

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



SAMIR HOZANOVIĆ

**UPORABA METODE ZMANJŠANEGA PREČNEGA
PREREZA ZA DOLOČITEV MEHANSKE
ODPORNOSTI LESENEGA NOSILCA V POGOJIH
NARAVNEGA POŽARA**

MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE
STOPNJE GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2022

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Kandidat/-ka:

SAMIR HOZANOVIĆ

**UPORABA METODE ZMANJŠANEGA PREČNEGA
PREREZA ZA DOLOČITEV MEHANSKE
ODPORNOSTI LESENEGA NOSILCA V POGOJIH
NARAVNEGA POŽARA**

Magistrsko delo št.:

**APPLYING THE REDUCED CROSS-SECTION
METHOD TO DETERMINE THE MECHANICAL
RESISTANCE OF A TIMBER BEAM UNDER
NATURAL FIRE EXPOSURE**

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

doc. dr. Robert Pečenko

Somentor/-ica:

prof. dr. Tomaž Hozjan

doc. dr. Sabina Huč

Član komisije:

Predsednik komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

ZAHVALA

Za vso strokovno pomoč, vložen čas in napotke pri izdelavi magistrskega dela se zahvaljujem mentorju doc. dr. Robertu Pečenku, ter somentorjema prof. dr. Tomažu Hozjanu in doc. dr. Sabini Huč.

Posebno bi se rad zahvalil tudi moji družini, ki mi je skozi celoten študij stala ob strani. Zahvaljujem se vam za vso spodbudo in podporo, brez tega ta naloga ne bi bila možna.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	614.841.25:624.011.1(043.3)
Avtor:	Samir Hozanović, dipl. inž. grad. (VS)
Mentor:	doc. dr. Robert Pečenko, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	prof. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	doc. dr. Sabina Huč, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Uporaba metode zmanjšane prečne prereza za določitev mehanske odpornosti lesenega nosilca v pogojih naravnega požara
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	52 str., 8 pregl., 19 sl., 22 graf., 79 en., 2 pril., 18 virov
Ključne besede:	naravni požar, lesen nosilec, zogleneli sloj, nenosilni sloj, temperaturna analiza, toplotno-vlažnostna analiza, mehanska analiza

Evropski standard SIST EN 1995-1-2, za določanje požarne odpornosti lesenih elementov podaja metodo zmanjšane prečne prereza, pri kateri se požarna odpornost določa na osnovi efektivnega prečne prereza. Ta je rezultat zmanjšanja začetnih dimenzij prečne prereza za debelino zoglenelega sloja d_{char} in debelino nenosilnega sloja d_0 . Pri tem velja, da je debelina nenosilnega sloja določena za standardno požarno krivuljo ISO 834 in znaša 7 mm. Ta vrednost se pogosto uporablja tudi pri analizi požarne odpornosti lesenih elementov v primeru nestandardnih (naravnih) krivulj, ki pa, kakor kažejo zadnje raziskave, ni ustrezna, saj daje rezultate na nevarni strani. Glavni namen naloge je določitev vrednosti debeline nenosilnega sloja v primeru naravnega požara, kar do sedaj še ni bilo izvedeno. V ta namen smo izvedli napredne računske analize, na podlagi katerih smo izračunali debelino nenosilnega sloja. V okviru magistrskega dela smo najprej predstavili uporabljene napredne računske modele, vhodne podatke, potek izračunov ter nazadnje še rezultate. Analiziran je bil lesen nosilec, ki smo ga izpostavili 42 naravnim požarnim krivuljam. Analize so pokazale, da je za vseh 42 požarnih krivulj vrednost debeline nenosilnega sloja d_0 večja od 7 mm. Poleg tega nas je zanimalo, ali obstaja odvisnost med debelino nenosilnega sloja in parametri naravne požarne krivulje. Kot se je izkazalo, debelino nenosilnega sloja najbolj natančno opišemo v odvisnosti od stopnje ohlajanja, kakor tudi v odvisnosti od linearne kombinacije naslednjih parametrov: stopnje segrevanja, stopnje ohlajanja, maksimalne dosežene temperature plinov v prostoru ter časa, ko temperatura v prostoru preseže 220 °C.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 614.841.25:624.011.1(043.3)
Author: Samir Hozanović, dipl. inž. grad. (VS)
Supervisor: Assist. Prof. Robert Pečenko, Ph.D.
Co-supervisor: Prof. Tomaž Hozjan, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Prof. Sabina Huč, Ph.D.
Title: Applying the reduced cross-section method to determine the mechanical resistance of a timber beam under natural fire exposure
Document type: Master thesis
Notes: 52 p., 8 tab., 19 fig., 22 graph., 79 eq., 2 ann., 18 ref.
Keywords: natural fire, timber beam, charring depth, zero-strength layer, temperature analysis, hygro-thermal analysis, mechanical analysis

The European standard EN 1995-1-2 specifies the method of reduced cross-section for determining the fire resistance of timber elements. This is determined based on the effective cross-section, which is the reduction of the initial dimensions of the cross-section by the char layer depth d_{char} and zero-strength layer depth d_0 . For the standard fire curve ISO 834 the zero-strength layer depth is 7 mm. This value is also often used in the case of non-standard (natural) fire curves, which, however, as recent studies show, is not appropriate, as fire resistance of timber elements can be overestimated. Thus, the main purpose of the thesis was to determine the zero-strength layer depth in the case of a natural fire. For this purpose, advanced computational analyses were performed, on the basis of which the zero-strength layer depth was determined. In the thesis, first the advanced calculation models are presented then the input data, the calculation procedure and finally the results are given. The analyzed timber beam was exposed to 42 natural fire curves. Results showed that for all 42 fire curves the value of the d_0 is bigger than 7 mm. In addition, we also investigated the relations between the zero-strength layer depth and the natural fire curve parameters. As it turned out, the zero-strength layer depth is most accurately described with the cooling rate, as well as linear combination of the following parameters: heating rate, cooling rate, maximum achieved gas temperature in compartment and time when the temperature in compartment exceeds 220 °C.

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA	I
ZAHVALA	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO.....	V
KAZALO SLIK.....	VII
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO GRAFIKONOV.....	IX
1 UVOD	1
2 OPIS MODELOV	4
2.1 Model naravnega požara – program OZone	4
2.1.1 Dvo-conski model.....	5
2.1.2 Eno-conski model	8
2.1.3 Model prenosa toplote po obodu požarnega sektorja in povezava z eno-conskim modelom	9
2.1.4 Model zgorevanja.....	11
2.1.5 Opis vhodnih parametrov programa OZone	13
2.2 Toplotno-vlažnostni model.....	17
2.3 Mehanski model	18
2.3.1 Napredni mehanski model	19
2.3.2 Poenostavljena računska metoda	20
2.4 Osnovni pojmi linearne regresije več spremenljivk.....	22
3 IZRAČUN NENOSILNEGA SLOJA, TER VHODNI PODATKI ZA ANALIZE.....	25
3.1 Določitev krivulj naravnega požara.....	25
3.1.1 Uporabljeni vhodni podatki in pregled scenarijev	25
3.1.2 Parametrična študija velikosti in pozicije odprtin.....	30
3.2 Vhodni podatki za toplotno-vlažnostno analizo	34
3.3 Napredna mehanska analiza	35
3.4 Določitev debeline nenosilnega sloja s poenostavljeno mehansko analizo	36
4 PREDSTAVITEV GRAFOV RAZTROSA ZA OSNOVNE PARAMETRE IN KARAKTERISTIKE NARAVNE KRIVULJE	39
4.1 Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od osnovnih vhodnih parametrov ...	40
4.2 Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od osnovnih karakteristik ki opisujejo krivuljo naravnega požara.....	41
5 REGRESIJSKI MODELI Z ENO ALI VEČ SPREMENLJIVKAMI.....	45
5.1 Regresijski modeli z eno spremenljivko	45
5.2 Regresijski modeli z več spremenljivkami	47
6 ZAKLJUČEK	50
7 VIRI.....	51

A	PRILOGA-A.....	A-1
B	PRILOGA-B.....	B-1

KAZALO SLIK

Slika 1: Zoglenel lesen element [3]	3
Slika 2: Shematski prikaz poteka metode ter uporabljenih modelov	4
Slika 3: Shematski prikaz dvo-conskega modela [9].....	5
Slika 4: Shematski prikaz eno-conskega modela [9]	8
Slika 5: Shematski prikaz enodimenzionalnih končnih elementov oboda [9]	10
Slika 6: Prikaz izbranega modela izgorevanja [9]	13
Slika 7: Shematski prikaz različnih debelin lesenega prereza izpostavljenega požaru [4]	22
Slika 8: Prikaz obravnavanega prostora.....	25
Slika 9: Vnos dimenzij sektorja v program OZone [5]	26
Slika 10: Vnos toplotnih lastnosti oboda v program OZone [5]	27
Slika 11: Vnos osnovnih karakteristik požara v program OZone [5].....	28
Slika 12: Shematski prikaz pozicij odprtín	32
Slika 13: Prerez lesenega nosilca z dimenzijami.....	34
Slika 14: Mreža končnih elementov lesenega nosilca za toplotno-vlažnostno analizo	35
Slika 15: Obravnavan nosilec [4].....	35
Slika 16: Poenostavljena računska metoda primera A01	36
Slika 17: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$, kR , kP , ter nt , 220.....	48
Slika 18: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$, kR , ter kP	48
Slika 19: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$ ter kP	49

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Karakteristična gostota požarne obtežbe glede na namembnost [1]	14
Preglednica 2: Določanje RHR_f in $t\alpha$ za različne namembnosti prostorov [1]	15
Preglednica 3: Vhodni podatki temperaturne analize z delnimi rezultati	28
Preglednica 4: Izračun širine odprtine glede na izbrano višino odprtine za parametrično študijo scenarija A02	31
Preglednica 5: Izračun širine odprtine glede na izbrano višino odprtine za parametrično študijo scenarija A06	31
Preglednica 6: Izračunan $d_{char, enoten}$, izbrani rezultati toplotno-vlažnostne analize in rezultati mehanske analize za vse scenarije	37
Preglednica 7: Nabor vhodnih podatkov za statistično analizo rezultatov	39
Preglednica 8: Zbrani R^2 za regresije z eno in prilagojen R^2 za prvo regresijo z več spremenljivkami	49

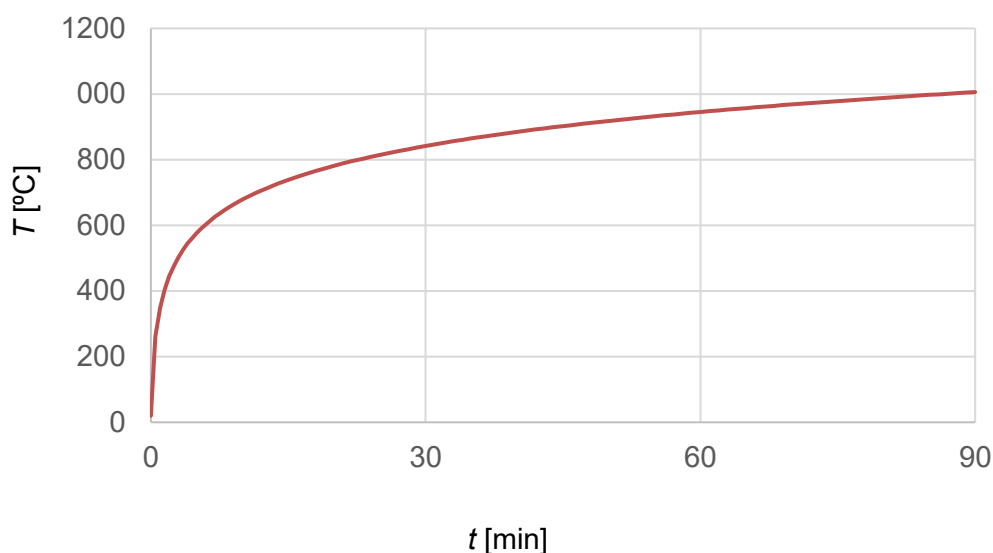
KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Standardna požarna krivulja [1].....	1
Grafikon 2: Naravna in parametrična požarna krivulja pri enakih vhodnih podatkih.....	2
Grafikon 3: Različne faze pri sproščanju toplote v prostor [2].....	16
Grafikon 4: Različne faze pri sproščanju toplote za naravno požarno krivuljo [11].....	16
Grafikon 5: Konstitucijski zakon lesa pri povišanih temperaturah [14].....	20
Grafikon 6: Grafični pregled naravnih požarnih krivulj.....	30
Grafikon 7: Prikaz vpliva višine parapeta na razvoj temperatur za scenarij A02 in višino 3 m.....	32
Grafikon 8: Prikaz vpliva spreminjanja dimenzij odprtin za scenarij A02.....	33
Grafikon 9: Prikaz vpliva spreminjanja dimenzij odprtin za scenarij A06.....	33
Grafikon 10: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od O	40
Grafikon 11: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od b	41
Grafikon 12: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od $q_{f,d}$	41
Grafikon 13: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od $T_{g,max}$	42
Grafikon 14: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od $n_{t,220}$	42
Grafikon 15: Aproksimacija stopnje ohlajanja za scenarij A01.....	43
Grafikon 16: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od k_P	43
Grafikon 17: Aproksimacija stopnje segrevanja za scenarij A01.....	44
Grafikon 18: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od k_R	44
Grafikon 19: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$	45
Grafikon 20: Povezava med d_0 in stopnjo segrevanja.....	46
Grafikon 21: Povezava med d_0 in stopnjo ohlajanja.....	46
Grafikon 22: Povezava med d_0 in $n_{t,220}$	47

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Mehanska odpornost in stabilnost objektov je ena izmed bistvenih zahtev gradbene zakonodaje, pri čemer jo moramo zagotoviti tudi v požarnem projektnem stanju. Pri določanju mehanske odpornosti in stabilnosti objektov v požarnem projektnem stanju, je najprej potrebno določiti nastanek in potek požara. To predstavlja kompleksen in nepredvidljiv pojav, saj sta nastanek in potek požara fizikalno in matematično težko opisljiva fenomena. Zato se v praksi pogosto uporabljajo t.i. požarne krivulje, ki določajo razvoj temperature plinov v odvisnosti od časa v prostoru. Najbolj znana požarna krivulja je standardna požarna krivulja ISO 834. Gre za idealizirano krivuljo, ki vključuje zgolj fazo segrevanja in jo uporabljamo tudi za določitev požarne odpornosti gradbenih elementov s testi v požarnem laboratoriju. Prikažemo jo na spodnjem grafu (Grafikon 1) [1].

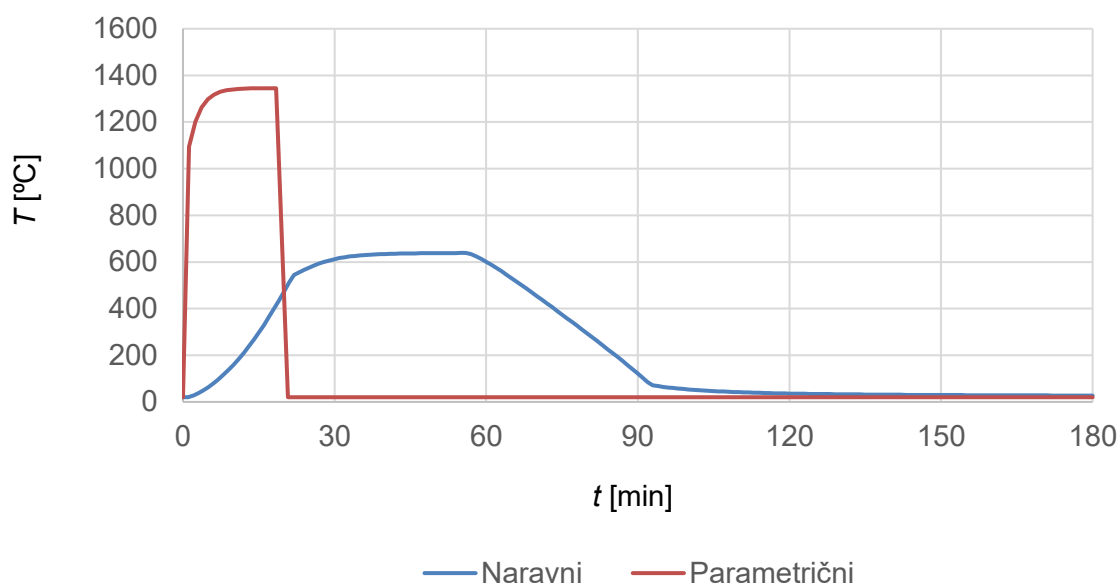


Grafikon 1: Standardna požarna krivulja [1]

Kot bolj realen opis požara nam SIST EN 1991-1-2 [1] podaja parametrično požarno krivuljo, ki upošteva določene lastnosti požarnega sektorja, kot so: gostota požarne obtežbe, geometrija prostora, lastnosti oboda, velikost odprtin ipd. Vsebuje tudi fazo ohlajanja in na ta način realneje opiše potek požara. Toda kljub vsemu uporaba parametrične krivulje vsebuje določene omejitve. Na primer, maksimalna površina požarnega sektorja ne sme preseči 500 m², maksimalna višina prostora ne sme biti večja od 4 m. Poleg tega parametrična požarna krivulja velja za pretežno celulozen tip goriva [2].

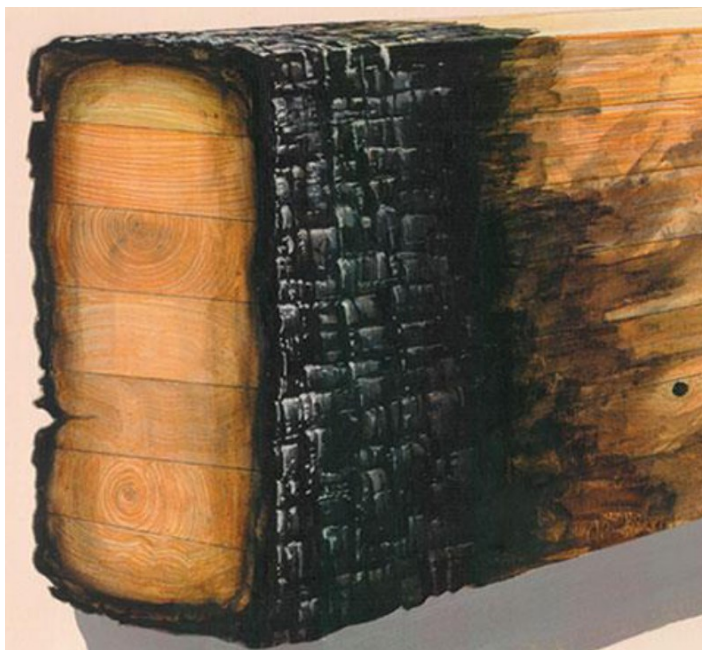
Te omejitve parametrične požarne krivulje lahko odpravimo z uporabo bodisi conskih modelov bodisi naprednih računskih modelov (CFD modeli), pri čemer so slednji preveč zahtevni za splošno uporabo. Conski modeli aproksimirajo potek naravnega požara, pri čemer upoštevajo

osnovno energijsko ter masno ravnovesje v požarnem prostoru. Hkrati pa upoštevajo tudi osnovne požarne karakteristike, kot sta maksimalna hitrost sproščanja toplote, ter hitrost razvoja požara tj. čas, v katerem dosežemo 1 MW sproščene toplote. Ker conski modeli temeljijo na fizikalno bolj natančnem opisu razvoja požara, se lahko parametrična požarna krivulja in požarna krivulja določena s conskim modelom precej razlikujeta, tudi ko izenačimo vhodne parametre. Tak primer vidimo na spodnjem grafu (Grafikon 2), kjer primerjamo naravno in parametrično požarno krivuljo z enakimi vhodnimi podatki. V sklopu te naloge smo za določitev poteka temperatur po prostoru uporabili conski model OZone [2].



Grafikon 2: Naravna in parametrična požarna krivulja pri enakih vhodnih podatkih

Ko je potek požara znan moramo določiti potek temperatur ter razvoj oglenenja po lesenem prečnem prerezu. Pri lesu je ta proces dokaj kompleksen. Če njegovo obnašanje povzamemo, les ogleni pri približno 300 °C (Slika 1), ta proces se začne v fazi segrevanja in sega tudi v fazo ohlajanja požarne krivulje [3].



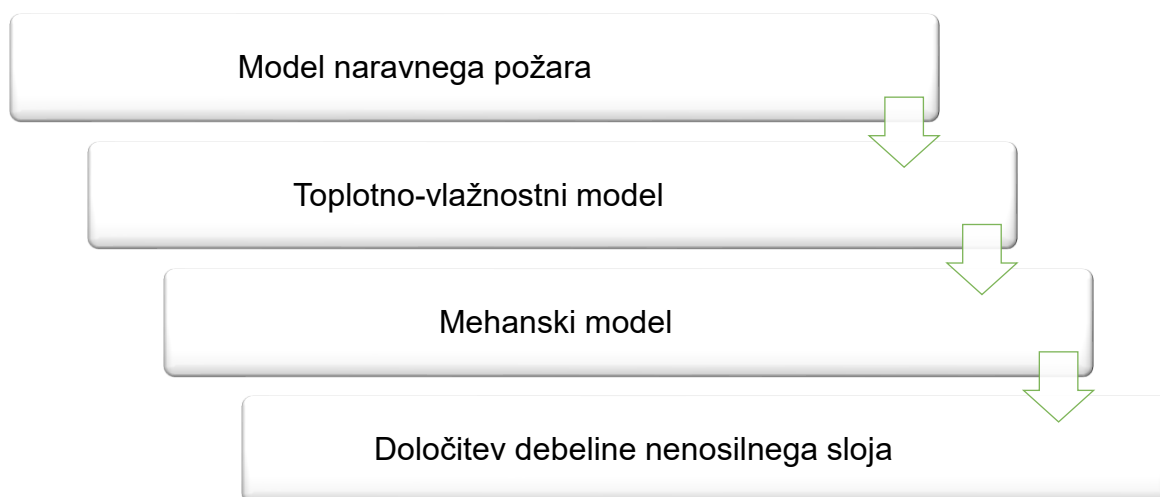
Slika 1: Zoglenel lesen element [3]

Ko poznamo potek temperatur in oglenenja po prečnem prerezu lesenega elementa, je naslednji korak določitev požarne odpornosti elementa. Običajna projektantska praksa za določanje požarne odpornosti lesenih elementov uporablja metodo zmanjšane prečnega prereza, podano v standardu SIST EN 1995-1-2. Pri tej metodi se požarna odpornost elementa določa na osnovi efektivnega prečnega prereza. Slednji je rezultat reduciranja dimenzij začetnega prereza za debelino zoglenega sloja d_{char} in debelino nenosilnega sloja d_0 . Celoten postopek je v standardu natančno pojasnjen za standardno požarno krivuljo ISO 834, pri čemer nenosilni sloj d_0 znaša 7 mm. Pri nestandardnih požarih se običajno uporablja ista vrednost za debelino nenosilnega sloja kljub temu, da je le-ta določena za standardno požarno krivuljo. Študije za določanje debeline nenosilnega sloja v primeru parametričnega požara že obstajajo [4] in kažejo, da je vrednost nenosilnega sloja večja od 7 mm. Pri naravnih požarih določenih s conskimi modeli, pa je debelina nenosilnega sloja še vedno neraziskana.

Zato je cilj naloge, da za naravne požarne krivulje določene s conskim modelom izračunamo debeline nenosilnega sloja. Pri tem bomo požarno odpornost lesenega elementa določili s pomočjo naprednih računskih orodij. Omenimo še, da je požarno odpornost lesenih elementov možno določiti tudi z eksperimenti v požarnem laboratoriju. Eksperimentalne raziskave sicer predstavljajo dolgotrajen proces ter tudi precejšen finančni zalogaj, saj je za ustrezno verifikacijo rezultatov potrebno opraviti veliko število eksperimentov. Debelino nenosilnega sloja pa izračunamo na podlagi numerično določene požarne odpornosti lesenega elementa z uporabo poenostavljene računske metode zmanjšane prečnega prereza.

2 OPIS MODELOV

V tem poglavju podrobneje prikazujemo uporabljene računske in numerične modele (Slika 2), ki jih bomo uporabili za potrebe magistrske naloge. Najprej se osredotočamo na določitev poteka temperatur v požarnem sektorju, za kar uporabimo program OZone v2.2 (v nadaljevanju OZone) [5], ki predstavlja poenostavljen model naravnega požara. Sledi opis toplotno-vlažnostnega modela, ki je potreben za določitev poteka temperatur po lesenem elementu [6]. Na koncu sta opisana še napredni mehanski model in metoda zmanjšane prečnega prereza, ki sta ključna pri zadnjem koraku naše analize – določitvi debeline nenosilnega sloja v primeru naravne požarne izpostavljenosti. Podrobnejši opis naprednega mehanskega modela je podan v [7].



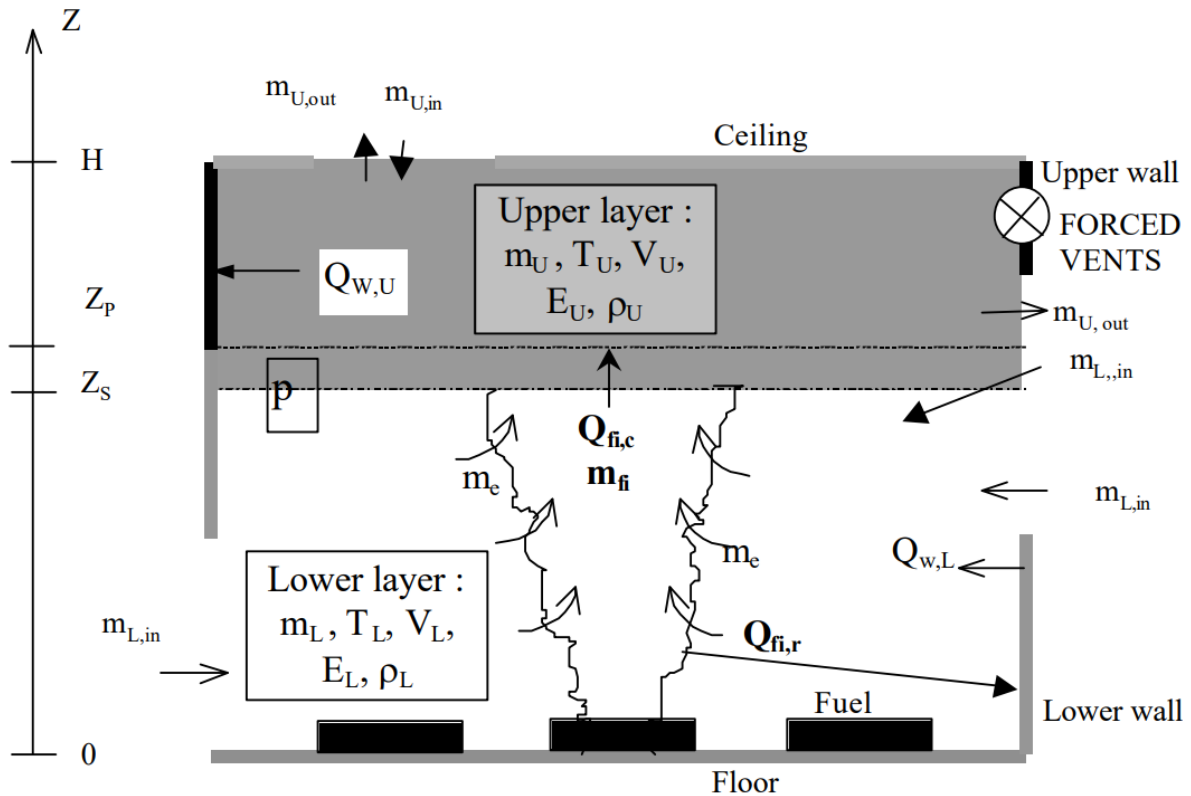
Slika 2: Shematski prikaz poteka metode ter uporabljenih modelov

2.1 Model naravnega požara – program OZone

V tem podpoglavju se osredotočamo na predstavitev modela naravnega požara. Uporabljeno je programsko orodje OZone [5], ki nam omogoča uporabo conskih modelov za določitev razvoja požara v prostoru. Za conske modele je značilno, da prostor razdelimo na območja, cone, kjer vladajo konstantne razmere npr. temperatura v posamezni coni je konstantna se pa spreminja s časom. Podobno velja za ostale parametre, ki jih predstavimo v nadaljevanju. Program omogoča rabo eno in dvo-conskega modela, ter kombinacije dvo- in eno-conskega modela, ob izpolnitvi določenih pogojev. Poleg modeliranja polno razvitih požarov, program OZone omogoča tudi modeliranje lokaliziranih požarov [8]. V našem primeru za izračun vseh požarnih scenarijev uporabimo eno-conski model. Kljub vsemu zaradi splošnosti v nadaljevanju na kratko predstavimo najprej dvo-conski model in nato še eno-conski model, ki je vgrajen v OZone [9].

2.1.1 Dvo-conski model

Osnova dvo-conskega modela je 11 spremenljivk, povezanih s sedmimi veznimi in štirimi diferencialnimi enačbami, ki opisujejo masno in energijsko ravnovesje v posamezni coni. Osnovne diferencialne enačbe, ki opisujejo masno in energijsko ravnovesje, program reši s časovno integracijo le teh. Na spodnji sliki (Slika 3) je shematsko prikazan dvo-conski model ter spremenljivke modela [9].



Slika 3: Shematski prikaz dvo-conskega modela [9]

Sistem sedmih veznih enačb modela, ki povezujejo osnovne spremenljivke med seboj je naslednji [9]:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (2.1)$$

$$E_i = c_v(T) m_i T_i \quad (2.2)$$

$$p = \rho_i R T_i \quad (2.3)$$

$$V = V_U + V_L \quad (2.4)$$

$$R = c_p(T_i) - c_v(T_i) \quad (2.5)$$

$$\gamma(T_i) = \frac{c_p(T_i)}{c_v(T_i)} \quad (2.6)$$

$$c_p(T) = 0,187T + 952 \quad (2.7)$$

Pri čemer so:

m_U	masa plinov v zgornjem sloju
m_L	masa plinov v spodnjem sloju
T_U	temperatura plinov v zgornjem sloju
T_L	temperatura plinov v spodnjem sloju
V_U	prostornina plinov v zgornjem sloju
V_L	prostornina plinov v spodnjem sloju
E_U	notranja energija plinov v zgornjem sloju
E_L	notranja energija plinov v spodnjem sloju
ρ_U	gostota plinov v zgornjem sloju
ρ_L	gostota plinov v spodnjem sloju
p	absolutni tlak v prostoru
R	univerzalna plinska konstanta

Z enačbo (2.1) izračunamo gostoto plinov v posameznem sloju, enačba (2.2) podaja izračun notranje energije plinov za posamezni sloj, ki je enaka produktu specifične toplote plinov v prostoru (pri nespremenjeni prostornini) $c_v(T)$, ter njihovi masi in temperaturi. Z enačbo (2.3) izračunamo absoluten pritisk v prostoru, z enačbo (2.4) pa skupen volumen prostora. Enačbi (2.5) in (2.6) podajata, preko kvocienta specifičnih toplot $\gamma(T_i)$ pri nespremenjenem tlaku in volumnu, povezavo med splošno plinsko konstanto in specifičnima toplotama, enačba (2.7) pa podaja povezavo med specifično toploto plinov pri nespremenjenem tlaku, ki je označena z izrazom $c_p(T)$, in njihovo temperaturo [9].

