

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Huč, S. 2013. Analiza požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Hozjan, T., somentor Planinc, I.): 81 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Huč, S. 2013. Analiza požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Hozjan, T., co-supervisor Planinc, I.): 81 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

**SABINA HUČ**

**ANALIZA POŽARNE VARNOSTI  
ENOSTANOVANJSKIH VRSTNIH HIŠ**

Diplomska naloga št.: 3284/KS

**FIRE SAFETY ANALYSIS OF TERRACED HOUSES**

Graduation thesis No.: 3284/KS

**Mentor:**

doc. dr. Tomaž Hozjan

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

prof. dr. Igor Planinc

**Član komisije:**

doc. dr. Primož Banovec

doc. dr. Matevž Dolenc

Ljubljana, 22. 02. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisana Sabina Huč izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »Analiza požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš«.

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

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

Ljubljana, 15.2.2013

Sabina Huč

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>614.84:728.31(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Sabina Huč</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Tomaž Hozjan</b>
<b>Somentor:</b>	<b>prof. dr. Igor Planinc</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Analiza požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>81 str., 17 pregl., 34 sl., 46 en., 3 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>zasnova požarne varnosti, FDS, hitrost sproščanja toplote, požarni scenarij, požarna analiza, požarna odpornost nosilca</b>

### **Izvleček**

Diplomska naloga na celovit način obravnava požarno varnost v stavbah. Predstavljena sta predpisni in performančni način projektiranja požarne varnosti ter uporaba naprednega računalniškega programa za modeliranje razvoja požara v prostoru. V skladu s slovensko zakonodajo je v tekstualni in grafični obliki izdelana zasnova požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš. S tem je prikazan koncept predpisnega načina projektiranja. Poudarek naloge je na numeričnem modeliranju razvoja požara v pritličju enostanovanjske vrstne hiše z uporabo računalniškega programa Fire Dynamics Simulator. Obravnavan je vpliv gostote mreže, lokacije izvora požara, temperature vžiga ovire drevesa in prežračevanja na dinamiko požara. Koncept performančnega načina projektiranja požarne varnosti konstrukcijskih elementov je prikazan v okviru požarne analize jeklenega nosilca. Časovni razvoj temperature zraka v okolici nosilca v primeru najbolj neugodnega požarnega scenarija je ocenjen s pomočjo programa Fire Dynamics Simulator. Za dokaz požarne odpornosti jeklenega nosilca so uporabljene poenostavljene računske metode, ki jih podaja standard SIST EN 1993-1-2.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>614.84:728.31(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Sabina Huč</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>assist. prof. Tomaž Hozjan, Ph. D.</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>prof. Igor Planinc, Ph. D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Fire safety analysis of terraced houses</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Scope and tools:</b>	<b>81 p., 17 tab., 34 fig., 46 eq., 3 ann.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>fire safety scheme, FDS, heat release rate, fire scenario, fire analysis, fire resistance of a beam</b>

**Abstract**

The graduation thesis discusses fire safety design for residential buildings in a comprehensive manner. Prescriptive rules and performance-based approach to fire safety design and the application of an advanced computer program for modelling a fire development in an enclosure are presented. A fire safety scheme of terraced houses is made in graphical and textual form according to the Slovenian codes. The focus of the present thesis is on numerical modelling of a fire spread in the ground floor of a terraced house, using the computer program Fire Dynamics Simulator. The effects of the mesh density, the area of origin of the fire, the temperature of ignition of obstruction and the ventilation on fire dynamics are considered. The performance-based approach to design fire safety of structural elements is presented in the context of the fire analysis of a steel beam. The time evolution of air temperature around the beam is estimated with the use of the computer program Fire Dynamics Simulator for the worst case fire scenario. Simplified calculation methods given by the standard SIST EN 1993-1-2 are used to prove the fire resistance of a steel beam.

## **ZAHVALA**

*Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Tomažu Hozjanu za nasvete in pomoč pri izdelavi diplomske naloge ter za čas, ki mi ga je namenil. Za predlagane izboljšave se zahvaljujem tudi somentorju prof. dr. Igorju Planincu.*

*Zahvaljujem se sošolcem in prijateljem, zaradi katerih so problemi postali rešljivi in cilji uresničljivi. Hvala tudi za vse prijetne trenutke, ki smo jih doživeli skupaj. Posebno zahvalo namenjam prijateljici Neji za neizmerno potrpežljivost, spodbudne besede in posluh v celotnem obdobju študija.*

*Na koncu, a najbolj iz srca, se zahvaljujem očetu Ludviku in mami Lidiji za nesebično pomoč, razumevanje in podporo, ki sta mi jo nudila na moji študijski poti. Za izkazano razumevanje se zahvaljujem tudi bratu Mihi.*

*Še enkrat hvala vsem, ki so mi na kakršenkoli način pomagali v preteklih letih.*

**KAZALO VSEBINE**

<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 ZASNOVA POŽARNE VARNOSTI ENOSTANOVANJSKIH VRSTNIH HIŠ.....</b>	<b>4</b>
2.1 Požarni scenarij in zasnova požarne varnosti.....	5
2.1.1 Opis zasnove objekta.....	5
2.1.2 Namembnost objekta in opis dejavnosti, ki se bodo izvajale v objektu.....	6
2.1.3 Opis možnih vzrokov za nastanek požara .....	7
2.1.4 Vrste in količina požarno nevarnih snovi (požarna obremenitev).....	8
2.1.5 Opis pričakovanega poteka požara in njegove posledice .....	8
2.1.6 Ukrepi varstva pred požarom .....	9
2.2 Širjenje požara na sosednje objekte.....	10
2.3 Nosilnost konstrukcije in širjenje požara po stavbah .....	11
2.3.1 Definiranje požarne odpornosti.....	12
2.3.2 Širjenje požara po zunanjih stenah in strehi stavbe.....	13
2.3.3 Požarna zaščita prehodov skozi požarne stene.....	13
2.3.4 Zaščita pred delovanjem strele.....	14
2.4 Evakuacijske poti in sistemi za javljanje ter alarmiranje .....	14
2.4.1 Število in razporeditev ter dolžine in širine evakuacijskih poti .....	15
2.5 Naprave za gašenje in dostop gasilcev .....	16
2.5.1 Naprave in oprema za gašenje začetnega požara .....	16
2.5.2 Hidrantno omrežje in potrebna količina vode za gašenje.....	17
2.5.3 Dostop za gašenje in reševanje.....	17
2.5.4 Nadzor vpliva požara na okolico.....	18
2.6 Organizacijski ukrepi .....	18
<b>3 NUMERIČNO MODELIRANJE RAZVOJA POŽARA V PRITLIČJU ENOSTANOVANJSKE VRSTNE HIŠE .....</b>	<b>20</b>
3.1 Splošne zahteve za izbor računalniškega modela.....	20
3.2 Opis programa FDS.....	21
3.3 Opis računskega modela pritličja enostanovanjske vrstne hiše.....	23
3.3.1 Mreža ("Meshes") .....	24
3.3.2 Reakcija ("Reactions") .....	24
3.3.3 Materiali ("Materials") .....	25
3.3.4 Površine ("Surfaces") in "Vent" .....	26
3.3.5 Modeliranje geometrije – ovire ("Obstructions").....	26



3.3.6 Modeliranje požara .....	26
3.3.7 Merilniki ("Devices").....	30
3.4 Opis opazovanih parametrov.....	31
3.4.1 Hitrost sproščanja toplote .....	31
3.4.2 Izpostavljenost ognju [33].....	31
3.4.3 Vpliv toplote na gradbene konstrukcije [16].....	32
3.4.4 Dim .....	32
3.4.5 Strupeni plini.....	33
3.5 Parametrična študija mreže .....	33
3.5.1 Primer P1 .....	34
3.5.2 Primer P5 .....	41
3.5.3 Primerjava rezultatov in izbor mreže.....	44
3.6 Vpliv lokacije izvora požara .....	48
3.7 Vpliv temperature vžiga ovire drevesa .....	55
3.8 Vpliv prezračevanja .....	57
<b>4 PREVERJANJE ODPORNOSTI JEKLENEGA NOSILCA V POŽARNEM PROJEKTNEM STANJU .....</b>	<b>62</b>
4.1 Postopki projektiranja požarnovarnih konstrukcij .....	62
4.2 Projektni požarni scenarij in projektni požar (primer P7).....	63
4.3 Podatki o obtežbi, materialu in geometriji prečnega prereza .....	65
4.4 Temperaturna analiza.....	65
4.4.1 Toplotne lastnosti ogljikovih jekel.....	66
4.4.2 Razvoj temperatur v nezaščitenih jeklenih elementih.....	67
4.5 Mehanska analiza.....	69
4.5.1 Mehanske lastnosti ogljikovih jekel pri povišanih temperaturah.....	70
4.5.2 Kombinacija vplivov.....	71
4.5.3 Obremenitev nosilca v požarnem projektnem stanju $E_{fi,d}$ .....	72
4.5.4 Kontrola nosilnosti elementa po SIST EN 1993-1-2 .....	72
<b>5 ZAKLJUČEK.....</b>	<b>77</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>79</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1:	Seznam prostorov. ....	7
Preglednica 2:	Razdelitev stavbe na požarne sektorje. ....	12
Preglednica 3:	Širina dovozne poti glede na radij [10]. ....	18
Preglednica 4:	Lastnosti v računskem modelu uporabljenih materialov. ....	25
Preglednica 5:	(a) Toplotna prevodnost opeke v odvisnosti od temperature. (b) Toplotna prevodnost celuloze v odvisnosti od temperature. ....	25
Preglednica 6:	Merilniki ogljikovega oksida. ....	30
Preglednica 7:	Merilniki vidnosti. ....	30
Preglednica 8:	Merilniki temperature. ....	31
Preglednica 9:	Podatki o velikosti mrežne celice v primerih P1. ....	34
Preglednica 10:	Podatki o modeliranih elementih pohištva v primeru P5. ....	41
Preglednica 11:	Podatki o velikosti mrežne celice v primerih P5. ....	42
Preglednica 12:	Opis lokacij izvora požara s pripadajočimi oznakami primerov. ....	49
Preglednica 13:	Čas odstranitve ovir iz modela. ....	50
Preglednica 14:	Podatki o modeliranih elementih pohištva v primeru P6. ....	55
Preglednica 15:	Pregled pomembnih sprememb tekom požara za primer P6. ....	56
Preglednica 16:	Začetni pogoji ventilacije. ....	58
Preglednica 17:	Redukcijski faktorji pri povišanih temperaturah. ....	71

## KAZALO SLIK

Slika 1: Trikotnik gorenja [10].....	8
Slika 2: Časovni potek temperature za značilni požar [10].....	9
Slika 3: Prikaz požarne ločitve na stiku strehe in ločilne stene [7].....	13
Slika 4: Dolžina evakuacijske poti iz prostora z enim izhodom [7].....	15
Slika 5: Dolžina evakuacijske poti za umik iz prostora z vsaj dvema izhodoma [7].....	15
Slika 6: Oznaka gasilnika skladno s SIST 1013.....	17
Slika 7: Računski model z oznakami odprt in elementov (ovir).....	23
Slika 8: Idealiziran časovni potek sproščanja toplote.....	28
Slika 9: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote v primeru P1.....	35
Slika 10: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Ts_1 v primeru P1.....	36
Slika 11: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Th_1 v primeru P1.....	37
Slika 12: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Td_4 v primeru P1.....	38
Slika 13: Časovni potek koncentracije ogljikovega oksida, izmerjen z merilnikom CO_302 v primeru P1.....	39
Slika 14: Časovni potek koncentracije ogljikovega oksida, izmerjen z merilnikom CO_4 v primeru P1.....	39
Slika 15: Časovni potek vidnosti skozi dim, izmerjen z merilnikom V_304 v primeru P1.....	40
Slika 16: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote v primeru P5.....	42
Slika 17: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Tk_4 v primeru P5.....	43
Slika 18: Časovni potek temperature po višini za primer P1_20.....	45
Slika 19: (a) Prikaz časovnega poteka vidnosti skozi dim po višini za primer P1_20. (b) Prikaz časovnega poteka koncentracije ogljikovega oksida po višini za primer P1_20.....	46
Slika 20: (a) Časovni potek koncentracije ogljikovega oksida v zraku, izmerjen z merilnikom CO_4 v primeru P5. (b) Časovni potek vidnosti skozi dim, izmerjen z merilnikom V_304 v primeru P5.....	47
Slika 21: Lokacija izvora požara.....	48
Slika 22: Primerjava časovnega poteka hitrosti sproščanja toplote za primere z različnimi lokacijami izvora požara.....	50

---

Slika 23: Primerjava časovnih potekov temperature, izmerjenih z merilniki Td, med primeri z različnimi lokacijami izvora požara. ....	51
Slika 24: Delitev prostora na vroč in hladen sloj [34]. ....	52
Slika 25: Primerjava časovnega poteka temperature pod stropom med primeri z različnimi lokacijami izvora požara. ....	53
Slika 26: Primerjava časovnega poteka koncentracije ogljikovega oksida med primeri z različnimi lokacijami izvora požara. ....	54
Slika 27: Vpliv temperature vžiga drevesa na časovni potek hitrosti sproščanja toplote. ....	56
Slika 28: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote pri različnih ventilacijskih pogojih. ....	58
Slika 29: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote pri različnih časih odpiranja severnih vrat. ....	60
Slika 30: Računski model v primeru P7. ....	64
Slika 31: Računski model nosilca. ....	65
Slika 32: Specifična toplota jekla v odvisnosti od temperature. ....	66
Slika 33: Časovni razvoj temperature zraka v okolici nosilca, dobljen s programom FDS in časovni razvoj temperature v jeklenem nosilcu HEA 280. ....	69
Slika 34: Spreminjanje redukcijskih faktorjev v odvisnosti od temperature. ....	70

## 1 UVOD

Skladno z Zakonom o graditvi objektov [1] je varnost pred požarom definirana kot ena izmed petih bistvenih zahtev vsakega inženirskega objekta. Cilj požarne varnosti je zagotoviti varovanje ljudi, premoženja ter okolja pred požarom in eksplozijami [2]. V nasprotnem primeru lahko neustrezna požarna varnost privede do velike neposredne in posredne materialne škode, v skrajnih primerih pa tudi do izgube človeških življenj. Zaradi velikega tveganja, ki lahko nastane ob neustrezni požarni varnosti objekta, sta se v praksi uveljavila dva pristopa projektiranja požarne varnosti; to sta predpisni in performančni način projektiranja.

