 = 1000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{2.875}{1} = 2.875 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{1000}{1} = 1000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$A_{ef} = 223.99 cm^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = 4069.85 cm^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{4069.85}{223.99}} = 4.26 cm$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300 cm}{4.26 cm} = 70.37$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{70.37}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.875}{1000}} = 1.201$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.201 - 0.3) + 1.201^2) = 1.31$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.31 + \sqrt{1.31^2 - 1.201^2}} = 0.5436$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60kN}{223.99cm^2} \leq 2.875 \frac{kN}{cm^2} \cdot 0.5436$$

$$0.268 \frac{kN}{cm^2} \leq 1.56 \frac{kN}{cm^2}$$



**PRILOGA G: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL II.**

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_{c,0,k} = 1.25 \cdot 2.3 = 2.875 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot E_{0,05} \cdot k = 1.25 \cdot 800 \cdot 0.7503 = 750.3 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{2.875}{1} = 2.875 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{750.3}{1} = 750.3 \frac{kN}{cm^2}$$

$$A_{ef} = 223.99 cm^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = 4069.85 cm^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{4069.85}{223.99}} = 4.26 cm$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300 cm}{4.26 cm} = 70.37$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{70.37}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.875}{750.3}} = 1.38$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.38 - 0.3) + 1.38^2) = 1.57$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.57 + \sqrt{1.57^2 - 1.38^2}} = 0.433$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60kN}{223.99cm^2} \leq 2.875 \frac{kN}{cm^2} \cdot 0.433$$

$$0.268 \frac{kN}{cm^2} \leq 1.24 \frac{kN}{cm^2}$$

**PRILOGA H: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL III.**

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_{c,0,k} \cdot k_{\theta} = 1.25 \cdot 2.3 \cdot 0.711 = 2.04 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot E_{0,05} = 1.25 \cdot 800 = 1000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{2.04}{1} = 2.04 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{1000}{1} = 1000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$A_{ef} = 223.99 cm^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = 4069.85 cm^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{4069.85}{223.99}} = 4.26 cm$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300 cm}{4.26 cm} = 70.37$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{70.37}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.04}{1000}} = 1.01$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.01 - 0.3) + 1.01^2) = 1.08$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.08 + \sqrt{1.08^2 - 1.01^2}} = 0.678$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60kN}{223.99cm^2} \leq 2.04 \frac{kN}{cm^2} \cdot 0.678$$

$$0.268 \frac{kN}{cm^2} \leq 1.38 \frac{kN}{cm^2}$$

**PRILOGA I: PEŠ IZRAČUN NA PRIMERU IGLAVCEV (C30), ZA ČAS TRAJANJA  
POŽARA T = 30 MIN: NUMERIČNI MODEL IV.**

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_{c,0,k} \cdot k_{\theta} = 1.25 \cdot 2.3 \cdot 0.711 = 2.04 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot E_{0,05} \cdot k = 1.25 \cdot 800 \cdot 0.7503 = 750.3 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{2.04}{1} = 2.04 \frac{kN}{cm^2}$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot \frac{750.3}{1} = 750.3 \frac{kN}{cm^2}$$

$$A_{ef} = 223.99 cm^2$$

$$I_{ef} = I_{ef,y} = I_{ef,z} = 4069.85 cm^4$$

$$i_{ef} = i_{ef,y} = i_{ef,z} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{ef}}} = \sqrt{\frac{4069.85}{223.99}} = 4.26 cm$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ef,y} = \lambda_{ef,z} = \frac{l_u}{i_{ef}} = \frac{300 cm}{4.26 cm} = 70.37$$

$$\lambda_{rel,ef} = \lambda_{rel,ef,y} = \lambda_{rel,ef,z} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{20}}{S_{20}}} = \frac{70.37}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{2.04}{750.3}} = 1.01$$

$$k = k_y = k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0.3) + \lambda_{rel,ef}^2) =$$

$$= 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.01 - 0.3) + 1.01^2) = 1.08$$

$$k_c = k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,ef,y}^2}} = \frac{1}{1.08 + \sqrt{1.08^2 - 1.01^2}} = 0.67$$

Kontrola:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

$$\frac{N_{Ed,fi}}{A_{ef}} \leq f_{c,d,fi} \cdot k_c$$

$$\frac{60kN}{223.99cm^2} \leq 2.04 \frac{kN}{cm^2} \cdot 0.67$$

$$0.268 \frac{kN}{cm^2} \leq 1.15 \frac{kN}{cm^2}$$