Masa plinov v coni je odvisna od mase plinov, ki jih generira požar, ter mase plinov, ki vstopijo ali izstopijo iz cone. Matematično je to opisano z diferencialnima enačbama za masno ravnovesje. Za zgornjo cono je to enačba (2.8), za spodnjo pa enačba (2.9). Masno ravnovesje za spodnjo cono označimo z $\dot{m}_L$, za zgornjo pa z $\dot{m}_U$ [9].

$$\begin{aligned} \dot{m}_U = & \dot{m}_{U,VV,out} + \dot{m}_{U,HV,in} + \dot{m}_{U,HV,out} \\ & + \dot{m}_{U,FV,in} + \dot{m}_{U,FV,out} + \dot{m}_e + \dot{m}_{fi} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_L = & \dot{m}_{U,VV,in} + \dot{m}_{L,VV,in} + \dot{m}_{L,VV,out} + \dot{m}_{L,HV,in} \\ & + \dot{m}_{L,HV,out} + \dot{m}_{L,FV,in} + \dot{m}_{L,FV,out} - \dot{m}_e \end{aligned} \quad (2.9)$$

Pri čemer so $\dot{m}_{U,VV,out}$, $\dot{m}_{U,VV,in}$, $\dot{m}_{L,VV,out}$ in $\dot{m}_{L,VV,in}$ mase plinov, ki vstopajo in izstopajo skozi vertikalne odprtine v posamezno cono. $\dot{m}_{U,HV,out}$, $\dot{m}_{U,HV,in}$, $\dot{m}_{L,HV,out}$ in $\dot{m}_{L,HV,in}$ so mase plinov, ki vstopajo in izstopajo skozi horizontalne odprtine v posamezno cono. $\dot{m}_{U,FV,out}$, $\dot{m}_{U,FV,in}$, $\dot{m}_{L,FV,out}$ in $\dot{m}_{L,FV,in}$ pa so mase plinov, ki vstopajo in izstopajo skozi prisilno zračenje v

posamezno cono. $\dot{m}_e$ je prehajanje mase med conama, $\dot{m}_{fi}$ pa stopnja pirolize oz. sproščanje plinov med gorenjem [9].

Enačbi za energijsko ravnovesje za zgornjo cono (2.10) in spodnjo cono (2.11) sta prikazani spodaj, pri čemer $\dot{q}_U$ in $\dot{q}_L$ predstavljata energijsko ravnovesje posameznega sloja. Skladno s tema dvema enačbama mora vedno obstajati ravnovesje med proizvedeno in porabljeno energijo v prostoru [9].

$$\begin{aligned} \dot{q}_U = & \dot{q}_{U,rad} + \dot{q}_{U,wall} + \dot{q}_{U,VV,out} + \dot{q}_{U,HV,in} + \dot{q}_{U,HV,out} \\ & + \dot{q}_{U,FV,in} + \dot{q}_{U,FV,out} + c_p(T_L)\dot{m}_{ent}T_L + 0,7RHR \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_L = & \dot{q}_{L,rad} + \dot{q}_{L,wall} + \dot{q}_{L,VV,in} + \dot{q}_{L,VV,out} + \dot{q}_{L,VV,out} \\ & + \dot{q}_{L,HV,in} + \dot{q}_{L,HV,out} + \dot{q}_{L,FV,in} + \dot{q}_{L,FV,out} - \dot{q}_{ent} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Kjer so $\dot{q}_{U,VV,out}$, $\dot{q}_{U,VV,in}$, $\dot{q}_{L,VV,out}$ in $\dot{q}_{L,VV,in}$ oznake za energijo, ki vstopa in izstopa skozi vertikalne odprtine, za posamezno cono. $\dot{q}_{U,HV,in}$, $\dot{q}_{U,HV,out}$, $\dot{q}_{L,HV,in}$ in $\dot{q}_{L,HV,out}$ so oznake za energijo, ki vstopa in izstopa skozi horizontalne odprtine, za posamezno cono. $\dot{q}_{U,FV,in}$, $\dot{q}_{U,FV,out}$, $\dot{q}_{L,FV,in}$ in $\dot{q}_{L,FV,out}$ pa so oznake za energijo, ki vstopa in izstopa skozi prisilno ventilacijo, za posamezno cono. Z $\dot{q}_{ent}$ označuje energijo hladnega zraka, ki vstopa v prostor, $\dot{q}_{U,rad}$ in $\dot{q}_{L,rad}$ pa označujeta izgube zaradi radiacije. RHR je hitrost sproščanja toplote [9].

Osnoven sistem enačb dvo-conskega modela opišejo spodnje 4 navadne diferencialne enačbe, ki izhajajo iz upoštevanja izbranih štirih neznank problema, ki jih opisujejo enačbe (2.8) – (2.11). Enačba (2.12) poda razliko v tlaku med trenutnim in začetnim časom, označeno z Δp . Enačbi (2.13) in (2.14) pa podajata časovno spremembo temperatur obeh con s časom, ki ju označimo s $\dot{T}_U$ za zgornjo in $\dot{T}_L$ za spodnjo cono. Zadnja enačba (2.15) pa nam podaja višino ploskve, ki deli obe coni in jo označujemo z $\dot{Z}_S$. Osnovne neznanke dobimo tako, da sistem enačb (2.12) – (2.15) rešimo s časovno integracijo diferencialnih enačb prvega reda [9].

$$\Delta p = \frac{(\gamma - 1)\dot{q}}{V} \quad (2.12)$$

$$\dot{T}_U = \frac{1}{c_p(T_U)\rho_U V_U} (\dot{q}_U - c_p(T_U)\dot{m}_U T_U + V_U \Delta p) \quad (2.13)$$

$$\dot{T}_L = \frac{1}{c_p(T_L)\rho_L V_L} (\dot{q}_L - c_p(T_L)\dot{m}_L T_L + V_L \Delta p) \quad (2.14)$$

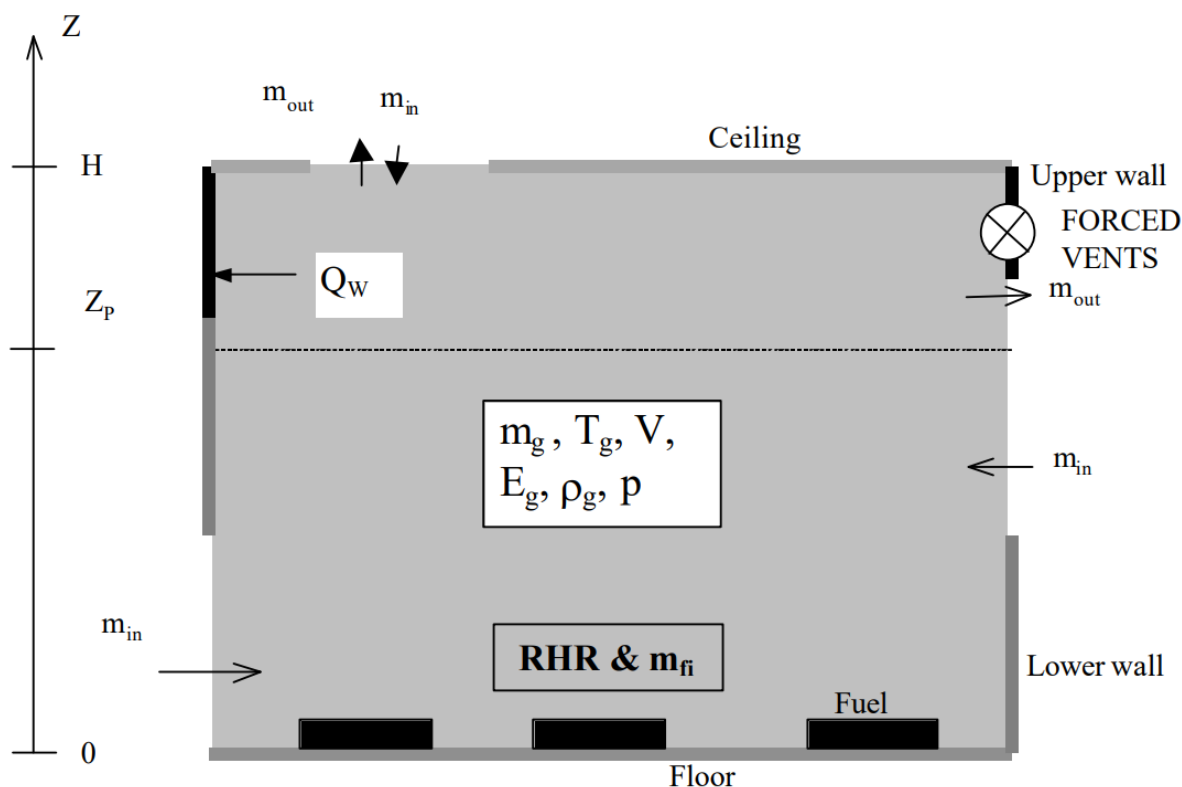
$$\dot{Z}_S = \frac{1}{\gamma(T_L)pA_f} ((\gamma(T_L) - 1)\dot{q} - V_L \Delta p) \quad (2.15)$$

Kjer je:

A_f površina tal prostora

2.1.2 Eno-conski model

V primeru eno-conskega modela se določitev razvoja naravnega požara nekoliko poenostavi. Namreč, število spremenljivk za eno cono se zmanjša na 6, ki so opisane s štirimi veznimi enačbami in dvema diferencialnima enačbama prvega reda. Eno-conski model ter spremenljivke modela so shematsko prikazane na spodnji sliki (Slika 4) [9].



Slika 4: Shematski prikaz eno-conskega modela [9]

Sistem štirih veznih enačb modela, ki povezujejo osnovne spremenljivke modela med seboj je naslednji [9]:

$$\rho_g = \frac{m_g}{V} \quad (2.16)$$

$$E_g = c_v(T_g)m_gT_g \quad (2.17)$$

$$p = \rho_gRT_g \quad (2.18)$$

$$V = hab \quad (2.19)$$

Pri čemer so:

- m_g masa plinov v prostoru
- T_g temperatura plinov v prostoru
- V volumen prostora
- E_g notranja energija plinov v prostoru

p tlak v prostoru

ρ_g gostota plinov v prostoru

Enačba (2.16) podaja izračun gostote plina ρ_g . Enačba (2.17) je potrebna za izračun notranje energije plinov E_g . Enačba (2.18) podaja račun tlaka v prostoru p , z enačbo (2.19) pa na enostaven način izračunamo prostornino V za prostor oblike kvadra, pri čemer sta a in b stranici, h pa višina [9].

Masno ravnovesje plinov v prostoru $\dot{m}_g$ izračunamo z enačbo (2.20) [9].

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{out} + \dot{m}_{fi} \quad (2.20)$$

Kjer sta $\dot{m}_{in}$ vstopajoča in $\dot{m}_{out}$ izstopajoča masa plinov, $\dot{m}_{fi}$ pa stopnja pirolize [9].

Energijsko ravnovesje v prostoru $\dot{q}_U$ določimo z enačbo (2.21) [9].

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{wall} + c_p(T_g)\dot{m}_{out}T_g + c_p(T_{out})\dot{m}_{in}T_{out} + RHR \quad (2.21)$$

Kjer sta spremenljivki $\dot{q}_{rad}$ energijska izguba zaradi radiacije in $\dot{q}_{wall}$ energijske izguba zaradi segrevanja oboda. T_{out} je ambientalna temperatura zraka. Produkt $c_p(T_g)\dot{m}_{out}T_g$ podaja energijske izgube zaradi segrevanja plinov, ki iz prostora izstopijo, produkt $c_p(T_{out})\dot{m}_{in}T_{out}$ pa za segrevanje plinov, ki v prostor vstopajo. RHR pa je hitrost sproščanja toplote [9].

Z izbiro dveh osnovnih spremenljivk ($\Delta\dot{p}$ in $\dot{T}_g$), ter enačb (2.16), (2.17), (2.18) in (2.19), se lahko enačbi za masno in energijsko ravnovesje preoblikujeta v spodnji navadni diferencialni enačbi. Z enačbo (2.22) izračunamo časovno spreminjanje tlaka v prostoru $\Delta\dot{p}$, glede na začetno stanje. Enačba (2.23) je diferencialna enačba za izračun temperature plinov v prostoru $\dot{T}_g$. Podobno kot pri dvo-conskem modelu diferencialni enačbi rešimo s časovno integracijo [9].

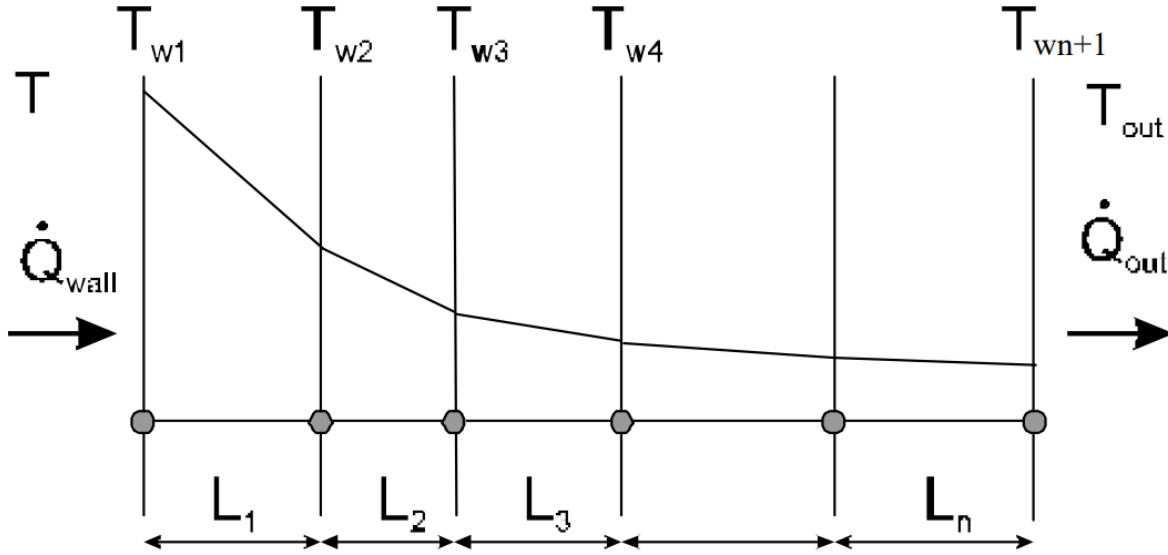
$$\Delta\dot{p} = \frac{(\gamma - 1)\dot{q}}{V} \quad (2.22)$$

$$\dot{T}_g = \frac{1}{c_p(T_g)\rho_g V} (\dot{q} - c_p(T_g)\dot{m}_g T_g + V\Delta\dot{p}) \quad (2.23)$$

2.1.3 Model prenosa toplote po obodu požarnega sektorja in povezava z eno-conskim modelom

V programu OZone je prenos toplote po obodu modeliran z eno-dimenzionalnimi končnimi elementi. S to predpostavko v primeru dvo-conskega modela naredimo manjšo napako, saj prihaja tudi do toplotne interakcije po obodu na meji med obema conama. Vendar so analize pokazale [9], da je ta prispevek zanemarljiv in lahko problem prenosa toplote po obodu modeliramo kot eno-dimenzionalni problem, s čimer se problem bistveno poenostavi in s tem pospeši računski čas analize. Obod prostora razdelimo na 3 osnovne tipe, in sicer strop, tla in

stene. Pri tem se elementi oboda medsebojno razlikujejo po robnih pogojih, ki so upoštevani v modelu prenosa toplote po obodu. Na spodnji sliki (Slika 5) je prikazana diskretizacija oboda. Temperatura se računa med sloji, ki sestavljajo obod, pri čemer se predpostavlja linearno spreminjanje temperature po debelini sloja [9].



Slika 5: Shematski prikaz enodimenzionalnih končnih elementov oboda [9]

Energijsko ravnovesje zapisano v vsakem od končnih elementov je podano v matrični enačbi (2.24) za temperaturo na začetku ($T_{w,i}$) in koncu končnega elementa ($T_{w,i+1}$) (enačba 2.26). Matriki podani v enačbah (2.25) in (2.27) opisujeta fizikalne lastnosti oboda. Z enačbo (2.28) pa upoštevamo robne pogoje na notranji in zunanji strani oboda, pri čemer se upošteva, da je prenos energije na obodu posledica prenosa toplote s konvekcijo in radiacijo [9].

$$\mathbf{K}_{el,i} \mathbf{T}_{el,i} + \mathbf{C}_{el,i} \mathbf{T}_{el,i} = \mathbf{g}_{el,i} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{K}_{el,i} = \frac{k_i}{L_i} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{T}_{el,i} = \begin{bmatrix} T_{w,i} \\ T_{w,i+1} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{C}_{el,i} = c_i \rho_i L_i \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} \dot{q}_{wall} \\ 0 \\ 0 \\ \dot{q}_{out} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Zgoraj omenjeni robni pogoji so za eno-conski model prikazani v enačbah (2.29) in (2.30), v prvi enačbi je podan robni pogoj na stiku med zunanjo ploskvijo oboda in zunanostjo, v drugi pa na stiku med notranjim prostorom in notranjo ploskvijo oboda [9].

$$\dot{q}_{out} = h(T_{out} - T_{w,N+1}) + \varepsilon \sigma (T_{out}^4 - T_{w,N+1}^4) \quad (2.29)$$

$$\dot{q}_{wall} = h(T_g - T_{w,1}) + \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_{w,1}^4) \quad (2.30)$$

Kjer so:

ε	emisivnost površine oboda
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta
T_{out}	temperatura zunanosti
$T_{w,N+1}$	temperatura na zunanji strani oboda
T_g	temperatura plinov v notranjosti
$T_{w,1}$	temperatura na notranji strani oboda

2.1.4 Model zgorevanja

Osnovni parametri za opis požara in modeliranje zgorevanja so naslednji: hitrost sproščanja toplote RHR [W], stopnja pirolize $\dot{m}_{fi}$ [kg/s] in površina požara A_{fi} [m²]. Hitrost sproščanja toplote se upošteva pri energetskem ravnovesju, saj predstavlja energijo, ki jo požar sprosti v eni sekundi. Odvisna je predvsem od vrste in količine goriva v prostoru [9]. Piroliza, ki predstavlja termični razkroj materiala pri povišani temperaturi [10], pa nastopa pri masnem ravnovesju, saj predstavlja maso goriva, ki se med požarom spreminja v plin. Hitrost sproščanja toplote in stopnjo pirolize lahko povežemo z enačbo (2.31) v efektivno zgorevalno energijo goriva, označeno s $H_{c,eff}$ [9].

$$H_{c,eff}(t) = \frac{RHR(t)}{\dot{m}_{fi}(t)} \quad (2.31)$$

Maksimalno možno sproščeno energijo goriva $H_{c,net}$ določimo v bombnem kalorimetru, tj. pri visokem tlaku in 100% kisiku. V Ozonu je razmerje med $H_{c,eff}$ in $H_{c,net}$ definirano prek enačbe (2.32), in predstavlja učinkovitost zgorevanja goriva m . Ta se praviloma spreminja s časom, ter je odvisna od samega goriva, njegove lege, temperatur ipd. V izračunih pogosto predpostavimo, da je ta faktor konstanten [9].

$$m(t) = \frac{H_{c,eff}(t)}{H_{c,net}} \quad (2.32)$$

Program OZone upošteva, da se površina požara A_{fi} spreminja s časom, pri čemer je največja možna površina požara seveda enaka površini požarnega sektorja. Pri masi kisika program upošteva enačbo (2.33), kjer je začetna masa kisika enaka 23% mase zraka. Enak odstotek je upoštevan pri kisiku, ki v prostor med požarom vstopa skozi odprtine. Upoštevana enačba zgorevanja predvidi 1,27 kg kisika za vsak kilogram goriva. Pri izgubah kisika skozi odprtine, pa je v primeru eno-conskega modela, delež kisika določen z enačbo (2.34), kjer ξ_{ox}

predstavlja koncentracijo kisika v plinu znotraj požarnega sektorja. Predpostavi se, da je kisik po prostoru razporejen enakomerno [9].

$$\dot{m}_{ox} = \dot{m}_{ox,in} + \dot{m}_{ox,out} - 1,27\dot{m}_f \quad (2.33)$$

$$\xi_{ox} = \frac{m_{ox}}{m_g} \quad (2.34)$$

V programu so na voljo trije različni modeli izgorevanja. Pri prvem količina kisika v prostoru ne vpliva na hitrost sproščanja toplote (angl. no combustion model). Pri drugem modelu se del sproščene energije pretvori v segrevanje prostora, del pa se, v obliki vročih plinov, prek odprtin prenese v zunanost (angl. external flaming combustion model). V tej nalogi smo uporabili tretji model, ki ob pomanjkanju kisika omeji količino sproščene toplote in hkrati ustrezno podaljša trajanje požara (angl. extended fire duration combustion model). Skladno s tem modelom, v linearno fazo ohlajanja preidemo, ko zgori 70% goriva. Predpostavi se, da je požar gorivno nadzorovan, ko je masa kisika znotraj požarnega sektorja večja od 0 kg. V tem primeru veljata enačbi (2.35) in (2.36) [9].

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_{f,data}(t) \quad (2.35)$$

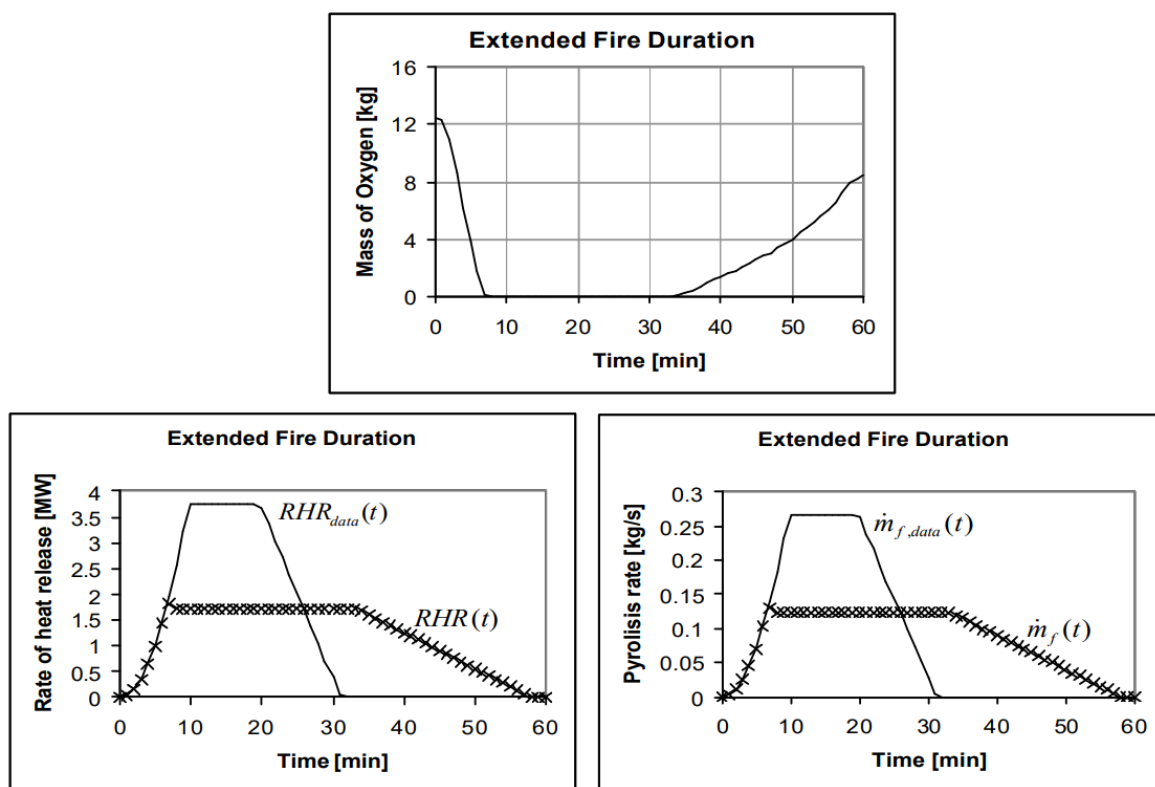
$$RHR(t) = RHR_{data}(t) = \dot{m}_f(t)H_{f,eff} \quad (2.36)$$

Ko kisika v prostoru ni, se predpostavi ventilacijsko nadzorovan požar. Veljata enačbi (2.37) in (2.38), pri čemer so masne izgube goriva pri zgorevanju odvisne samo od količine kisika, ki vstopa v prostor, poleg tega pa se vsa masa, ki se tvori med procesom pirolize, pretvori v energijo za segrevanja prostora [9].

$$\dot{m}_f(t) = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1,27} \quad (2.37)$$

$$RHR(t) = \dot{m}_f(t)H_{f,eff} = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1,27} H_{f,eff} \quad (2.38)$$

Vpliv padanja kisika na hitrost sproščanja toplote in stopnjo pirolize je prikazan na spodnji sliki (Slika 6) in sicer na primeru ventilacijsko nadzorovanega požara. Potrebno je omeniti, da je stopnja pirolize v primeru ventilacijsko nadzorovanega požara proporcionalno odvisna od količine kisika, ki prihaja v prostor, in ne od koncentracije kisika v prostoru [9].



Slika 6: Prikaz izbranega modela izgorevanja [9]

2.1.5 Opis vhodnih parametrov programa OZone

Z vidika modeliranja naravnega požara so v programu OZone pomembni naslednji vhodni podatki. Dimenzije prostora, dimenzije in pozicije odprtín, fizikalne lastnosti obodnih sten, največja možna površina požara A_f , projektna gostota požarne obtežbe $q_{f,d}$, maksimalna hitrost sproščanja toplote RHR_f in hitrost razvoja požara, ki ga opišemo s parametrom t_α , ki predstavlja čas v katerem dosežemo 1 MW hitrosti sproščanja toplote [2]. Postopek določanja projektna gostote požarne obtežbe je določen s standardom SIST EN 1991-1-2 [1] z enačbama (2.39) in (2.40) za karakteristično in (2.41) za projektno vrednost.

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} H_{ui} \Psi_i \quad (2.39)$$

$$q_{f,k} = \frac{Q_{fi,k}}{A_f} \quad (2.40)$$

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \prod \delta_{ni} m q_{f,k} \quad (2.41)$$

Kjer so:

- $Q_{fi,k}$ karakteristična požarna obtežba
- $M_{k,i}$ količina gorljivega materiala
- H_{ui} neto kalorična vrednost

Ψ_i	faktor za oceno zaščitenosti požarne obtežbe
δ_1	nevarnost nastanka požara v odvisnosti od velikosti sektorja
δ_2	nevarnost nastanka požara v odvisnosti od dejanske rabe
δ_{ni}	aktivni ukrepi za preprečevanje požara
m	zgorevalni faktor

Poenostavljeno se $q_{f,k}$ lahko določi tudi s pomočjo spodnje preglednice (Preglednica 1), ki podaja gostoto požarne obtežbe v odvisnosti od namembnost prostora. Pri tem je karakteristična gostota požarne obtežbe enaka 80 % fraktili gostote požarne obtežbe dejanskih primerljivih prostorov [1].

Preglednica 1: Karakteristična gostota požarne obtežbe glede na namembnost [1]

Raba	Povprečje	80 % kvantil
Stanovanja	780	948
Bolnišnice (sobe)	230	280
Hoteli (sobe)	310	377
Knjižnice	1500	1824
Pisarne	420	511
Šolski razredi	285	347
Nakupovalna središča	600	730
Dvorane (kino)	300	365
Transport (javni prostori)	100	122
OPOMBA: Za 80 % kvantil se predpostavlja Gumbelova porazdelitev.		

Naslednji pomemben parameter je maksimalna površina požara, saj je od nje odvisna projektna gostota požarne obtežbe, pa tudi količina sproščene toplote v danem trenutku. Ta je sicer odvisna tudi od maksimalne hitrosti sproščanja toplote določene v požarnem sektorju. Gre za količino energije, ki se lahko sproti ob zadostnem dotoku kisika. Za plato naravnega požara, ki je gorivno nadzorovan, potemtakem velja izraz (2.42), kjer sproščeno toploto predstavlja $\dot{Q}$ [2].

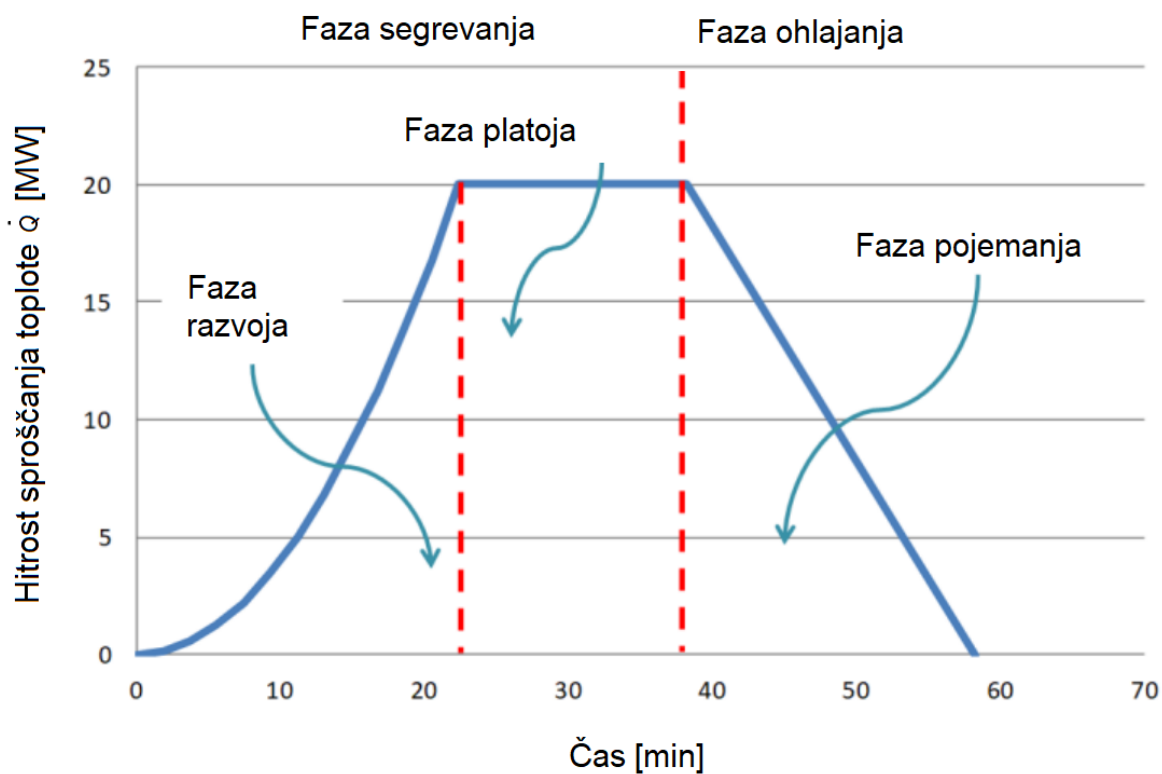
$$Q = RHR_f A_f \quad (2.42)$$

Čas v katerem dosežemo 1 MW hitrosti sproščene energije in RHR_f sta skladno z [1] določena na podlagi namembnosti prostora (Preglednica 2). Hitrost sproščanja toplote je odvisna od časa t_α ki definira začetno fazo sproščanja toplote ter posredno vpliva tudi na fazo enakomernega sproščanja toplote (faza platoja), ki skupaj predstavljata fazo segrevanja, to je fazo ko temperatura med požarom v prostoru narašča. Ko pa enkrat pogori večina požarne obtežbe, skladno s SIST EN 1991-1-2 je to 70 % celotne požarne obtežbe, pa začne faza

pojemanja požara oziroma faza ohlajanja saj temperature v prostoru začnejo padati (Grafikon 3) [2].