Predpisni način projektiranja požarne varnosti temelji na izkustvenih in eksperimentalnih metodah ter na relativno natančnih in strogih predpisanih ukrepih, ki so podani v standardih oziroma smernicah. Izkazalo se je, da je lahko ta pristop zaradi svoje enostavnosti za določene objekte konzervativen in stroškovno neučinkovit. Zlasti to velja v primerih kompleksnejših in nestandardnih novejših objektov, v katerih se pogosto uporablja tudi novejša materiale. Žal pa je lahko predpisni način v določenih primerih modernih stavb tudi na nevarni strani, kar potrjujejo požari in tragični dogodki v prejšnjih desetletjih [3]. V številnih študijah, ki so bile opravljene kot posledica tragičnih dogodkov, se je namreč izkazalo, da stavbe pogosto nimajo zadostne ravni nosilnosti pri ekstremnih obtežbah kot je požar. Ti dogodki so privedli do spoznanja, da je pri projektiranju požarne varnosti potrebno uvesti nov pristop, ki bo v primeru nestandardnih stavb in objektov varnejši in bolj realističen v primerjavi z do sedaj uveljavljenim predpisnim načinom.

Nov pristop je t.i. performančno projektiranje požarne varnosti, ki se zadnje desetletje uveljavlja po svetu. Ta pristop projektantom omogoča, da v sodelovanju z organi pristojnimi za požarno varnost in zavarovalnicami lažje dosežejo želeno (zastavljeno) stopnjo požarne varnosti stavbe, pri tem pa čim bolj realno upoštevajo lastnosti objekta, zahteve uporabnika, lastnika in okolice. Pomembna novost v primerjavi s predpisnim načinom je ta, da se pri zasnovi upošteva spekter možnih realnih požarov, ki se lahko razvijejo v obravnavani stavbi. Na osnovi tega se sprejmejo ustrezni aktivni in pasivni požarnovarnostni ukrepi, med katere spada tudi zahteva po požarni nosilnosti konstrukcije. Seveda to pomeni, da je za ustrezno performančno projektiranje potrebno razpolagati tudi z ustreznimi numeričnimi modeli, ki takšne analize omogočajo. Zato tudi na področju numeričnih modelov v zadnjem desetletju zasledimo velik napredek računskih modelov tako za opis razvoja požara v stavbah kot za mehanski odziv konstrukcije izpostavljenе požaru.

Projektiranje požarne varnosti lahko razdelimo v dve fazi, in sicer primarno in sekundarno. V primarni fazi s pomočjo predpisnega ali performančnega načina predvidimo aktivne in pasivne ukrepe požarne varnosti, s katerimi zagotovimo ustrezen nivo požarne varnosti obravnavane stavbe. Skladno s

Pravilnikom o požarni varnosti v stavbah [4] dosežemo ustrezen nivo požarne varnosti tako, da: (i) predvidimo ustrezne ukrepe, ki preprečijo širjenje požara na sosednje objekte, (ii) zagotovijo ustrezen nivo nosilnosti konstrukcije med požarom in v določeni meri preprečijo širjenje požara po stavbi, (iii) predvidimo ustrezne evakuacijske poti ter morebiten sistem za javljanje in alarmiranje, (iv) predvidimo ustrezne naprave za gašenje požara ter gasilcem omogočimo varen dostop in reševanje med požarom. Vse te ukrepe za zagotovitev požarne varnosti zajamemo v študiji ali zasnovi požarne varnosti.

V sekundarni fazi projektiranja požarne varnosti se glede na zahtevano požarno odpornost obodne konstrukcije požarnih sektorjev, ki so določeni bodisi v študiji bodisi v zasnovi požarne varnosti, dokončno zasnujejo in dimenzionirajo še posamezni konstrukcijski elementi gradbene konstrukcije. Požarno analizo konstrukcij običajno razdelimo v tri fizikalno smiselne, matematično nepovezane faze. V prvi fazi je potrebno določiti oceno časovnega razvoja temperatur v požarnem sektorju. Za to se uporabljajo modeli naravnih požarov, ki se delijo na poenostavljene in točnejše požarne modele. Poenostavljeni požarni modeli so zasnovani na razmeroma enostavnih metodah za opisovanje jakosti požara v obliki modeliranih požarnih krivulj. Točnejši požarni modeli pa so zasnovani na reševanju kompleksnih matematičnih enačb. Zaradi zahtevnosti so lahko ti modeli enoconski, dvoconski in hidrodinamični. Hidrodinamični računski model, s katerim določimo časovno in prostorsko razporeditev temperature v požarnem sektorju, uporablja tudi trenutno najnaprednejši računalniški program Fire Dynamics Simulator. V drugi fazi požarne analize konstrukcij, imenovani tudi temperaturna analiza konstrukcije, se glede na rezultate prve faze analize določi časovno spreminjanje temperature gradbenih konstrukcij ali njihovih delov med požarom. V tretji fazi požarne analize, imenovani tudi mehanska analiza konstrukcije, se z uporabo matematičnega modela konstrukcije dokazuje požarna varnost konstrukcije v celoti oziroma njenih delov v celotnem času izpostavljenosti požaru. Pri tem standardi Evrokod dovoljujejo poenostavljene in napredne računske metode projektiranja ter projektiranje s tabeliranimi podatki oziroma preizkušanjem.

Namen diplomske naloge je prikazati in se spoznati z zgoraj opisanima konceptoma projektiranja požarne varnosti gradbenih konstrukcij. Z uporabo predpisnega načina projektiranja požarne varnosti in na podlagi 7. člena Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4] je izdelana zasnova požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš. V drugem poglavju diplomske naloge in v prilogi A je predstavljen tekstualni del, v prilogi B pa grafični del zasnove požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš. Konceptualno se drugemu poglavju pridružuje še priloga C, v kateri je tabelarično prikazana klasifikacija gradbenih materialov glede odziva na ogenj. V tretjem poglavju je predstavljeno numerično modeliranje razvoja požara v pritličju enostanovanjske vrstne hiše z uporabo točnejšega požarnega modela oziroma računalniškega programa Fire Dynamics Simulator. Obravnavan je vpliv mreže, lokacije izvora požara, temperature vžiga ovire drevesa in prezračevanja na dinamiko požara.

Namen tega poglavja je v prvi vrsti spoznati program ter si ustvariti mnenje o njegovi zahtevnosti in zanesljivosti oziroma natančnosti. Koncept performančnega projektiranja požarne varnosti je predstavljen v četrtem poglavju. Na osnovi predhodno pridobljenih izkušenj je v sklopu požarne analize modeliran temperaturno najneugodnejši požarni scenarij v okolici jeklenega nosilca. Za dokaz požarne odpornosti jeklenega nosilca HEA 280 so uporabljene poenostavljene računske metode, ki jih podaja standard SIST EN 1993-1-2 [5]. Poleg treh prilog in osrednjih treh poglavij, obsega diplomska naloga še uvod in zaključek.

## 2 ZASNOVA POŽARNE VARNOSTI ENOSTANOVANJSKIH VRSTNIH HIŠ

V tem poglavju je izdelana zasnova požarne varnosti za enostanovanjske vrstne hiše. Elaborat z naslovom Zasnova požarne varnosti mora skladno s Pravilnikom o požarni varnosti v stavbah [4] vsebovati dokaz o doseganju predpisane ravni požarne varnosti. Sama zasnova požarne varnosti obravnavanih enostanovanjskih vrstnih hiš je izdelana po priporočilih smernice [6]. Sestavljena je iz tekstualnega in grafičnega dela. Tekstualni del je predstavljen v tem poglavju in vsebuje potrebne podatke in pojasnila za uporabo ukrepov varstva pred požarom. Pod tekstualni del spada tudi obrazec z naslovom Izkaz požarne varnosti, ki je obvezna priloga zasnove požarne varnosti in se nahaja na koncu diplomske naloge v prilogi A. Načrtovane rešitve ukrepov varstva pred požarom so s predpisanimi znaki predstavljene v grafičnem delu v prilogi B na koncu diplomske naloge. V prilogi B je v okviru razpoložljivih arhitekturnih podlog prikazan tloris pritličja in mansarde enostanovanjskih vrstnih hiš. Na risbah je v obliki grafičnih znakov prikazano naslednje: požarna odpornost nosilnih in predelnih konstrukcijskih elementov, meje požarnih sektorjev, evakuacijske poti, lokacija in vrsta opreme za gašenje začetnih požarov, ki jo lahko uporabijo vsi uporabniki ter legenda uporabljenih grafičnih znakov. Intervencijskih površin in dovoznih poti za gasilce in druge reševalce žal ni bilo mogoče prikazati z grafičnimi simboli, saj nismo imeli na voljo ustreznih arhitekturnih podlog.

### Zakonska podlaga za načrtovanje požarne varnosti v stavbah

Pravilnik o požarni varnosti v stavbah [4] določa ukrepe, ki jih je treba izvesti, da bi stavbe izpolnjevale gradbene zahteve za zagotovitev požarne varnosti. Rešitve za doseganje teh zahtev oziroma priporočeni gradbeni ukrepi so skladno s 7. členom pravilnika [4] podani v tehnični smernici z naslovom Tehnična smernica za graditev TSG-1-001:2010 Požarna varnost v stavbah (v nadaljevanju TSG) [7]. Po 8. členu pravilnika [4] se smejo pri projektiranju in gradnji stavb namesto ukrepov navedenih v TSG uporabiti tudi: ukrepi iz drugih standardov, tehničnih smernic ali drugih dokumentov, ki določajo požarnovarnostne ukrepe v smislu [4] ali ukrepi, ki temeljijo na izračunih v okviru metod požarnega inženirstva. Cilj ukrepov je omejiti ogrožanje okolja, ljudi, živali in premoženja v stavbah, okolici stavb in sosednjih objektov ter omogočiti učinkovito ukrepanje gasilskih ekip pri omejitvi posledic požara, ne da bi bila pri tem po nepotrebnem ogrožena življenje in zdravje njihovih članov.

Doseganje predpisane ravni požarne varnosti po Pravilniku o požarni varnosti v stavbah [4] mora izhajati iz študije požarne varnosti, kadar je to zahtevano skladno s predpisom o študiji požarne varnosti [8]. Obvezna vsebina študije požarne varnosti za objekte, za katere je izdelava študije obvezna in pogoji za izdelovalca študije so določeni v Pravilniku o študiji požarne varnosti [8].\*

\* Opomba: Zasnova požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš je bila izdelana pred 2.11.2012, ko so bile v Uradnem listu RS objavljene spremembe in dopolnitve Zakona o varstvu pred požarom [2]. Po novem slednji predpisuje, da se za gradnjo požarno manj zahtevnih objektov izdelava zasnova požarne varnosti, za gradnjo požarno zahtevnih objektov pa študija požarne varnosti. Sprememba na zakonodajnem področju nima vpliva na izdelano zasnovo požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš.



Kadar izdelava študije požarne varnosti ni zahtevana, mora doseganje predpisane ravni požarne varnosti izhajati iz zasnove požarne varnosti. Ta na kratek in pregleden način določa potrebne protipožarne ukrepe, ki so povezani:

- s širjenjem požara na sosednje objekte,
- z nosilnostjo konstrukcije ter širjenjem požara po stavbah,
- z evakuacijskimi potmi in sistemi za javljanje in alarmiranje ter
- z napravami za gašenje in dostopom gasilcev.

Študija oziroma zasnova požarne varnosti sta sestavni del projektne dokumentacije za pridobitev gradbenega dovoljenja. Povzetek vsebine študije oziroma zasnove požarne varnosti mora biti naveden v obrazcu z naslovom Izkaz požarne varnosti stavbe (priloga A), ki ga opredeljuje pravilnik [4] in je obvezna priloga dokazila o zanesljivosti objekta kot je določeno v Zakonu o graditvi objektov [1]. Obrazec je razdeljen na dva dela, ki se izpolnjujeta ločeno. Izpolnjen stolpec »načrtovani ukrepi« je sestavni del projektne dokumentacije za pridobitev gradbenega dovoljenja. Stolpec »izvedeni ukrepi« pa se izpolni ob zaključku gradnje.

Glede na požarno zahtevnost se v diplomski nalogi analizirana stavba skladno s prilogo 1 Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4] uvršča med požarno manj zahtevne stavbe, v skupino **11211 – Večstanovanjske stavbe** (skladno s CC–SI [9]). V skladu s pravilnikoma [4] in [8] za načrtovani objekt ni potrebna izdelava študije požarne varnosti, temveč se za objekt izdelava zasnova požarne varnosti.\*

Zasnova požarne varnosti je izdelana po 7. členu Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4], to je na osnovi TSG.

## **2.1 Požarni scenarij in zasnova požarne varnosti**

### **2.1.1 Opis zasnove objekta**

#### **Velikost objekta**

Višinski gabarit objekta sestavljata pritličje in mansarda. Kota tal mansarde znaša + 2,80 m nad koto ± 0,0 m. Tloris pritličja sestavljata dva pravokotna, prečno simetrična dela, dimenzij 24,90 m x 12,90 m, med katerima je dilatacija v debelini 5 cm. Skupni tloris pritličja z garažami in nadkritjem vhodov ima površino 643,07 m<sup>2</sup>. Gabarit mansarde je podobno kot pritličje enojno simetričen, vendar krajši za dolžino garaž. Bruto tlorisna površina mansarde vključno z balkoni znaša 480,53 m<sup>2</sup>. Tloris pritličja in mansarde z osnovnimi kotami je prikazan v prilogi B.

## **Gradbena zasnova**

Nosilno konstrukcijo objekta tvorijo jekleni nosilci, armiranobetonski nosilci in plošče, ki so podprti z armiranobetonskimi stebri in opečnatimi zidovi z debelino 30 cm ter leseno ostrešje. Temeljenje konstrukcije je izvedeno s pasovnimi temelji s širino in višino vsaj 50 cm. Talna plošča je debelina 10 cm, plošči nad pritličjem in mansardo pa 18 cm. Vsaka stanovanjska enota je med pritličjem in mansardo povezana z dvoramnim armiranobetonskim stopniščem, ki je vpeto v temelje širine 40 cm. V pritličju so predelne stene iz opečnatih predelnikov s širino 12 cm, v mansardi pa so tudi mavčno kartonske predelne stene s širino 10 cm. Streha objekta je kombinacija dvokapnice in ravne strehe nad balkoni na vzdolžnih straneh objekta. Dvokapnica ima naklon 35° in je pokrita z opečnim zareznikom. Nosilno konstrukcijo strehe sestavljajo vmesne lege dimenzij 18/18 cm in 20/20 cm, kapne lege dimenzij 16/16 cm ter škarniki dimenzij 12/14 cm. Nosilni opečnati zidovi med stanovanji so podaljšani do kote +9,13 m nad koto pritličja in tako na treh mestih vertikalno prekinjajo streho. Sleme dvokapne strehe je na višini +8,64 m nad koto pritličja.

### **2.1.2 Namembnost objekta in opis dejavnosti, ki se bodo izvajale v objektu**

Obravnavani objekt je kompleks štirih enostanovanjskih dvonadstropnih vrstnih hiš. Zasnovan je tako, da se deli na štiri samostojne enote, ki imajo ločene vhode in pripadajoče zunanje površine. Skupnih prostorov znotraj objeta ni. Hiše so med seboj simetrične ter po površini, razporeditvi notranjih prostorov in njihovi namembnosti popolnoma enake. V pritlični etaži posamezne enote je iz severne strani vhod v vetrolov. Od tu je dostop do kabineta, kurilnice, garderobe, kopalnice, kuhinje, jedilnice in dnevnega prostora. Iz tega je na južni strani izhod na pokrito teraso z zelenico. V mansardi se nahajajo spalniki prostori z izhodi na balkona in dve kopalnici. Seznam prostorov pritličja in mansarde tipičnega stanovanja je prikazan v preglednici 1. Etaži sta vertikalno povezani z notranjim stopniščem. Podstrešje je neizkoriščeno. Na vzhodni in zahodni strani objekt zaključujeta po dve garaži. Vsaki hiši pripada ena garaža za dva avtomobila in pokrito parkirišče pred njo. Dostop do objekta je omogočen z javne ceste. Skupna predvidena kapaciteta zasedenosti objekta znaša do 20 ljudi.

Dejavnosti, ki se izvajajo v objektu niso posebej nevarne. V garažah so parkirani avtomobili z rezervoarji za gorivo. V vsakem stanovanju so prostori namenjeni bivanju. V kuhinji se nahaja klasična oprema za pripravo hrane, na primer električna pečica, indukcijska kuhalna plošča, napa za odvod vodne pare in pomivalni stroj. Za ogrevanje posameznega stanovanja se uporablja peč na utekočinjeni zemeljski plin, dobavljen iz podzemnega plinovodnega sistema. Dodatno je dnevni prostor ogrevan še s kaminom na drva. Plinska peč, ki se nahaja v kurilnici ter kamin imata zagotovljen odvod dima po dveh ločenih dimniških cevih.

Preglednica 1: Seznam prostorov.

	Oznaka	Opis	Površina [m <sup>2</sup> ]
PRITLIČJE	P1	Vetrolov	6,70
	P2	Kabinet	12,90
	P3	Dnevni prostor	35,00
	P4	Kurilnica	4,10
	P5	Garderoba	5,05
	P6	Kopalnica	5,90
	P7	Kuhinja	7,90
	P8	Jedilnica	12,50
	GVH	Garaža	33,00
	<b>SKUPAJ PRITLIČJE</b>		
MANSARDA	M1	Stopnišče	8,20
	M2	Hodnik	10,90
	M3	Spalnica	20,85
	M4	Kopalnica	8,00
	M5	Garderoba	6,95
	M6	Kopalnica	5,40
	M7	Otroška soba	15,45
	M8	Otroška soba	16,30
	M9	Balkon	6,45
	M10	Balkon	4,05
	<b>SKUPAJ MANSARDA</b>		

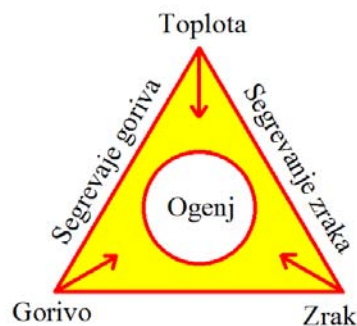
### 2.1.3 Opis možnih vzrokov za nastanek požara

V objektu ni predvideno izvajanje tehnoloških postopkov, ki bi pomenili večjo požarno nevarnost. Vendar je lahko vzrok za izbruh požara vsaka dejavnost, pri kateri je prisoten človeški faktor. Torej ne glede na funkcionalno in konstrukcijsko zasnovo objekta obstaja določena verjetnost, da pride do vžiga oziroma izbruha požara. V obravnavanem objektu se lahko vžgejo stropne, stenske, talne in druge obloge ter deli stanovanjske opreme. Glede na potencialne vire vžiga je potrebno predvideti in omejiti možne vzroke požara, kot so:

- vroča dela pri vzdrževanju in popravilih (npr. varjenje, brušenje),
- nepravilna uporaba in okvare na električnih instalacijah in napravah, kratek stik,
- malomarnost (odvržen cigaretni ogorek, sveče),
- napake na plinski inštalaciji,
- neustrezno vzdrževanje kurilnih naprav in dimnikov,
- udarec strele in

- namerno podtaknjen požar.

Da pride do gorenja morajo biti poleg vira toplote oziroma vžiga, v zadostnih količinah oziroma koncentracijah prisotni tudi gorljivi materiali (gorivo) in oksidacijsko sredstvo (kisik, zrak ali oksidant) (slika 1) [10].



Slika 1: Trikotnik gorenja [10].

#### 2.1.4 Vrste in količina požarno nevarnih snovi (požarna obremenitev)

Skupna ali celotna požarna obremenitev se deli na premično in nepremično požarno obremenitev. Premično požarno obremenitev predstavljajo goriva, ki jih lahko v prostor prinesemo. V stanovanjih so to na primer pohištvo, knjige, obleke, zavese in druge dekoracije. Njihovo požarno obremenitev predstavimo kot količino sproščene toplote na  $m^2$  površine. Nepremična požarna obremenitev predstavlja količino goriva, vezane na objekt oziroma gorljive elemente vgrajene v objekt, kot so na primer: nenosilni zidovi, stavbno pohištvo, nosilni zidovi in medetažne konstrukcije. Glede na namembnost objekta je za požare, ki bi lahko nastali v obravnavanem stanovanjskem objektu, predvidena srednja hitrost širjenja požara. Ocenjena požarna obremenitev za stanovanja je  $300 \text{ MJ/m}^2$ . To je nizka požarna obremenitev, saj je manjša od  $1000 \text{ MJ/m}^2$  [11]. Izjema je prostor s plinsko pečjo, za katerega se predvideva nizka požarna obremenitev  $200 \text{ MJ/m}^2$  in hiter razvoj požara [12]. V prostorih obravnavanega objekta je pričakovati naslednje vrste požarov:

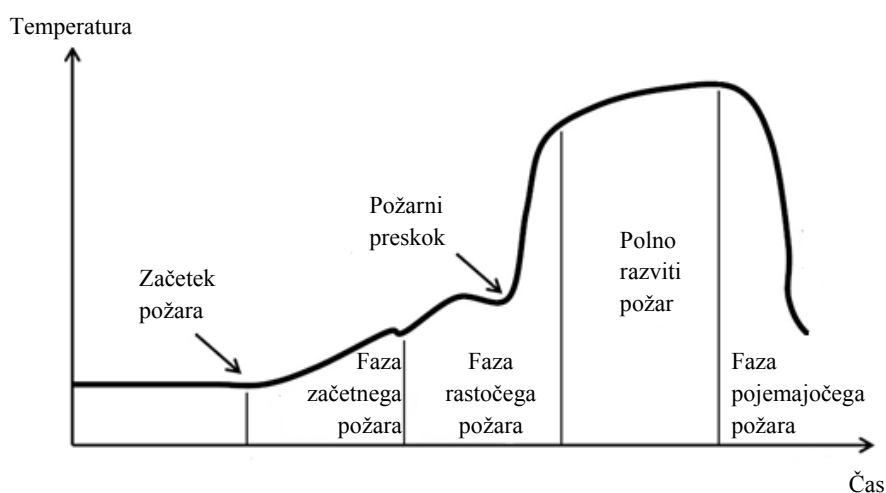
- požari razreda A: gorljive trdne snovi predvsem organskega izvora, ki pri gorenju tvorijo žar,
- požari razreda B: požari tekočin in raztaljenih snovi,
- požari razreda C: požari plinov.

#### 2.1.5 Opis pričakovanega poteka požara in njegove posledice

V primeru izbruha požara je začetna faza požara odvisna od vira vžiga in pričetka gorenja gorljivega materiala oziroma od količine sproščene toplote. V fazi rastočega požara se predvideva počasno do hitro ali enakomerno gorenje, saj je hitrost razvoja požara odvisna predvsem od lastnosti gorljivih materialov. Za počasen požar je značilno, da se razvija počasi, ob gorenju ni plamena, sprošča se

predvsem dim, količina sproščene toplote ob gorenju pa je nizka. Pri hitrem požaru je razvoj hitrejši, pride pa predvsem do gorenja s plamenom. Če je dovod kisika na mesto gorenja omejen, požar verjetno ne bo prišel v fazo požarnega preskoka in lahko postopoma celo sam ugasne. V primeru, da do požarnega preskoka pride, bo hitrost sproščanja toplote dosegla maksimalno raven pri določeni ravni prezračevanja. Če je dovod svežega zraka na mesto gorenja zadosten, bodo hitrost in količino sproščene toplote določale količine in lastnosti gorljivih materialov. Po požarnem preskoku torej nastopi faza polno razvitega požara, v kateri na hitrost gorenja v prostoru odločujoče vplivajo različni zunanji faktorji, kot so ventilacija, geometrija prostora in lastnosti uporabljenih gradbenih materialov. Za pričakovati je, da se v tej fazi prične širjenje požara v sosednje prostore [10].

Z izvedbo predvidenih požarnovarnostnih ukrepov in posredovanjem gasilcev, bi bil morebitni požar v obravnavanem objektu omejen na posamezni požarni sektor, kjer je za pričakovati poškodbe konstrukcije in uničenje opreme.



Slika 2: Časovni potek temperature za značilni požar [10].

Pričakovanemu razvoju požara se podrobneje posvetimo v naslednjem poglavju. Preučevanje nastanka in širjenja požara v prostoru nastanka požara zajema oceno:

- količine dima in toplote, ki se sprošča ob gorenju,
- količine ogljikovega oksida, ki nastaja ob gorenju ter
- časovnega razvoja temperature v prostoru.

### 2.1.6 Ukrepi varstva pred požarom

Zasnova požarne zaščite v objektu temelji na aktivnih, pasivnih in organizacijskih ukrepih požarne zaščite. S temi ukrepi se želi preprečiti oziroma zmanjšati možnost za nastanek požara, zagotoviti

varen umik ljudi iz stavbe na prosto, varovati premoženje ter preprečiti širjenje požara znotraj stavbe in na sosednje objekte. Aktivni ukrepi požarne zaščite so vsi tehnični ukrepi, ki so namenjeni za gašenje požara (npr. sistemi, naprave, oprema in postopki za odkrivanje in gašenje požara ter odvajanje dima in toplote ob požaru). Aktivirajo se ob morebitnem požaru in se uporabljajo predvsem za začetno gašenje požara. V obravnavanem objektu skladno s TSG ni predvidenih ukrepov aktivne požarne zaščite. Ukrepi pasivne požarne zaščite so vsi gradbeno tehnični ukrepi, namenjeni preprečevanju širjenja požara. Predvideni ukrepi pasivne požarne zaščite v objektu zajemajo:

- delitev objekta na požarne sektorje,
- požarno odpornost gradbenih elementov, kamor sodi primerna požarna odpornost nosilne konstrukcije in predelnih gradbenih elementov na mejah požarnih sektorjev ter take požarne lastnosti fasadnih gradbenih elementov, ki preprečujejo prenos požara na sosednje objekte,
- zadostne odmike od sosednjih objektov,
- uporabo takih gradbenih materialov oziroma gradbenih proizvodov, ki omejujejo hitro širjenje požara po površini, se težko vžgejo, v primeru vžiga pa oddajajo nizke količine toplote in dima z namenom omejitve hitrega širjenja požara po objektu,
- izvedbo zadostnega števila izhodov iz obravnavanih prostorov in ustrezno izvedbo le-teh,
- izvedbo strelovodne zaščite in
- ureditev dovoznih poti in površin za gasilsko intervencijo z vozili.

Pasivni ukrepi varstva pred požarom so načrtovani v skladu s točko II. Zahteve za varnost pred požarom Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4], kjer so obravnavane zahteve podane v 3., 4., 5. in 6. členu. Organizacijski ukrepi za obravnavan objekt so opisani in predstavljeni v poglavju 2.6.

## 2.2 Širjenje požara na sosednje objekte

Preprečitev širjenja požara na sosednje objekte je zahtevana v 3. členu Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4], ki se glasi:

- (1) Zunanje stene in strehe stavb morajo biti projektirane in grajene tako, da je z upoštevanjem njihovega odmika od meje parcele omejeno širjenje požara na sosednje objekte.*
- (2) Ločilne stene, skupaj z vrati, okni in drugimi preboji med posameznimi stavbami morajo biti projektirane in grajene tako, da je omejeno širjenje požara na sosednje objekte. Med posamezne stavbe štejejo tudi dvostanovanjske stavbe in vrstne hiše.*

Da so izpolnjene zahteve varstva pred požarom glede možnosti širjenja požara med stavbami, se zahteva zunanje stene s požarno odpornostjo (R)EI 60. Zunanje stene ne smejo imeti na zunanji strani

več kot 1 mm debele obloge iz gorljivega materiala, razredov B-s3,d2, C, D ali E. Klasifikacija gradbenih materialov glede odziva na ogenj je predstavljena v prilogi C. K požarno nezaščitenim površinam v zunanjih stenah se štejejo okna in vrata, ki ne zagotavljajo predpisane požarne odpornosti.

Za obravnavan objekt so odmiki od meje sosednje parcele ali sredine javne ceste sledeči:

- na južni strani je objekt oddaljen od sredine javne ceste najmanj 12,5 m,
- na vzhodni in zahodni strani je objekt oddaljen od sredine javne ceste najmanj 6,5 m,
- na severni strani pa je objekt oddaljen od parcelne meje več kot 9,0 m.

Delež nezaščitenih zunanjih površin na južnem delu fasade je 80 %, na vzhodnem in zahodnem delu 40 % in na severnem delu 20 %. V skladu z Metodo 2, opisano v TSG, je lahko največji odstotek požarno nezaščitenih površin na severni fasadi 72 %, na vzhodni in zahodni fasadi 52 %, medtem ko za južno fasado ni zahtev. Požarno nezaščitene površine zunanjih sten obravnavanega objekta so v skladu z zahtevami TSG.

Fasada objekta je predvidena v obliki kompozitnega sistema za zunanjo toplotno izolacijo stavbe – ETICS, ki ga sestavljajo toplotnoizolacijski sloj, armirna mrežica in zaključni omet. ETICS fasada z gorljivo izolacijo mora biti najmanj razreda B-d1.

Strešna kritina stavbe mora biti najmanj razreda  $B_{ROOF}(t1)$  po standardu SIST EN 13501-5. Oznaka  $B_{ROOF}(t1)$  se uporablja za označevanje požarne odpornosti streh, za katere je značilno, da so izpostavljene požaru z zunanje strani, kjer je razširitev ognja po površini kritine omejena ter da do gorenja na spodnji strani strehe ne pride.