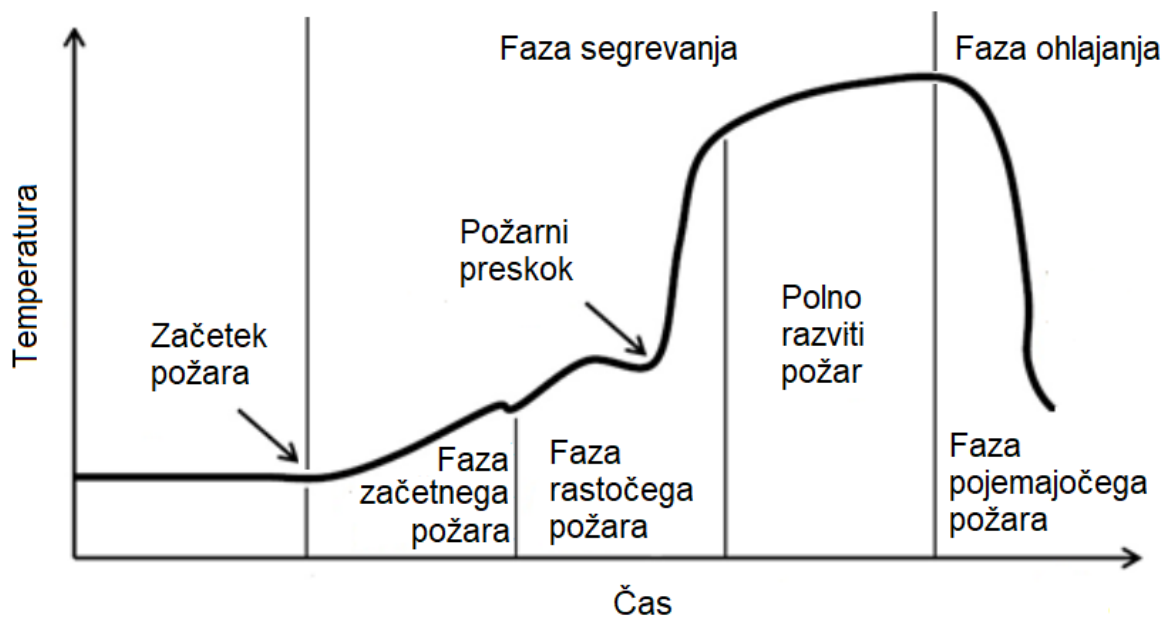
Preglednica 2: Določanje RHR_f in t_a za različne namembnosti prostorov [1]

Največja hitrost sproščanja toplote RHR_f			
Raba	Hitrost razvoja požara	t_a [s]	RHR_f [kW/m ²]
Stanovanja	srednja	300	250
Bolnišnice (sobe)	srednja	300	250
Hoteli (sobe)	srednja	300	250
Knjižnice	hitra	150	500
Pisarne	srednja	300	250
Šolski razredi	srednja	300	250
Nakupovalna središča	hitra	150	250
Dvorane (kino)	hitra	150	500
Transport (javni prostori)	počasna	600	250



Grafikon 3: Različne faze pri sproščanju toplote v prostor [2]

Na Grafikonu 4 vidimo še ključne faze pri sproščanju toplote za naravno požarno krivuljo.



Grafikon 4: Različne faze pri sproščanju toplote za naravno požarno krivuljo [11]

2.2 Toplotno-vlažnostni model

V tem podpoglavju se osredotočimo na toplotno-vlažnostni model, ki ga potrebujemo za določitev razvoja temperatur po prečnem prerezu lesenega nosilca in posredno debeline oglenenja. Napredni modeli za toplotno analizo lesenih elementov so usmerjeni v sočasno upoštevanje prenosa vlage in toplote po prerezu, saj sta ta dva procesa neposredno povezana. Na prenos toplote ima velik vpliv izparevanje vlage, ki predstavlja proces spremembe agregatnega stanja vezane vode v vodno paro. Za ta proces je potrebna določena energija, kar upočasni razvoj temperatur na mestu, kjer prihaja do spremembe agregatnega stanja. Poleg tega, znotraj celičnih lumnov, pride do konvekcijskega prenosa toplote z vodno paro. Znotraj celične stene pa pride do prenosa toplote zaradi vpliva difuzije vezane vode [12].

Model, ki je predstavljen v nadaljevanju je bil razvit posebej za potrebe obravnave požaru izpostavljenega konstrukcijskemu lesu. Upošteva pa povezan prenos toplote s prenosom vezane vode, vodne pare in zraka [6], kar je matematično opisano s spodnjim sistemom kontinuitetnih enačb. Enačba (2.43) opisuje ohranitev mase za vezano vodo, enačba (2.44) za vodno paro in enačba (2.45) za zrak. Podana je tudi enačba za ohranitev energije (2.46) in tri enačbe za določitev masnega toka, vezane vode (2.47), vodne pare (2.48) in zraka (2.49). Pri tem velja, da sta prenosa vezane vode in zraka odvisna od prenosa snovi s konvekcijo in difuzijo [12].

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = -\nabla \mathbf{J}_b + \dot{c} \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_g \tilde{\rho}_v}{\partial t} = -\nabla \mathbf{J}_v + \dot{c} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_g \tilde{\rho}_a}{\partial t} = -\nabla \mathbf{J}_a \quad (2.45)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \nabla (k_{ij} \nabla T) - (\rho c v) \nabla T - \Delta H_s \dot{c} \quad (2.46)$$

$$\mathbf{J}_b = \mathbf{D}_0 \exp \left[-\frac{E_b}{RT} \right] \nabla c_b - \mathbf{D}_0 \exp \left[-\frac{E_b}{RT} \right] \frac{c_b E_b}{RT^2} \nabla T \quad (2.47)$$

$$\mathbf{J}_v = \varepsilon_v \tilde{\rho}_v \mathbf{v}_g - \varepsilon_g \tilde{\rho}_g \mathbf{D}_{va} \nabla \left[\frac{\tilde{\rho}_v}{\tilde{\rho}_s} \right] \quad (2.48)$$

$$\mathbf{J}_a = \varepsilon_g \tilde{\rho}_a \mathbf{v}_g - \varepsilon_g \tilde{\rho}_g \mathbf{D}_{av} \nabla \left[\frac{\tilde{\rho}_a}{\tilde{\rho}_g} \right] \quad (2.49)$$

Kjer so:

c_b koncentracija vezane vode

$\tilde{\rho}_v$ koncentracija vodne pare

$\tilde{\rho}_a$ koncentracija zraka

ε_g	poroznost lesa
J_b	masni tok vezane vode
J_v	masni tok vodne pare
J_a	masni tok zraka
$\dot{c}$	stopnja sorpcije
ΔH_s	latentna toplotna sorpcije
E_b	energija potrebna za prekinitev vodikovih vezi
D_0	matrika z osnovnimi vrednostmi difuzijskih koeficientov
D_{va}	difuzijski koeficient zraka v vodno paro
D_{av}	difuzijski koeficient vodne pare v zrak

Enačba (2.50) podaja robni pogoj za toplotni tok na površini elementa, ki ga označimo s q^s . Določen je z vsoto izmenjane toplote med telesom in okolico zaradi konvekcije q_c in zaradi radiacije q_r (2.51). Potrebni so še robni pogoji masnega pretoka na površini elementa. Z enačbo (2.52) je opisan tok vodne pare na ploskvi, ki predstavlja izmenjavo med vodno paro v lumnih in okolico. Predpostavimo tudi, da sta tlaka v lumnih in okolici predvidoma enaka, kar je podano z enačbo (2.53). Zgornji sistem nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb (2.43–2.45) je, ob upoštevanju robnih in začetnih pogojev, rešen numerično z metodo končnih elementov [12].

$$q^s = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.50)$$

$$q^s = q_c + q_r \quad (2.51)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_v = k_c (\tilde{\rho}_{v,\infty} - \tilde{\rho}_v) \quad (2.52)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \quad (2.53)$$

Kjer so:

$\tilde{\rho}_{v,\infty}$	koncentracija vodne pare v okolici
$\mathbf{n}$	enotski vektor normale na zunanjo površino
k_c	masni prestopni koeficient
$\mathbf{u}$	vektor osnovnih neznank
k_{ij}	tenzor toplotne prevodnosti

2.3 Mehanski model

V tem podpoglavju na kratko opišemo napreden mehanski model in poenostavljeno računsko metodo, ki temelji na metodi efektivnega prečnega prereza. Oba koraka sta potrebna pri mehanski analizi in določitvi nenosilnega sloja prereza lesenega nosilca v nadaljevanju naloge.

2.3.1 Napredni mehanski model

Uporabljen računski model je zasnovan na Reissnerjevem kinematično točnem modelu nosilca, upoštevani so vplivi membranske, upogibne in strižne deformacije [13]. Dodatna predpostavka je, da prečni prerez nosilca vedno ostaja raven. Sistem enačb s katerimi določimo model sestavljajo 3 kinematične (2.54–2.56), 3 ravnotežne (2.57–2.61) in 3 konstitucijske enačbe (2.60–2.62), ki se jih rešuje z metodo končnih elementov, pri čemer je element baziran na interpolaciji deformacijskih količin [7].

$$X' + u' - (1 + \varepsilon) \cos \varphi - \gamma \sin \varphi = 0 \quad (2.54)$$

$$Z' + w' + (1 + \varepsilon) \sin \varphi - \gamma \cos \varphi = 0 \quad (2.55)$$

$$\varphi' - \kappa = 0 \quad (2.56)$$

$$R'_x + p_x = 0 \quad (2.57)$$

$$R'_z + p_z = 0 \quad (2.58)$$

$$M'_Y - (1 + \varepsilon)Q + \gamma N + m_Y = 0 \quad (2.59)$$

$$N = N_c = \int \sigma(D_m, T) dA \quad (2.60)$$

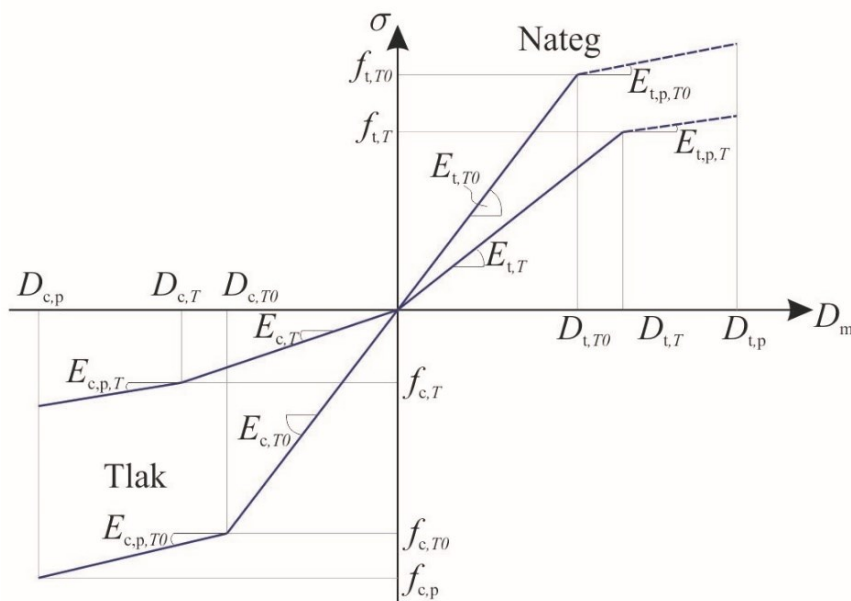
$$Q_c = G(T)A_s\gamma \quad (2.61)$$

$$M_Y = M_c = \int z\sigma(D_m, T) dA \quad (2.62)$$

Kjer so:

u	vektor pomikov v X smeri
w	vektor pomikov v Z smeri
ε	specifična sprememba dolžine
κ	psevdoukrivljenost referenčne osi
φ	zasuk prereza
γ	strižna deformacija
R_X	ravnotežna osna sila N
R_Z	ravnotežna osna sila Q
p_X	komponenta linijske obtežbe v X smeri
p_Z	komponenta linijske obtežbe v Z smeri
m_Y	komponenta linijskega momenta okoli Y osi
$G(T)$	strižni modul
A_s	strižni prerez
σ	normalna napetost
D_m	mehanska deformacija

S konstitucijskimi enačbami opišemo konstitucijski zakon lesa. Q_c predstavlja konstitucijsko prečno silo, N_c konstitucijsko osno silo in M_c konstitucijski moment. Na spodnjem grafu (Grafikon 5) je prikazana ta zveza [7]. Vidna je povezava med vzdolžno normalno napetostjo in mehansko deformacijo, upoštevan pa je bi-linearen diagram v tlaku in nategu. Z naraščanjem temperatur trdnost in togost materiala padata, zогlenela plast pa nima nosilnosti [14].



Grafikon 5: Konstitucijski zakon lesa pri povišanih temperaturah [14]

Enačbe sistema (2.54)-(2.62) so za potrebe reševanja izpeljane s pomočjo spremenjenega principa virtualnega dela. Pri tem do porušitve lahko pride bodisi zaradi globalne nestabilnosti bodisi zaradi materialne porušitve. Enačbe se rešujejo z Newtonovo inkrementalno-iteracijsko metodo. Glavni spremenljivki, ki jih določamo z naprednim mehanskim modelom sta čas porušitve t_{fail} in pripadajoča upogibna odpornost $M_{Rd,fi}$ [7].

2.3.2 Poenostavljena računska metoda

Pri določanju upogibne odpornosti lesenega nosilca v požarnem projektnem stanju na poenostavljen način se najpogosteje uporablja metoda efektivnega prečnega prereza. Metoda se načeloma izvede v dveh korakih. V prvem koraku se določi rezidualni prečni prerez (levo na Sliki 7), kar pomeni, da se ne upošteva zогlenelega sloja, saj je dejanska nosilnost zогlenelega sloja enaka 0. V drugem koraku dodatno odštejemo še t.i. nenosilni sloj, prek katerega se upošteva še izgube materialnih karakteristik lesa pod zогlenelo plastjo, rezultat je efektivni prerez nosilca (desno na Sliki 7) [15].

V nalogi je uporabljena rahlo modificirana metoda, saj je debelina zогlenele plasti d_{char} določena na podlagi toplotno vlažnostne analize. Kot vidimo na Sliki 8 (skrajno levo) je v

splošnem debelina zoglele plasti spodaj in od strani v primeru požara s treh strani različna. V računski analizi namesto ločenega upoštevanja zoglelega sloja za spodnji rob in s strani, izračunamo enotno debelino zoglele plasti za celoten prerez, ki ga označimo z $d_{char,noten}$. Račun določitve $d_{char,noten}$ poteka iterativno, z reševanjem enačbe (2.63). Pri tem je odpornostni moment rezidualnega prereza $W_{y,rr}$ določen s toplotno-vlažnostno analizo, prek izoterme 300 °C. Ko enkrat poznamo $d_{char,noten}$ je edina neznanka v enačbah za izračun dimenzij efektivnega prečnega prereza debelina nenosilnega sloja d_0 , kar vidimo tudi v enačbah (2.64) in (2.65) za račun efektivne višine h_{ef} in efektivne širine b_{ef} prečnega prereza. Efektivni prečni prerez se nato uporabi za izračun upogibne nosilnosti lesenega elementa, kar je podano z izrazom (2.66). Podobno kot pri določitvi $d_{char,noten}$ debelino nenosilnega sloja d_0 določimo iterativno, pri čemer mejno upogibno nosilnost $M_{RD,fi}$, ki nastopa v enačbi (2.66), določimo z naprednim mehanskim modelom [4].

$$W_{y,rr} = \frac{(b - 2d_{char,noten})(h - d_{char,noten})^2}{6} \quad (2.63)$$

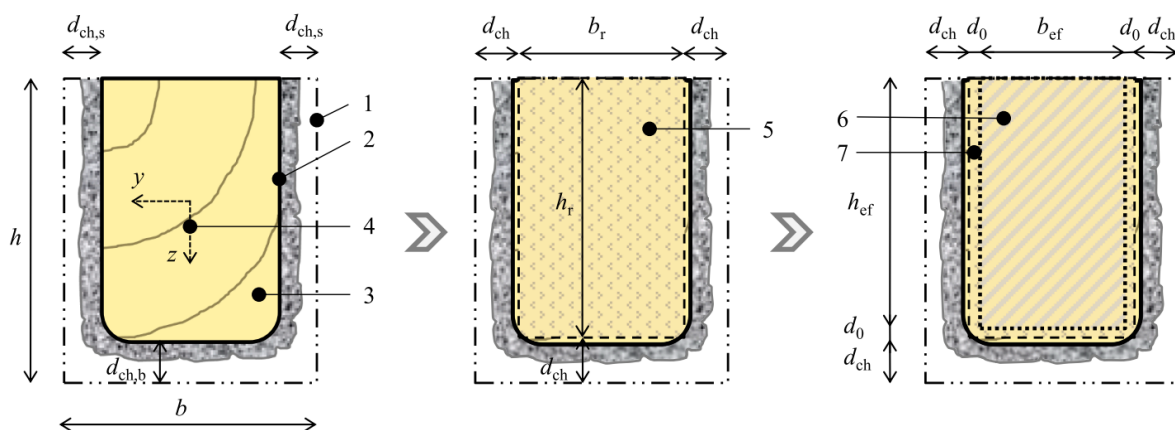
$$h_{ef} = h - d_{char,noten} - d_0 \quad (2.64)$$

$$b_{ef} = b - 2d_{char,noten} - 2d_0 \quad (2.65)$$

$$M_{RD,fi} = f_{m,k} \frac{b_{ef} h_{ef}^2}{6} \quad (2.66)$$

Kjer so:

h	začetna višina prereza
b	začetna širina prereza
$W_{y,rr}$	odpornostni moment rezidualnega prereza
$d_{char,noten}$	enotna debelina zoglelega sloja
d_0	debelina nenosilnega sloja
$f_{m,k}$	karakteristična upogibna trdnost
$M_{RD,fi}$	mejna upogibna nosilnost



Slika 7: Shematski prikaz različnih debelin lesenega prereza izpostavljenega požaru [4]

2.4 Osnovni pojmi linearne regresije več spremenljivk

V tem podpoglavju opišemo osnovne pojme povezane z linearno regresijo več spremenljivk, ki jih srečamo pri statistični analizi v poglavju 4. V osnovi, regresijska funkcija opisuje vpliv ene spremenljivke na drugo, podamo jo z enačbo (2.67). Pri tem pa ni upoštevan vpliv drugih spremenljivk ali slučajnega odstopanja. Odvisno spremenljivko lahko podamo z enačbo (2.68), kot vsoto dveh spremenljivk. Kjer so: Y odvisna spremenljivka, X neodvisna spremenljivka, ε pa napaka [16].

$$\hat{Y} = f(X) \quad (2.67)$$

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon \quad (2.68)$$

Pri metodi linearne regresije več spremenljivk gre za posplošitev linearne regresije ene spremenljivke, slednja je podana z enačbo (2.69), kjer sta a in b parametra, ki opišeta regresijsko premico na način, da se ta čim bolj prilega vzorcu. Uporabljeno metodo za iskanje teh parametrov imenujemo metoda najmanjših kvadratov. Ocenimo jih z iskanjem minimuma funkcije $S(a, b)$, ki predstavlja vsoto kvadratov odstopanj, podane z enačbo (2.70). Pri linearni regresiji z več spremenljivkami je osnovna enačba (2.68) enaka, regresijsko enačbo pa zapišemo kot (2.71), kjer velja predpostavka, da je porazdelitev ε normalna s pričakovano vrednostjo nič in standardno deviacijo σ . Tudi princip ocenjevanja parametrov je enak, osnova je enačba (2.70) [16].

$$\hat{Y} = a + bX + \varepsilon \quad (2.69)$$

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - (a + bX_i))^2 \quad (2.70)$$

$$Y_i = a + \sum_{j=1}^k b_j X_{ij} + \varepsilon_i \quad (2.71)$$

Linearno regresijo več spremenljivk izvedemo s pomočjo programa Excel. Za ustrezno interpretacijo rezultatov statistične analize pa je potrebno še razumevanje osnovnih izrazov. Determinacijski koeficient R^2 (angl. *R square*) (enačba 2.72) nam poda delež variabilnosti odvisne spremenljivke pojasnjene z vključenimi neodvisnimi spremenljivkami, z SS označimo skupno vsoto kvadratov (2.73). R^2 nam pove ali model ustreza obravnavanim podatkom [17]. Prilagojen determinacijski koeficient *prilagojen* R^2 ne upošteva spremenljivk, ki ne prispevajo k izboljšanju modela. R^2 se namreč zviša z vsako dodano spremenljivko, četudi ta ne prispeva k napovedovalni natančnosti modela. *prilagojen* R^2 (angl. *adjusted R square*) podamo z izrazom (2.74), kjer je n število elementov ter k število spremenljivk. R^2 in *prilagojen* R^2 sta meri, ki nam podajata natančnost regresijskega modela. Višji R^2 oz. *prilagojen* R^2 pomeni, da model bolj natančno opiše rezultate. Oba zavzemata vrednosti med 0 in 1 [18].

$$R^2 = 1 - \frac{S(a,b)}{SS} \quad (2.72)$$

$$SS = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \hat{Y})^2 \quad (2.73)$$

$$\text{prilagojen } R^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1} \quad (2.74)$$

Statistično značilnost neodvisnih spremenljivk preverjamo posamezno in skupno, na ravni modela. Statistično značilnost vseh neodvisnih spremenljivk skupaj preverjamo z analizo variance (angl. ANOVA). Cilj analize variance je preveriti ničelno domnevo podano z izrazom (2.75), ki pravi da so vsi izračunani koeficienti regresije b_j enaki 0. Alternativna domneva je podana z izrazom (2.76) in trdi, da je vpliv izračunanih koeficientov je značilen. Ničelno domnevo preizkušamo s pomočjo statistike F , podane z enačbo (2.77), kjer je MS_A vzorčna varianca faktorja ter MS_E vzorčna varianca napake. V kolikor je izračunana statistika F večja od kritične vrednosti oz. je dejansko tveganje α_{dej} (angl. Significance F) manjše od predpisane stopnje tveganja α , ki je za naš primer enako 0,05, lahko ničelno domnevo zavrnejo in sprejememo alternativno domnevo [16].

$$H_0: b_j = 0; \text{ za vsak } j = 1, \dots, k \quad (2.75)$$

$$H_1: b_j \neq 0; \text{ za vsak } j = 1, \dots, k \quad (2.76)$$

$$F = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.77)$$

Pri preverjanju statistične značilnosti posameznih neodvisnih spremenljivk v tej nalogi uporabimo *t statistiko* (angl. *t stat*). Z njo preverjamo ali je posamezen parameter statistično značilen. Ko izračunamo *t statistiko* lahko preko Studentove porazdelitvene funkcije določimo

p – vrednost (angl. P-value). V kolikor je p – vrednost manjša ali enaka α je posamezen parameter statistično značilen. Excel t statistiko računa z izrazom (2.78), pri čemer je R_{XY} ocena koeficienta korelacije [18].

$$t \text{ statistika} = \frac{R_{XY}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R_{XY}^2}} \quad (2.78)$$

3 IZRAČUN NENOSILNEGA SLOJA, TER VHODNI PODATKI ZA ANALIZE

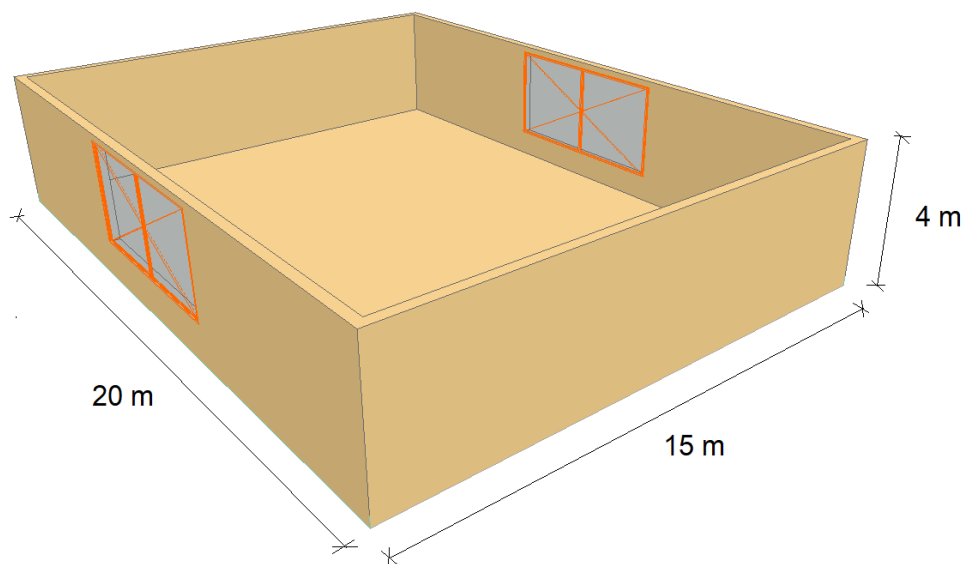
V tem poglavju podrobneje prikažemo vhodne podatke za uporabljene metode, ter izračune nenosilnega sloja, ki so podrobneje opisani v poglavju 2. Prvi korak je določitev naravnih krivulj s pomočjo programa OZone [5], sledita toplotno-vlažnostna analiza s katero določimo časovni potek temperatur ter zogljenega sloja po prečnem prerezu nosilca ter napredna mehanska analiza, s katero določimo čas pri katerem nosilec odpove, ter pripadajočo upogibno nosilnost. Na koncu na osnovi rezultatov naprednih analiz, s poenostavljeno metodo določimo debelino nenosilnega sloja.

3.1 Določitev krivulj naravnega požara

Kot je že omenjeno, krivulje naravnega požara določamo s programskim orodjem OZone, ki je podrobneje opisan v sklopu drugega poglavja. V tem podpoglavju se osredotočamo na vhodne podatke, ter na njihov vpliv na potek požara. Dobljene krivulje naravnih požarov tudi opišemo.

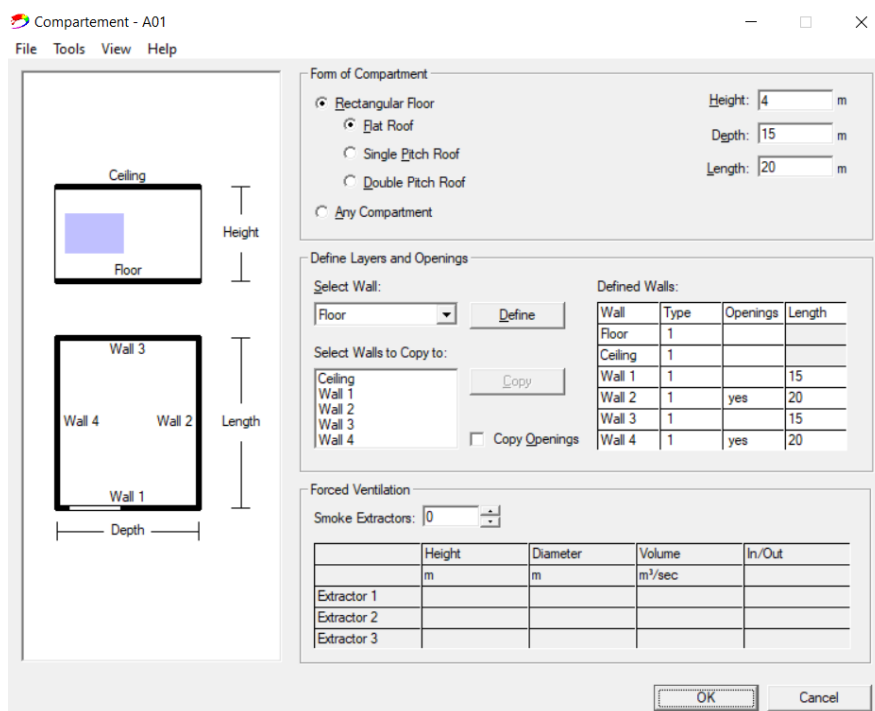
3.1.1 Uporabljeni vhodni podatki in pregled scenarijev

Pri generiranju požarnih krivulj s programom OZone [5] v vseh primerih uporabimo enak prostor (Slika 8), dolžine 20 m, širine 15 m in višine 4 m. Maksimalna površina požara A_f je tako enaka talni površini prostora in znaša 300 m². Skupna površina oboda A_t pa znaša 880 m².



Slika 8: Prikaz obravnavanega prostora

Na spodnji sliki (Slika 9) lahko vidimo vnos dimenzij požarnega sektorja v program OZone [5].



Slika 9: Vnos dimenzij sektorja v program OZone [5]

V okviru določanja krivulj naravnega požara, nas zanima predvsem to, da so si krivulje čim bolj raznolike. Zato pri požarnih scenarijih spreminjamo lastnosti oboda in sicer toplotno prevodnost stene λ , površino odprtin in požarno obtežbo. Pri spreminjanju površine odprtin za izhodišče izberemo različne faktorje odprtin O , izraz ki se sicer uporablja pri parametričnih požarih in je podan z enačbo (3.1) [1]. Predpostavi se enaka ekvivalentna višina odprtin, ki znaša 3 m. Na osnovi poznane ekvivalentne višine odprtin smo nato izračunali površino odprtin A_v in posledično potrebno dolžino odprtin. Faktor odprtin v naših scenarijih znaša od 0,04 do 0,20. Višina parapeta h_i je za vse scenarije enaka, in znaša 1 m.

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (3.1)$$

Toplotne lastnosti oboda v programu OZone [5] definiramo na zavihku, vidnem na spodnji sliki (Slika 10). Debelina vseh ploskev oboda je za vse scenarije enaka, in znaša 30 cm. Gostoto ρ in specifično toplotno oboda c ne spreminjamo po scenarijih, znašata pa 1.000 kg/m^3 in 1.000 J/kgK . Spreminjamo pa toplotno prevodnost λ , njen razpon sega od 0,25 do $4,00 \text{ W/mK}$.

Layers and Openings Wall 2 - A01

File Tools View Help

Wall Length: 20 m

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m³]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	Gas-concrete Bricks	30	1000	0,25	1000	0,8	0,8
Layer 2							
Layer 3							
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

	Sill Height Hi [m]	Soffit Height Hs [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
Opening 1	1	4	10,16	Constant	no
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

Slika 10: Vnos toplotnih lastnosti oboda v program OZone [5]

Vnos požarnih karakteristik v program OZone [5] je viden na spodnji sliki (Slika 11). Vsi scenariji imajo identično hitrost razvoja požara t_{α} in največjo hitrost sproščanja toplote RHR_f , prva znaša 150 s, druga pa 250 kW/m². Parameter, ki ga spreminjamo pa je projektna gostota požarne obtežbe $q_{f,d}$, giblje se med 300 in 1.200 MJ/m².

Fire - A01

File Tools View Help

Fire Curve

EN 1991-1-2 User Defined Fire

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load $q_{f,k}$	Danger of Fire Activation
		[kW/m²]	80% Fractile [MJ/m²]	
User Defined	150	250	487	1
Description	Fast	Building use is retail		

Active Fire Fighting Measures

- ☐ Automatic Water Extinguishing System $\delta_{n,1} = 1$
- ☐ Independent Water Supplies (1 2) $\delta_{n,2} = 1$
- ☐ Automatic Fire Detection by Heat $\delta_{n,3} = 1$
- ☐ Automatic Fire Detection by Smoke $\delta_{n,4} = 1$
- ☐ Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade $\delta_{n,5} = 1$
- ☐ Work Fire Brigade $\delta_{n,6} = 1$
- ☐ Off Site Fire Brigade $\delta_{n,7} = 1$
- ☒ Safe Access Routes $\delta_{n,8} = 1$
- ☐ Staircases Under Overpressure in Fire Alarm $\delta_{n,9} = 1$
- ☒ Fire Fighting Devices $\delta_{n,10} = 1$
- ☒ Smoke Exhaust System $\delta_{n,11} = 1$

Fire Info

Max Fire Area: 300 m²

Fire Elevation: 0 m Fuel Height: 0 m

Design Fire Load

Fire Risk Area: 300 m² $\delta_{q,1} = 1.54$

Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2} = 1$

Active Measures: $\prod \delta_{n,i} = 1$

$q_{f,d} = \delta_{q,1} \cdot \delta_{q,2} \cdot \prod \delta_{n,i} \cdot q_{f,k} = 600.0 \text{ MJ/m}^2$

Combustion

Combustion Heat of Fuel: 17.5 MJ/kg

Combustion Efficiency Factor: 0.8

Combustion Model: Extended fire duration

Stoichiometric Coefficient: 1.27

OK Cancel

Slika 11: Vnos osnovnih karakteristik požara v program OZone [5]

V spodnji preglednici (Preglednica 3) prikažemo ključne vhodne podatke, ki so toplotna prevodnost, faktor odprtin, površina odprtin, izračunana širina odprtine (opisana v 3.1.2), projektna gostota požarne obtežbe ter maksimalno izračunano temperaturo, ter podatek o tem ali je požar gorivno ali ventilacijsko nadzorovan. Pri razvrščanju smo se vodili po kriteriju, da v kolikor maksimalna hitrost sproščanja toplote doseže $\dot{Q}_{max} = RHR_f A_{fi}$ imamo gorivno nadzorovan požar, sicer pa je požar ventilacijsko nadzorovan. Polni rezultati temperature analize so na voljo v Prilogi A.

Preglednica 3: Vhodni podatki temperature analize z delnimi rezultati

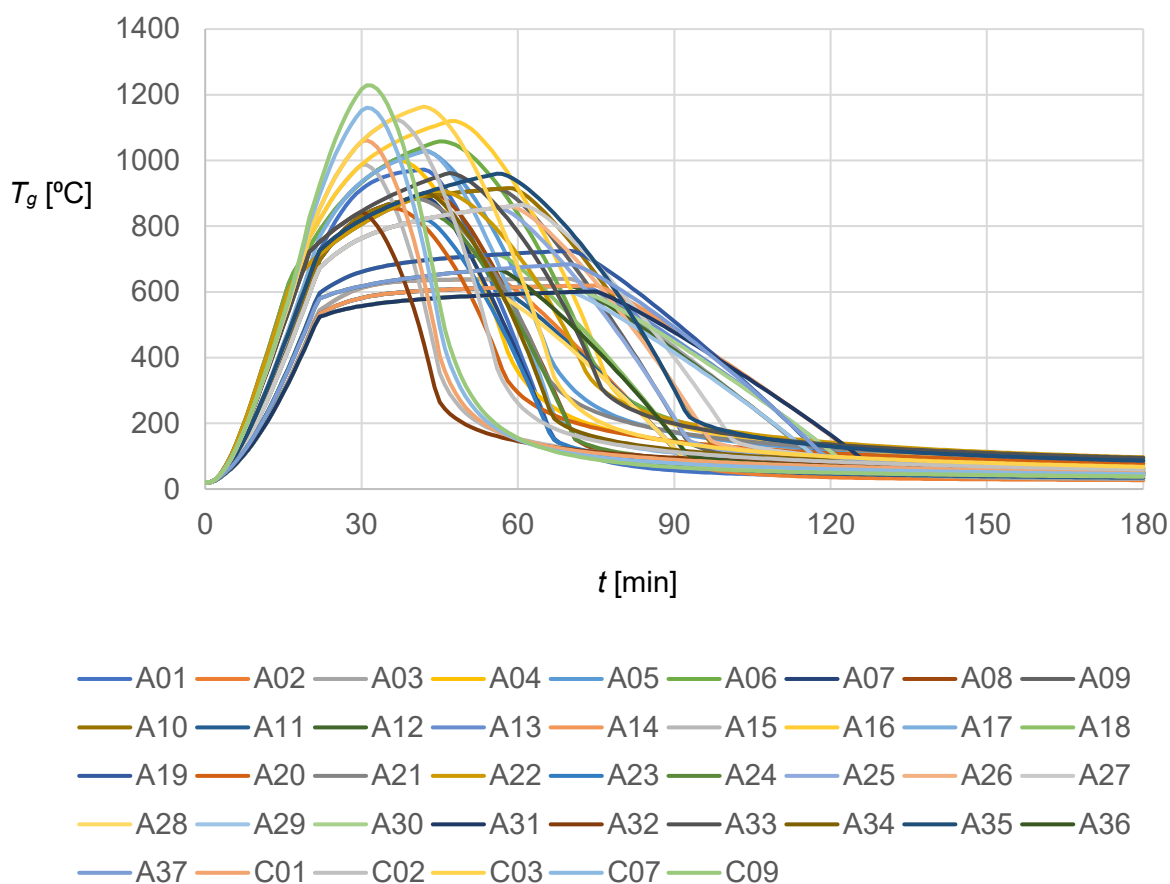
Oznaka	λ [W/mK]	O [m ^{0,5}]	A_v [m²]	l [m]	$q_{f,d}$ [MJ/m²]	Nadzor	$T_{g,max}$ [°C]
A01	0,25	0,12	60,97	20,32	600	Gorivno	972,37
A02	0,25	0,20	101,61	33,87	900	Gorivno	638,67
A03	0,25	0,20	101,61	33,87	1200	Gorivno	640,09
A04	1,00	0,04	20,32	6,77	300	Ventilacijsko	1000,88
A05	1,00	0,04	20,32	6,77	350	Ventilacijsko	1032,74
A06	1,00	0,04	20,32	6,77	400	Ventilacijsko	1058,20
A07	1,00	0,12	60,97	20,32	600	Gorivno	889,30
A08	1,00	0,12	60,97	20,32	650	Gorivno	893,91

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 3

A09	1,00	0,12	60,97	20,32	900	Gorivno	913,47
A10	1,00	0,12	60,97	20,32	950	Gorivno	915,93
A11	1,00	0,20	101,61	33,87	900	Gorivno	612,72
A12	1,00	0,20	101,61	33,87	1200	Gorivno	618,23
A13	1,00	0,20	101,61	33,87	1250	Gorivno	618,86
A14	1,00	0,20	101,61	33,87	1300	Gorivno	619,75
A15	1,56	0,06	30,48	10,16	300	Ventilacijsko	987,32
A16	1,56	0,06	30,48	10,16	600	Ventilacijsko	1120,08
A17	1,56	0,09	45,73	15,24	600	Gorivno	1028,34
A18	1,56	0,16	81,29	27,10	900	Gorivno	714,01
A19	1,56	0,16	81,29	27,10	1200	Gorivno	724,96
A20	2,25	0,04	20,32	6,77	300	Ventilacijsko	854,74
A21	2,25	0,04	20,32	6,77	350	Ventilacijsko	883,52
A22	2,25	0,04	20,32	6,77	400	Ventilacijsko	908,65
A23	2,25	0,12	60,97	20,32	600	Gorivno	821,49
A24	2,25	0,12	60,97	20,32	650	Gorivno	828,28
A25	2,25	0,12	60,97	20,32	900	Gorivno	856,33
A26	2,25	0,12	60,97	20,32	950	Gorivno	860,14
A27	2,25	0,12	60,97	20,32	1000	Gorivno	865,09
A28	2,25	0,20	101,61	33,87	900	Gorivno	591,17
A29	2,25	0,20	101,61	33,87	1200	Gorivno	599,26
A30	2,25	0,20	101,61	33,87	1250	Gorivno	600,19
A31	2,25	0,20	101,61	33,87	1300	Gorivno	601,51
A32	4,00	0,06	30,48	10,16	300	Ventilacijsko	844,37
A33	4,00	0,06	30,48	10,16	600	Ventilacijsko	961,93
A34	4,00	0,09	45,73	15,24	600	Gorivno	900,86
A35	4,00	0,09	45,73	15,24	900	Gorivno	959,78
A36	4,00	0,16	81,29	27,10	900	Gorivno	669,67
A37	4,00	0,16	81,29	27,10	1200	Gorivno	684,44
C01	1,00	0,06	30,48	10,16	300	Ventilacijsko	1061,55
C02	1,00	0,06	30,48	10,16	400	Ventilacijsko	1126,14
C03	1,00	0,06	30,48	10,16	500	Ventilacijsko	1163,86
C07	0,50	0,06	30,48	10,16	300	Ventilacijsko	1160,68
C09	0,25	0,06	30,48	10,16	300	Ventilacijsko	1228,78

V naboru požarnih krivulj je tako skupaj 42 scenarijev, od katerih je 27 gorivno in 15 ventilacijsko nadzorovanih. V fazi razvoja požara je raznolikost požarnih krivulj dokaj majhna, kar je zaradi enake hitrosti razvoja t_{α} razumljivo. Ko pa požar preide v polno-razvit požar, pa se potek požarnih krivulj bistveno spremeni, saj je tako pri dolžini platoja ter najvišjih doseženih temperaturah raznolikost krivulj bistveno večja. Namreč, v nekaterih primerih, $T_{g,max}$ doseže od približno 590 °C pa do 1230 °C. Poleg tega velja, da se plato v določenih primerih ne razvije in požar takoj preide v fazo ohlajanja. V fazi ohlajanja ravno tako opazimo precejšnje razlike v poteku in stopnji ohlajanja, ki so v večini primerov manjše za gorivno nadzorovane požare. Vse požarne krivulje določene v programu OZone so prikazane grafično v nadaljevanju (Grafikon 6).



Grafikon 6: Grafični pregled naravnih požarnih krivulj

3.1.2 Parametrična študija velikosti in pozicije odprtin

V okviru magistrske naloge smo preverili tudi vpliv postavitve in dimenzij oken znotraj programa OZone na razvoj temperatur požara. Ta korak je potreben, saj smo pri izboru požarnih scenarijev odprtine na obodu prostora opisali s faktorjem odprtin, ki je sicer izraz povezan s parametričnim požarom podanim v standardu SIST EN 1991-1-2 (2004). Namreč

faktor odprtin nam poda samo delež oboda, ki ga pokrivajo odprtine, ne pa tudi njihovega položaja.

Pri obravnavanih scenarijih v nadaljevanju je predvidena enaka višina parapeta, spreminjamo samo širino oken, prav zato je potreben pregled vpliva pozicije odprtin. Parametrično študijo smo opravili za en gorivno in en ventilacijsko nadzorovan požar.

Zanima nas torej kako spreminjanje višine in širine okna, ter višine parapeta, vpliva na razvoj temperatur, pri čemer ves čas ohranjamo enak faktor odprtin. Izbrani osnovni krivulji sta A02, ki je gorivno nadzorovana, in A06, ki je ventilacijsko nadzorovana. Za primer A02 je bil izbran faktor odprtin 0,2. Pri danih dimenzijah prostora je potrebna skupna površina odprtin enaka 101,61 m². V spodnji preglednici (Preglednica 4) je prikazan izračun širine odprtine za 3 izbrane višine odprtine.

Preglednica 4: Izračun širine odprtine glede na izbrano višino odprtine za parametrično študijo scenarija A02

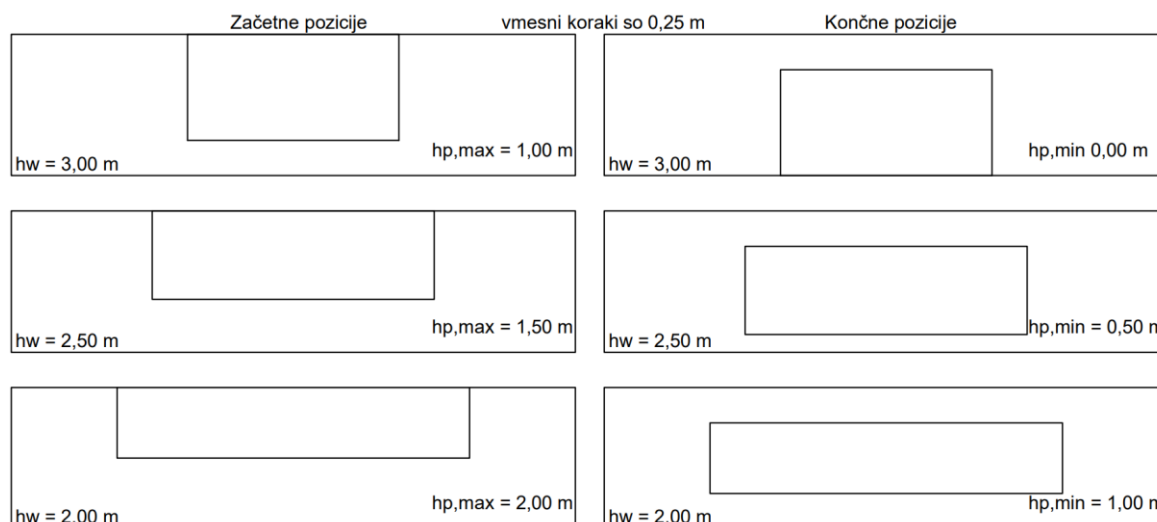
Površina [m ²]	Višina [m]	Širina [m]
101,61	2,00	50,81
101,61	2,50	40,65
101,61	3,00	33,87

Za primer A06 je bil izbran faktor odprtin 0,04. Pri danih dimenzijah prostora je potrebna skupna površina odprtin enaka 20,32 m². V spodnji preglednici (Preglednica 5) je prikazan izračun širine odprtine za 3 izbrane višine.

Preglednica 5: Izračun širine odprtine glede na izbrano višino odprtine za parametrično študijo scenarija A06

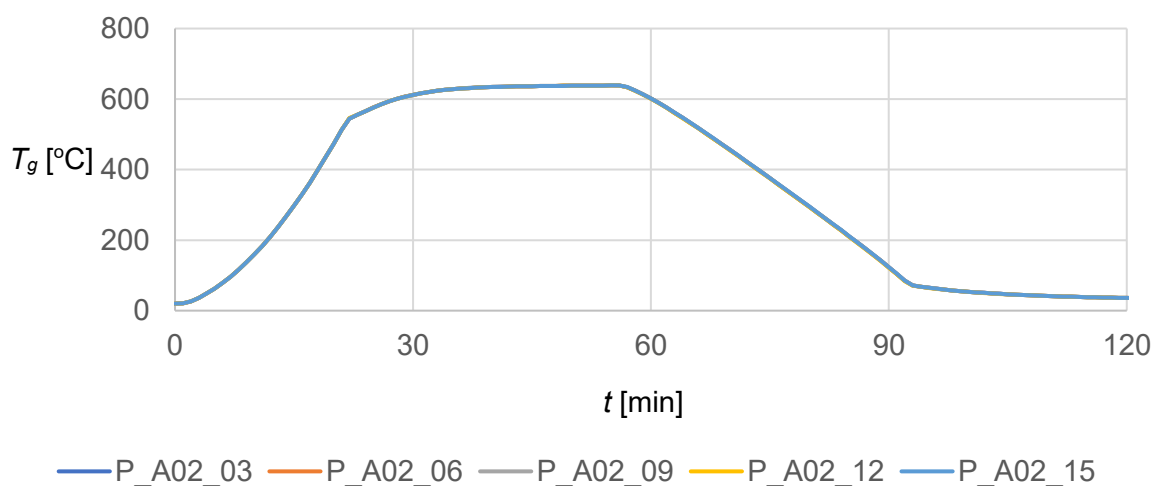
Površina [m ²]	Višina [m]	Širina [m]
20,32	2,00	10,16
20,32	2,50	8,13
20,32	3,00	6,77

Prostor, ki ga obravnavamo je višine 4 m. Vsi osnovni scenariji predvidevajo višino spodnjega parapeta 1 m in višino odprtine 3 m, kar pomeni, da odprtina sega natanko do stropa. V parametrični študiji višino parapeta spreminjamo za oba primera, in sicer v korakih po 0,25 m. Za lažje razumevanje, je na spodnji sliki (Slika 12) shematsko prikazano spreminjanje pozicij odprtin, pri čemer h_w označuje višino odprtine, $h_{p,min}$ in $h_{p,max}$ pa najmanjšo in največjo možno višino spodnjega parapeta.



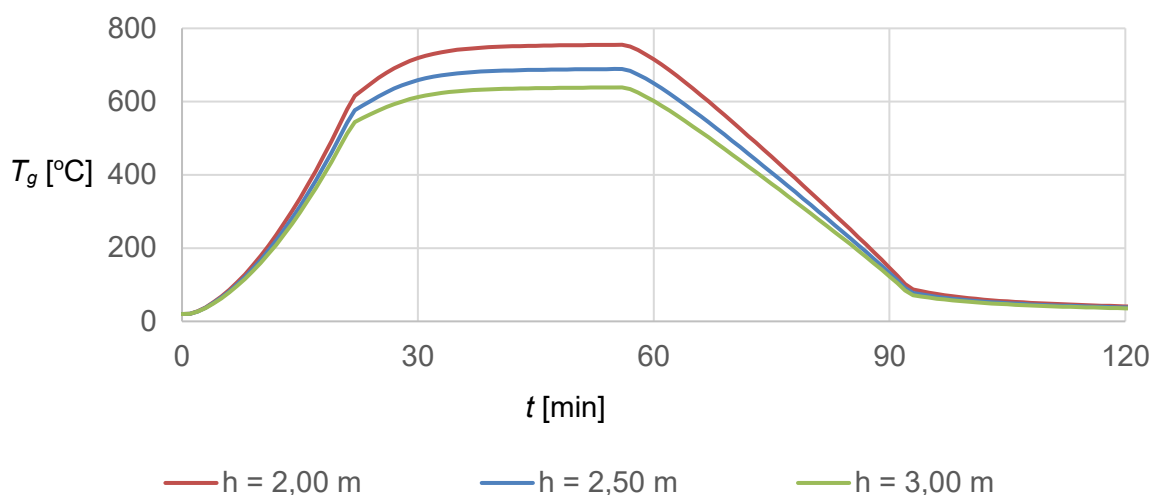
Slika 12: Shematski prikaz pozicij odprtín

Za vsakega od dveh scenarijev je bilo s pomočjo programskega orodja OZone generiranih 15 krivulj, torej za vsako od treh različnih višin odprtine po 5 različnih višin parapeta. V obeh primerih rezultati pokažejo, da spreminjanje pozicije odprtine po višini nima znatnega vpliva na rezultate. Spodaj prikažemo rezultate samo za primer z osnovnim scenarijem A02 in to za višino odprtín, ki znaša 3 metre (Grafikon 7). Opažamo praktično popolno ujemanje krivulj, iz česar sklepamo, da spreminjanje pozicije odprtín po višini nima vpliva na razvoj temperatur.



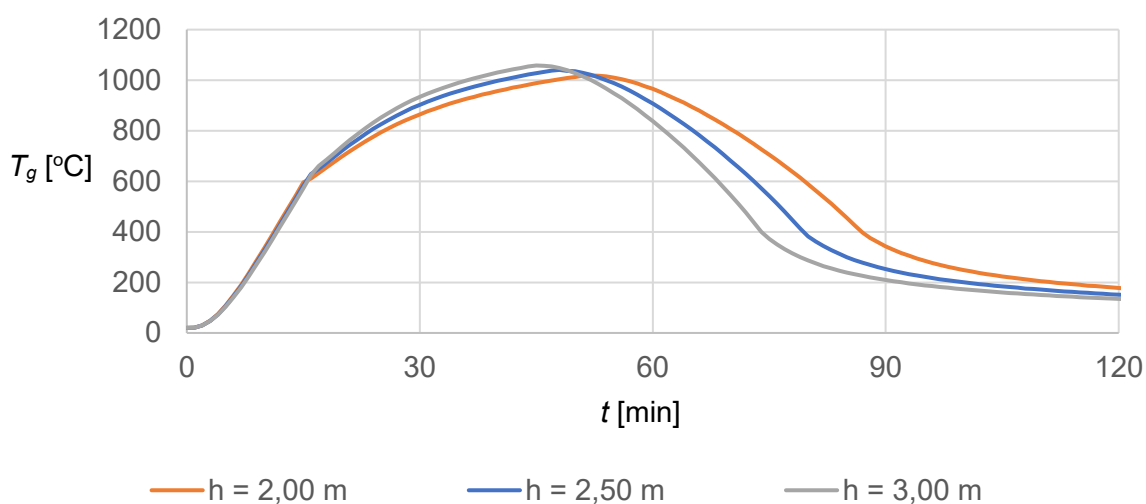
Grafikon 7: Prikaz vpliva višine parapeta na razvoj temperatur za scenarij A02 in višino 3 m

Pri spreminjanju same višine okna, in posledičnem spreminjanju širine, pa so rezultati nekoliko bolj raznoliki. Za primer gorivno nadzorovanega požara lahko vidimo precejšnjo razliko pri maksimalni temperaturi za različne višine oken (Grafikon 8). Nižja in širša kot je odprtina, višja je maksimalna temperatura. Kot možno razlago vidimo počasnejše izgubljanje toplote pri nižjih odprtinah, kar ob enaki količini sproščene toplote vodi v višje temperature.



Grafikon 8: Prikaz vpliva spreminjanja dimenzij odprtin za scenarij A02

Za osnovni scenarij A06, torej za primer ventilacijsko nadzorovanega požara, so tudi opazne razlike v poteku temperatur, v primeru, ko spreminjamo višino odprtin (Grafikon 9). Maksimalno temperaturo v tem primeru dosežemo z višjimi odprtinami, medtem ko z nižjimi odprtinami dosežemo dlje trajajoče območje z višjimi temperaturami in počasnejše ohlajanje prostora.

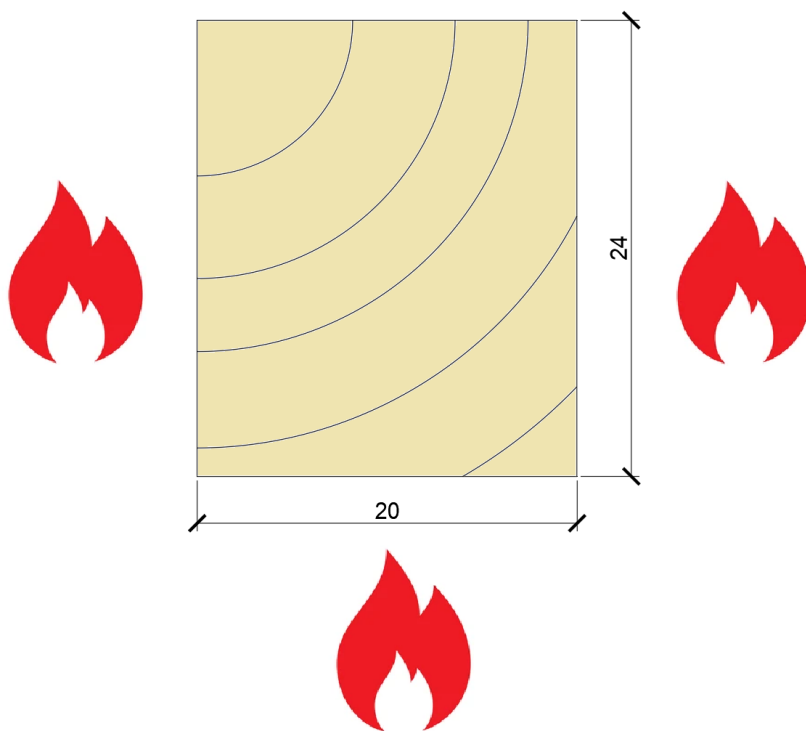


Grafikon 9: Prikaz vpliva spreminjanja dimenzij odprtin za scenarij A06

Rezultati parametrične študije kažejo na to, da sama pozicija okna ne vpliva na razvoj temperatur, ki jih dobimo s programskim orodjem OZone. Medtem ko ima spreminjanje dimenzij odprtin vpliv na razvoj temperatur in je ta vpliv v primeru gorivno nadzorovanega požara nekoliko večji.

3.2 Vhodni podatki za toplotno-vlažnostno analizo

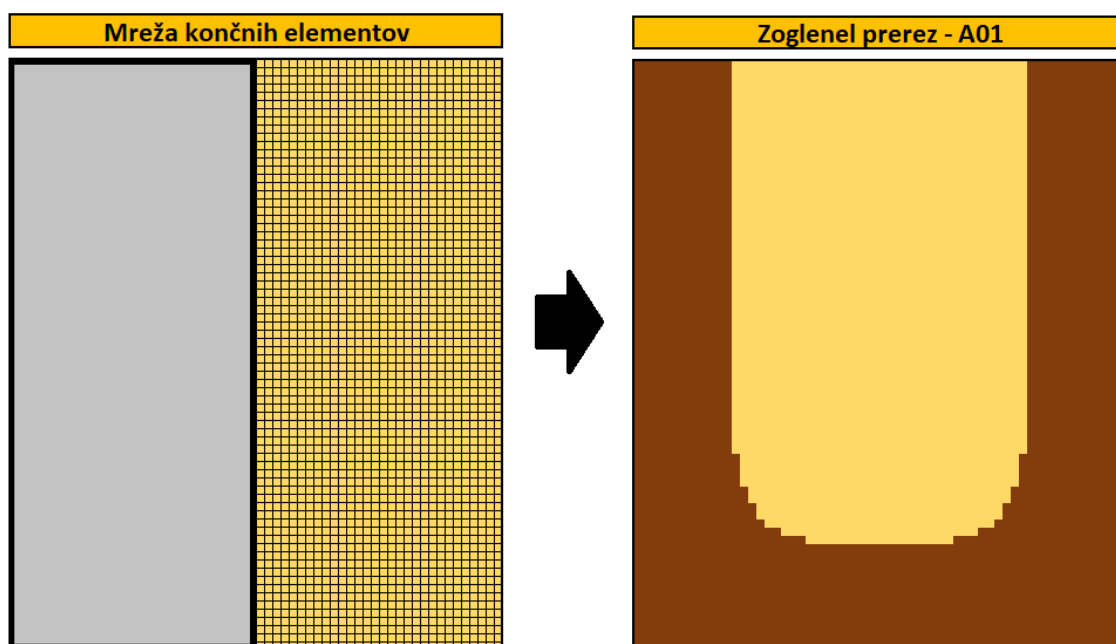
Krivulje generirane v poglavju 3.1 se uporabijo kot vhodni podatek za toplotno-vlažnostne analize. Skupno število opravljenih analiz je torej 42. Za toplotno-vlažnostno analizo obravnavamo prerez, širine 20 cm in višine 24 cm, ki je požaru izpostavljen s treh strani (Slika 13). Upoštevan je les gostote ρ je 420 kg/m^3 ter začetne vlažnosti 12%. Izhodiščna koncentracija vezane vode $c_{b,0}$ znaša $81,60 \text{ kg/m}^3$, koncentracija vodne pare $\rho_{v,0}$ pa 9 g/m^3 .



Slika 13: Prerez lesenega nosilca z dimenzijami

Robni pogoji za analizo so naslednji: emisivnost površine ε_m je enaka 0,80, temperaturni koeficient prenosa s konvekcijo α_c znaša $35 \text{ W/m}^2\text{K}$, koeficient masnega prenosa k_c pa je enak $20 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$. Poleg tega velja, da je tlak v lumnih na stiku z okolico ($p_{g,0}$) enak tlaku okolice in znaša $0,10 \text{ MPa}$. Vsi ostali parametri, ki tukaj niso navedeni, so podani v [6].

Glede na to, da obravnavamo prerez izpostavljen požaru s treh strani, lahko zaradi simetrije upoštevamo samo polovico prečnega prereza. Prerez je tako diskretiziran z 2.160 štiri-vozliščnimi izoparametričnimi končnimi elementi (Slika 14), kjer so dimenzije posameznega končnega elementa enake $3,33 \times 3,33 \text{ mm}$. Na levem delu spodnje slike je vidna mreža končnih elementov, na obravnavanem delu prereza. Desna stran slike pa prikaže primer zoglenelega prereza za scenarij A01, pri čemer je zoglenel del prereza temno obarvan. Podatki so grafično obdelani v programu Excel. Zoglenel del prereza se diskretno zmanjšuje in sicer, posamezen končni element izločimo, ko povprečna temperatura v njegovih vozliščih doseže $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

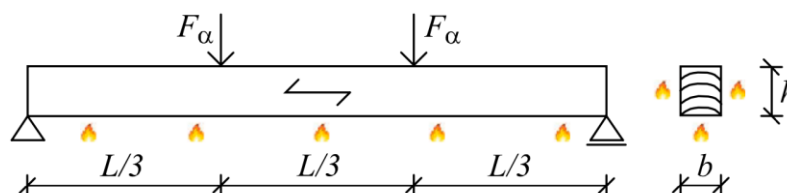


Slika 14: Mreža končnih elementov lesenega nosilca za toplotno-vlažnostno analizo

Pred določitvijo nenosilnega sloja s poenostavljeno metodo je potrebno še preračunati enotno debelino zogljenega sloja $d_{char,noten}$, da zagotovimo skladnost z Evrokodom SIST EN 1995-1-2:2004. $d_{char,noten}$ se skladno z metodo predstavljeno v 2.2 določa iterativno, prek znanega odpornostnega momenta rezidualnega prereza $W_{y,rr}$, podanega z izrazom (2.63), kjer je edina neznanka $d_{char,noten}$.

3.3 Napredna mehanska analiza

Rezultati toplotno-vlažnostne analize (toplotno polje) so uporabljeni kot vhodni podatek za napredno mehansko analizo. Uporabljen je les trdnostnega razreda C35 s pripadajočo karakteristično upogibno trdnostjo $f_{m,k}$ 3,5 kN/cm². Obravnavan je prosto-ležeči lesen nosilec dolžine $l = 3,6$ m, obremenjen s točkovnimi silami na prvi in drugi tretjini razpona (Slika 15).



Slika 15: Obravnavan nosilec [4]

Nosilec je diskretiziran s šestimi linijskimi končnimi elementi, od katerih ima vsak pet integracijskih točk. Konstitucijski zakon lesa v požarnem projektnem stanju (Grafikon 8) je definiran z bilinearnim modelom, njegovi glavni vhodni podatki, ki jih upoštevamo v izračunu

so naslednji: $f_{t,T0} = 2,25 \text{ kN/cm}^2$, $f_{c,T0} = 2,50 \text{ kN/cm}^2$, $D_{t,T0} = 0,0016$, $D_{c,T0} = 0,0019$, $D_{t,p} = 0,018$, $D_{c,p} = 0,035$, $E_{t,T0} = E_{c,T0} = 1335 \text{ kN/cm}^2$ in $E_{c,p,T0} = E_{t,p,T0} = 50 \text{ kN/cm}^2$.