### **2.3 Nosilnost konstrukcije in širjenje požara po stavbah**

Zahteva za nosilnost konstrukcije in širjenje požara po stavbah je opredeljena v 4. členu Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4]:

- (1) Stavbe morajo biti projektirane in grajene tako, da njihova nosilna konstrukcija ob požaru določen čas ohrani potrebno nosilnost.*
- (2) Stavbe morajo biti razdeljene v požarne sektorje, če je to nujno za omejitev hitrega širjenja požara v njih. Projektirati in graditi jih je treba tako, da se v največji možni meri omeji hitro širjenje požara po navpičnih oziroma vodoravnih povezavah. Razdelitev v požarne sektorje in njihova velikost sta odvisni od:*
  - *namembnosti stavbe,*

- velikosti in drugih arhitekturnih lastnosti posamezne stavbe,
- proizvodnega procesa, ki poteka v stavbi, ter od vrste in količine gorljivih snovi, ki se nahajajo v stavbi,
- vgrajenih oziroma postavljenih sistemov za gašenje in
- drugih izvedenih požarnovarnostnih ukrepov.

(3) Za omejitev hitrega širjenja požara po stavbi morajo biti uporabljeni takšni gradbeni materiali oziroma gradbeni proizvodi, ki:

- se težko vžgejo,
- v primeru vžiga oddajajo nizke količine toplote in dima ter
- omejujejo hitro širjenje požara po površini.

Glede na zgornje zahteve obravnavano stavbo razdelimo na 10 požarnih sektorjev (PS) kot je prikazano v preglednici 2 in označeno v prilogi B.

Preglednica 2: Razdelitev stavbe na požarne sektorje.

Oznaka	Opis	Površina [m <sup>2</sup> ]
PS1 - PS4	stanovanje	178,0
PS1a - PS4a	kurilnica	4,1
PS5, PS6	garaže	66,0

### 2.3.1 Definiranje požarne odpornosti

Za označevanje požarne odpornosti elementov gradbenih konstrukcij se uporablja evropska klasifikacija, skladno s SIST EN 13501-2, ki vključuje naslednja merila, povzeta po prilogi 2 Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4]:

- R – nosilnost, ki v minutah označuje odpornost nosilnega dela stavbe proti zrušitvi,
- E – celovitost, ki v minutah označuje odpornost dela stavbe s funkcijo požarnega ločevanja proti vdoru ognja, dima in vročih plinov,
- I – toplotna izolativnost v pogojih standardnega požara ( $\Delta T = 140$  K), ki v minutah označuje odpornost dela stavbe s funkcijo požarnega ločevanja proti prenosu prekomerne vročine,
- C – samozapiranje, pri obravnavi vrat, ki se v primeru požara samodejno zapro in
- S – prepuščanje dima, pri obravnavi delov stavb, ki so namenjeni predvsem omejevanju širjenja dima.

Številka v kombinaciji s črkovnimi zanki R, E, I pomeni požarno odpornost v minutah (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 240, 360 minut).

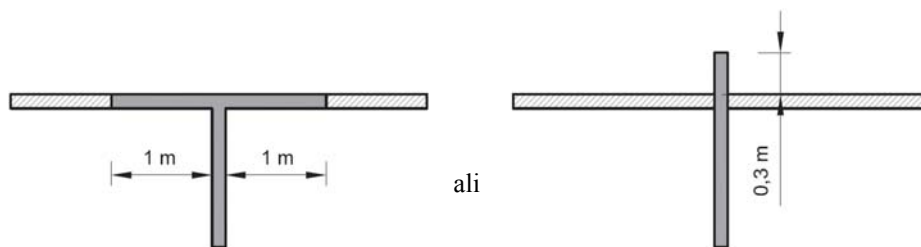


Za nosilno konstrukcijo stavbe se skladno s tabelo 4 v TSG zahteva, da v požaru ohrani nosilnost in stabilnost vsaj 60 minut (**R 60**). Dovoljeno je, da lahko predpisano nosilnost R 60 zagotovi tudi lesena nosilna konstrukcija. V kolikor je posamezni nosilni gradbeni element znotraj stavbe obenem tudi element na meji med različnimi požarnimi sektorji mora zagotavljati tudi merila za celovitost E in izolativnost I za zahtevano časovno obdobje. Za mejne elemente požarnih sektorjev obravnavane stavbe se zahteva požarna odpornost v smislu celovitosti in izolativnosti najmanj 60 minut (**EI 60**), kar izhaja iz tabele 5 v TSG. Torej se za vsako stanovanje, ki je ločen požarni sektor, zahteva požarna odpornost najmanj **REI 60**. Predvidena armiranobetonska in jeklena nosilna konstrukcija v obravnavani stavbi ustreza tem zahtevam.

### 2.3.2 Širjenje požara po zunanjih stenah in strehi stavbe

Strešna kritina mora biti odporna proti požaru tudi iz zunanje strani. Strešna plošča garaž mora biti na razdalji 5 m od zunanje stene višje ležečega dela stavbe izvedena iz materialov s požarno odpornostjo 60 minut (**REI 60**), da se prepreči vertikalni prenos požara z nižjega na višji del stavbe.

Horizontalni prenos požara preko strehe se prepreči s požarnim zidom, ki sega najmanj 30 cm nad streho in ima požarno odpornost **RE 60** (slika 3).



Slika 3: Prikaz požarne ločitve na stiku strehe in ločilne stene [7].

### 2.3.3 Požarna zaščita prehodov skozi požarne stene

Vrata v stanovanja in garaže morajo imeti požarno odpornost najmanj EI<sub>1</sub>30 in so lahko brez samozapirala. Oznaka I<sub>1</sub> predstavlja zahtevo, da vratno krilo izpolnjuje kriterije izolativnosti 25 mm od roba.

Vrata kurilnice morajo biti opremljena s samozapiralom razreda C2 (nizka frekvenca rabe v stavbah in skrbno ravnanje z vrati) po tabeli 14 v TSG, odpirati se morajo navzven in imeti mehanizem na jekleno vzmet za avtomatsko zapiranje. Zahtevana požarna odpornost vrat kurilnice je EI<sub>1</sub>30-C2. V

skladu s TSG je potrebno zagotoviti ustrezno naravno ali prisilno prezračevanje kurilnice. V primeru požara je predviden odvod dima iz objekta skozi okenske in vratne odprtine na fasadi.

Inštalacijski jaški in kanali ne prehajajo skozi meje požarnega sektorja, zato zanje ni posebnih zahtev. Sicer morajo imeti vzdrževalne/revizijske zapore ter inštalacijski jaški in kanali enako požarno odpornost (EI 60) kot se zahteva za elemente požarnega sektorja skozi katere le-ti prehajajo. Poleg tega morajo biti neprepustni za dim in med seboj ločeni po namembnosti.

Na prehodih prezračevalnih kanalov skozi meje požarnih sektorjev in požarnih celic je treba vgraditi požarne lopute s požarno odpornostjo EI 60–S. Požarne lopute morajo imeti termično prožilo za avtonomno proženje zapornega mehanizma. Vgradnja požarnih loput ni potrebna, če so kanali za prezračevanje, ki prečkajo drug požarni sektor, brez odprtin, požarno odporni ali zaščiteni s požarnim ovojem z najmanj tako obojestransko požarno odpornostjo kot je zahtevana za požarni sektor oziroma celico. Prezračevalni kanali morajo biti iz negorljivih materialov. Prav tako mora biti toplotna izolacija kanalov negorljiva ali težko gorljiva, razreda A1, A2, B ali C.

#### **2.3.4 Zaščita pred delovanjem strele**

V skladu s Pravilnikom o zaščiti stavb pred delovanjem strele [13] morajo biti vse manj zahtevne in zahtevne stavbe opremljene s sistemom zaščite pred strelo z zaščitnim nivojem najmanj IV, ki mora biti projektiran, izveden in vzdrževan tako, da:

- odvede atmosfersko razelektrenje v zemljo brez škodljivih posledic ter pri tem ne povzroča iskrenja in električnih preskokov, ki bi lahko povzročili požar,
- omeji okvare električnih, telekomunikacijskih in drugih oskrbovalnih sistemov na najmanjšo možno mero,
- omeji okvare električnih in elektronskih naprav na najmanjšo možno mero in
- zagotavlja dovolj nizke napetosti dotika in koraka z ustrezno izenačitvijo potenciala.

#### **2.4 Evakuacijske poti in sistemi za javljanje ter alarmiranje**

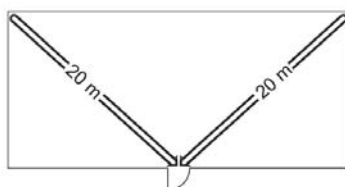
Zagotovitev hitre in varne evakuacije iz objekta je zahtevana po 5. členu Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4], ki navaja:

- (1) Stavbe morajo biti projektirane in grajene tako, da je ob požaru na voljo zadostno število ustrezno izvedenih evakuacijskih poti in izhodov na ustreznih lokacijah, ki omogočajo uporabnikom hitro in varno zapustitev stavbe.*

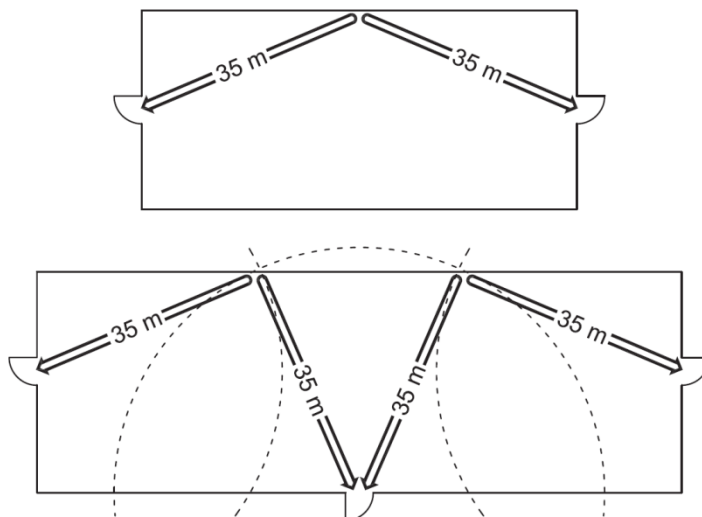
- (2) Če je glede na zasnovo, lokacijo, namembnost in velikost stavbe to nujno, morajo biti za zagotovitev hitre in varne evakuacije uporabnikov stavbe ter hitrega posredovanja gasilcev v stavbi vgrajeni sistemi za požarno javljanje in alarmiranje.

#### 2.4.1 Število in razporeditev ter dolžine in širine evakuacijskih poti

Če ima prostor samo en izhod, ne sme biti nobena točka v prostoru od njega oddaljena več kot 20 m (slika 4). Če ima prostor dva izhoda, ne sme biti nobena točka v prostoru od enega izhoda oddaljena več kot 35 m (slika 5). Pogoj za dolžino evakuacijskih poti je izpolnjen, saj najdaljša pot iz obravnavanega objekta na prosto meri 19,40 m.



Slika 4: Dolžina evakuacijske poti iz prostora z enim izhodom [7].



Slika 5: Dolžina evakuacijske poti za umik iz prostora z vsaj dvema izhodoma [7].

Minimalna širina stopnišč in hodnikov mora biti 1,2 m. Notranje stopnice, ki povezujejo etaži so lahko krožne ali zavite, vendar morajo biti lahko dostopne in imeti najmanj tri stopnice.

Iz prostorov ene stanovanjske enote mora biti zagotovljen en izhod širine najmanj 0,8 m. Smer odpiranja vrat ni pomembna, vendar ne smejo biti omejena zaradi nadzora nad dostopom ali protivlomnega varovanja stavbe.

Vsaka stanovanjska hiša ima urejena dva izhoda na prosto, in sicer skozi glavni izhod s severne strani in pomožni izhod na teraso z južne strani. S tem je zagotovljena možnost dvosmerne evakuacije. Iz garaž je izhod na prosto omogočen skozi garažna vrata. Vsi izhodi so v pritlični etaži, torej neposredno na teren. V posameznem stanovanju je za evakuacijo iz nadstropja predviden umik preko notranjega stopnišča v pritličje in naprej preko vetrolova in glavnega vhoda na prosto. V obravnavanem objektu so evakuacijske poti s svojo širino in dolžino zadostne za predvideno število uporabnikov posameznega stanovanja, to je skupaj 5 ljudi v pritličju in mansardi. Smeri evakuacije so prikazane v grafični prilogi B zasnove požarne varnosti.

Evakuacijska pot mora biti vedno prosta in pripravljena za umik, služi pa tudi kot intervencijska pot, po kateri lahko v zgradbo vstopijo gasilci.

## 2.5 Naprave za gašenje in dostop gasilcev

Pri načrtovanju naprav za gašenje in primernih površin za dostop gasilnih in reševalnih ekip sta upoštevani zahtevi iz 6. člena Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4]:

*(1) Stavbe morajo biti projektirane in grajene tako, da so glede na zasnovo, lokacijo, namembnost in velikost stavbe ob požaru:*

- *zagotovljene naprave in oprema za gašenje začetnih požarov, ki jih lahko uporabijo vsi uporabniki,*
- *zagotovljene naprave in oprema za gašenje, ki jih lahko uporabijo usposobljeni uporabniki in gasilci,*
- *vgrajeni ustrezni sistemi za gašenje požara.*

*(2) Zagotovljen mora biti neoviran in varen dostop za gašenje in reševanje v stavbi.*

### 2.5.1 Naprave in oprema za gašenje začetnega požara

Da se stanovalcem omogoči gašenje začetnega požara, se v pritličju in mansardi vsakega stanovanja skladno s Pravilnikom o izbiri in namestitvi gasilnih aparatov [14] namesti po en **ročni gasilni aparat** na prah tipa 21A, kar pomeni 6 EG (enot gasila). Gasilniki morajo biti nameščeni tako, da je glava ročnega gasilnika z mehanizmom za aktiviranje v višini 80 do 120 cm od tal. Mesta, kjer so nameščeni gasilniki, morajo biti označena v skladu s standardom SIST 1013 (slika 6). Gasilni aparati se morajo preizkušati in vzdrževati v skladu s predpisi, standardi SIST EN 3 za ročne gasilne aparate ter navodili proizvajalca.



Slika 6: Oznaka gasilnika skladno s SIST 1013.

### 2.5.2 Hidrantno omrežje in potrebna količina vode za gašenje

Obravnavan stanovanjski objekt ima manj kot štiri nadstropja, zato vgradnja notranjih hidrantov ni obvezna. Voda za gašenje morebitnih požarov je tako zagotovljena preko zunanjega hidrantnega omrežja. Potrebna količina vode za gašenje posameznega požarnega sektorja za en požar obravnavanega objekta je **10 l/s**. Določena je glede na uvrstitev objekta med večstanovanjske stavbe v naseljih in prostornine največjega požarnega sektorja do 3000 m<sup>2</sup>, skladno s tabelo 19 v TSG. Potrebna količina vode za gašenje požara na obravnavanem objektu mora biti zagotovljena z najmanj enim zunanjim hidrantom, ki zagotavlja poleg redne porabe za pitno in sanitarno vodo še zanesljivo dobavo, potreben pretok in zalogo za gašenje. Hidrant mora biti nadtalen in premera najmanj DN 80. Do hidranta mora biti zagotovljen stalen dostop, njegova lokacija pa mora biti označena s tablicami, izdelanimi po standardu SIST 1007. Razdalja med hidrantom in stavbo ne sme biti manjša od 5 m in ne večja od 80 m. Potreben obratovalni tlak v zunanjem hidrantnem omrežju ne sme biti manjši od 2,5 bar pri zahtevanem pretoku. Pri odvzemu vse potrebne količine vode tlak v vodovodu ne sme pasti pod 1,5 bar.

### 2.5.3 Dostop za gašenje in reševanje

Hitro in uspešno posredovanje gasilske enote je možno, kadar so zagotovljene primerne površine za dovoz in izvajanje reševalnih in gasilnih postopkov. Zagotovljen mora biti dostop gasilcev do najmanj ene strani stavbe ter najmanj ena delovna površina za intervencijo. Za obravnavan objekt je to zagotovljeno na severni strani, kjer se nahajajo tudi glavni vhodi v stanovanja. Dovožne in dostopne poti ter delovne in postavitvene površine morajo biti ustrezno označene, nenehno proste in izvedene skladno z zahtevami standarda SIST DIN 14090. Dovožne poti za gasilska vozila morajo biti utrjene tako, da lahko po njih vozijo gasilska vozila z osno obremenitvijo minimalno 10 ton. Na ravnih delih mora biti dovozna pot široka minimalno 3,0 m ali 3,5 m, če je dostopna pot na dolžini več kot 12 m omejena s stenami, stebri ali drugimi ovirami. Če pot ni ravna, se minimalna širina poti določi po preglednici 3. Na katerikoli točki poti mora biti njena svetla višina najmanj 3,5 m. Maksimalni vzdolžni naklon poti je 10 %, prečni pa 5 %. Prehod z enega na drug nivo mora biti speljan v

vertikalnem radiju, večjem od 15 m. Odmik poti od objekta mora biti med 3 m in 9 m. Postavitvene površine za gasilska vozila morajo glede nosilnosti, naklona in odmika od objekta ustrezati enakim zahtevam kot dovozne poti. Poleg tega mora biti postavitvena površina široka najmanj 3,5 m, na strani stran od objekta pa mora biti ob postavitveni površini 2 m širok pas nenehno proste površine, ki služi za manipulacijo gasilske lestve [10].

Preglednica 3: Širina dovozne poti glede na radij [10].

Radij poti [m]	Širina poti [m]
10,5 - 12,0	5,0
> 12,0 - 15,0	4,5
> 15,0 - 20,0	4,0
> 20,0 - 40,0	3,5
> 40,0 - 70,0	3,2
> 70,0	3,0

#### 2.5.4 Nadzor vpliva požara na okolico

Požar ima ne glede na izvedene požarne ukrepe vedno vpliv na okolico. V okolje se spusti določena količina emisij, kar negativno vpliva na naše bivalno okolje ali pa je s požarom ogroženo sosedovo premoženje. Omejitev nekaterih vplivov požara na okolico lahko dosežemo z naslednjimi ukrepi:

- z ustreznimi odmiki med objekti oziroma od relevantnih mej,
- z ustrezno požarno odpornostjo zunanjih sten in streh,
- z uporabo gradbenih materialov, ki povzročajo čim manjšo obremenitev okolja,
- z zagotovitvijo ustreznega dostopa do stavbe in delovnih površin za gasilna vozila in gasilce ter
- s hlajenjem okolice stavb z vodo.

V obravnavanem objektu ni predvideno odvijanje za okolje nevarnih procesov, zato tudi pri morebitnem požaru ni pričakovati nevarnih **odpadnih vod gašenja**.

#### 2.6 Organizacijski ukrepi

Med preventivne ukrepe varstva pred požarom, ki tako kot ostali ukrepi zmanjšujejo nevarnost za nastanek požara, uvrščamo tudi organizacijske ukrepe. Organizacijske ukrepe mora podrobneje opredeliti požarni načrt, ki pa ga v skladu s Pravilnikom o požarnem redu [15] za obravnavan objekt ni potrebno izdelati.

Na osnovi določil Zakona o varstvu pred požarom [2] velja, da je za varstvo pred požarom odgovoren lastnik ali uporabnik stanovanjskega objekta. V obravnavanem primeru je naloga uporabnika, da pozna delovanje in način uporabe nameščenega ročnega gasilnega aparata za začetno gašenje požara.

### 3 NUMERICNO MODELIRANJE RAZVOJA POŽARA V PRITLIČJU ENOSTANOVANJSKE VRSTNE HIŠE

V tem poglavju je na razmeroma preprosti ravni prikazano modeliranje različnih požarnih scenarijev v pritličju enostanovanjske vrstne hiše z uporabo naprednejšega računalniškega programa. Tak način računalniškega modeliranja požara je med raziskovalci in inženirji prisoten šele relativno kratko časovno obdobje. Glede na to, je bil namen tega dela diplomske naloge pridobiti okvirno sliko o zmožnostih programa, potrebnega predhodnega znanja za njegovo uporabo in ne nazadnje tudi o stopnji zanesljivosti rezultatov. Po predstavitvi kriterijev za izbiro programa sledi opis njegovih splošnih značilnosti. V nadaljevanju so v podobnih odsekih kot se podajajo v program prikazani vhodni podatki računskega modela. Splošneje so opisani tudi opazovani parametri. Rezultati dveh parametričnih študij mreže, ki se razlikujeta v načinu modeliranja požara, so uporabljeni za optimizacijo velikosti mrežne celice. Izbrana delitev mreže je nato uporabljena pri študiji vpliva lokacije izvora požara, temperature vžiga ovire drevesa in vpliva prezračevanja na parametre, ki določajo lastnosti požara.

#### 3.1 Splošne zahteve za izbor računalniškega modela

Uporaba računalniškega modela mora temeljiti na požarnem scenariju. Požarni scenarij predstavlja opis poteka požara od vžiga do polno razvitega požara. Zajema značilnosti objekta, uporabnikov in okolice, kakor tudi vpliv požarnovarnostnih ukrepov in morebitne škode, ki jo lahko požar povzroči. Na splošno mora vsak požarni scenarij zajemati tri pomembne komponente: lastnosti požara, lastnosti objekta in lastnosti uporabnikov v objektu. Med kritičnimi dejavniki, ki vplivajo na nastanek ter širjenje požara in jih določa požarni scenarij, je potrebno posebno pozornost nameniti naslednjim:

- virom vžiga,
- vrsti in količini goriva, ki se bo prvo vžgalo,
- mestu požara,
- vplivu oblike in velikosti prostora na širjenje požara,
- položaju vrat in oken ob požaru,
- vrsti prezračevanja v objektu (naravno, mehansko),
- vrsti konstrukcije (jeklena, armiranobetonska, opečna, lesena),
- obložnim materialom (gorljivi, negorljivi, hitro goreči, počasi goreči, kapljajo ob gorenju) in
- možnostim gašenja (značilnosti uporabnikov objekta).

S požarnim scenarijem uporabnik določi izhodišča za uporabo požarnega modela, s katerim nato načrtuje požarnovarnostne ukrepe oziroma preveri ustreznost izvedenih ukrepov varstva pred požarom v načrtovanem ali obstoječem objektu. Pri tem si lahko pomagata z animacijo razvoja požara [16].



V okviru diplomske naloge smo se želeli seznaniti tudi s trenutnim stanjem na področju modeliranja požara z uporabo matematičnih modelov dinamike tekočin (CFD) in pripadajočih numeričnih modelov z računalniškimi programi. Uporaba računalniških programov na področju požarnega inženirstva, ki temeljijo na modelih CFD, je v znanosti in stroki razširjena šele dobro desetletje. Modeli CFD uporabljajo kompleksne numerične metode za reševanje sistema parcialnih diferencialnih enačb, s katerimi matematično opišemo fizikalne in kemijske pojave v prostoru med požarom. Če želimo natančneje opisati vse fizikalne in kemijske pojave, ki nastopajo med požarom, postane interakcija med njimi kompleksna in zahteva uporabo zelo zmogljivih računalnikov. Po drugi strani pa so eksperimenti o razvoju požarov v naravnem merilu prinesli nova spoznanja o dinamiki požarov in tako dodatno pripomogli k razvoju in razširjenosti CFD modelov na področju modeliranja požarov. Glede na postavljene kriterije smo izbrali programski paket Fire Dynamics Simulator (v nadaljevanju FDS) [17], ki je zasnovan na turbulentnem modelu velikih vrtincev in je po mnenju mnogih trenutno najnaprednejši računalniški program za oceno razvoja požara v prostoru.

### 3.2 Opis programa FDS

Program FDS je bil razvit na National Institute of Standards and Technology (NIST) v ZDA. Prva verzija je bila objavljena februarja leta 2000, kljub temu je program že široko razširjen med strokovnjaki s področja požarne varnosti. Napisan je v programskem jeziku Fortran 90 in brezplačno dostopen na svetovnem spletu [17]. V diplomski nalogi je bila uporabljena verzija FDS 5.5.3, objavljena 29.10.2010. Pred javno objavo je vsaka nova verzija programa obsežno validirana s strani razvijalcev [18]. Poleg tega se preverjanje in potrjevanje programa vse od objave naprej izvaja tudi s strani drugih uporabnikov in raziskovalcev [19].

Računalniški program FDS omogoča simuliranje časovnega in krajevnega razvoja požara v prostoru. Pri tem rešuje osnovne enačbe mehanike tekočin. Za prenos dima in toplote med požarom uporablja hidrodinamični model, kjer rešuje sistem Navier – Stokesovih enačb za toplotne tokove nizkih hitrosti. Kot model izgorevanja snovi program FDS uporablja model mešalnih razmerij. Krajevni delež sproščene toplote pri gorenju snovi se izračuna iz krajevne porabe kisika na površini plamena. Med požarom se oddana toplota poleg konvekcije po prostoru v veliki meri prenaša tudi z radiacijo. Prenos toplote z radiacijo se s programom FDS izračuna s pomočjo enačbe za prenos toplote z radiacijo v idealnem plinu. Ker so ovire in odprtine v modelu obravnavane kot črna telesa, je sevalna jakost odvisna le od valovne dolžine sevanja in temperature. FDS za reševanje osnovnih enačb uporablja t.i. diskretizacijsko metodo končnih razlik. Prostorski odvodi so poenostavljeni s sredinsko shemo drugega reda, časovni odvodi pa po eksplicitni shemi prediktor - korektor. Za reševanje enačb prenosa toplote z radiacijo se uporablja t.i. metoda končnih volumnov. Tako program FDS obravnavan prostor razdeli na veliko število prostorskih elementov ter rešuje osnovne enačbe v vsakem izmed teh

elementov posebej. Slabost take metode je omejenost geometrije le na pravokotne oblike, prednost pa računsko učinkovitost [20].

S pomočjo programa FDS se lahko napove gibanje dima, prenos toplote, širjenje plamenov, razvoj temperature, ogljikovega dioksida in drugih snovi v požarnem prostoru. Omogočena sta tudi izračun napovedi odkrivanja požara s toplotnim javljalnikom in možnost gašenja požara s pomočjo šprinklerjev ali vodne megle. Prav tako se lahko FDS uporablja za analizo evakuacije ljudi in modeliranje situacij, ki sicer ne vključujejo pojavov povezanih s požarom, so pa prav tako pomembna za kvalitetno bivanje ljudi, kot je to na primer prezračevanje v stavbah. Rezultati simulacij, dobljeni s programom FDS, se lahko uporabljajo za projektiranje požarno varnih objektov, oceno varnosti obstoječih stavb, rekonstrukcijo požarov pri preiskavi po nesrečah in za pomoč pri usposabljanju gasilskih enot.

FDS ni značilen človeku prijazen program, saj se med uporabo srečamo z različnimi problemi, ki so lahko povezani s samim programom ali uporabljenim računalnikom. Pri uporabi programa FDS gre za analizo, ki uporablja računalniški procesor in spomin na robu njunih zmogljivosti. Pri tem pa ni predpisanih mej, ki bi uporabnika že pred začetkom simulacije opozorile, da je le-ta prezahtevna za razpoložljivo strojno opremo. Za učinkovito delovanje programa FDS se zahteva hiter procesor in veliko količino RAM pomnilnika. Minimalne priporočljive zahteve za ustrezen računalniški sistem so: 1 GHz procesor in najmanj 512 MB RAM. Hitrost procesorja določa kako dolgo traja izračun, količina RAM pa koliko mrežnih celic se lahko hrani v pomnilniku. Za shranjevanje rezultatov izračunov je potreben dovolj velik trdi disk, saj lahko en izračun porabi tudi 1 GB in več prostora. Tudi spremljevalni program Smokeview potrebuje za učinkovito delovanje najmanj 512 MB pomnilnika RAM in hitro grafično kartico za prikazovanje rezultatov [20]. Na začetku simulacije je praktično nemogoče napovedati kako dolgo bo trajal izračun in koliko spomina bo potreboval. Oceno zmogljivosti uporabljenega računalnika si ustvarjamo tekom uporabo FDS, tako da začnemo s preprostimi simulacijami in nato postopoma dvigujemo raven njihove zahtevnosti.

Program FDS bere vhodne parametre iz tekstovne datoteke, izračuna številčne rešitve enačb in uporabniško določene izhodne podatke izpiše v obliki datotek. Smokeview (SMV 5.6) je spremljevalni menijski program, ki bere FDS izhodne datoteke in omogoča grafično prikazovanje rezultatov simulacij. Uporaba programa FDS se lahko znatno poenostavi z uporabo grafičnega uporabniškega vmesnika PyroSim, ki združuje grafično 3D modeliranje s programom FDS. S programom PyroSim se hitro in enostavno ustvarijo veliki, kompleksni, napredni požarni modeli v relativno kratkem času. Raznovrstna grafična orodja, kot so premikanje, kopiranje, povečevanje, vrtenje in repliciranje ponavljajočih se objektov, ki jih je možno povezati v skupine, omogočajo hitro oblikovanje in urejanje 2D in 3D geometrije. PyroSim omogoča organiziran vnos vhodnih podatkov, kar bistveno zmanjša

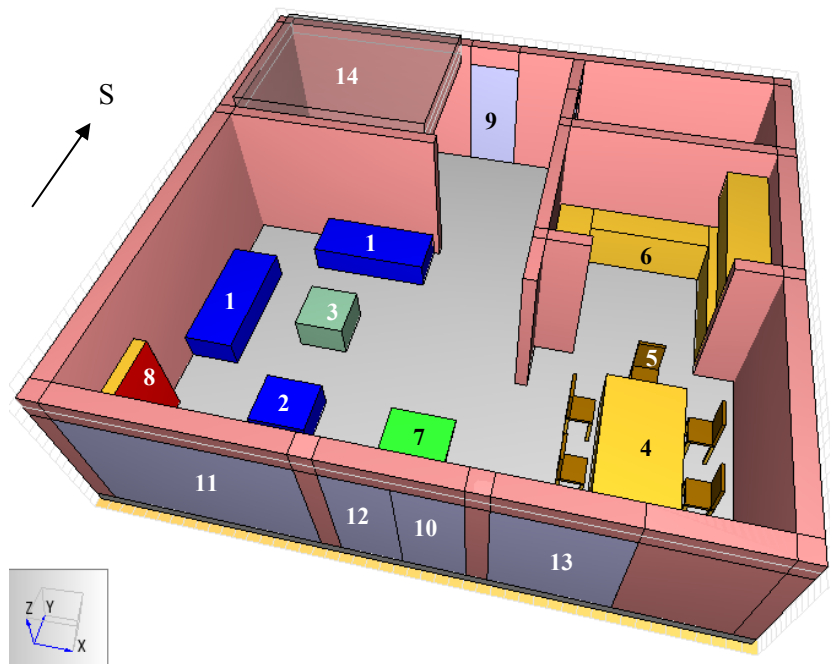
možnost napake. Poleg tega samodejno generira vse FDS vhodne zapise, zato uporabniku ni potrebno poznati FDS vhodnih sintaks in pisati na stotine ali tisoče vrstic teksta. PyroSim samodejno generira tudi zelene izhodne datoteke, ki služijo za obdelavo in prikaz rezultatov [21].