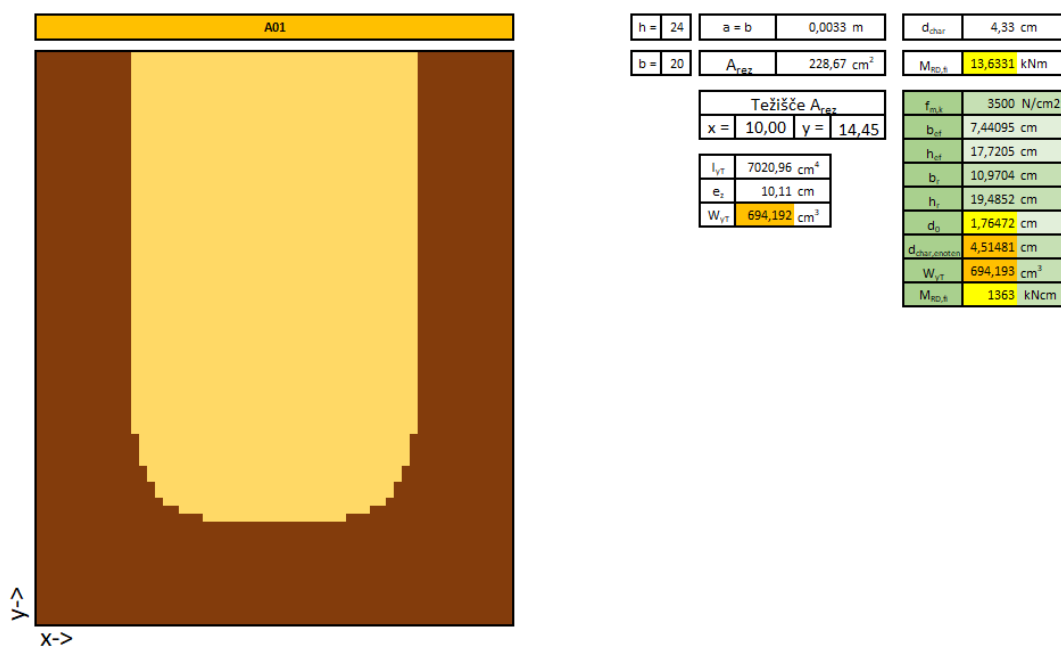
Pri napredni mehanski analizi nosilec obremenimo z različnimi nivoji obtežbe F_α , pri čemer za vsak nivo obtežbe s programom določamo upogibno odpornost $M_{Rd,fi}$ in čas odpovedi nosilnosti t_{fail} . Obtežba F_α je podana z enačbo (3.2) v [kN], pri čemer velja, da se brezdimenzijski faktor α spreminja do najnižje možne vrednosti $F_{\alpha,end}$, pri kateri nosilec še preživi izbran požarni scenarij.

$$F_\alpha = 56\alpha \quad (3.2)$$

3.4 Določitev debeline nenosilnega sloja s poenostavljeno mehansko analizo

Ob znani vrednosti enotne debeline zoglenelega sloja, upogibne odpornosti pri času porušitve in karakteristične upogibne trdnosti lahko s sistemom enačb (2.64-2.66), z iterativnim postopkom, izračunamo nenosilni sloj d_0 , kar je prikazano tudi na Sliki 16.

Na spodnji sliki (Slika 16) je prikazan postopek poenostavljene računske metode in določitve debeline nenosilnega sloja za primer scenarija A01, ki je obdelan s programskim orodjem Excel. Spomnimo se, da nam za določitev debeline nenosilnega sloja rezultati napredne toplotno-vlažnostne in mehanske analize služijo kot vhodni podatki za programsko orodje Excel. Na spodnji preglednici (Preglednica 6) so podane vrednosti nenosilnega sloja ter bistveni rezultati toplotno-vlažnostne in mehanske analize vseh scenarijev. Razširjeni rezultati so na voljo med prilogami (Priloga B).



Slika 16: Poenostavljena računska metoda primera A01

Preglednica 6: Izračunan $d_{char,noten}$, izbrani rezultati toplotno-vlažnostne analize in rezultati mehanske analize za vse scenarije

Oznaka	$d_{char,noten}$ [mm]	A_{rez} [cm ²]	$W_{y,rr}$ [cm ³]	$M_{Rd,fi}$ [kNcm]	d_o [mm]
A01	45	228,67	694,19	1363,31	18
A02	22	355,78	1230,97	2421,18	23
A03	27	334,00	1116,19	1942,00	26
A04	47	224,89	661,85	1203,20	19
A05	55	188,00	520,77	852,61	19
A06	62	154,00	394,09	473,94	21
A07	37	268,00	858,80	1835,26	17
A08	39	261,78	817,63	1661,83	18
A09	51	208,00	592,20	962,05	21
A10	52	201,78	559,76	848,44	21
A11	20	364,89	1290,64	2510,10	24
A12	24	342,67	1174,06	2072,81	26
A13	25	341,33	1160,17	2013,32	27
A14	26	339,56	1141,06	1946,74	27
A15	37	269,33	873,58	2025,10	15
A16	72	112,44	263,95	266,59	18
A17	52	194,89	560,90	1060,24	17
A18	29	319,56	1048,70	2004,49	22
A19	36	282,22	892,85	1466,36	25
A20	33	287,78	952,87	1890,10	20
A21	39	265,33	831,05	1555,69	21
A22	44	240,89	720,13	1123,24	24
A23	31	303,33	997,05	2118,06	18
A24	33	287,11	945,30	1924,24	19
A25	43	243,11	734,76	1297,20	21
A26	45	238,67	698,47	1106,67	23
A27	47	225,33	661,29	1030,04	23
A28	19	380,22	1326,41	2584,89	24
A29	22	359,11	1225,53	2170,30	27
A30	23	355,56	1220,62	2089,66	28
A31	24	344,00	1190,11	2034,46	27
A32	26	326,89	1131,57	2606,08	17
A33	51	207,78	591,26	938,73	21
A34	39	263,11	829,79	1679,30	18
A35	56	184,67	490,49	683,14	21
A36	25	341,56	1162,23	2255,56	23

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 6

A37	30	312,89	1018,16	1700,78	26
C01	43	234,67	737,00	1555,46	16
C02	57	174,67	479,85	839,50	17
C03	70	121,56	289,02	363,94	17
C07	52	195,78	569,52	1191,41	14
C09	59	164,00	450,12	869,51	14

4 PREDSTAVITEV GRAFOV RAZTROSA ZA OSNOVNE PARAMETRE IN KARAKTERISTIKE NARAVNE KRIVULJE

Za analizo pridobljenih rezultatov smo pregledali povezavo med nenosilnim slojem d_0 in osnovnimi vhodnimi parametri ter parametri s katerimi lahko opišemo pridobljene požarne krivulje. Zanima nas predvsem kakšno je njihovo ujemanje kar v nadaljevanju prikazujemo z grafi raztrosa.

Uporabljeni vhodni parametri na osnovi katerih prikazujemo grafe raztrosa so $q_{f,d}$, 0 ter b . Parametri s katerimi opišemo naravne požarne krivulje, pridobljene s programom OZone [5], so naslednji: najvišja dosežena temperatura $T_{g,max}$, stopnja segrevanja k_R , stopnja ohlajanja k_P ter čas, ko temperatura v prostoru presega določeno vrednost $n_{t,220}$. Uporabljeni podatki so, za lažje spremljanje analize, zbrani v spodnji preglednici (Preglednica 7). Določitev parametrov $T_{g,max}$, k_R , k_P in $n_{t,220}$ je temeljiteje prikazana v poglavju 4.2.

Preglednica 7: Nabor vhodnih podatkov za statistično analizo rezultatov

Oznaka	d_0 [mm]	$T_{g,max}$ [°C]	k_R [°C/min]	k_P [°C/min]	$n_{t,220}$ [min]
A01	18	972,37	23,15	-32,96	55,00
A02	23	638,67	11,41	-15,42	72,00
A03	26	640,09	9,14	-11,78	95,00
A04	19	1000,88	27,05	-27,73	63,00
A05	19	1032,74	25,19	-25,11	72,00
A06	21	1058,20	23,52	-22,71	80,00
A07	17	889,30	21,17	-29,77	54,00
A08	18	893,91	20,32	-27,21	59,00
A09	21	913,47	16,31	-20,97	79,00
A10	21	915,93	15,79	-19,81	83,00
A11	24	612,72	10,94	-14,63	72,00
A12	26	618,23	8,83	-11,21	95,00
A13	27	618,86	8,60	-10,69	99,00
A14	27	619,75	8,26	-10,50	103,00
A15	15	987,32	32,91	-40,25	42,00
A16	18	1120,08	23,34	-27,02	77,00
A17	17	1028,34	24,48	-32,03	58,00
A18	22	714,01	12,75	-16,67	75,00
A19	25	724,96	10,36	-12,88	99,00
A20	20	854,74	23,74	-23,37	60,00
A21	21	883,52	22,09	-20,97	70,00

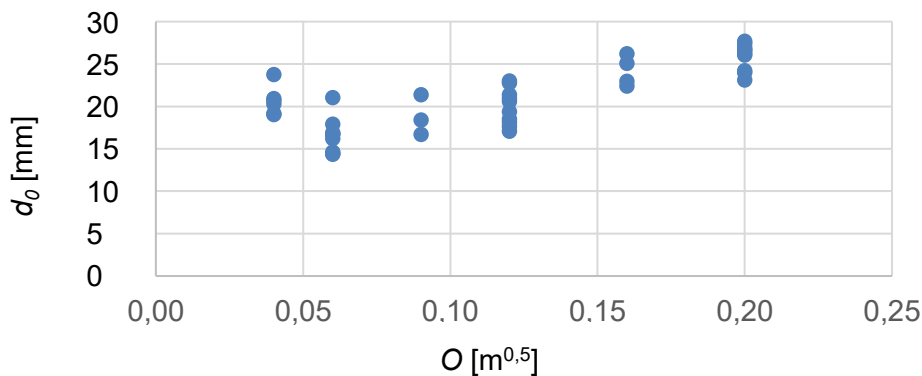
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 7

A22	24	908,65	20,19	-19,66	80,00
A23	19	821,49	19,56	-27,03	54,00
A24	19	828,28	18,41	-25,71	59,00
A25	21	856,33	15,29	-19,21	79,00
A26	23	860,14	14,58	-18,65	83,00
A27	23	865,09	14,18	-17,81	88,00
A28	24	591,17	10,56	-13,98	72,00
A29	27	599,26	8,56	-10,74	95,00
A30	28	600,19	8,34	-10,24	99,00
A31	27	601,51	8,02	-10,07	103,00
A32	17	844,37	28,15	-38,23	39,00
A33	21	961,93	20,47	-22,57	77,00
A34	18	900,86	21,45	-27,36	57,00
A35	21	959,78	17,14	-19,98	83,00
A36	23	669,67	11,96	-15,41	75,00
A37	26	684,44	9,78	-11,93	99,00
C01	16	1061,55	34,24	-46,89	43,00
C02	17	1126,14	31,28	-37,92	54,00
C03	17	1163,86	27,71	-32,30	65,00
C07	14	1160,68	37,44	-47,61	45,00
C09	14	1228,78	39,64	-47,74	46,00

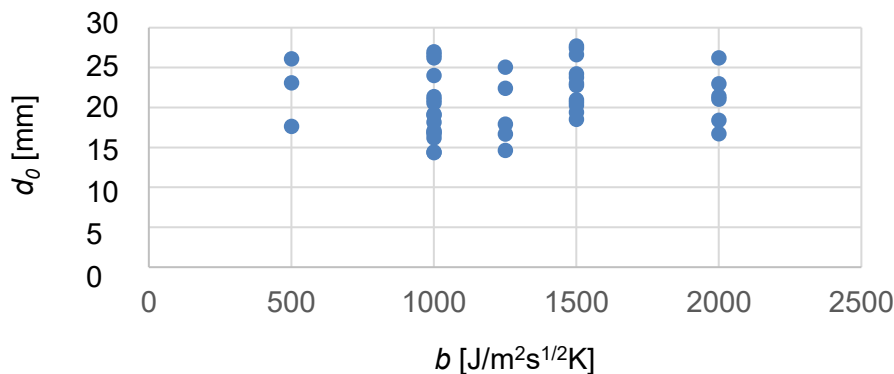
4.1 Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od osnovnih vhodnih parametrov

Najprej preverimo ali obstaja odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od osnovnih vhodnih parametrov O , b ter $q_{f,d}$. Odvisnost preverjamo na grafih raztrosa za vsak faktor posebej, najprej za faktor odprtin O (Grafikon 10), pri čemer jasne povezave med njim in debelino nenosilnega sloja ne opažamo.



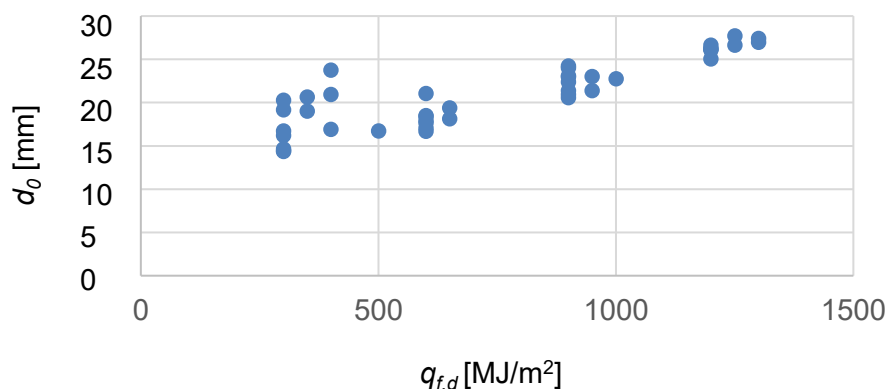
Grafikon 10: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od O

Preverimo še graf raztrosa za faktor oboda b , ki ga izračunamo kot $b = \sqrt{\rho c \lambda} \text{ [J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K]}$ (Grafikon 11). Tudi v tem primeru ni vidna odvisnost debeline nenosilnega sloja od izbranega parametra b .



Grafikon 11: Odvisnost debeline nenosilnega d_0 sloja od b

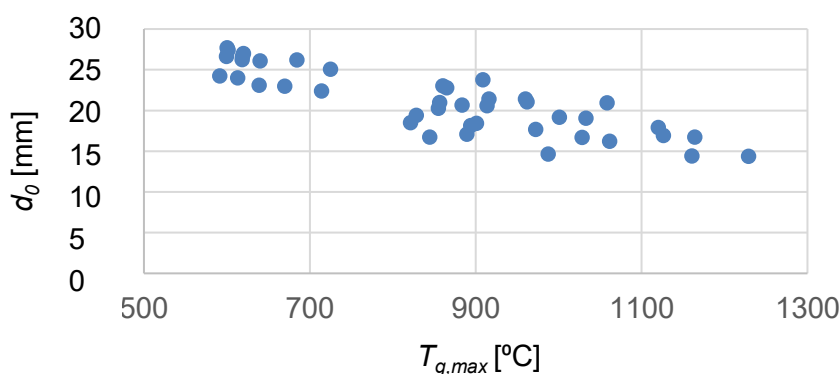
Kot zadnjega od vhodnih parametrov preverimo še projektno gostoto požarne obtežbe $q_{f,d} \text{ [MJ/m}^2\text{]}$ na Grafikonu 12. V tem primeru opazimo da debelina nenosilnega sloja narašča z višanjem projektno gostote požarne obtežbe.



Grafikon 12: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od $q_{f,d}$

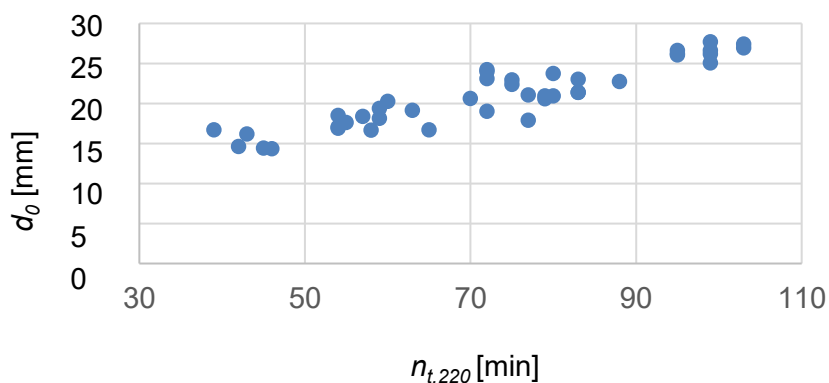
4.2 Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od osnovnih karakteristik ki opisujejo krivuljo naravnega požara

Pri grafih raztrosa v poglavju 4.1 za večino parametrov nismo opazili odvisnosti z debelino nenosilnega sloja, zato preverimo še povezavo med d_0 in parametri, ki opišejo krivuljo naravnega požara. Najprej smo preverili povezavo med debelino nenosilnega sloja d_0 in najvišjo doseženo temperaturo plinov v prostoru med požarom, označeno s $T_{g,max}$. Ta povezava je grafično prikazana na Grafikonu 13. Opazimo jasen trend padanja debeline nenosilnega sloja z višanjem najvišje dosežene temperature.



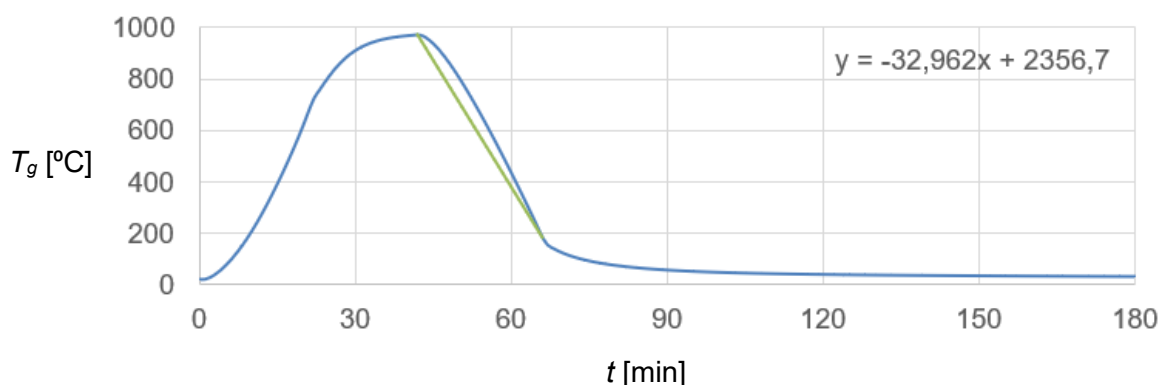
Grafikon 13: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od $T_{g,max}$

Preverjena je bila tudi povezava med debelino nenosilnega sloja d_0 in časom kjer temperatura plinov presega določeno temperaturo T_g . Ta čas je definiran v minutah. Tak parameter smo ocenili kot nujen, saj je potreben nek način opisa trajanja požara. Proces je potekal iterativno. Za vsako krivuljo smo določili čas pri katerem temperatura presega 50, 100, 150, 200, 250 in 300 °C ter preverjali ujemanje dobljenih časov z izračunanimi debelinami nenosilnega sloja. Največje ujemanje je bilo opazno pri 200 in 250 °C, zato smo preverili še vmesne čase, in sicer pri temperaturah 210, 220, 230, 240 in 250 °C. Najboljše ujemanje je bilo opazno pri temperaturi 220 °C. Na Grafikonu 14 opazamo jasen trend naraščanja debeline nenosilnega sloja z višanjem časa, ko je temperatura plinov v prostoru nad 220 °C.



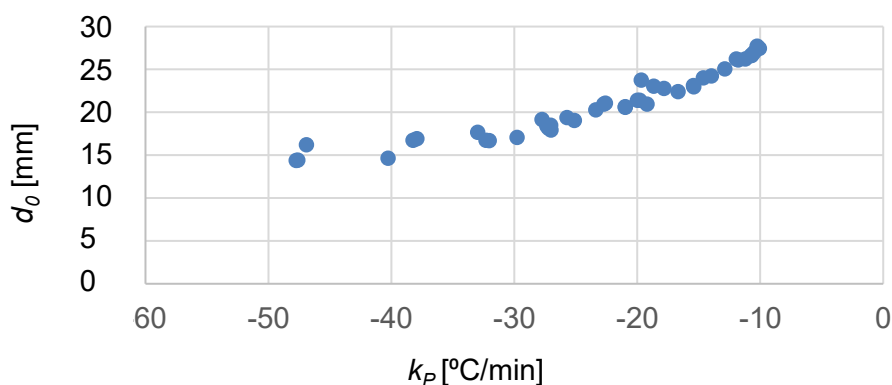
Grafikon 14: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od $n_{t,220}$

Preverili smo tudi vpliv stopnje ohlajanja na debelino nenosilnega sloja. Kot prvi poskus aproksimacije stopnje ohlajanja smo ročno določili naklon požarne krivulje v fazi ohlajanja. Pri grafičnem izpisu podatkov je bila ugotovljena povezava med tako določenim naklonom krivulje v fazi ohlajanja in debelino nenosilnega sloja. Za zagotovitev enoličnega določanja vpliva stopnje ohlajanja smo jo definirali kot enostavno povezavo točke v kateri krivulja doseže maksimalno vrednost $T_{g,max}$, ter točke v kateri odvod krivulje doseže najnižjo vrednost. Stopnjo ohlajanja tako opišemo z naklonom te daljice, označenim s k_p v °C/min. Primer za požarni scenarij A01 lahko vidimo spodaj (Grafikon 15).

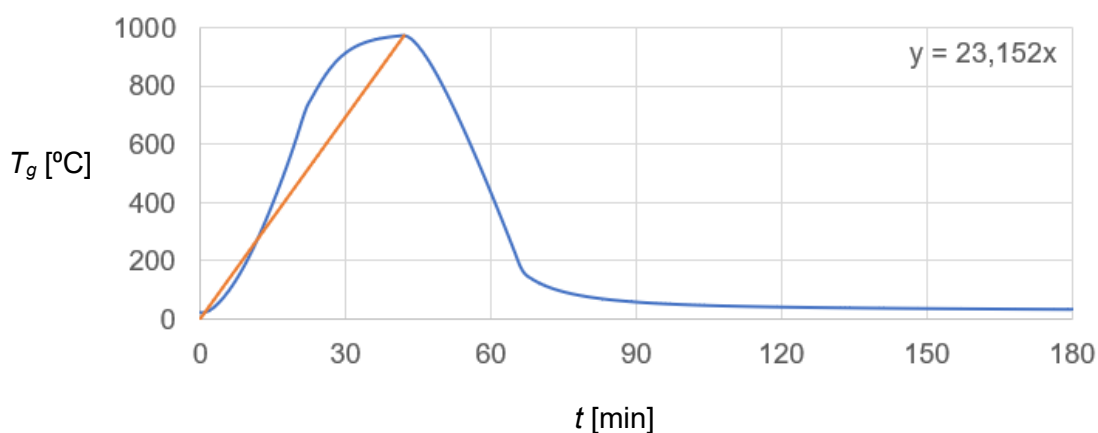


Grafikon 15: Aproximacija stopnje ohlajanja za scenarij A01

Preko Grafikona 16 preverimo še ali obstaja povezava med debelino nenosilnega sloja in tako določenim parametrom k_p , ki opiše stopnjo ohlajanja. Trend je opazen, in sicer vidimo naraščanje debeline nenosilnega sloja z naraščanjem naklona premice, ki aproksimira stopnjo ohlajanja.

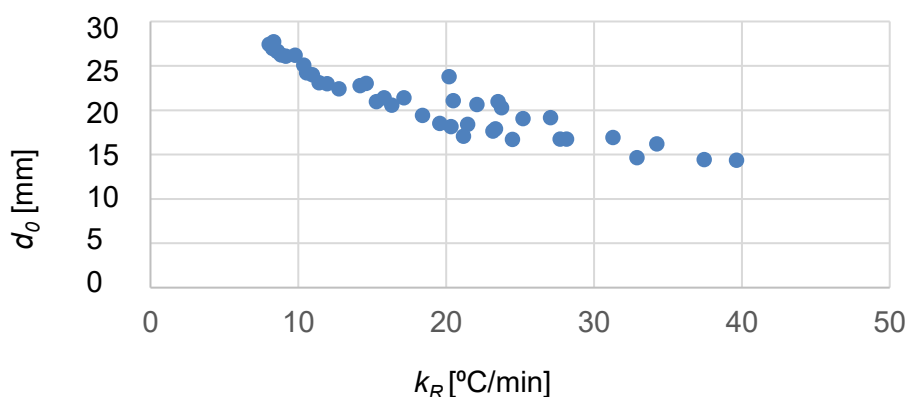
Grafikon 16: Odvisnost debeline nenosilnega sloja d_0 od k_p

Med možnimi parametri, ki vplivajo na debelino nenosilnega sloja smo preverili tudi potek stopnje segrevanja med požarom. Prvi poskus aproksimacije stopnje segrevanja je vključeval ročno določanje naklona linearnega dela požarne krivulje v fazi segrevanja. Pri grafičnem izpisu podatkov je bila ugotovljena povezava med tako določenim naklonom krivulje v fazi segrevanja in debelino nenosilnega sloja. Težave bi imeli tudi pri sami praktični uporabi takšnega pristopa, saj naklona ne bi mogli določiti enolično. Zato smo aproksimacijo stopnje segrevanja enostavno definirali kot povezavo začetne točke požarne krivulje ter točke, v kateri krivulja doseže maksimalno vrednost $T_{g,max}$. Primer za požarni scenarij A01 lahko vidimo spodaj (Grafikon 17). Tako določena aproksimacija stopnje segrevanja požarne krivulje se lahko enostavno določi za vsak primer požarne krivulje določene s programom OZone [5]. Uporabljen parameter za izračun debeline nenosilnega sloja je naklon te premice k_R z enoto °C/min.



Grafikon 17: Aproksimacija stopnje segrevanja za scenarij A01

S pomočjo Grafikona 18 preverimo še ali obstaja povezava med debelino nenosilnega sloja in stopnjo segrevanja naravne požarne krivulje. Vidimo lahko jasen trend padanja debeline nenosilnega sloja z naraščanjem naklona premice, s katero aproksimiramo stopnjo segrevanja.



Grafikon 18: Odvisnost debeline nenosilnega d_0 sloja od k_R

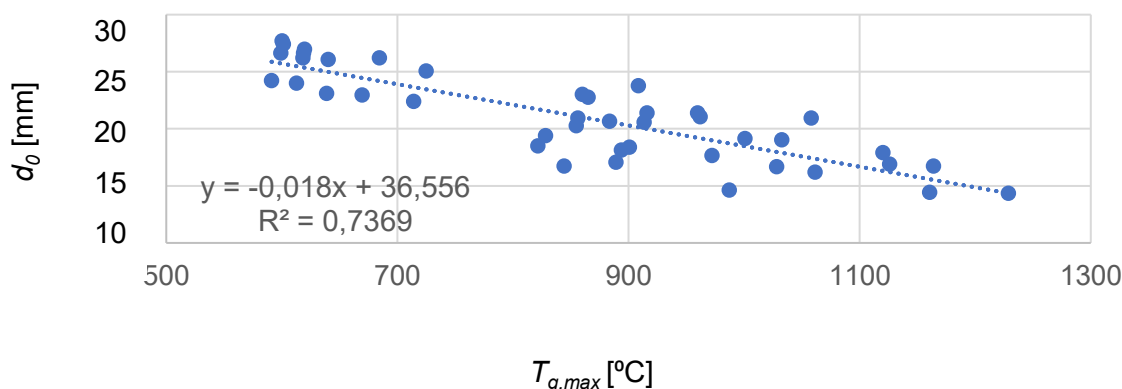
Pri grafih raztrosa, ki povezujejo debelino nenosilnega sloja in osnovne karakteristike naravne požarne krivulje, opazamo jasne trende. Ocenjujemo da bi vsi štirje parametri lahko bili uporabljeni za napovedovanje debeline nenosilnega sloja, kar podrobneje preverimo v naslednjem poglavju.

5 REGRESIJSKI MODELI Z ENO ALI VEČ SPREMENLJIVKAMI

V tem poglavju podrobneje preverimo določene povezave iz Poglavja 4. Povezave med debelino nenosilnega sloja d_0 in osnovnimi vhodnimi podatki nismo opazili, zato jih v tem poglavju ne obravnavamo. Opazili smo povezavo med d_0 in osnovnimi karakteristikami naravne požarne krivulje. Te trende podrobneje preverimo v tem poglavju z regresijskimi modeli z eno spremenljivko. Za vsak primer posebej izberemo povezavo, ki nam da najboljše ujemanje. Na koncu še izvedemo linearne regresijske analize za tri različne kombinacije naslednjih parametrov: najvišja dosežena temperatura $T_{g,max}$, linearna aproksimacija stopnje segrevanja k_R , linearna aproksimacija stopnje ohlajanja k_P in časom ko je temperatura plinov v prostoru nad 220 °C $n_{t,220}$.

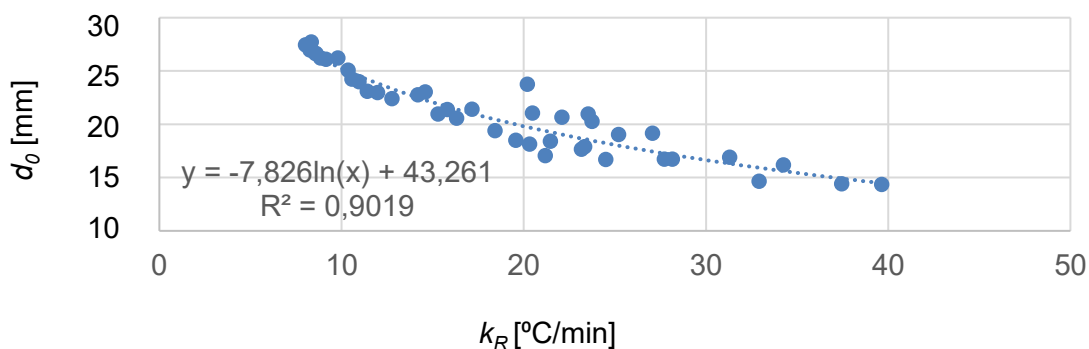
5.1 Regresijski modeli z eno spremenljivko

Najprej smo natančneje preverili povezavo med debelino nenosilnega sloja d_0 in najvišjo doseženo temperaturo plinov v prostoru med požarom, označeno s $T_{g,max}$. Najboljše ujemanje je pokazala linearna povezava, ki je grafično prikazana na spodnjem grafu (Grafikon 19). Model zaradi srednje visokega determinacijskega koeficienta ocenjujemo kot delno natančen. R^2 je 0,74.



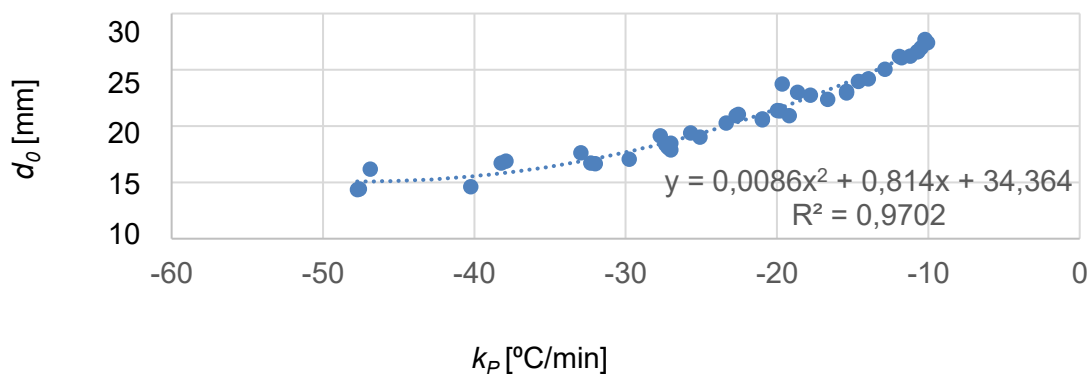
Grafikon 19: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$

Za tem smo preverili še povezavo med debelino nenosilnega sloja d_0 in aproksimacijo naklona požarne krivulje v fazi segrevanja, označeno s k_R v °C/min. To povezavo grafično prikažemo na Grafikonu 20. Povezavo najboljše opiše logaritemska funkcija. R^2 znaša 0,90, zato model ocenimo kot bolj natančen od predhodnega.



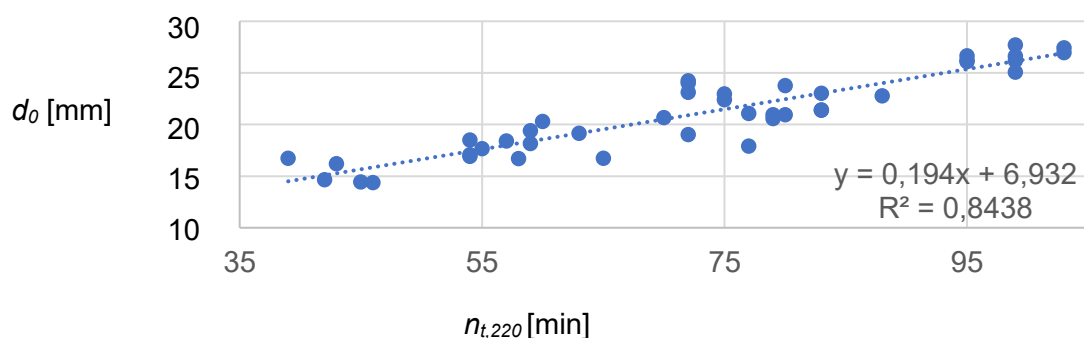
Grafikon 20: Povezava med d_0 in stopnjo segrevanja

Podrobneje pregledamo še povezavo med d_0 in aproksimacijo naklona požarne krivulje v fazi ohlajanja. Najbolje jo opišemo s polinomsko funkcijo 2. reda, ki je zapisana na Grafikonu 21. R^2 je v tem primeru 0,97. Ta model zelo natančno opisuje odvisnost debeline nenosilnega sloja od izbranega parametra, v primerjavi s predhodnima modeloma.



Grafikon 21: Povezava med d_0 in stopnjo ohlajanja

Povezavo med debelino nenosilnega sloja d_0 in časom, kjer temperatura plinov presega določeno temperaturo T_g , najbolje opišemo z linearnim modelom. Prikažemo jo na Grafikonu 22. R^2 je 0,84. Model ocenimo kot delno natančen.

Grafikon 22: Povezava med d_0 in $n_{t,220}$

Od vseh prikazanih modelov največjo natančnost izkazuje model, ki opisuje odvisnost debeline nenosilnega sloja in stopnje ohlajanja. Ta spremenljivka sama pojasni 97 % variabilnosti d_0 .

5.2 Regresijski modeli z več spremenljivkami

Preko modela linearne regresije več spremenljivk (opisane v podpoglavju 2.4) je bila preverjena linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$, k_R , k_P , ter $n_{t,220}$ (Slika 17). Te štiri parametre izberemo na podlagi visokega determinacijskega koeficienta R^2 , ki je bil izračunan v podpoglavju 5.1. V prejšnjem podpoglavju smo individualen vpliv posameznega parametra opisali s poljubno regresijsko funkcijo. V primeru multiple regresije pa se osredotočimo na uporabo linearne funkcije z več spremenljivkami. Izbrana mera natančnosti modela je prilagojen R^2 (0,97), pri čemer na osnovi visoke vrednosti tega parametra sklepamo, da je linearni model s temi spremenljivkami zelo natančen. Ustreznost modela kot celote najprej preverjamo z analizo variance. Vidimo, da je izračunana statistika F znotraj kritičnega območja, saj pripadajoče dejansko tveganje znaša $2,11 \cdot 10^{-29}$. Na podlagi tega sprejmemo alternativno domnevo, ki pravi, da je vsaj eden izmed koeficientov linearne regresije statistično značilen. To pomeni, da je model v osnovi ustrezen, kar pa ne pove kateri koeficienti so pomembni in kateri niso. Zato nadalje s t statistiko preverimo še statistično značilnost posameznih koeficientov. Opažamo, da je izračunana t statistika znotraj kritičnega območja, saj je pripadajoča p – vrednost za vse primere manjša od 0,05.

Regression Statistics					
R Square	0,98				
Adjusted R Square	0,97				
Standard Error	0,06				
Observations	42				

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	4	6,03	1,51	375,67	2,11E-29
Residual	37	0,15	4,01E-03		
Total	41	6,18			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	20,4085	1,36E-01	14,99	2,68E-17
$n_{t,220}$	0,1387	1,39E-03	9,98	4,84E-12
k_R	0,1975	5,75E-03	3,44	1,47E-03
k_P	0,1004	4,34E-03	2,31	2,65E-02
$T_{g,max}$	-0,0127	1,42E-04	-8,90	9,81E-11

Slika 17: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$, k_R , k_P , ter $n_{t,220}$

Z modelom linearne regresije več spremenljivk je bila preverjena še linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$, k_R , ter k_P . Za vse parametre prejšnje regresije velja da jih določamo direktno s požarne krivulje. Model, viden na Sliki 18, tako ne vsebuje parametra, ki bi opisal čas trajanja požara. Najprej preverimo *prilagojen* R^2 , ki je sicer visok, a nižji kot pri predhodni regresiji. Izračunana statistika F je znotraj kritičnega območja, zato sprejmemo alternativno domnevo, ki pravi da je vsaj en parameter statistično značilen. Pri pregledu statistične značilnosti posameznih koeficientov ugotovimo, da pri k_R ne moremo zavreči ničelne domneve, pripadajoča p – vrednost je 0,35. k_R ni statistično značilen.

Regression Statistics				
R Square	0,91			
Adjusted R Square	0,90			
Standard Error	0,12			
Observations	42			

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	5,63	1,88	130,10	4,94E-20
Residual	38	0,55	1,44E-02		
Total	41	6,18			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	32,2145	1,28E-01	25,21	2,50E-25
k_R	0,1013	1,07E-02	0,94	3,52E-01
k_P	0,3337	6,94E-03	4,81	2,42E-05
$T_{g,max}$	-0,0062	2,40E-04	-2,59	1,36E-02

Slika 18: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$, k_R , ter k_P

Zato opravimo še eno linearno regresijo z več spremenljivkami, pri čemer izločimo parameter k_R . Preverimo torej linearno povezavo med d_0 in $T_{g,max}$ ter k_P . *Prilagojen* R^2 je primerljiv s

predhodno regresijo. Prikažemo jo na Sliki 19. Ob pregledu izračunane statistike F ugotovimo da je le-ta znotraj kritičnega območja. Sprejmemo alternativno domnevo in ugotovimo, da je vsaj en parameter statistično značilen. Ob pregledu izračunanih t statistik ugotovimo, da sta pripadajoči p – vrednosti znotraj kritičnega območja za oba parametra.

Regression Statistics	
R Square	0,91
Adjusted R Squar	0,90
Standard Error	0,12
Observations	42

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	5,61	2,81	195,26	4,8163E-21
Residual	39	0,56	1,44E-02		
Total	41	6,18			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	31,5496	1,06E-01	29,65	2,30E-28
k_P	0,2757	3,21E-03	8,60	1,52E-10
$T_{g,max}$	-0,0048	1,85E-04	-2,58	1,36E-02

Slika 19: Linearna povezava med d_0 in $T_{g,max}$ ter k_P

Linearna kombinacija štirih parametrov, ki karakterizirajo naravno požarno krivuljo, nam lahko poda izračun debeline nenosilnega sloja. Za dan nabor podatkov opazamo, da je model ene spremenljivke, kjer debelino nenosilnega sloja d_0 povežemo s stopnjo ohlajanja približno tako natančen kot regresijski model z več spremenljivkami, kjer d_0 povežemo z vsemi parametri naravne požarne krivulje. R^2 za regresije z eno spremenljivko in prilagojen R^2 za najučinkovitejšo regresijo več spremenljivk so podani v Preglednici 8. Če sklepamo po našem naboru podatkov bi za napovedovanje debeline nenosilnega sloja zadostoval regresijski model z eno spremenljivko. Ugibamo lahko, da bi bil njen vpliv v sklopu večje študije manjši.

Preglednica 8: Zbrani R^2 za regresije z eno in prilagojen R^2 za prvo regresijo z več spremenljivkami

Spremenljivka	$T_{g,max}$	k_R	k_P	$n_{t,220}$	$T_{g,max}, k_R, k_P$ in $n_{t,220}$
R^2 / prilagojen R^2	0,74	0,90	0,97	0,84	0,97

6 ZAKLJUČEK

V magistrski nalogi smo se osredotočili na določitev debeline nenosilnega sloja lesenega nosilca izpostavljenega naravnemu požaru. Metoda efektivnega prečnega prereza je trenutno veljavna le za standardni požar, pri čemer je debelina nenosilnega sloja konstantna in znaša 7 mm. Ta vrednost se uporablja tudi za določitev požarne odpornosti lesenih elementov pri parametrični in naravni požarni krivulji, pri čemer z rezultati nismo na varni strani, kot to kažejo obsežnejše študije [4]. Zato smo v magistrski nalogi s pomočjo naprednih računskih analiz izračunali debeline nenosilnega sloja za 42 naravnih požarnih krivulj, ki smo jih določili s pomočjo programa OZone.

Najprej smo preverili ali obstaja povezava med debelino nenosilnega sloja in vhodnimi podatki potrebnimi za določitev razvoja naravnega požara, za tem pa postopek ponovili še s parametri, ki direktno opišejo naravno požarno krivuljo. Ugotovili smo, da jasne povezave med debelino nenosilnega sloja in faktorjem odprtin O in faktorjem oboda b ni. Opazili smo, da debelina nenosilnega sloja narašča z višanjem projektne gostote požarne obtežbe $q_{f,d}$. V primerjavi z vhodnimi podatki potrebnimi za določitev razvoja naravnega požara, smo dobili boljšo povezavo med debelino nenosilnega sloja in parametri, ki karakterizirajo naravne požarne krivulje, in sicer pri stopnji segrevanja in ohlajanja požarne krivulje, ter pri maksimalni doseženi temperaturi plinov v prostoru in časom, kjer temperatura plinov presega 220 °C.

Ugotovili smo, da bi linearna kombinacija teh štirih parametrov lahko podala izračun debeline nenosilnega sloja. Hkrati pa opazamo, da veliko natančnost poda tudi regresija ene spremenljivke in sicer v primeru, ko debelino nenosilnega sloja d_0 izrazimo v odvisnosti od stopnje ohlajanja. Povezava je v tem primeru zajeta s polinomske funkcijo 2. reda.

7 VIRI

- [1] SIST EN 1991-1-2:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije.
- [2] Hozjan, T. 2017. Požarna obtežba in razvoj požara v požarnem sektorju. <http://www.km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/PozarnaVarnost/Predavanja/Pozarna%20obtezba.pdf> (Pridobljeno 31. 8. 2021.)
- [3] Hozjan, T. 2017. Požarna odpornost lesenih konstrukcij – določitev mehanske odpornosti <http://www.km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/POK/Predavanja/Pozarna%20odpornost%20lesnih%20konstrukcij.pdf> (Pridobljeno 17. 9. 2021.)
- [4] Huč, S., Pečenko, R., Hozjan, T. 2021. Predicting the thickness of zero-strength layer in timber beam exposed to parametric fires. Engineering structures, letn. 43, 3-20.
- [5] Cadorin, J.F., Pintea, D., Franssen, J.M. 2005. Program OZone V2.2. Liege (Belgija), Univerza v Liegeu.
- [6] Pečenko, R., Svensson, S., Hozjan, T. 2015. Modelling heat and moisture transfer in timer exposed to fire. International Journal of Heat and Mass Transfer, letn. 13, 8-12: 598-605.
- [7] Pečenko, R. 2018. Numerična analiza nenosilnega sloja lesa ob uporabi metode efektivnega prečnega prereza. V: Može, P. (ur.), Lopatič, J. (ur.), Markelj, V (ur.). Štirideseto zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 19. – 20. november 2018, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 362.
- [8] Seminar evropskega raziskovalnega projekta Difisek. 2008. Projektiranje požarno varnih jeklenih in sovprežnih konstrukcij, v skladu s standardi Evrokod. Gradivo seminarja: 201 str. http://www.km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/POK/Literatura/difisek_gradivo.pdf (Pridobljeno 19.9.2021.)
- [9] Cadorin, J.F., Pintea, D., Franssen, J.M. 2001. The design fire tool OZone V2.0 – Theoretical description and validation of experimental fire tests. Liege (Belgija), Univerza v Liegeu: 49 str.
- [10] Boslaugh, S. E. .Pyrolysis. Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/pyrolysis>. Accessed 16 August 2021 (Pridobljeno 16.8.2021.)
- [11] Glavnik, A., Jug, A. 2010. Priročnik o načrtovanju požarne varnosti. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 289 str.

- [12] Pečenko, R., Hozjan, T. 2017. Modeliranje vpliva vlage pri toplotni analizi lesa. V: Može, P. (ur.), Lopatič, J. (ur.). Devetintrideseto zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Ljubljana, 30. november 2017, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 256.
- [13] Pečenko, R. 2018. Celostna analiza lesenega strešnega nosilca s spremenljivo višino v požaru. V: Zupan, D. (ur.), Hozjan, T. (ur.). Kuhljevi dnevi 2018, Laško, 27. – 28. september 2018, str. 169.
- [14] Pečenko, R., Hozjan, T. 2016. Vpliv vlage na odziv lesenega nosilca v požaru. V: Zupan, D. (ur.), Hozjan, T. (ur.). Kuhljevi dnevi 2016, Bovec, 29. – 30. september 2016, str. 202.
- [15] Schmid, J., Klippel, M., Just, A., Frangi, A. 2014. Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method. Fire safety journal, letn. 38, 1-8:81-99.
- [16] Turk, G. 2012. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 264 str.
- [17] Dokumentacija programa Cognos Analytics 11.1.0. 2018. Statistični preizkusi. <https://www.ibm.com/docs/sl/cognos-analytics/11.1.0?topic=dashboards-statistical-tests> (Pridobljeno 15.11.2021.)
- [18] Minitab. 2019. Interpret the key results for Multiple Regression. <https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/multiple-regression/interpret-the-results/key-results/> (Pridobljeno 15.11.2021.)

PRILOGA A – REZULTATI TEMPERATURNE ANALIZE

Rezultati temperaturne analize – požarne krivulje A01 – A11

t [min]	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10	A11
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
1	20,89	20,50	20,50	21,41	21,41	21,41	20,89	20,89	20,89	20,89	20,50
2	27,99	26,64	26,64	29,97	29,97	29,97	27,99	27,99	27,99	27,99	26,64
3	40,46	36,57	36,57	47,19	47,19	47,19	40,45	40,45	40,45	40,45	36,57
4	56,57	48,81	48,81	72,11	72,11	72,11	56,53	56,53	56,53	56,53	48,79
5	75,60	62,93	62,93	103,36	103,36	103,36	75,47	75,47	75,47	75,47	62,87
6	97,23	78,81	78,81	139,83	139,83	139,83	97,03	97,03	97,03	97,03	78,69
7	121,43	96,39	96,39	180,65	180,65	180,65	121,11	121,11	121,11	121,11	96,20
8	148,13	115,66	115,66	224,84	224,84	224,84	147,62	147,62	147,62	147,62	115,37
9	177,26	136,62	136,62	271,54	271,54	271,54	176,48	176,48	176,48	176,48	136,20
10	208,71	159,26	159,26	319,94	319,94	319,94	207,59	207,59	207,59	207,59	158,67
11	242,38	183,58	183,58	369,35	369,35	369,35	240,82	240,82	240,82	240,82	182,77
12	278,10	209,57	209,57	419,32	419,32	419,32	276,01	276,01	276,01	276,01	208,50
13	315,73	237,20	237,20	469,69	469,69	469,69	312,95	312,95	312,95	312,95	235,80
14	355,08	266,43	266,43	520,54	520,54	520,54	351,47	351,47	351,47	351,47	264,65
15	396,03	297,23	297,23	572,22	572,22	572,22	391,36	391,36	391,36	391,36	294,98
16	438,49	329,55	329,55	625,37	625,37	625,37	432,48	432,48	432,48	432,48	326,73
17	482,49	363,34	363,34	660,51	660,51	660,51	474,75	474,75	474,75	474,75	359,82
18	528,15	398,56	398,56	685,70	685,70	685,70	518,18	518,18	518,18	518,18	394,18
19	575,79	435,19	435,19	711,64	711,64	711,64	562,90	562,90	562,90	562,90	429,75
20	625,85	473,26	473,26	737,45	737,45	737,45	609,14	609,14	609,14	609,14	466,49
21	678,96	512,86	512,86	762,62	762,62	762,62	657,30	657,30	657,30	657,30	504,37
22	726,54	544,07	544,07	786,83	786,83	786,83	698,23	698,23	698,23	698,23	533,55
23	756,98	555,13	555,13	809,85	809,85	809,85	720,14	720,14	720,14	720,14	541,69
24	786,78	565,79	565,79	831,53	831,53	831,53	741,20	741,20	741,20	741,20	549,35
25	814,75	575,82	575,82	851,83	851,83	851,83	760,77	760,77	760,77	760,77	556,37
26	840,13	585,00	585,00	870,75	870,75	870,75	778,50	778,50	778,50	778,50	562,71
27	862,57	593,23	593,23	888,31	888,31	888,31	794,27	794,27	794,27	794,27	568,36
28	881,99	600,46	600,46	904,59	904,59	904,59	808,12	808,12	808,12	808,12	573,34
29	898,55	606,70	606,70	919,67	919,67	919,67	820,16	820,16	820,16	820,16	577,71
30	912,49	612,02	612,02	933,63	933,63	933,63	830,60	830,60	830,60	830,60	581,52
31	924,13	616,51	616,51	946,56	946,56	946,56	839,62	839,62	839,62	839,62	584,83
32	933,77	620,25	620,25	958,56	958,56	958,56	847,42	847,42	847,42	847,42	587,72
33	941,74	623,37	623,37	969,70	969,70	969,70	854,20	854,20	854,20	854,20	590,24
34	948,29	625,94	625,94	980,07	980,07	980,07	860,11	860,11	860,11	860,11	592,46
35	953,67	628,05	628,05	989,73	989,73	989,73	865,30	865,30	865,30	865,30	594,41
36	958,09	629,80	629,80	998,76	998,76	998,76	869,88	869,88	869,88	869,88	596,14
37	961,72	631,23	631,23	1000,88	1007,22	1007,22	873,96	873,96	873,96	873,96	597,68
38	964,71	632,41	632,41	998,51	1015,16	1015,16	877,63	877,63	877,63	877,63	599,07
39	967,18	633,38	633,38	992,33	1022,63	1022,63	880,94	880,94	880,94	880,94	600,33
40	969,23	634,18	634,18	982,61	1029,67	1029,67	883,96	883,96	883,96	883,96	601,48
41	970,94	634,85	634,85	969,69	1032,74	1036,33	886,73	886,73	886,73	886,73	602,53
42	972,37	635,41	635,41	953,86	1031,03	1042,65	889,30	889,30	889,30	889,30	603,51
43	967,28	635,89	635,89	935,39	1026,15	1048,64	884,76	891,68	891,68	891,68	604,42
44	954,26	636,29	636,29	914,49	1018,25	1054,34	872,58	893,91	893,91	893,91	605,27
45	936,53	636,63	636,63	891,37	1007,64	1058,20	856,38	893,77	896,00	896,00	606,07
46	914,93	636,93	636,93	866,18	994,59	1057,49	836,91	884,17	897,98	897,98	606,82
47	890,19	637,19	637,19	839,03	979,33	1053,80	814,78	870,56	899,86	899,86	607,53
48	862,87	637,42	637,42	810,02	962,07	1047,50	790,48	853,71	901,64	901,64	608,21
49	833,43	637,62	637,62	779,23	942,99	1038,81	764,38	834,23	903,34	903,34	608,86
50	802,22	637,81	637,81	746,68	922,23	1027,99	736,77	812,62	904,97	904,97	609,48
51	769,53	637,98	637,98	712,38	899,91	1015,26	707,88	789,26	906,52	906,52	610,07
52	735,58	638,14	638,14	676,33	876,14	1000,80	677,87	764,46	908,02	908,02	610,64

53	700,54	638,28	638,28	638,47	851,00	984,78	646,86	738,45	909,46	909,46	611,19
54	664,53	638,42	638,42	598,73	824,54	967,34	614,94	711,39	910,84	910,84	611,72
55	627,66	638,55	638,55	557,00	796,82	948,59	582,18	683,42	912,18	912,18	612,23
56	590,01	638,67	638,67	513,15	767,86	928,62	548,64	654,63	913,47	913,47	612,72
57	551,65	633,25	638,79	467,03	737,67	907,53	514,34	625,10	910,96	914,72	607,53
58	512,64	623,59	638,91	418,46	706,25	885,39	479,32	594,87	903,04	915,93	598,25
59	473,01	612,64	639,02	384,64	673,58	862,23	443,60	564,00	892,41	915,61	587,79
60	432,83	600,64	639,13	358,12	639,63	838,12	407,21	532,50	879,63	908,97	576,45
61	392,12	587,80	639,23	335,20	604,34	813,07	370,16	500,40	865,14	899,58	564,40
62	350,94	574,31	639,33	315,30	567,64	787,11	332,47	467,72	849,28	888,02	551,80
63	309,29	560,29	639,43	297,93	529,46	760,25	294,14	434,48	832,32	874,73	538,75
64	267,18	545,86	639,53	282,70	489,70	732,50	255,16	400,69	814,44	860,07	525,34
65	224,57	531,10	639,63	269,26	448,25	703,84	215,48	366,36	795,82	844,29	511,63
66	181,29	516,08	639,72	257,34	405,02	674,26	174,92	331,50	776,57	827,61	497,68
67	153,41	500,84	639,82	246,72	375,76	643,73	149,59	296,11	756,78	810,20	483,52
68	140,98	485,43	639,91	237,20	352,17	612,21	139,65	260,18	736,52	792,16	469,18
69	130,59	469,87	640,00	228,63	331,66	579,67	131,49	223,65	715,83	773,60	454,69
70	121,73	454,19	640,09	220,88	313,74	546,05	124,63	186,42	694,77	754,59	440,07
71	114,09	438,41	636,07	213,82	298,01	511,30	118,79	151,96	673,35	735,18	425,31
72	107,44	422,53	628,86	207,38	284,12	475,33	113,77	141,44	651,61	715,40	410,45
73	101,60	406,58	620,67	201,47	271,80	438,09	109,39	133,24	629,56	695,30	395,47
74	96,43	390,55	611,71	196,03	260,81	399,51	105,55	126,35	607,21	674,90	380,40
75	91,82	374,46	602,14	191,00	250,96	371,22	102,14	120,50	584,57	654,21	365,22
76	87,69	358,30	592,09	186,34	242,07	349,60	99,10	115,45	561,65	633,25	349,95
77	83,98	342,08	581,66	182,00	234,03	330,72	96,37	111,07	538,46	612,03	334,59
78	80,62	325,79	570,92	177,94	226,72	314,15	93,89	107,22	515,00	590,55	319,14
79	77,57	309,44	559,95	174,15	220,03	299,54	91,63	103,80	491,27	568,82	303,59
80	74,79	293,03	548,78	170,58	213,89	286,58	89,56	100,76	467,28	546,86	287,94
81	72,24	276,54	537,46	167,22	208,24	275,03	87,66	98,02	443,04	524,65	272,19
82	69,91	259,97	526,02	164,05	203,01	264,68	85,90	95,54	418,53	502,21	256,33
83	67,77	243,31	514,47	161,05	198,16	255,36	84,26	93,27	393,78	479,54	240,36
84	65,80	226,54	502,84	158,21	193,63	246,92	82,73	91,20	368,76	456,64	224,25
85	63,97	209,65	491,13	155,51	189,41	239,26	81,30	89,29	343,50	433,51	207,99
86	62,28	192,60	479,37	152,93	185,45	232,25	79,95	87,52	317,98	410,15	191,56
87	60,72	175,36	467,55	150,48	181,72	225,83	78,68	85,88	292,20	386,57	174,92
88	59,27	157,89	455,68	148,14	178,21	219,91	77,48	84,35	266,15	362,77	158,03
89	57,91	140,10	443,77	145,90	174,90	214,44	76,34	82,91	239,80	338,74	140,83
90	56,65	121,90	431,83	143,75	171,76	209,36	75,26	81,55	213,12	314,48	123,22
91	55,48	103,12	419,85	141,69	168,78	204,64	74,23	80,28	186,04	289,99	105,04
92	54,38	83,47	407,84	139,71	165,95	200,22	73,24	79,07	158,44	265,26	86,07
93	53,35	71,12	395,79	137,81	163,25	196,07	72,30	77,92	138,62	240,26	74,49
94	52,39	67,68	383,72	135,98	160,67	192,18	71,40	76,83	131,58	214,95	71,66
95	51,48	64,64	371,61	134,21	158,21	188,51	70,53	75,79	125,73	189,30	69,23
96	50,63	61,92	359,48	132,51	155,85	185,05	69,70	74,80	120,71	163,19	67,10
97	49,83	59,47	347,32	130,86	153,59	181,76	68,90	73,85	116,35	139,40	65,22
98	49,08	57,26	335,12	129,28	151,42	178,64	68,13	72,94	112,53	132,10	63,54
99	48,37	55,24	322,89	127,74	149,34	175,68	67,38	72,07	109,15	126,28	62,04
100	47,70	53,41	310,64	126,25	147,33	172,85	66,67	71,23	106,13	121,28	60,68
101	47,07	51,74	298,34	124,81	145,40	170,16	65,97	70,42	103,42	116,95	59,45
102	46,47	50,20	286,01	123,42	143,53	167,58	65,30	69,64	100,97	113,15	58,32
103	45,90	48,80	273,63	122,06	141,73	165,11	64,65	68,89	98,74	109,78	57,29
104	45,37	47,50	261,21	120,75	139,99	162,74	64,02	68,16	96,69	106,79	56,34
105	44,86	46,30	248,74	119,47	138,31	160,47	63,41	67,46	94,80	104,09	55,45
106	44,37	45,20	236,22	118,23	136,69	158,28	62,82	66,78	93,05	101,65	54,63
107	43,91	44,18	223,62	117,02	135,11	156,17	62,25	66,12	91,42	99,43	53,87
108	43,47	43,23	210,96	115,85	133,58	154,14	61,69	65,49	89,90	97,39	53,15
109	43,06	42,35	198,21	114,71	132,10	152,19	61,14	64,87	88,47	95,51	52,47
110	42,66	41,54	185,35	113,60	130,66	150,30	60,62	64,27	87,12	93,77	51,83
111	42,28	40,78	172,38	112,52	129,27	148,47	60,10	63,68	85,85	92,16	51,22

112	41,92	40,07	159,26	111,46	127,91	146,70	59,60	63,12	84,65	90,64	50,65
113	41,57	39,40	145,97	110,43	126,59	144,99	59,11	62,56	83,50	89,22	50,10
114	41,23	38,79	132,46	109,43	125,31	143,33	58,64	62,03	82,41	87,88	49,58
115	40,91	38,21	118,67	108,45	124,06	141,73	58,18	61,51	81,37	86,62	49,08
116	40,61	37,67	104,53	107,50	122,85	140,17	57,73	61,00	80,37	85,42	48,60
117	40,31	37,16	89,90	106,56	121,67	138,65	57,28	60,50	79,42	84,28	48,14
118	40,03	36,68	74,58	105,65	120,51	137,18	56,85	60,02	78,50	83,19	47,70
119	39,76	36,24	65,24	104,76	119,39	135,76	56,44	59,55	77,62	82,15	47,28
120	39,50	35,82	62,49	103,89	118,29	134,37	56,03	59,09	76,77	81,16	46,87
121	39,24	35,42	60,09	103,04	117,22	133,01	55,62	58,64	75,95	80,21	46,47
122	39,00	35,05	57,93	102,21	116,18	131,70	55,23	58,20	75,16	79,29	46,09
123	38,76	34,69	55,96	101,40	115,16	130,42	54,85	57,77	74,39	78,41	45,72
124	38,54	34,36	54,17	100,60	114,16	129,17	54,48	57,36	73,65	77,56	45,36
125	38,31	34,04	52,54	99,82	113,19	127,95	54,11	56,95	72,93	76,75	45,02
126	38,10	33,75	51,04	99,06	112,24	126,76	53,75	56,55	72,24	75,96	44,68
127	37,89	33,46	49,67	98,31	111,31	125,60	53,40	56,16	71,56	75,19	44,35
128	37,69	33,20	48,41	97,58	110,40	124,47	53,06	55,78	70,91	74,45	44,03
129	37,50	32,94	47,24	96,86	109,51	123,37	52,72	55,40	70,27	73,74	43,73
130	37,31	32,70	46,17	96,16	108,64	122,29	52,39	55,04	69,65	73,04	43,43
131	37,12	32,47	45,17	95,47	107,79	121,24	52,07	54,68	69,05	72,37	43,13
132	36,94	32,25	44,25	94,79	106,95	120,21	51,75	54,33	68,47	71,71	42,85
133	36,77	32,04	43,40	94,13	106,14	119,20	51,44	53,98	67,90	71,08	42,57
134	36,60	31,84	42,60	93,48	105,34	118,22	51,14	53,65	67,34	70,46	42,30
135	36,43	31,65	41,86	92,84	104,55	117,25	50,84	53,32	66,80	69,86	42,04
136	36,27	31,46	41,17	92,21	103,78	116,31	50,55	52,99	66,27	69,27	41,78
137	36,12	31,29	40,53	91,60	103,03	115,39	50,26	52,68	65,75	68,70	41,53
138	35,96	31,12	39,93	90,99	102,29	114,49	49,98	52,37	65,25	68,14	41,28
139	35,81	30,96	39,37	90,40	101,56	113,60	49,70	52,06	64,76	67,60	41,04
140	35,66	30,80	38,84	89,82	100,85	112,73	49,43	51,76	64,28	67,07	40,80
141	35,52	30,65	38,35	89,25	100,15	111,89	49,16	51,47	63,81	66,55	40,57
142	35,38	30,51	37,88	88,69	99,47	111,05	48,90	51,18	63,35	66,05	40,35
143	35,24	30,37	37,45	88,13	98,80	110,24	48,64	50,90	62,90	65,55	40,13
144	35,10	30,23	37,04	87,59	98,14	109,44	48,39	50,62	62,46	65,07	39,91
145	34,97	30,10	36,65	87,06	97,49	108,65	48,14	50,34	62,03	64,60	39,70
146	34,84	29,98	36,29	86,53	96,85	107,88	47,90	50,08	61,61	64,14	39,50
147	34,71	29,85	35,94	86,02	96,23	107,13	47,66	49,81	61,20	63,69	39,29
148	34,59	29,74	35,62	85,51	95,61	106,39	47,42	49,55	60,80	63,25	39,10
149	34,47	29,62	35,31	85,01	95,01	105,66	47,19	49,30	60,40	62,82	38,90
150	34,35	29,51	35,02	84,52	94,41	104,94	46,96	49,05	60,02	62,40	38,71
151	34,23	29,40	34,74	84,04	93,83	104,24	46,74	48,80	59,64	61,98	38,52
152	34,11	29,30	34,48	83,56	93,25	103,55	46,51	48,56	59,27	61,58	38,34
153	33,99	29,19	34,23	83,09	92,69	102,88	46,30	48,32	58,90	61,18	38,16
154	33,88	29,10	33,99	82,63	92,13	102,21	46,08	48,09	58,54	60,79	37,98
155	33,77	29,00	33,76	82,18	91,59	101,56	45,87	47,86	58,19	60,41	37,81
156	33,66	28,90	33,55	81,73	91,05	100,91	45,67	47,63	57,85	60,04	37,64
157	33,55	28,81	33,34	81,29	90,52	100,28	45,46	47,41	57,51	59,67	37,47
158	33,45	28,72	33,14	80,86	90,00	99,66	45,26	47,19	57,18	59,31	37,31
159	33,34	28,63	32,95	80,43	89,49	99,05	45,06	46,97	56,85	58,96	37,15
160	33,24	28,55	32,77	80,01	88,99	98,45	44,87	46,76	56,53	58,61	36,99
161	33,14	28,46	32,60	79,60	88,49	97,86	44,68	46,55	56,22	58,27	36,83
162	33,04	28,38	32,43	79,19	88,00	97,28	44,49	46,34	55,91	57,94	36,68
163	32,94	28,30	32,27	78,79	87,52	96,70	44,30	46,14	55,60	57,61	36,53
164	32,84	28,22	32,11	78,39	87,04	96,14	44,12	45,94	55,31	57,29	36,38
165	32,75	28,14	31,96	78,00	86,58	95,59	43,94	45,74	55,01	56,97	36,24
166	32,65	28,06	31,82	77,61	86,12	95,04	43,76	45,55	54,72	56,66	36,09
167	32,56	27,99	31,68	77,23	85,66	94,50	43,58	45,36	54,44	56,35	35,95
168	32,47	27,91	31,54	76,86	85,22	93,97	43,41	45,17	54,16	56,05	35,81
169	32,38	27,84	31,41	76,49	84,77	93,45	43,24	44,98	53,89	55,76	35,68
170	32,29	27,77	31,28	76,12	84,34	92,94	43,07	44,80	53,62	55,47	35,54