### 3.3 Opis računskega modela pritličja enostanovanjske vrstne hiše

Pri simuliranju požarnih scenarijev s programom FDS je priporočljivo računski model čim bolj poenostaviti. Z upoštevanjem zgolj glavnih vplivnih parametrov stremimo k zadovoljivo natančnim rezultatom in hkrati sprejemljivemu računskemu času. V okviru diplomske naloge smo se odločili, da bomo v programu FDS simulirali požarne scenarije v pritličju ene vrstne hiše, s poudarkom na širjenju ognja in dima v dnevnem prostoru, jedilnici in kuhinji. Iz modela smo izpustili kurilnico, garderobo, vetrolov in kabinet. Na sliki 7 je prikazan računski model, ki je po geometriji enak v vseh simulacijah. Odprtine in elementi pohištva so označeni s številkami, njihovo poimenovanje pa je prikazano v legendi.

Legenda:

1 zofa za tri osebe	6 kuhinja	11 levo okno
2 enosedelna zofa	7 (božično) drevo	12 sredinsko okno
3 klubska mizica	8 omara	13 desno okno
4 jedilna miza	9 severna vrata	14 odprtina v stropni plošči
5 stol	10 južna vrata	



Slika 7: Računski model z oznakami odprtin in elementov (ovir).

Vhodna datoteka za FDS mora vsebovati podatke o geometriji objekta, velikosti računske celice, lokaciji vira vžiga, energiji, ki jo sprosti vir vžiga, kemijski reakciji, toplotnih lastnostih in dimenzijah sten, tal, stropov, pohištva in odprtih, ki vplivajo na rast in širjenje požara. V naslednjih podpoglavjih so opisani bistveni principi in vhodni parametri, ki smo jih uporabili pri kreiranju vhodne datoteke in so v vseh simulacijah enaki.

### 3.3.1 Mreža ("Meshes")

V programu je s pomočjo globalne mreže določeno računsko območje požarnega prostora s prostornino 10,6 m x 10,0 m x 3,6 m. Ta je nato v smereh x, y, z razdeljen na poljubno število majhnih tridimenzionalnih pravokotnih celic. Program v vsaki celici izračuna gostoto, hitrost, temperaturo, tlak in koncentracije različnih vrst plinov v izbranih časovnih korakih. Vrednosti omenjenih količin so znotraj posamezne celice konstantne. Izhodišče koordinatnega sistema se nahaja na nivoju pritličja, na zunanji strani stičišča južne in zahodne stene. Koordinatni osi x in y sta usmerjeni v notranjost prostora, koordinatna os z pa je usmerjena proti mansardi. Meje računskega območja so nekoliko večje od same geometrije prostora in so odprte v vseh smereh, razen v negativni smeri koordinatne osi z. S tem je preprečeno kopičenje izsevane toplote in dima okrog modela. Količina izsevane toplote se zaradi napredovanja požara s časom povečuje. Posledično se proizvaja vedno večja količina dima, ki omogoča sevanje vedno večje količine toplote na obdajajoče ovire in obratno, kar lahko privede do nepravilnih napovedi [22]. Vpliv gostote mreže na opazovane parametre je predstavljeno v nadaljevanju diplomske naloge (glej 3.5).

### 3.3.2 Reakcija ("Reactions")

Pri gorenju atomi goriva (ogljik, vodik, ostali elementi) reagirajo s kisikom. Če je kisika dovolj (dobro prezračevanje) in gorenje poteka pri visokih temperaturah, pride do popolnega sežiga gorljivih snovi. To pomeni, da se ves ogljik v gorljivih snoveh spremeni v ogljikov dioksid, vodik v vodno paro, ostali elementi pa v okside. V večini primerov pri gorenju ne pride do popolnega sežiga. Pri nepopolnem sežigu nastajajo tudi vmesni produkti kot sta ogljikov oksid in saje, ki zaradi pomanjkanja kisika ali prenizke temperature ne reagirajo s kisikom. Z razvojem požara temperatura običajno raste, zato se večina teh produktov, ki so pogosto toksični, razkroji [10].

V programu je možno predpisati eno globalno kemijsko reakcijo v plinski fazi, ki nadzoruje potek gorenja. Podati je potrebno sestavo goriva in produktov gorenja v obliki razmerja števila atomov kemijskih elementov oziroma spojin ter zgorevalno toploto. Podana kemijska reakcija za požar v »tipičnem« stanovanju je pridobljena iz eksperimentalno podprtih raziskav [23]. Razmerje atomov goriva sestavlja 1,0 atom ogljika, 1,8 vodikovih atomov, 0,3 kisikovega atoma in 0,05 dušikovega

atoma. Pri gorenju nastane 0,004 ogljikovega oksida in 0,015 masnega deleža sajastih delcev v ostankih. Predpisana toplota, potrebna za zgorevanje uplinjenega goriva je  $\Delta H_c = 17000$  kJ/kg.

### 3.3.3 Materiali ("Materials")

Določitev materialnih lastnosti gorljivega materiala v požarnem prostoru je ena izmed najzahtevnejših nalog pri ustvarjanju FDS računskega modela, saj imajo le-te pomemben vpliv na rezultate [24]. Materialne lastnosti za opeko, beton, les in peno smo privzeli iz FDS knjižnice. Za ostale materiale (steklo, celuloza in plastika) smo jih pridobili iz [25]. V preglednici 4 so prikazane materialne lastnosti materialov, ki smo jih uporabljali v analizah. Lastnosti homogenega gorljivega materiala "kuhinja" smo podobno kot v [26] določili s kombinacijo lastnosti lesa in plastike.

Preglednica 4: Lastnosti v računskem modelu uporabljenih materialov.

Material	Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]	Specifična toplota [kJ/kg K]	Prevodnost [W/m K]
Beton ("Concrete")	2280	1,04	1,8
Opeka ("Fire Brick")	750	1,04	Preglednica 5a
Pena ("Foam")	28	1,7	0,05
Les ("Yellow Pine")	640	2,85	0,14
Steklo	2500	0,984	0,81
Celuloza	400	2,3	Preglednica 5b
Plastika	1500	1,5	0,2
Kuhinja	900	2	0,2

Preglednica 5: (a) Toplotna prevodnost opeke v odvisnosti od temperature.

(b) Toplotna prevodnost celuloze v odvisnosti od temperature.

(a) opeka

Temperatura [°C]	Prevodnost [W/m K]
20	0.36
200	0.36
300	0.38
600	0.45

(b) celuloza

Temperatura [°C]	Prevodnost [W/m K]
20	0,15
500	0,29

### 3.3.4 Površine ("Surfaces") in "Vent"

Površine se na podlagi predhodno definiranih materialov uporabljajo za opredelitev lastnosti ovir in elementov "vent". Ti se uporabljajo za opis ravninskih predmetov, simulacijo dovoda svežega zraka v prostor ali odvoda dima iz prostora. Primerni so tudi, kadar želi uporabnik neki mejni površini pripisati določene značilnosti. Na primer zelene lastnosti požara se lahko opredelijo z elementom "vent", ki se ga postavi na neko mejno površino (mrežo ali trden predmet) [22].

### 3.3.5 Modeliranje geometrije – ovire ("Obstructions")

Ovire so temelj geometrijskega prikaza modela. V programu FDS so definirane s tremi pari točk in predstavljajo pravokotne trde površine v 3D prostoru. Vsaki oviri so predpisane lastnosti površine. Pri oblikovanju modela ni nujno, vendar je priporočljivo, da se geometrija ovire ujema z geometrijo numerične mreže. V primeru, da se geometriji ne ujemata, FDS posamezno ploskev ovire prilagodi najbližji mrežni celici. Tako lahko ovire postanejo debelejšje ali tanjše. Dimenzije celic naj bi bile izbrane tako natančno, da se razumno predstavi geometrija ovir v modelu [22].

S pomočjo ovir smo modelirali obodne in predelne stene, temeljno in stropno ploščo, odprtine ter pohištvo. Na mestu stopnišča smo v stropno ploščo vstavili luknjo. Pohištvo v dnevnem prostoru predstavljajo enosedežna zofa, dve zofi za tri osebe, klubska mizica in omara za knjige. Pohištvo v jedilnici predstavlja miza s šestimi stoli ter kuhinjska oprema (slika 7). V vseh primerih smo nekaterim oviram na južnem delu stavbe, ki predstavljajo zastekljene površine, predpisali, da se odstranijo, ko merilnik temperature v steni doseže 300 °C. To sledi iz ocene, da steklo počí, ko se segreje na približno 300 °C. Ostale ovire, katerim ni predpisana omenjena funkcija, pa se iz modela odstranijo pri točno določenem času.

### 3.3.6 Modeliranje požara

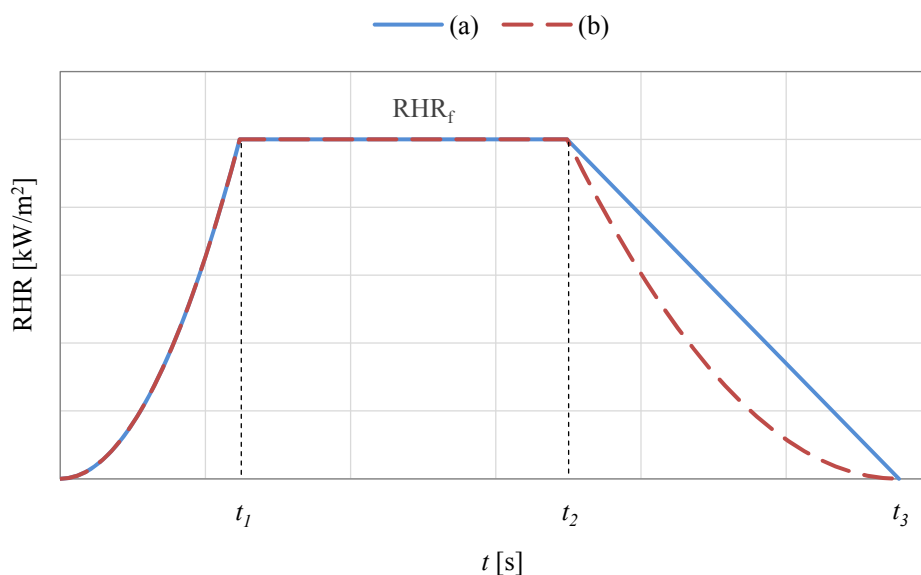
Pri načrtovanju požarnega scenarija je treba opredeliti vir požara in količino toplote, ki se sprošča med razvojem požara. Obstaja več pristopov za modeliranje vžiga elementov, ki narekujejo razvoj požara v požarnem prostoru. Teoretično je najbolj realističen pristop z uporabo piroliznega modela, ki je vgrajen tudi v program FDS. Z njim se količino piroliznih plinov določi na podlagi oddane toplote med požarom. Izkazalo se je, da so FDS simulacije izredno občutljive na večje število gorljivih elementov v požarnem scenariju ter na veliko število različnih parametrov (npr. materialne lastnosti), ki opisujejo kompleksne mehanizme širjenja plamenov. Dodatna slabost piroliznega modela je tudi v tem, da je za natančen izračun potrebno eksperimentalno pridobiti materialne parametre za opis gorenja vseh materialov, ki nastopajo v simulaciji, kar je v večini primerov neizvedljivo. Zato se za

modeliranje požara nemalokrat uporabi preprostejši pristop, kjer je v celoti predpisan potek hitrosti sproščanja toplote (ang. heat release rate, v nadaljevanju HRR) posameznega elementa v prostoru v kombinaciji s pripadajočimi časi vžiga na podlagi temperature vžiga ali kritičnega toplotnega toka. V [23] je ocenjeno, da je ta pristop dovolj natančen. Še manj parametrov zahteva modeliranje požara, kjer se HRR celotnega požarnega prostora predpiše manjši površini znotraj prostora, tor je elementu "vent". Bistvo tega pristopa je v naraščanju požara, ki vodi do požarnega preskoka, kjer je velikost požara omejena z ventilacijskimi pogoji in ne s predpisano vrednostjo HRR. FDS upošteva hitrost sproščanja toplote kot vbrizgavanje zgorevalnih plinov, ki bi ob popolnem zgorevanju proizvedli predpisani HRR. Možen je tudi pristop modeliranja požara z delno predpisanim potekom HRR, kot je opisano v [23]. Pri tem pristopu se predpiše potek HRR na primer dvema elementoma, ki povzročita požarni preskok, ostalim elementom, za katere je to možno, pa se predpiše potek gorenja po piroliznem mehanizmu, kjer se poda zgorevalno toploto in toploto izparevanja. Ta pristop dovoljuje povezovanje sproščene toplote v požaru z nastajanjem goriva v času po nastanku požarnega preskoka. Potrebno je opozoriti, da ta pristop velja le kot približek v fazi polno razvitega požara.

V diplomski nalogi smo se osredotočili na dva pristopa modeliranja požara. Prvi pristop bomo v nadaljevanju diplomske naloge imenovali požar modeliran z enim elementom "vent", saj smo celoten požar skoncentrirali na eno površino ("vent") znotraj prostora. Drugi pristop smo poimenovali modeliranje požara z več elementi "vent", kjer smo predpostavili, da znotraj objekta nastopa šest različnih tipov goriva v obliki najpomembnejših elementov (zofa, miza, omara, drevo, stol, kuhinja), ki so modelirani z "vent". Sproščena toplota posameznega "vent" je bila vnesena v model kot produkt ustrezne hitrosti sproščanja toplote na enoto površine (HRRPUA) enega izmed goriv in skupne izpostavljene površine elementa ( $A$ ). Za vsak tip gorljive snovi je predvidena drugačna hitrost sproščanja toplote, ki bo nastajala ob gorenju. Hitrosti sproščanja toplote, ki smo jih gorljivim elementom predpisali v tej nalogi, so izračunane na dva načina:

(a) Idealizirano projektno sproščanje toplote, povzeto po [27], je prikazano na sliki 8 in se lahko opiše z naslednjimi parametri:

- $RHR_f$  [kW/m<sup>2</sup>] - maksimalna hitrost sproščanja toplote na enoto površine 1 m<sup>2</sup>,
- $t_a$  [s] - čas za doseg 1 MW, nadzoruje fazo naraščanja požara, požar  $t^2$ ,
- $q_{f,d}$  [MJ/m<sup>2</sup>] - maksimalna gostota požarne obtežbe na enoto površine in
- $A_{fi}$  [m<sup>2</sup>] - maksimalna površina požara, ki je lahko celoten požarni sektor v primeru enakomerno porazdeljene požarne obtežbe ali manjša površina v primeru lokaliziranega požara.



Slika 8: Idealiziran časovni potek sproščanja toplote.

Parametre  $RHR_f$ ,  $t_a$  in  $q_{f,d}$  in predpisuje [27] glede na rabo stavbe. Maksimalno površino požara  $A_{fi}$  definira uporabnik sam. Potem so lahko časi  $t_1$ ,  $t_2$  in  $t_3$ , izračunani s pomočjo naslednjih enačb [28]:

$$q_{f,d} = \int_0^{\infty} RHR_f dt, \quad (1)$$

$$t_1 = t_a \cdot \sqrt{\frac{RHR_f \cdot A_{fi}}{1\text{MW}}}, \quad (2)$$

$$q_1 = \int_0^{t_1} \left( \frac{1\text{MW}}{A_{fi}} \right) \cdot \left( \frac{t}{t_a} \right)^2 dt = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{1\text{MW}}{A_{fi}} \right) \cdot \frac{t_1^3}{t_a^2}, \quad (3)$$

$$q_2 = RHR_f \cdot (t_2 - t_1) = q_{f,k} - q_1 - q_3 \Rightarrow t_2 = t_1 + \frac{(q_{f,d} - q_1 - 0,3 \cdot q_{f,d})}{RHR_f} \text{ in} \quad (4)$$

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot 0,3 \cdot q_{f,d}}{RHR_f}. \quad (5)$$

Omenimo, da je vodoravni plato ( $RHR_f$ ) omejen z linearno fazo pojemanja, ki se začne, ko dogori 70 % celotne požarne obtežbe (enačba 4).



Podatke o poteku HRR za omaro in božično drevo smo pridobili iz [29], kjer so na podlagi eksperimentalnih rezultatov gorenja različnih elementov podani ključni parametri za opis projektnih požarov. Oblika hitrosti sproščanja toplote je enaka kot v [27] in se lahko opiše tudi z enačbo:

$$Q(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2, & 0 \leq t < t_1 \\ Q_{\max}, & t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{(t_3 - t)^2}{t_{ad}^2}, & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases}, \quad (6)$$

kjer je  $t_\alpha$  [s] stopnja rasti požara,  $t_{ad}$  [s] stopnja pojemanja požara,  $t$  [s] čas od začetka požara,  $t_1$  [s] čas rasti požara do maksimalnega nivoja,  $t_2$  [s] čas ob koncu faze razvitega požara,  $t_3$  [s] čas ob koncu gorenja in  $Q_{\max}$  [kW] maksimalna hitrost sproščanja toplote, ki se izračuna po enačbi

$$Q_{\max} = RHR_f \cdot A_{fi}. \quad (7)$$

Stopnja rasti požara se izračuna z

$$t_\alpha^2 = \frac{t_1^2}{Q_{\max}}, \quad (8)$$

stopnja pojemanja požara pa z enačbo

$$t_{ad}^2 = \frac{(t_3 - t_2)^2}{Q_{\max}}. \quad (9)$$

(b) Druga oblika časovnega poteka HRR, ki smo ga predpisali nekaterim elementom pohištva, smo povzeli po [30], kjer je predstavljena metoda za oceno poteka HRR za različne gorljive snovi. Metoda je bila izdelana na podlagi dostopnih eksperimentalnih podatkov, dobljenih iz preizkusov v kontroliranih pogojih v laboratorijih. Ocenjene HRR krivulje za opisane elemente so razdeljene na tri faze: začetna rast požara, faza razvitega požara in pojemanje požara. Pri HRR krivuljah, pridobljenih na podlagi eksperimentov, je razvidna tudi faza pred naraščanjem požara, ki pa se v računskem postopku zanemari. Predlagan potek HRR v [30] se od [27] (točka a) razlikuje le v obliki krivulje, s katero se ponazori faza pojemanja požara (slika 8). Potek HRR se opiše z enačbo 10:

$$Q(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2, & 0 \leq t < t_1 \\ Q_{\max}, & t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{(t_3 - t)^2}{t_{ad}^2}, & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (10)$$

kjer je pomen oznak enak kot v enačbi 6. Maksimalna hitrost sproščanja toplote  $Q_{\max}$  [kW] in stopnja rasti požara  $t_\alpha$  [s] se izračunata po enačbah 7 oziroma 8, stopnja pojevanja požara pa se izrazi z enačbo

$$t_{ad}^2 = \frac{(t_3 - t_2)^2}{Q_{\max}}. \quad (11)$$

### 3.3.7 Merilniki ("Devices")

Spremljanje želenih parametrov v programu FDS je omogočeno s pomočjo uporabe merilnikov. V računskem modelu smo definirali večje število različnih merilnikov. V diplomski nalogi zaradi preglednosti prikazujemo rezultate tistih merilnikov, ki najbolj izstopajo. Osredotočili smo se na preučevanje rezultatov točkovnih merilnikov, ki napovedujejo izbrani parameter znotraj ene celice mreže v odvisnosti od časa. Izhodne številke podatke točkovnih merilnikov je mogoče tudi preprosto obdelati in grafično prikazati. V preglednicah 6, 7 in 8 so prikazane oznake in koordinate merilnikov opazovanih parametrov: ogljikovega oksida, vidnosti skozi dim in temperature, katerih rezultati bodo predstavljeni v nadaljevanju. Poleg teh parametrov prikazujemo tudi skupni časovni potek HRR, ki se ne pridobi z uporabo točkovnega merilnika, temveč ga FDS napove privzeto in prav tako izpiše v obliki številskih podatkov. Opazovani parametri niso izbrani naključno, saj je njihova uporaba za prikaz lastnosti požara v računskih simulacijah v literaturi splošno razširjena [31].

Preglednica 6: Merilniki ogljikovega oksida.

Oznaka	x [m]	y [m]	z [m]
CO_3	1,3	3,6	0,7
CO_302	1,3	3,6	1,5
CO_303	1,3	3,6	2,3
CO_4	7,7	2,0	1,5

Preglednica 7: Merilniki vidnosti.

Oznaka	x [m]	y [m]	z [m]
V_3	4,8	5,8	0,4
V_302	4,8	5,8	0,9
V_303	4,8	5,8	1,4
V_304	4,8	5,8	1,9
V_305	4,8	5,8	2,4

Preglednica 8: Merilniki temperature.

Oznaka	x [m]	y [m]	z [m]
Ts_1	5,0	2,0	0,5
Ts_5	5,0	2,0	2,4
Tk_4	7,0	5,2	2,0
Tk_5	7,0	5,2	2,4
Td_1	1,3	2,0	0,5
Td_3	1,3	2,0	1,5
Td_4	1,3	2,0	2,0
Td_5	1,3	2,0	2,4
Th_1	5,0	7,0	0,5
Th_2	5,0	7,0	1,0
Th_3	5,0	7,0	1,5
Th_4	5,0	7,0	2,0
Th_5	5,0	7,0	2,4

Omenimo, da smo čas simulacije omejili na 1200 s (20 min). V tem času se zgodijo ključne spremembe v procesu gorenja. V nekaterih primerih po 20 minutah požar še ni povsem zaključen, vendar je že globoko v fazi pojemanja, ko nima več opaznejšega vpliva na razmere v prostoru.

### 3.4 Opis opazovanih parametrov

#### 3.4.1 Hitrost sproščanja toplote

Kot glavni izhodni podatek smo po zgledu [23] privzeli časovni potek HRR. Izbira temelji na dejstvu, da je HRR ena izmed pomembnejših spremenljivk v požaru [32], ki opiše intenzivnost požara oziroma prikaže količino toplote, ki se sprosti v časovni enoti. V literaturi je večkrat izpostavljeno, da na podlagi dosedanjih izkušenj velja, da so ob pravilno predpisanem poteku HRR tudi simulirani časovni poteki temperature in koncentracije sproščenih plinov v požarnem sektorju dobri približki realnosti. Kljub temu se je potrebno zavedati, da napovedani skupni HRR predstavlja globalni potek, zato lahko prikrije lokalni razvoj požara, predvsem v prostorih večjih dimenzij [23].

#### 3.4.2 Izpostavljenost ognju [33]

Za mejo vzdržljivosti pri izpostavljenosti kože sevalni toploti je bila predlagana izpostavljenost, ki povzroči hude bolečine nezaščitene kože. Ta se pojavi nad pragom toplotnega toka  $2,5 \text{ kW/m}^2$ . Pod tem pragom je izpostavljenost mogoče vzdržati nekaj minut, pri večjih toplotnih tokovih pa se čas vzdržljivosti hitro zmanjša na nekaj sekund. Močne bolečine se pojavijo, kadar je doza

izpostavljenosti sevalni toploti približno  $(80 \text{ do } 100 \text{ kW/m}^2)^{4/3}$  s. Predpostavlja se, da bo uporabnik močno prizadet pri izpostavljenosti takim razmeram.

Iz podatkov o toplotni vzdržljivosti nezaščitene kože ljudi se sklepa, da je mejna vrednost za konvekcijsko toploto približno pri temperaturi 120 °C. Nad to mejo se hitro pojavi precejšnja bolečina z nastankom opeklin v nekaj minutah. V odvisnosti od dolžine izpostavljenosti, lahko konvekcijska toplota pod to temperaturo še vedno povzroči nesposobnost gibanja zaradi dviga telesne temperature. Na splošno so krajša obdobja izpostavljenosti velikemu sevalnemu toku ali temperaturi bolj uničujoča kot daljša izpostavljenost manjšemu toku ali temperaturi.

Opekline dihalnih poti zaradi vročega zraka, ki vsebuje manj kot 10 vol % vodnih hlapov, se ne pojavi, če ni tudi opeklin kože na obrazu. Zato so meje vzdržljivosti za bolečine in opekline kože po navadi nižje kot za opekline dihalnih poti. Opekline dihalnih poti se lahko pojavijo zaradi vdihavanja zraka s temperaturo nad samo 60 °C, če je nasičen z vodnimi hlapi, kar se lahko pojavi, kadar se za gašenje požara uporabi voda.

### **3.4.3 Vpliv toplote na gradbene konstrukcije [16]**

V fazi začetnega požara se toplota, ki nastaja pri gorenju akumulira v prostoru. Predmeti se segrevajo in nekateri gorljivi predmeti se lahko segrejejo tudi do temperature vžiga. Temperatura plinov v prostoru hitro narašča in pripelje do požarnega preskoka, če seveda požar ni prej pogašen ali omejen. S požarnim preskokom pride požar v fazo polno razvitega požara. Pri tem je temperatura vročih plinov okoli 600 °C, količina izsevane toplote se poveča, kar povzroči vžig ostalih gorljivih snovi v prostoru. V fazi pred požarnim preskokom je temperatura v prostoru relativno nizka in njen vpliv na požarno varnost gradbenih elementov s tem zanemarljiv. Za gradbene in stavbne elemente predstavlja glavno tveganje polno razvit požar. Temperatura v prostoru lahko v tej fazi preseže 1000 °C. Tekom požara se nastala toplota izgublja na stenah in predmetih v prostoru, s segrevanjem zračnih mas, s toplotnim sevanjem ter konvekcijo skozi okna in vrata.

### **3.4.4 Dim**

Dim predstavlja disperzijo trdnih in tekočih delcev v nosilnem plinu, ki ga sestavljajo plinski produkti gorenja in zrak. Tekoči delci so katranu podobne kapljice ali meglica, ki jo sestavljajo tekoči produkti pirolize ali delno oksidirani produkti in voda. Trde delce predstavljajo predvsem različne oblike elementarnega ogljika.

Dim se v stavbah lahko razširi pod vplivom tlačnih razlik, ki so lahko posledica vzgona, nastanka nadtlakov ali temperaturnih razlik med vročim dimom in okolico zaradi sproščene požarne toplote. Nevaren je zaradi zmanjševanja vidljivosti in zaradi strupenih plinov, ki so del suspenzije dima v zraku. Zmanjšanje vidljivosti pri dovolj visoki gostoti dima lahko prepreči varen izhod iz objekta. Če ljudje objekt poznajo, je priporočena vidljivost v objektu v času požara od 3 do 5 metrov [34]. Dim pod mejo 1,80 m dodatno ogroža ljudi, saj preprečuje orientacijo.

### 3.4.5 Strupeni plini

Pojem strupeni požarni plini povezujemo z mešanico dražil in dušljivcev. Učinki dražil so odvisni od koncentracij v požarnih plinih in moči vsake vrste dražeče snovi. Pri majhnih koncentracijah vplivajo na učinkovitost umika in hitrost gibanja zaradi bolečih in škodljivih učinkov na oči ter bolečin in težav pri dihanju zaradi učinkov na nos, usta, grlo in pljuča. Pri visokih koncentracijah lahko povzročijo onesposobitev. Ker so koncentracije različnih dražil odvisne od sestave goriva in razmer pri gorenju ter jih je v inženirskih izračunih težko napovedati, je priporočljivo predpostaviti, da je dim iz požarov tipične požarne obtežbe stavbe zmerno dražeč. Dražila v produktih gorenja so lahko različne organske spojine, na primer akrolein in formaldehid, ter kisli plini, kot na primer klorovodik ali dušikovi oksidi.

Značilnost dušičnih plinov je, da takoj le malo ali sploh ne vplivajo na izpostavljene ljudi. Če pa ljudje med požarom dobijo dovolj veliko dozo, se pojavi zmedenost, ki ji hitro sledi onesposobitev zaradi kolapsa in izgube zavesti. Dušični plini, ki so pomembni za onesposobitev in smrt v požaru, so ogljikov oksid, cianovodik, ogljikov dioksid in majhna vsebnost kisika (pod 16 vol %) [33].

Ogljikov oksid, imenovan tudi ogljikov monoksid s kemijsko formulo CO je brezbarven, zelo toksičen plin brez vonja in okusa. Nastaja ob nepopolnem izgorevanju trdih, tekočih in plinastih snovi, ki vsebujejo ogljik. Plin se absorbira v kri in preprečuje transport kisika do tkiv. Koncentracija ogljikovega oksida (v nadaljevanju CO) se pogosto izraža z enoto ppm, ki je okrajšava za "part per million", kar pomeni delec plina na milijon delov zraka. Kritična vrednost za ljudi je pri daljši in konstantni izpostavljenosti že 30 ppm. V požaru se lahko kritična meja koncentracije CO za ljudi privzame 1400 ppm [35]. V tej nalogi nismo posvečali večje pozornosti vplivu koncentracije CO na človeka. Bistveni namen prikaza časovnega poteka koncentracije CO v zraku je preučevanje vpliva gostote numerične mreže in lokacije vira vžiga na rezultate.