171	32,20	27,70	31,16	75,76	83,91	92,43	42,90	44,62	53,35	55,18	35,41
172	32,11	27,63	31,04	75,41	83,49	91,93	42,74	44,44	53,09	54,90	35,28
173	32,02	27,56	30,92	75,06	83,07	91,44	42,58	44,26	52,83	54,62	35,15
174	31,94	27,50	30,81	74,71	82,66	90,96	42,42	44,09	52,58	54,35	35,03
175	31,85	27,43	30,70	74,37	82,26	90,48	42,26	43,92	52,33	54,08	34,90
176	31,77	27,37	30,59	74,04	81,86	90,01	42,11	43,75	52,08	53,82	34,78
177	31,69	27,30	30,49	73,70	81,46	89,55	41,95	43,58	51,84	53,56	34,66
178	31,61	27,24	30,38	73,38	81,08	89,09	41,80	43,42	51,60	53,30	34,54
179	31,53	27,18	30,28	73,05	80,69	88,64	41,65	43,26	51,37	53,05	34,42
180	31,45	27,12	30,19	72,73	80,31	88,20	41,51	43,10	51,14	52,80	34,31

Rezultati temperaturne analize – požarne krivulje A12 – A22

t [min]	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
1	20,50	20,50	20,50	21,26	21,26	21,07	20,68	20,68	21,41	21,41	21,41
2	26,64	26,64	26,64	29,39	29,39	28,63	27,26	27,26	29,97	29,97	29,97
3	36,57	36,57	36,57	45,06	45,06	42,47	38,28	38,28	47,17	47,17	47,17
4	48,79	48,79	48,79	66,81	66,81	60,86	52,10	52,10	72,02	72,02	72,02
5	62,87	62,87	62,87	93,40	93,40	82,83	68,16	68,16	103,10	103,10	103,10
6	78,69	78,69	78,69	124,16	124,16	108,00	86,29	86,29	139,27	139,27	139,27
7	96,20	96,20	96,20	158,61	158,61	136,16	106,42	106,42	179,58	179,58	179,58
8	115,37	115,37	115,37	196,33	196,33	167,15	128,52	128,52	223,14	223,14	223,14
9	136,20	136,20	136,20	236,81	236,81	200,76	152,56	152,56	269,04	269,04	269,04
10	158,67	158,67	158,67	279,50	279,50	236,75	178,49	178,49	316,42	316,42	316,42
11	182,77	182,77	182,77	323,87	323,87	274,85	206,29	206,29	364,58	364,58	364,58
12	208,50	208,50	208,50	369,41	369,41	314,70	235,86	235,86	413,02	413,02	413,02
13	235,80	235,80	235,80	415,75	415,75	356,01	267,14	267,14	461,44	461,44	461,44
14	264,65	264,65	264,65	462,65	462,65	398,48	300,00	300,00	509,80	509,80	509,80
15	294,98	294,98	294,98	510,05	510,05	441,89	334,32	334,32	558,21	558,21	558,21
16	326,73	326,73	326,73	558,08	558,08	486,11	369,98	369,98	606,99	606,99	606,99
17	359,82	359,82	359,82	607,06	607,06	531,15	406,85	406,85	635,44	635,44	635,44
18	394,18	394,18	394,18	657,49	657,49	577,13	444,82	444,82	652,71	652,71	652,71
19	429,75	429,75	429,75	710,04	710,04	624,34	483,83	483,83	669,31	669,31	669,31
20	466,49	466,49	466,49	765,53	765,53	673,20	523,85	523,85	685,21	685,21	685,21
21	504,37	504,37	504,37	791,87	791,87	724,27	564,95	564,95	700,37	700,37	700,37
22	533,55	533,55	533,55	820,83	820,83	769,10	597,09	597,09	714,76	714,76	714,76
23	541,69	541,69	541,69	848,45	848,45	796,16	607,99	607,99	728,41	728,41	728,41
24	549,35	549,35	549,35	874,21	874,21	822,07	618,15	618,15	741,35	741,35	741,35
25	556,37	556,37	556,37	897,90	897,90	846,12	627,45	627,45	753,63	753,63	753,63
26	562,71	562,71	562,71	919,48	919,48	868,01	635,84	635,84	765,28	765,28	765,28
27	568,36	568,36	568,36	939,06	939,06	887,70	643,34	643,34	776,35	776,35	776,35
28	573,34	573,34	573,34	956,77	956,77	905,29	650,01	650,01	786,89	786,89	786,89
29	577,71	577,71	577,71	972,80	972,80	920,94	655,93	655,93	796,94	796,94	796,94
30	581,52	581,52	581,52	987,32	987,32	934,88	661,17	661,17	806,53	806,53	806,53
31	584,83	584,83	584,83	986,34	1000,53	947,31	665,84	665,84	815,70	815,70	815,70
32	587,72	587,72	587,72	976,95	1012,58	958,44	670,00	670,00	824,49	824,49	824,49
33	590,24	590,24	590,24	960,04	1023,61	968,46	673,74	673,74	832,91	832,91	832,91
34	592,46	592,46	592,46	936,47	1033,76	977,52	677,12	677,12	841,00	841,00	841,00
35	594,41	594,41	594,41	906,98	1043,14	985,76	680,18	680,18	848,77	848,77	848,77
36	596,14	596,14	596,14	872,19	1051,84	993,31	682,98	682,98	854,74	856,25	856,25
37	597,68	597,68	597,68	832,52	1059,94	1000,25	685,55	685,55	852,89	863,47	863,47
38	599,07	599,07	599,07	788,27	1067,52	1006,66	687,93	687,93	847,73	870,42	870,42
39	600,33	600,33	600,33	739,58	1074,64	1012,63	690,13	690,13	839,64	877,14	877,14
40	601,48	601,48	601,48	686,44	1081,34	1018,20	692,19	692,19	828,94	883,52	883,63
41	602,53	602,53	602,53	628,68	1087,66	1023,42	694,12	694,12	815,88	882,98	889,91
42	603,51	603,51	603,51	565,97	1093,66	1028,34	695,94	695,94	800,70	879,34	895,99
43	604,42	604,42	604,42	497,87	1099,35	1027,58	697,66	697,66	783,56	873,20	901,87
44	605,27	605,27	605,27	423,83	1104,77	1018,73	699,28	699,28	764,62	864,79	907,58
45	606,07	606,07	606,07	353,57	1109,94	1005,10	700,82	700,82	743,96	854,36	908,65
46	606,82	606,82	606,82	317,60	1114,88	987,53	702,29	702,29	721,66	842,14	906,15
47	607,53	607,53	607,53	289,04	1119,61	966,74	703,70	703,70	697,76	828,29	901,44
48	608,21	608,21	608,21	265,98	1120,08	943,27	705,04	705,04	672,29	812,95	894,71
49	608,86	608,86	608,86	247,10	1115,43	917,55	706,32	706,32	645,24	796,23	886,20
50	609,48	609,48	609,48	231,41	1107,31	889,90	707,55	707,55	616,58	778,22	876,12
51	610,07	610,07	610,07	218,20	1096,21	860,55	708,73	708,73	586,27	758,97	864,64
52	610,64	610,64	610,64	206,94	1082,58	829,67	709,87	709,87	554,23	738,53	851,89
53	611,19	611,19	611,19	197,23	1066,80	797,39	710,96	710,96	520,37	716,93	837,98
54	611,72	611,72	611,72	188,75	1049,17	763,79	712,01	712,01	484,57	694,18	822,98
55	612,23	612,23	612,23	181,30	1029,93	728,92	713,03	713,03	446,69	670,29	806,98

56	612,72	612,72	612,72	174,67	1009,27	692,80	714,01	714,01	406,58	645,23	790,01
57	613,20	613,20	613,20	168,73	987,32	655,44	710,13	714,96	364,07	619,00	772,13
58	613,66	613,66	613,66	163,37	964,22	616,83	701,26	715,88	329,80	591,54	753,34
59	614,10	614,10	614,10	158,50	940,04	576,93	690,77	716,77	310,11	562,80	733,69
60	614,53	614,53	614,53	154,05	914,86	535,73	679,01	717,63	293,56	532,74	713,16
61	614,95	614,95	614,95	149,97	888,72	493,19	666,25	718,46	279,44	501,26	691,78
62	615,36	615,36	615,36	146,19	861,66	449,27	652,70	719,27	267,23	468,28	669,52
63	615,75	615,75	615,75	142,68	833,70	403,97	638,51	720,05	256,56	433,70	646,38
64	616,14	616,14	616,14	139,42	804,85	357,27	623,79	720,81	247,12	397,42	622,34
65	616,51	616,51	616,51	136,37	775,11	309,19	608,64	721,55	238,70	359,33	597,36
66	616,87	616,87	616,87	133,51	744,46	259,74	593,12	722,27	231,13	331,77	571,42
67	617,23	617,23	617,23	130,82	712,89	224,88	577,28	722,97	224,25	314,20	544,47
68	617,57	617,57	617,57	128,28	680,36	209,06	561,14	723,65	217,97	299,23	516,46
69	617,91	617,91	617,91	125,88	646,84	196,26	544,76	724,32	212,20	286,31	487,34
70	618,23	618,23	618,23	123,60	612,29	185,69	528,13	724,96	206,87	275,03	457,03
71	614,34	618,55	618,55	121,44	576,64	176,82	511,29	722,00	201,93	265,07	425,46
72	607,31	618,86	618,86	119,39	539,84	169,24	494,23	715,32	197,32	256,19	392,58
73	599,48	617,27	619,17	117,43	501,83	162,69	476,99	707,43	193,00	248,20	358,30
74	590,99	610,82	619,46	115,56	462,54	156,95	459,55	698,60	188,96	240,94	334,35
75	581,98	603,55	619,75	113,78	421,91	151,87	441,94	689,04	185,15	234,32	318,24
76	572,57	595,60	614,03	112,07	379,89	147,31	424,15	678,90	181,55	228,23	304,41
77	562,84	587,11	607,28	110,43	336,45	143,20	406,19	668,30	178,15	222,61	292,39
78	552,84	578,20	599,82	108,86	310,36	139,46	388,06	657,34	174,92	217,38	281,80
79	542,64	568,96	591,80	107,35	291,85	136,03	369,77	646,08	171,85	212,51	272,39
80	532,27	559,45	583,35	105,90	276,30	132,87	351,32	634,56	168,93	207,94	263,94
81	521,75	549,73	574,56	104,50	263,07	129,94	332,70	622,82	166,15	203,66	256,29
82	511,11	539,84	565,49	103,15	251,68	127,21	313,92	610,90	163,49	199,62	249,31
83	500,37	529,80	556,21	101,85	241,76	124,66	294,98	598,81	160,95	195,80	242,90
84	489,54	519,64	546,75	100,60	233,02	122,26	275,86	586,56	158,52	192,19	236,98
85	478,62	509,38	537,14	99,39	225,25	120,00	256,56	574,18	156,19	188,76	231,48
86	467,64	499,03	527,41	98,22	218,28	117,87	237,07	561,67	153,95	185,50	226,35
87	456,58	488,60	517,58	97,09	211,98	115,84	217,35	549,03	151,80	182,39	221,56
88	445,47	478,09	507,66	95,99	206,23	113,92	197,39	536,28	149,73	179,43	217,05
89	434,29	467,53	497,66	94,93	200,97	112,10	177,14	523,42	147,73	176,59	212,80
90	423,06	456,90	487,59	93,91	196,11	110,35	156,51	510,46	145,81	173,88	208,79
91	411,77	446,21	477,46	92,91	191,61	108,69	135,42	497,39	143,96	171,28	204,98
92	400,43	435,48	467,27	91,94	187,41	107,10	113,69	484,22	142,17	168,79	201,37
93	389,05	424,69	457,03	91,00	183,49	105,57	99,12	470,96	140,45	166,40	197,94
94	377,61	413,85	446,73	90,09	179,81	104,11	95,25	457,60	138,78	164,10	194,66
95	366,12	402,97	436,39	89,20	176,34	102,70	92,02	444,16	137,16	161,88	191,54
96	354,59	392,04	426,00	88,34	173,06	101,35	89,23	430,62	135,60	159,75	188,55
97	343,01	381,06	415,57	87,50	169,96	100,05	86,77	416,99	134,08	157,69	185,69
98	331,37	370,04	405,09	86,69	167,01	98,79	84,60	403,28	132,62	155,70	182,94
99	319,69	358,98	394,57	85,90	164,21	97,58	82,65	389,48	131,19	153,78	180,31
100	307,96	347,87	384,01	85,12	161,54	96,42	80,88	375,60	129,81	151,93	177,78
101	296,18	336,72	373,41	84,37	158,99	95,29	79,28	361,63	128,47	150,14	175,34
102	284,34	325,52	362,77	83,63	156,55	94,20	77,80	347,57	127,17	148,40	173,00
103	272,45	314,28	352,09	82,92	154,21	93,14	76,44	333,43	125,90	146,72	170,74
104	260,50	302,99	341,37	82,22	151,96	92,12	75,17	319,21	124,67	145,09	168,56
105	248,48	291,66	330,61	81,54	149,81	91,13	73,99	304,89	123,47	143,51	166,46
106	236,39	280,27	319,80	80,87	147,74	90,17	72,88	290,49	122,30	141,98	164,42
107	224,23	268,83	308,96	80,22	145,74	89,24	71,83	275,99	121,17	140,49	162,46
108	211,99	257,34	298,07	79,58	143,82	88,34	70,84	261,39	120,06	139,04	160,56
109	199,65	245,78	287,13	78,96	141,97	87,46	69,90	246,69	118,98	137,64	158,71
110	187,20	234,16	276,15	78,36	140,18	86,60	69,01	231,87	117,93	136,27	156,93
111	174,63	222,47	265,12	77,76	138,45	85,78	68,16	216,93	116,91	134,94	155,20
112	161,91	210,70	254,03	77,18	136,78	84,97	67,35	201,85	115,91	133,65	153,52
113	149,03	198,84	242,89	76,62	135,16	84,18	66,57	186,60	114,93	132,39	151,89
114	135,93	186,88	231,69	76,06	133,59	83,42	65,82	171,17	113,98	131,17	150,31

115	122,58	174,81	220,42	75,52	132,08	82,67	65,10	155,52	113,05	129,97	148,77
116	108,90	162,61	209,08	74,98	130,61	81,95	64,41	139,58	112,14	128,81	147,28
117	94,78	150,24	197,65	74,46	129,18	81,24	63,75	123,30	111,25	127,67	145,82
118	80,08	137,69	186,13	73,95	127,79	80,55	63,10	106,56	110,39	126,56	144,41
119	71,44	124,91	174,50	73,45	126,45	79,88	62,48	95,64	109,54	125,48	143,03
120	69,16	111,84	162,75	72,96	125,14	79,22	61,89	92,60	108,71	124,43	141,69
121	67,23	98,39	150,85	72,48	123,87	78,58	61,31	90,03	107,90	123,40	140,39
122	65,51	84,44	138,78	72,01	122,63	77,95	60,74	87,78	107,10	122,39	139,11
123	63,98	71,88	126,50	71,55	121,43	77,34	60,20	85,78	106,32	121,41	137,87
124	62,61	69,52	113,96	71,09	120,25	76,74	59,67	83,98	105,56	120,45	136,66
125	61,37	67,56	101,08	70,65	119,11	76,16	59,16	82,36	104,82	119,51	135,48
126	60,24	65,83	87,77	70,21	118,00	75,59	58,66	80,88	104,09	118,59	134,33
127	59,20	64,29	73,89	69,78	116,92	75,03	58,18	79,52	103,37	117,69	133,20
128	58,25	62,91	69,79	69,36	115,86	74,48	57,71	78,26	102,67	116,81	132,10
129	57,37	61,65	67,83	68,95	114,83	73,95	57,25	77,09	101,98	115,95	131,03
130	56,56	60,52	66,08	68,54	113,82	73,42	56,81	75,99	101,31	115,10	129,97
131	55,80	59,48	64,53	68,14	112,84	72,91	56,37	74,96	100,65	114,28	128,95
132	55,09	58,53	63,14	67,75	111,87	72,41	55,95	73,99	100,00	113,47	127,94
133	54,42	57,64	61,89	67,37	110,94	71,92	55,54	73,07	99,37	112,68	126,96
134	53,79	56,83	60,75	66,99	110,02	71,43	55,14	72,19	98,74	111,90	126,00
135	53,19	56,07	59,71	66,62	109,12	70,96	54,75	71,36	98,13	111,14	125,06
136	52,62	55,35	58,75	66,25	108,25	70,50	54,36	70,56	97,53	110,39	124,14
137	52,09	54,69	57,87	65,89	107,39	70,04	53,99	69,79	96,94	109,66	123,24
138	51,57	54,05	57,05	65,54	106,55	69,60	53,63	69,06	96,36	108,94	122,35
139	51,08	53,46	56,29	65,19	105,73	69,16	53,27	68,35	95,79	108,24	121,49
140	50,61	52,89	55,58	64,85	104,92	68,73	52,92	67,67	95,23	107,55	120,64
141	50,16	52,35	54,91	64,51	104,14	68,31	52,58	67,02	94,68	106,87	119,81
142	49,72	51,84	54,28	64,18	103,36	67,89	52,25	66,38	94,14	106,20	118,99
143	49,30	51,35	53,69	63,86	102,61	67,49	51,92	65,77	93,61	105,55	118,20
144	48,90	50,88	53,12	63,54	101,87	67,09	51,60	65,18	93,09	104,91	117,41
145	48,51	50,43	52,59	63,22	101,14	66,70	51,29	64,61	92,58	104,28	116,64
146	48,13	50,00	52,08	62,91	100,43	66,31	50,99	64,05	92,07	103,66	115,89
147	47,77	49,58	51,59	62,60	99,73	65,93	50,69	63,51	91,58	103,05	115,15
148	47,41	49,17	51,12	62,30	99,05	65,56	50,39	62,99	91,09	102,45	114,42
149	47,07	48,79	50,67	62,01	98,38	65,20	50,10	62,48	90,61	101,86	113,71
150	46,74	48,41	50,24	61,71	97,72	64,84	49,82	61,99	90,14	101,29	113,01
151	46,41	48,04	49,82	61,43	97,07	64,49	49,55	61,50	89,67	100,72	112,32
152	46,10	47,69	49,42	61,14	96,43	64,14	49,27	61,04	89,22	100,16	111,64
153	45,79	47,35	49,03	60,86	95,81	63,80	49,01	60,58	88,77	99,61	110,98
154	45,49	47,01	48,65	60,59	95,20	63,46	48,75	60,13	88,32	99,07	110,32
155	45,20	46,69	48,29	60,32	94,60	63,13	48,49	59,70	87,89	98,54	109,68
156	44,91	46,37	47,94	60,05	94,01	62,81	48,24	59,28	87,46	98,01	109,05
157	44,64	46,07	47,60	59,78	93,42	62,49	47,99	58,86	87,03	97,50	108,43
158	44,36	45,77	47,26	59,52	92,85	62,17	47,75	58,46	86,62	96,99	107,82
159	44,10	45,48	46,94	59,27	92,29	61,86	47,51	58,07	86,21	96,49	107,22
160	43,84	45,19	46,63	59,01	91,74	61,56	47,28	57,68	85,80	96,00	106,63
161	43,59	44,92	46,32	58,76	91,20	61,26	47,05	57,31	85,40	95,52	106,05
162	43,34	44,65	46,02	58,52	90,67	60,96	46,82	56,94	85,01	95,04	105,47
163	43,10	44,38	45,73	58,28	90,14	60,67	46,60	56,58	84,62	94,57	104,91
164	42,86	44,12	45,45	58,04	89,62	60,38	46,38	56,23	84,24	94,11	104,36
165	42,63	43,87	45,17	57,80	89,12	60,10	46,17	55,88	83,86	93,65	103,81
166	42,40	43,62	44,90	57,57	88,62	59,82	45,96	55,54	83,49	93,20	103,27
167	42,18	43,38	44,64	57,34	88,12	59,55	45,75	55,21	83,12	92,76	102,75
168	41,96	43,14	44,38	57,11	87,64	59,28	45,55	54,89	82,76	92,32	102,22
169	41,75	42,91	44,13	56,88	87,16	59,01	45,34	54,57	82,40	91,89	101,71
170	41,54	42,69	43,88	56,66	86,69	58,75	45,15	54,26	82,05	91,47	101,21
171	41,34	42,46	43,64	56,44	86,23	58,49	44,95	53,95	81,70	91,05	100,71
172	41,13	42,25	43,40	56,23	85,78	58,23	44,76	53,66	81,36	90,64	100,22
173	40,94	42,03	43,17	56,02	85,33	57,98	44,57	53,36	81,02	90,23	99,73

174	40,74	41,82	42,94	55,81	84,89	57,73	44,39	53,07	80,69	89,83	99,25
175	40,55	41,62	42,72	55,60	84,45	57,49	44,20	52,79	80,36	89,43	98,78
176	40,36	41,42	42,50	55,39	84,02	57,24	44,02	52,51	80,03	89,04	98,32
177	40,18	41,22	42,29	55,19	83,60	57,01	43,85	52,24	79,71	88,66	97,86
178	40,00	41,02	42,08	54,99	83,18	56,77	43,67	51,97	79,39	88,28	97,41
179	39,82	40,83	41,88	54,79	82,77	56,54	43,50	51,71	79,08	87,90	96,96
180	39,65	40,65	41,67	54,60	82,37	56,31	43,33	51,45	78,77	87,53	96,52

Rezultati temperaturne analize – požarne krivulje A23 – A33

t [min]	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
1	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	20,50	20,50	20,50	20,50	21,26	21,26
2	27,99	27,99	27,99	27,99	27,99	26,64	26,64	26,64	26,64	29,38	29,38
3	40,44	40,44	40,44	40,44	40,44	36,56	36,56	36,56	36,56	45,01	45,01
4	56,49	56,49	56,49	56,49	56,49	48,75	48,75	48,75	48,75	66,65	66,65
5	75,34	75,34	75,34	75,34	75,34	62,79	62,79	62,79	62,79	93,02	93,02
6	96,78	96,78	96,78	96,78	96,78	78,55	78,55	78,55	78,55	123,40	123,40
7	120,68	120,68	120,68	120,68	120,68	95,97	95,97	95,97	95,97	157,33	157,33
8	146,95	146,95	146,95	146,95	146,95	115,02	115,02	115,02	115,02	194,34	194,34
9	175,50	175,50	175,50	175,50	175,50	135,69	135,69	135,69	135,69	233,94	233,94
10	206,24	206,24	206,24	206,24	206,24	157,98	157,98	157,98	157,98	275,57	275,57
11	239,00	239,00	239,00	239,00	239,00	181,86	181,86	181,86	181,86	318,67	318,67
12	273,62	273,62	273,62	273,62	273,62	207,31	207,31	207,31	207,31	362,71	362,71
13	309,88	309,88	309,88	309,88	309,88	234,30	234,30	234,30	234,30	407,26	407,26
14	347,57	347,57	347,57	347,57	347,57	262,77	262,77	262,77	262,77	451,99	451,99
15	386,46	386,46	386,46	386,46	386,46	292,66	292,66	292,66	292,66	496,71	496,71
16	426,35	426,35	426,35	426,35	426,35	323,87	323,87	323,87	323,87	541,36	541,36
17	467,10	467,10	467,10	467,10	467,10	356,33	356,33	356,33	356,33	585,99	585,99
18	508,62	508,62	508,62	508,62	508,62	389,93	389,93	389,93	389,93	630,78	630,78
19	550,89	550,89	550,89	550,89	550,89	424,58	424,58	424,58	424,58	676,02	676,02
20	594,00	594,00	594,00	594,00	594,00	460,21	460,21	460,21	460,21	722,10	722,10
21	638,14	638,14	638,14	638,14	638,14	496,75	496,75	496,75	496,75	736,94	736,94
22	673,63	673,63	673,63	673,63	673,63	524,79	524,79	524,79	524,79	752,22	752,22
23	688,51	688,51	688,51	688,51	688,51	529,93	529,93	529,93	529,93	766,49	766,49
24	702,38	702,38	702,38	702,38	702,38	535,21	535,21	535,21	535,21	779,82	779,82
25	715,11	715,11	715,11	715,11	715,11	539,93	539,93	539,93	539,93	792,33	792,33
26	726,68	726,68	726,68	726,68	726,68	544,15	544,15	544,15	544,15	804,12	804,12
27	737,15	737,15	737,15	737,15	737,15	547,94	547,94	547,94	547,94	815,27	815,27
28	746,62	746,62	746,62	746,62	746,62	551,33	551,33	551,33	551,33	825,87	825,87
29	755,19	755,19	755,19	755,19	755,19	554,40	554,40	554,40	554,40	835,96	835,96
30	762,98	762,98	762,98	762,98	762,98	557,18	557,18	557,18	557,18	844,37	845,59
31	770,08	770,08	770,08	770,08	770,08	559,72	559,72	559,72	559,72	835,20	854,81
32	776,58	776,58	776,58	776,58	776,58	562,05	562,05	562,05	562,05	820,55	863,64
33	782,57	782,57	782,57	782,57	782,57	564,20	564,20	564,20	564,20	800,88	872,12
34	788,11	788,11	788,11	788,11	788,11	566,19	566,19	566,19	566,19	776,79	880,26
35	793,25	793,25	793,25	793,25	793,25	568,04	568,04	568,04	568,04	748,64	888,10
36	798,05	798,05	798,05	798,05	798,05	569,77	569,77	569,77	569,77	716,66	895,64
37	802,55	802,55	802,55	802,55	802,55	571,40	571,40	571,40	571,40	680,93	902,90
38	806,78	806,78	806,78	806,78	806,78	572,93	572,93	572,93	572,93	641,43	909,91
39	810,76	810,76	810,76	810,76	810,76	574,38	574,38	574,38	574,38	598,00	916,68
40	814,53	814,53	814,53	814,53	814,53	575,76	575,76	575,76	575,76	550,37	923,22
41	818,10	818,10	818,10	818,10	818,10	577,06	577,06	577,06	577,06	498,17	929,54
42	821,49	821,49	821,49	821,49	821,49	578,30	578,30	578,30	578,30	440,91	935,65
43	817,21	824,72	824,72	824,72	824,72	579,48	579,48	579,48	579,48	378,08	941,57
44	805,63	827,80	827,80	827,80	827,80	580,61	580,61	580,61	580,61	309,18	947,30
45	790,78	828,28	830,74	830,74	830,74	581,69	581,69	581,69	581,69	264,31	952,86
46	773,31	819,01	833,55	833,55	833,55	582,73	582,73	582,73	582,73	244,46	958,25
47	753,70	806,43	836,25	836,25	836,25	583,72	583,72	583,72	583,72	228,90	961,93
48	732,32	791,22	838,83	838,83	838,83	584,67	584,67	584,67	584,67	216,28	958,68
49	709,45	773,90	841,32	841,32	841,32	585,59	585,59	585,59	585,59	205,76	952,55
50	685,28	754,86	843,70	843,70	843,70	586,48	586,48	586,48	586,48	196,79	944,05
51	659,96	734,40	846,00	846,00	846,00	587,33	587,33	587,33	587,33	188,99	933,62
52	633,58	712,71	848,22	848,22	848,22	588,15	588,15	588,15	588,15	182,11	921,56
53	606,22	689,96	850,35	850,35	850,35	588,94	588,94	588,94	588,94	175,97	908,09
54	577,94	666,25	852,41	852,41	852,41	589,71	589,71	589,71	589,71	170,44	893,36
55	548,76	641,66	854,41	854,41	854,41	590,45	590,45	590,45	590,45	165,41	877,47

56	518,72	616,26	856,33	856,33	856,33	591,17	591,17	591,17	591,17	160,82	860,51
57	487,82	590,08	854,18	858,20	858,20	586,13	591,86	591,86	591,86	156,59	842,54
58	456,09	563,15	846,70	860,00	860,00	576,98	592,53	592,53	592,53	152,69	823,59
59	423,53	535,50	836,96	860,14	861,75	566,93	593,19	593,19	593,19	149,06	803,71
60	390,16	507,13	825,48	853,79	863,44	556,17	593,82	593,82	593,82	145,68	782,89
61	355,98	478,07	812,62	845,12	865,09	544,84	594,43	594,43	594,43	142,52	761,16
62	321,01	448,31	798,67	834,68	860,28	533,05	595,03	595,03	595,03	139,56	738,51
63	285,23	417,86	783,81	822,84	852,73	520,89	595,61	595,61	595,61	136,78	714,94
64	248,63	386,74	768,21	809,90	843,33	508,41	596,18	596,18	596,18	134,15	690,42
65	211,16	354,94	751,96	796,07	832,50	495,66	596,72	596,72	596,72	131,68	664,93
66	172,66	322,48	735,15	781,50	820,55	482,68	597,26	597,26	597,26	129,33	638,45
67	149,28	289,35	717,82	766,30	807,69	469,49	597,78	597,78	597,78	127,11	610,92
68	141,17	255,53	700,03	750,56	794,10	456,11	598,29	598,29	598,29	125,00	582,31
69	134,55	220,99	681,81	734,33	779,89	442,55	598,78	598,78	598,78	122,99	552,56
70	129,01	185,61	663,18	717,67	765,15	428,83	599,26	599,26	599,26	121,07	521,60
71	124,27	152,90	644,16	700,60	749,94	414,96	595,45	599,73	599,73	119,25	489,37
72	120,14	144,01	624,77	683,15	734,31	400,94	588,57	600,19	600,19	117,50	455,80
73	116,51	137,26	605,01	665,34	718,29	386,78	581,03	598,64	600,64	115,83	420,80
74	113,27	131,61	584,90	647,18	701,92	372,49	572,96	592,41	601,08	114,23	384,31
75	110,34	126,80	564,43	628,69	685,21	358,07	564,47	585,36	601,51	112,70	346,26
76	107,67	122,63	543,63	609,88	668,19	343,52	555,66	577,76	595,80	111,23	307,38
77	105,22	118,95	522,48	590,76	650,85	328,85	546,58	569,73	589,24	109,82	290,17
78	102,96	115,68	501,00	571,32	633,23	314,05	537,29	561,37	582,09	108,46	277,06
79	100,86	112,72	479,18	551,58	615,31	299,13	527,81	552,74	574,50	107,15	266,03
80	98,90	110,03	457,03	531,53	597,11	284,09	518,17	543,89	566,56	105,90	256,52
81	97,07	107,57	434,55	511,18	578,63	268,91	508,39	534,85	558,34	104,68	248,15
82	95,34	105,29	411,74	490,54	559,88	253,60	498,49	525,66	549,90	103,51	240,68
83	93,71	103,17	388,60	469,60	540,85	238,15	488,47	516,33	541,27	102,39	233,93
84	92,17	101,19	365,14	448,37	521,56	222,54	478,35	506,88	532,48	101,30	227,77
85	90,71	99,34	341,36	426,85	502,01	206,76	468,12	497,31	523,55	100,24	222,10
86	89,32	97,60	317,25	405,03	482,19	190,79	457,81	487,65	514,51	99,22	216,86
87	87,99	95,95	292,81	382,93	462,11	174,61	447,41	477,89	505,36	98,24	211,99
88	86,73	94,39	268,03	360,53	441,76	158,15	436,92	468,04	496,10	97,29	207,44
89	85,52	92,92	242,89	337,85	421,16	141,38	426,36	458,11	486,76	96,36	203,17
90	84,36	91,51	217,37	314,88	400,30	124,20	415,72	448,10	477,33	95,47	199,17
91	83,26	90,17	191,41	291,62	379,19	106,47	405,01	438,01	467,82	94,60	195,39
92	82,19	88,89	164,91	268,05	357,81	87,99	394,22	427,86	458,24	93,76	191,82
93	81,17	87,67	146,21	244,16	336,18	76,91	383,36	417,63	448,58	92,94	188,44
94	80,19	86,50	140,08	219,93	314,29	74,54	372,44	407,33	438,85	92,15	185,23
95	79,24	85,37	135,03	195,31	292,14	72,53	361,45	396,97	429,06	91,38	182,19
96	78,33	84,30	130,72	170,22	269,72	70,77	350,39	386,55	419,20	90,63	179,28
97	77,45	83,26	126,95	147,50	247,01	69,21	339,27	376,06	409,29	89,90	176,52
98	76,60	82,26	123,62	141,08	223,99	67,81	328,08	365,51	399,31	89,20	173,87
99	75,78	81,30	120,63	136,02	200,63	66,55	316,83	354,91	389,27	88,51	171,35
100	74,98	80,37	117,92	131,70	176,88	65,40	305,51	344,24	379,18	87,84	168,93
101	74,22	79,48	115,44	127,93	152,62	64,33	294,13	333,51	369,03	87,18	166,61
102	73,47	78,62	113,15	124,61	142,48	63,34	282,67	322,72	358,82	86,55	164,38
103	72,75	77,78	111,03	121,63	137,31	62,42	271,15	311,88	348,56	85,93	162,25
104	72,05	76,97	109,05	118,93	132,93	61,55	259,56	300,97	338,24	85,32	160,19
105	71,37	76,19	107,19	116,46	129,12	60,74	247,89	290,00	327,87	84,74	158,21
106	70,72	75,43	105,44	114,18	125,77	59,96	236,14	278,97	317,45	84,16	156,31
107	70,08	74,70	103,78	112,07	122,77	59,23	224,30	267,88	306,97	83,60	154,47
108	69,46	73,99	102,22	110,10	120,06	58,53	212,37	256,72	296,43	83,05	152,70
109	68,85	73,30	100,72	108,25	117,59	57,87	200,34	245,49	285,84	82,52	150,99
110	68,26	72,63	99,30	106,51	115,31	57,23	188,20	234,18	275,19	82,00	149,34
111	67,69	71,97	97,95	104,86	113,19	56,62	175,93	222,79	264,48	81,49	147,74
112	67,14	71,34	96,65	103,30	111,22	56,04	163,51	211,32	253,71	80,99	146,20
113	66,59	70,73	95,41	101,81	109,37	55,47	150,92	199,76	242,87	80,50	144,70
114	66,07	70,13	94,21	100,40	107,63	54,93	138,13	188,08	231,97	80,02	143,25

115	65,55	69,54	93,07	99,05	105,99	54,41	125,08	176,30	220,98	79,56	141,85
116	65,05	68,97	91,97	97,75	104,43	53,91	111,73	164,37	209,92	79,10	140,49
117	64,56	68,42	90,90	96,51	102,94	53,42	97,98	152,29	198,77	78,65	139,16
118	64,08	67,88	89,88	95,33	101,53	52,95	83,70	140,03	187,52	78,21	137,88
119	63,61	67,35	88,89	94,18	100,18	52,50	75,50	127,54	176,16	77,78	136,63
120	63,16	66,84	87,94	93,08	98,88	52,06	73,54	114,78	164,68	77,36	135,42
121	62,71	66,34	87,02	92,02	97,65	51,64	71,90	101,67	153,05	76,95	134,24
122	62,28	65,85	86,12	91,00	96,46	51,22	70,46	88,10	141,25	76,55	133,10
123	61,85	65,37	85,26	90,01	95,31	50,82	69,17	75,98	129,25	76,15	131,98
124	61,44	64,91	84,42	89,06	94,21	50,43	68,00	73,97	117,00	75,76	130,89
125	61,03	64,45	83,61	88,14	93,15	50,06	66,93	72,31	104,45	75,38	129,83
126	60,63	64,01	82,82	87,24	92,13	49,69	65,94	70,84	91,49	75,00	128,80
127	60,24	63,57	82,06	86,38	91,14	49,33	65,03	69,54	78,05	74,63	127,79
128	59,86	63,14	81,32	85,54	90,19	48,98	64,18	68,36	74,33	74,27	126,81
129	59,49	62,73	80,59	84,73	89,26	48,65	63,37	67,29	72,65	73,92	125,85
130	59,12	62,32	79,89	83,94	88,37	48,32	62,61	66,30	71,17	73,57	124,92
131	58,77	61,92	79,21	83,18	87,50	48,00	61,90	65,39	69,86	73,22	124,00
132	58,42	61,53	78,54	82,43	86,66	47,68	61,21	64,53	68,67	72,89	123,11
133	58,07	61,15	77,90	81,71	85,85	47,38	60,56	63,73	67,60	72,55	122,24
134	57,74	60,77	77,27	81,00	85,06	47,08	59,94	62,97	66,61	72,23	121,38
135	57,40	60,41	76,65	80,32	84,29	46,79	59,34	62,26	65,70	71,91	120,55
136	57,08	60,05	76,05	79,65	83,55	46,50	58,77	61,57	64,84	71,59	119,73
137	56,76	59,69	75,47	79,00	82,82	46,23	58,22	60,93	64,04	71,28	118,93
138	56,45	59,35	74,90	78,37	82,11	45,95	57,69	60,30	63,29	70,97	118,15
139	56,15	59,01	74,34	77,75	81,43	45,69	57,17	59,71	62,57	70,67	117,38
140	55,85	58,68	73,79	77,15	80,76	45,43	56,68	59,14	61,89	70,37	116,62
141	55,55	58,35	73,26	76,56	80,10	45,18	56,20	58,59	61,25	70,08	115,89
142	55,26	58,03	72,74	75,99	79,47	44,93	55,74	58,06	60,63	69,79	115,16
143	54,98	57,72	72,24	75,43	78,85	44,69	55,29	57,55	60,03	69,50	114,45
144	54,70	57,41	71,74	74,88	78,24	44,45	54,86	57,06	59,47	69,22	113,76
145	54,43	57,11	71,25	74,35	77,65	44,22	54,44	56,58	58,92	68,94	113,07
146	54,16	56,81	70,78	73,83	77,08	43,99	54,03	56,12	58,39	68,67	112,40
147	53,89	56,52	70,31	73,32	76,52	43,76	53,63	55,67	57,88	68,40	111,74
148	53,63	56,23	69,86	72,82	75,97	43,55	53,25	55,24	57,39	68,13	111,09
149	53,38	55,95	69,41	72,33	75,43	43,33	52,87	54,82	56,92	67,87	110,46
150	53,12	55,67	68,97	71,85	74,90	43,12	52,50	54,41	56,46	67,61	109,83
151	52,88	55,40	68,55	71,38	74,39	42,91	52,15	54,02	56,02	67,35	109,21
152	52,63	55,13	68,13	70,92	73,89	42,71	51,80	53,63	55,58	67,10	108,61
153	52,39	54,87	67,72	70,47	73,39	42,51	51,46	53,26	55,17	66,85	108,01
154	52,16	54,61	67,31	70,03	72,91	42,32	51,13	52,89	54,76	66,60	107,43
155	51,93	54,35	66,92	69,60	72,44	42,13	50,81	52,54	54,36	66,35	106,85
156	51,70	54,10	66,53	69,18	71,98	41,94	50,50	52,19	53,98	66,11	106,28
157	51,48	53,86	66,15	68,77	71,53	41,76	50,19	51,85	53,61	65,87	105,72
158	51,25	53,61	65,77	68,36	71,08	41,57	49,89	51,52	53,24	65,64	105,17
159	51,04	53,38	65,41	67,96	70,65	41,40	49,60	51,20	52,89	65,40	104,62
160	50,82	53,14	65,05	67,57	70,22	41,22	49,31	50,89	52,54	65,17	104,09
161	50,61	52,91	64,69	67,19	69,81	41,05	49,03	50,58	52,21	64,94	103,56
162	50,40	52,68	64,35	66,81	69,40	40,88	48,76	50,28	51,88	64,71	103,04
163	50,20	52,46	64,01	66,44	68,99	40,72	48,49	49,99	51,56	64,49	102,52
164	50,00	52,24	63,67	66,08	68,60	40,55	48,23	49,70	51,25	64,27	102,02
165	49,80	52,02	63,34	65,72	68,21	40,39	47,97	49,42	50,94	64,05	101,52
166	49,60	51,80	63,02	65,37	67,83	40,23	47,72	49,15	50,64	63,83	101,02
167	49,41	51,59	62,70	65,02	67,46	40,08	47,48	48,88	50,35	63,61	100,54
168	49,22	51,38	62,39	64,69	67,09	39,93	47,23	48,62	50,06	63,40	100,06
169	49,03	51,18	62,08	64,35	66,73	39,78	47,00	48,36	49,78	63,19	99,58
170	48,85	50,98	61,77	64,03	66,38	39,63	46,76	48,11	49,51	62,98	99,11
171	48,66	50,78	61,48	63,70	66,03	39,48	46,54	47,87	49,24	62,77	98,65
172	48,48	50,58	61,18	63,39	65,69	39,34	46,31	47,62	48,98	62,57	98,19
173	48,31	50,39	60,89	63,08	65,35	39,20	46,09	47,39	48,72	62,36	97,74

174	48,13	50,20	60,61	62,77	65,02	39,06	45,88	47,15	48,47	62,16	97,29
175	47,96	50,01	60,33	62,47	64,70	38,92	45,67	46,93	48,22	61,96	96,85
176	47,79	49,82	60,06	62,17	64,38	38,79	45,46	46,70	47,98	61,76	96,41
177	47,62	49,64	59,78	61,88	64,06	38,65	45,26	46,48	47,75	61,56	95,98
178	47,45	49,46	59,52	61,59	63,75	38,52	45,06	46,27	47,51	61,37	95,55
179	47,29	49,28	59,25	61,31	63,45	38,39	44,86	46,05	47,28	61,18	95,13
180	47,13	49,10	58,99	61,03	63,15	38,27	44,67	45,85	47,06	60,98	94,71

Rezultati temperaturne analize – požarne krivulje A34 – C09

t [min]	A34	A35	A36	A37	C01	C02	C03	C07	C09
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
1	21,07	21,07	20,68	20,68	21,26	21,26	21,26	21,26	21,26
2	28,63	28,63	27,26	27,26	29,39	29,39	29,39	29,39	29,39
3	42,46	42,46	38,26	38,26	45,07	45,07	45,07	45,08	45,08
4	60,81	60,81	52,02	52,02	66,85	66,85	66,85	66,89	66,91
5	82,62	82,62	67,99	67,99	93,51	93,51	93,51	93,62	93,68
6	107,56	107,56	86,00	86,00	124,38	124,38	124,38	124,60	124,72
7	135,40	135,40	105,94	105,94	159,01	159,01	159,01	159,41	159,63
8	165,96	165,96	127,81	127,81	196,97	196,97	196,97	197,62	197,98
9	199,02	199,02	151,56	151,56	237,76	237,76	237,76	238,75	239,31
10	234,33	234,33	177,15	177,15	280,85	280,85	280,85	282,28	283,10
11	271,59	271,59	204,52	204,52	325,71	325,71	325,71	327,69	328,84
12	310,46	310,46	233,61	233,61	371,85	371,85	371,85	374,54	376,12
13	350,58	350,58	264,30	264,30	418,94	418,94	418,94	422,52	424,65
14	391,63	391,63	296,48	296,48	466,79	466,79	466,79	471,52	474,39
15	433,32	433,32	330,01	330,01	515,41	515,41	515,41	521,67	525,54
16	475,43	475,43	364,72	364,72	565,04	565,04	565,04	573,36	578,59
17	517,82	517,82	400,46	400,46	616,15	616,15	616,15	627,24	634,34
18	560,44	560,44	437,07	437,07	669,41	669,41	669,41	684,25	693,91
19	603,36	603,36	474,43	474,43	725,69	725,69	725,69	745,52	758,61
20	646,71	646,71	512,42	512,42	786,02	786,02	786,02	809,43	827,72
21	690,73	690,73	550,99	550,99	818,33	818,33	818,33	852,33	875,22
22	726,04	726,04	579,77	579,77	854,21	854,21	854,21	897,22	926,19
23	740,99	740,99	586,31	586,31	888,64	888,64	888,64	940,63	975,67
24	754,80	754,80	592,10	592,10	920,80	920,80	920,80	981,32	1022,16
25	767,52	767,52	597,27	597,27	950,27	950,27	950,27	1018,59	1064,82
26	779,30	779,30	601,96	601,96	976,92	976,92	976,92	1052,18	1103,28
27	790,27	790,27	606,25	606,25	1000,80	1000,80	1000,80	1082,07	1137,51
28	800,53	800,53	610,22	610,22	1022,08	1022,08	1022,08	1108,45	1167,68
29	810,19	810,19	613,92	613,92	1040,98	1040,98	1040,98	1131,58	1194,06
30	819,30	819,30	617,38	617,38	1057,77	1057,77	1057,77	1151,77	1217,01
31	827,94	827,94	620,64	620,64	1061,55	1072,68	1072,68	1160,68	1228,78
32	836,14	836,14	623,73	623,73	1054,92	1085,95	1085,95	1157,92	1228,42
33	843,95	843,95	626,65	626,65	1039,73	1097,81	1097,81	1145,61	1217,88
34	851,40	851,40	629,44	629,44	1016,96	1108,44	1108,44	1124,67	1198,22
35	858,52	858,52	632,10	632,10	987,44	1118,02	1118,02	1096,05	1170,44
36	865,34	865,34	634,63	634,63	951,92	1126,14	1126,69	1060,58	1135,37
37	871,87	871,87	637,06	637,06	910,94	1124,16	1134,58	1018,93	1093,72
38	878,13	878,13	639,39	639,39	864,93	1115,83	1141,80	971,63	1046,07
39	884,15	884,15	641,63	641,63	814,15	1101,74	1148,43	919,05	992,84
40	889,93	889,93	643,77	643,77	758,69	1082,63	1154,55	861,43	934,30
41	895,50	895,50	645,84	645,84	698,52	1059,18	1160,24	798,77	870,59
42	900,86	900,86	647,83	647,83	633,40	1031,91	1163,86	731,12	801,66
43	899,77	906,03	649,74	649,74	562,95	1001,26	1160,03	658,11	727,30
44	891,02	911,02	651,59	651,59	486,65	967,60	1151,47	579,29	647,08
45	878,83	915,84	653,38	653,38	405,08	931,19	1138,67	494,08	560,41
46	863,92	920,50	655,11	655,11	359,00	892,22	1122,22	428,60	486,67
47	846,76	925,00	656,78	656,78	322,59	850,84	1102,64	380,80	431,79
48	827,70	929,36	658,39	658,39	292,97	807,11	1080,33	341,23	385,61
49	806,97	933,58	659,96	659,96	268,64	761,06	1055,64	308,33	346,72
50	784,74	937,66	661,47	661,47	248,44	712,64	1028,83	280,83	313,88
51	761,10	941,63	662,94	662,94	231,50	661,78	1000,14	257,67	286,03
52	736,12	945,47	664,37	664,37	217,14	608,31	969,74	238,03	262,27
53	709,85	949,21	665,75	665,75	204,86	552,07	937,75	221,22	241,87
54	682,30	952,83	667,10	667,10	194,26	492,84	904,28	206,74	224,23
55	653,49	956,36	668,40	668,40	185,02	430,40	869,39	194,17	208,88

56	623,40	959,78	669,67	669,67	176,91	367,69	833,13	183,19	195,43
57	592,00	959,24	665,84	670,91	169,74	333,08	795,51	173,52	183,57
58	559,27	953,63	657,18	672,11	163,35	304,83	756,54	164,97	173,06
59	525,16	945,72	647,35	673,29	157,62	281,47	716,17	157,35	163,68
60	489,63	935,99	636,64	674,43	152,46	261,96	674,36	150,54	155,28
61	452,63	924,83	625,22	675,54	147,77	245,49	631,04	144,42	147,72
62	414,11	912,51	613,23	676,63	143,50	231,47	586,14	138,90	140,88
63	374,05	899,20	600,75	677,68	139,58	219,40	539,53	133,89	134,67
64	332,40	885,02	587,84	678,72	135,98	208,94	491,14	129,33	129,01
65	289,17	870,07	574,54	679,73	132,65	199,78	440,84	125,17	123,84
66	244,31	854,40	560,89	680,71	129,56	191,70	388,58	121,36	119,10
67	213,83	838,07	546,91	681,67	126,68	184,52	339,99	117,86	114,74
68	202,20	821,12	532,63	682,62	123,99	178,10	312,78	114,63	110,72
69	192,83	803,57	518,05	683,54	121,47	172,31	290,20	111,64	107,01
70	185,00	785,44	503,20	684,44	119,10	167,07	271,27	108,87	103,57
71	178,28	766,74	488,08	681,57	116,87	162,30	255,24	106,30	100,38
72	172,39	747,50	472,70	675,10	114,76	157,93	241,53	103,91	97,41
73	167,15	727,71	457,08	667,75	112,76	153,91	229,70	101,67	94,64
74	162,43	707,38	441,21	659,74	110,86	150,19	219,40	99,57	92,06
75	158,14	686,51	425,11	651,22	109,06	146,74	210,36	97,61	89,64
76	154,20	665,09	408,78	642,29	107,34	143,53	202,36	95,76	87,38
77	150,56	643,12	392,22	633,01	105,69	140,52	195,23	94,03	85,27
78	147,19	620,60	375,45	623,44	104,12	137,70	188,84	92,39	83,28
79	144,05	597,51	358,45	613,61	102,62	135,05	183,06	90,84	81,41
80	141,11	573,85	341,24	603,55	101,18	132,55	177,81	89,37	79,65
81	138,35	549,60	323,81	593,27	99,80	130,18	173,02	87,98	77,99
82	135,76	524,74	306,17	582,79	98,47	127,94	168,62	86,65	76,42
83	133,31	499,28	288,32	572,13	97,19	125,81	164,55	85,40	74,95
84	131,00	473,18	270,24	561,28	95,96	123,78	160,79	84,20	73,55
85	128,80	446,44	251,94	550,27	94,77	121,84	157,28	83,05	72,23
86	126,72	419,05	233,40	539,10	93,62	119,99	154,01	81,96	70,97
87	124,74	391,00	214,60	527,78	92,52	118,22	150,94	80,91	69,79
88	122,85	362,28	195,51	516,31	91,45	116,53	148,05	79,91	68,66
89	121,05	332,87	176,09	504,69	90,41	114,90	145,33	78,95	67,59
90	119,33	302,79	156,29	492,93	89,41	113,34	142,76	78,02	66,57
91	117,68	272,00	136,01	481,04	88,44	111,83	140,32	77,13	65,60
92	116,11	240,50	115,09	469,02	87,49	110,38	138,00	76,28	64,68
93	114,60	218,45	101,37	456,87	86,58	108,98	135,79	75,45	63,80
94	113,15	209,45	98,26	444,59	85,69	107,64	133,69	74,66	62,95
95	111,75	202,00	95,71	432,19	84,83	106,33	131,67	73,89	62,15
96	110,41	195,61	93,49	419,66	83,99	105,07	129,75	73,14	61,39
97	109,12	190,02	91,52	407,02	83,18	103,85	127,90	72,42	60,65
98	107,88	185,02	89,74	394,26	82,39	102,67	126,13	71,73	59,95
99	106,68	180,50	88,11	381,38	81,62	101,53	124,42	71,05	59,28
100	105,53	176,36	86,60	368,39	80,87	100,42	122,78	70,40	58,63
101	104,41	172,55	85,20	355,29	80,14	99,35	121,20	69,77	58,01
102	103,33	169,01	83,90	342,07	79,42	98,30	119,67	69,15	57,42
103	102,29	165,71	82,67	328,74	78,73	97,29	118,20	68,55	56,85
104	101,28	162,62	81,51	315,29	78,05	96,30	116,78	67,97	56,30
105	100,30	159,71	80,41	301,73	77,39	95,35	115,40	67,40	55,77
106	99,36	156,97	79,37	288,06	76,75	94,41	114,07	66,85	55,26
107	98,44	154,38	78,38	274,26	76,12	93,51	112,78	66,31	54,77
108	97,55	151,92	77,43	260,35	75,50	92,62	111,53	65,79	54,29
109	96,69	149,58	76,53	246,30	74,90	91,76	110,31	65,28	53,84
110	95,85	147,36	75,67	232,13	74,31	90,92	109,14	64,78	53,40
111	95,04	145,24	74,84	217,81	73,74	90,11	107,99	64,29	52,97
112	94,25	143,21	74,05	203,33	73,18	89,31	106,88	63,82	52,56
113	93,48	141,28	73,29	188,68	72,63	88,53	105,80	63,35	52,16
114	92,73	139,42	72,55	173,84	72,09	87,77	104,75	62,90	51,77

115	92,01	137,64	71,85	158,77	71,57	87,03	103,72	62,45	51,40
116	91,30	135,94	71,17	143,43	71,05	86,30	102,73	62,02	51,03
117	90,61	134,30	70,51	127,76	70,55	85,60	101,76	61,59	50,68
118	89,94	132,72	69,88	111,67	70,06	84,90	100,81	61,18	50,34
119	89,28	131,19	69,26	101,44	69,57	84,23	99,89	60,77	50,00
120	88,64	129,73	68,67	98,95	69,10	83,57	98,99	60,37	49,68
121	88,02	128,31	68,10	96,86	68,63	82,92	98,11	59,98	49,37
122	87,41	126,95	67,54	95,01	68,18	82,28	97,25	59,60	49,06
123	86,81	125,63	67,00	93,36	67,73	81,66	96,42	59,22	48,76
124	86,23	124,35	66,48	91,85	67,30	81,06	95,60	58,85	48,47
125	85,67	123,11	65,97	90,45	66,87	80,46	94,80	58,49	48,19
126	85,11	121,92	65,48	89,16	66,44	79,88	94,02	58,14	47,92
127	84,57	120,76	65,00	87,94	66,03	79,31	93,26	57,79	47,65
128	84,04	119,63	64,54	86,80	65,62	78,75	92,51	57,45	47,38
129	83,52	118,54	64,08	85,72	65,23	78,20	91,78	57,11	47,13
130	83,01	117,48	63,64	84,69	64,83	77,67	91,06	56,79	46,88
131	82,51	116,45	63,21	83,71	64,45	77,14	90,36	56,46	46,63
132	82,02	115,45	62,80	82,78	64,07	76,62	89,68	56,14	46,39
133	81,55	114,47	62,39	81,89	63,70	76,11	89,01	55,83	46,16
134	81,08	113,52	61,99	81,04	63,34	75,62	88,35	55,53	45,93
135	80,62	112,60	61,60	80,22	62,98	75,13	87,71	55,22	45,71
136	80,17	111,70	61,23	79,43	62,63	74,65	87,08	54,93	45,49
137	79,73	110,82	60,86	78,67	62,28	74,18	86,46	54,64	45,27
138	79,29	109,97	60,50	77,94	61,94	73,72	85,85	54,35	45,06
139	78,86	109,14	60,14	77,24	61,60	73,26	85,26	54,07	44,85
140	78,45	108,32	59,80	76,56	61,27	72,81	84,67	53,79	44,65
141	78,03	107,53	59,46	75,90	60,95	72,38	84,10	53,52	44,45
142	77,63	106,75	59,13	75,27	60,63	71,94	83,54	53,25	44,25
143	77,23	105,99	58,81	74,65	60,32	71,52	82,99	52,98	44,06
144	76,84	105,25	58,49	74,05	60,01	71,10	82,44	52,72	43,87
145	76,46	104,52	58,18	73,48	59,70	70,69	81,91	52,46	43,69
146	76,08	103,81	57,88	72,91	59,40	70,29	81,39	52,21	43,51
147	75,71	103,12	57,58	72,37	59,11	69,90	80,88	51,96	43,33
148	75,34	102,43	57,29	71,84	58,82	69,51	80,37	51,72	43,15
149	74,98	101,77	57,00	71,32	58,53	69,12	79,88	51,48	42,98
150	74,62	101,11	56,72	70,82	58,25	68,75	79,39	51,24	42,81
151	74,27	100,47	56,45	70,33	57,97	68,37	78,91	51,00	42,64
152	73,93	99,84	56,18	69,85	57,70	68,01	78,44	50,77	42,47
153	73,59	99,23	55,91	69,39	57,43	67,65	77,98	50,55	42,31
154	73,26	98,62	55,65	68,94	57,16	67,29	77,52	50,32	42,15
155	72,92	98,03	55,40	68,49	56,90	66,94	77,08	50,10	41,99
156	72,60	97,44	55,14	68,06	56,64	66,60	76,63	49,88	41,84
157	72,28	96,87	54,90	67,64	56,39	66,26	76,20	49,67	41,68
158	71,96	96,31	54,65	67,23	56,14	65,93	75,77	49,46	41,53
159	71,65	95,75	54,41	66,82	55,89	65,60	75,36	49,25	41,38
160	71,34	95,21	54,18	66,43	55,65	65,28	74,94	49,04	41,24
161	71,03	94,67	53,94	66,04	55,41	64,96	74,53	48,84	41,09
162	70,73	94,15	53,71	65,67	55,17	64,64	74,13	48,64	40,95
163	70,44	93,63	53,49	65,30	54,94	64,33	73,74	48,44	40,81
164	70,14	93,12	53,27	64,93	54,70	64,03	73,35	48,24	40,67
165	69,85	92,62	53,05	64,58	54,48	63,73	72,97	48,05	40,53
166	69,56	92,12	52,83	64,23	54,25	63,43	72,59	47,86	40,40
167	69,28	91,64	52,62	63,89	54,03	63,14	72,22	47,67	40,26
168	69,00	91,16	52,41	63,55	53,81	62,85	71,85	47,48	40,13
169	68,72	90,68	52,20	63,22	53,59	62,56	71,49	47,30	40,00
170	68,45	90,22	52,00	62,90	53,38	62,28	71,14	47,12	39,87
171	68,18	89,76	51,80	62,58	53,17	62,00	70,79	46,94	39,75
172	67,91	89,30	51,60	62,27	52,96	61,73	70,44	46,77	39,62
173	67,64	88,86	51,40	61,96	52,76	61,46	70,10	46,59	39,50

174	67,38	88,42	51,21	61,66	52,55	61,19	69,76	46,42	39,37
175	67,12	87,98	51,02	61,36	52,35	60,93	69,43	46,25	39,25
176	66,87	87,55	50,83	61,07	52,16	60,67	69,10	46,08	39,13
177	66,61	87,13	50,65	60,79	51,96	60,42	68,78	45,92	39,01
178	66,36	86,71	50,46	60,50	51,77	60,16	68,46	45,75	38,90
179	66,11	86,29	50,28	60,23	51,58	59,91	68,15	45,59	38,78
180	65,86	85,89	50,10	59,95	51,39	59,67	67,84	45,43	38,67

PRILOGA B – REZULTATI TOPLOTNO-VLAŽNOSTNE IN MEHANSKE ANALIZE

Oznaka	$d_{char,sp}$ [cm]	$d_{char,Matlab}$ [cm]	y_T [cm]	I_y [cm ⁴]	e_z [cm]
A01	4,33	4,188	14,45	7020,96	10,11
A02	2,00	1,86	13,27	13871,44	11,27
A03	2,33	2,2	13,51	12470,05	11,17
A04	4,33	4,35	14,58	6779,65	10,24
A05	5,33	5,196	15,11	5091,00	9,78
A06	6,33	6,183	15,67	3678,30	9,33
A07	3,33	3,33	13,93	9104,03	10,60
A08	3,67	3,5599	14,15	8570,56	10,48
A09	4,67	4,644	14,78	5989,50	10,11
A10	5,00	4,8842	15,01	5602,72	10,01
A11	1,67	1,6422	13,04	14678,37	11,37
A12	2,00	1,9612	13,27	13233,92	11,27
A13	2,00	2,002	13,31	13118,84	11,31
A14	2,00	2,06	13,36	12958,37	11,36
A15	3,33	3,3808	13,89	9220,43	10,55
A16	7,67	7,5914	16,29	2275,74	8,62
A17	5,00	4,8992	14,84	5517,04	9,84
A18	2,33	2,4653	13,55	11760,55	11,21
A19	3,00	3,0031	13,89	9722,66	10,89
A20	3,00	2,9335	13,71	10204,75	10,71
A21	3,33	3,4419	14,02	8884,49	10,69
A22	4,00	3,9786	14,43	7509,99	10,43
A23	2,67	2,7702	13,64	10938,48	10,97
A24	3,00	2,9505	13,73	10144,44	10,73
A25	4,00	3,8464	14,37	7617,85	10,37
A26	4,00	4,0175	14,51	7339,53	10,51
A27	4,33	4,2189	14,57	6771,40	10,24
A28	1,33	1,4902	13,00	15476,25	11,67
A29	1,67	1,7864	13,19	14126,47	11,53
A30	2,00	1,8364	13,29	13779,23	11,29
A31	2,00	1,8829	13,23	13368,75	11,23
A32	2,33	2,3367	13,33	12444,55	11,00
A33	4,67	4,677	14,79	5983,29	10,12
A34	3,67	3,5016	14,11	8663,51	10,44
A35	5,33	5,3239	15,25	4864,87	9,92
A36	2,00	2,0801	13,30	13135,48	11,30
A37	2,67	2,5614	13,72	11255,68	11,05
C01	4,00	4,0039	14,21	7525,85	10,21
C02	5,67	5,5268	15,22	4581,75	9,55
C03	7,33	7,2583	16,24	2574,48	8,91
C07	5,00	4,9711	14,80	5579,98	9,80
C09	5,67	5,7421	15,19	4286,49	9,52