### 3.5 Parametrična študija mreže

V nadaljevanju je na primerih P1 in P5 prikazan vpliv gostote numerične mreže na rezultate simulacij v programu FDS, saj je znano, da ima lahko gostota mreže velik vpliv na rezultate numeričnih

simulacij. Velikost celice računske mreže vpliva na zanesljivost simulacije, minimalno velikost predmetov, ki so lahko vključeni v požarni model in na čas potreben za izračun. Obratno so od velikosti mreže odvisni na primer sevanje, lokacija plamena in geometrija. Pričakuje se, da z zgoščevanjem mreže rezultati konvergirajo k določeni vrednosti [36]. Kriteriji za primerjavo rezultatov različnih mrež so časovni poteki HRR ter temperature, CO in vidnosti v izbranih točkah znotraj modela. Na podlagi rezultatov parametričnih študij za različna požarna scenarija (P1 in P5) je bila izbrana optimalna velikost celice mreže, ki je bila nato uporabljena v nadaljevanju.

### 3.5.1 Primer P1

V primeru P1 je požar modeliran z enim elementom "vent", velikosti  $0,5 \text{ m}^2$ , ki se nahaja na kuhinjskem pultu na višini  $0,9 \text{ m}$  od tal (slika 21a). Elementu "vent" so predpisane lastnosti požara, za katerega je značilno sproščanje toplote po načinu (a) (glej 3.3.6). Upoštevali smo, da je hitrost razvoja požara hitra  $t_a = 150 \text{ s}$ , gostota požarne obtežbe  $q_{f,d} = 200 \text{ MJ/m}^2$  in največja hitrost sproščanja toplote na  $1 \text{ m}^2$  požara v gorivno nadzorovanih pogojih  $RHR_f = 250 \text{ kW/m}^2$  na območju požara  $A_f = 12 \text{ m}^2$ . Pri tem smo predpostavili, da se požar ne razširi po celotnem požarnem sektorju, vendar se omeji na manjše območje in ga obravnavamo kot lokaliziran požar. Vse modelirane ovire v prostoru so negorljive. Odprtine v modelu so sprva zaprte, razen odprtine v stropni plošči. Po  $60 \text{ s}$  se odprejo severna, po  $120 \text{ s}$  simulacije pa še južna vrata. Ovire, ki predstavljajo ostale odprtine, se iz modela odstranijo, če je dosežena temperatura  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

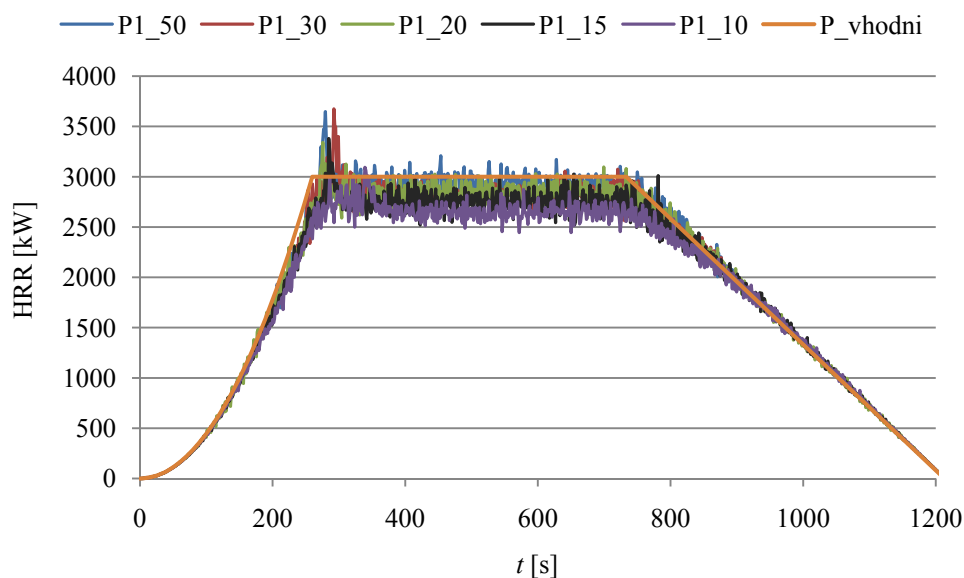
V preglednici 9 so prikazane oznake primerov, ki se med seboj razlikujejo le v dimenzijah mrežnih celic in številu celic, ki tvorijo celotno mrežo. V nadaljevanju je prikazan vpliv gostote numerične mreže na HRR, temperaturo, koncentracije CO in vidnost.

Preglednica 9: Podatki o velikosti mrežne celice v primerih P1.

Oznaka	Dimenzije celice [m]	Skupno število celic
P1_50	0,51 x 0,49 x 0,52	2052
P1_30	0,30 x 0,30 x 0,31	9600
P1_20	0,20 x 0,20 x 0,20	31680
P1_15	0,15 x 0,15 x 0,15	80535
P1_10	0,10 x 0,10 x 0,10	267623

## Vpliv mreže na hitrost sproščanja toplote

Krivulje na sliki 9 (P1\_50 do P1\_10) prikazujejo izračunan časovni potek parametra HRR pri različno gostih mrežah. Dodan je tudi graf hitrosti sproščanja toplote, ki je bil podan kot vhodni podatek (P\_vhodni).

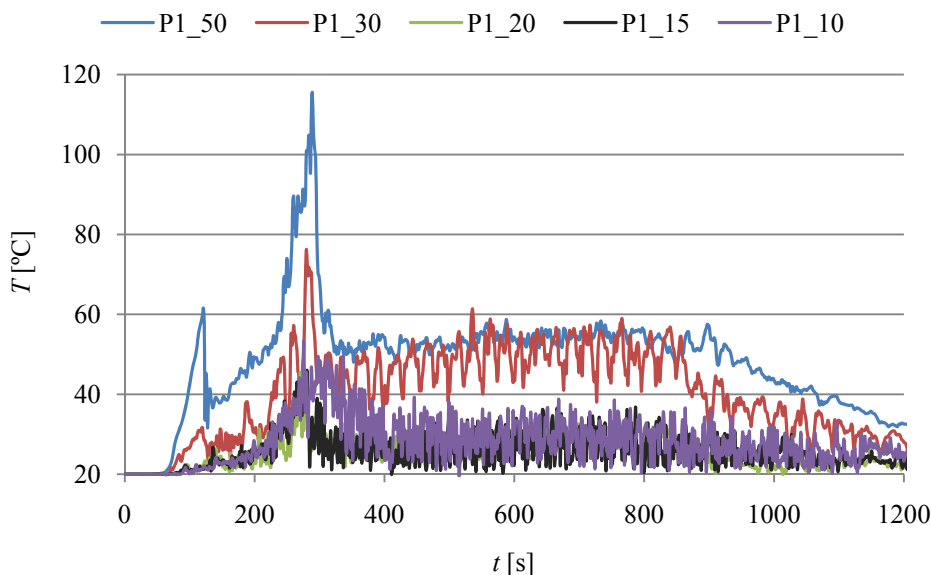


Slika 9: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote v primeru P1.

Iz slike 9 je razviden trend padanja izračunanih vrednosti HRR z zmanjševanjem dimenzij računске celice. S primerjavo krivulje P\_vhodni z izračunanimi krivuljami pri različno gostih mrežah je opaziti oblikovno in časovno ujemanje požarnih faz. V fazi naraščanja požara se lepo vidi kvadratna oblika krivulj, ki se med seboj prekrivajo, torej med njimi ni bistvenih odstopanj. V fazi pojemanja požara opazimo, da gostota mreže vpliva na HRR le v prvi tretjini, približno od 780 s do 900 s. Kasneje vpliva ni zaznati, saj imajo krivulje enak potek. Pri predpisani požarni obtežbi pride v primeru P1 do požarnega preskoka pri približno 230 s. Okrog 300 s se v računskem modelu odstrani ovira, ki predstavlja skrajno desno okno. Pred tem je vrednost HRR iz računskih modelov maksimalna in v primerih P1\_50 in P1\_30 celo preseže 3500 kW. Nato se na vodoravnem platoju stabilizira okrog povprečne vrednosti 3000 kW v primeru P1\_50 oziroma 2600 kW v primeru P1\_10, kar je približno 13 % odstopanje. Glede na to, da je parameter HRR odvisen od mnogih pogojev kot na primer od geometrije, lastnosti, lokacije in orientacije materiala v prostoru, prezračevanja in zornih kotov opazovanja, smo ocenili, da ujemanje podanega in izračunanega poteka HRR zadosti pričakovanjem.

## Vpliv mreže na temperaturo

Vpliv gostote mreže na časovni potek temperature smo preverjali z merilniki v treh točkah v prostoru ( $T_{s\_1}$ ,  $T_{h\_1}$  in  $T_{d\_4}$ ). Rezultati merilnika  $T_{s\_1}$  so prikazani na sliki 10.



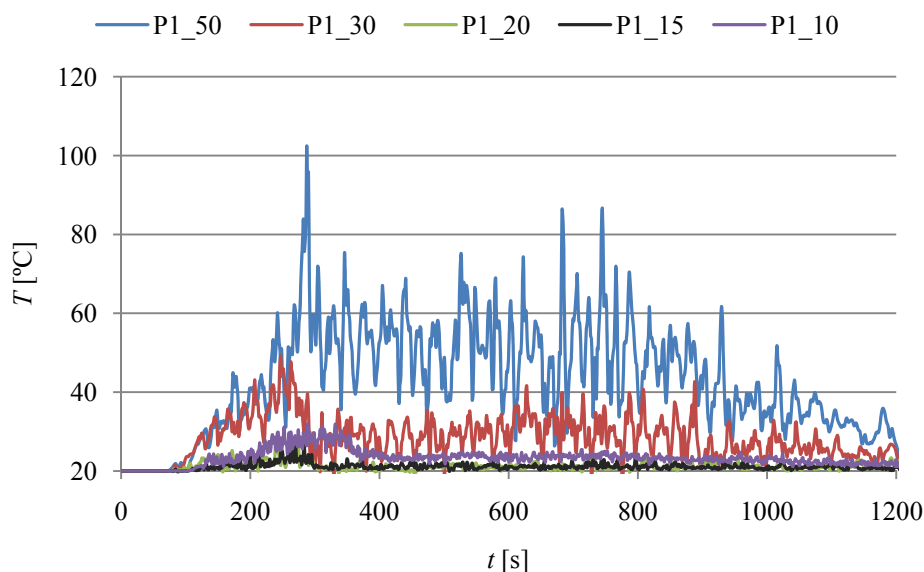
Slika 10: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom  $T_{s\_1}$  v primeru P1.

Z večanjem gostote mreže izmerjene temperature padajo (slika 10). V intervalu od 280 s do 300 s je pri vseh primerih dosežena maksimalna temperatura, in sicer pri P1\_50 skoraj 120 °C, pri P1\_30 približno 40 °C manj in pri ostalih približno 50 °C. Takrat se v računskem modelu primera P1 odstrani desno okno, v prostor pride hladen zrak in temperature v notranjosti padejo. Sledi stabilizacija temperatur na približno 50 °C v primerih P1\_50 in P1\_30, v primerih P1\_20, P1\_15 in P1\_10 pa na približno 30 °C. Po približno 900 s (15 min) trajanja simulacije je pri P1\_50 in P1\_30 opaziti začetek upadanja temperature proti začetni vrednosti (20 °C), kar je nekoliko kasneje kot v podanem požaru, kjer se faza pojemanja začne okrog 800 s. Zakasnitev pričetka faze pojemanja požara se zdi smiselna in kaže na to, da sprememba hitrosti sproščanja toplote nima hipnega vpliva na potek temperature na mestu  $T_{s\_1}$ . Iz slike 10 torej razberemo, da je potek temperature v primerih P1\_20, P1\_15 in P1\_10 med seboj primerljiv, medtem ko je v primerih z redkejšo mrežo (P1\_30 in P1\_50) opaziti večje odstopanje.

Slika 11 prikazuje potek temperature, izmerjen z merilnikom  $T_{h\_1}$ . Merilnik  $T_{h\_1}$  ni v neposredni bližini izvora požara, saj se nahaja za predelno steno, ki ločuje kuhinjo od ostalih prostorov. Posledično so izmerjene temperature s tem merilnikom nekoliko nižje od temperatur izmerjenih s



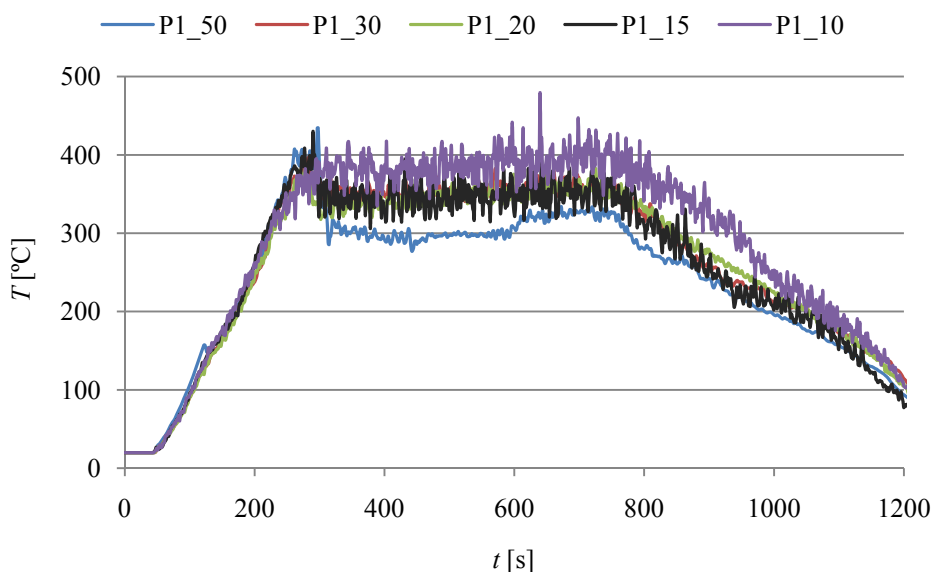
Ts\_1. V nobenem primeru pa ne bi imele kritičnega vpliva na človeka, saj se zadržujejo krepko pod 120 °C.



Slika 11: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Th\_1 v primeru P1.

Ponovno je opaziti, da izmerjene temperature padajo z zgoščevanjem mreže (slika 11). Poteki temperatur v primerih P1\_20, P1\_15 in P1\_10 so med seboj primerljivi in dosežejo maksimum okrog 30 °C pri približno 300 s. Tudi v primerih P1\_50 in P1\_30 sta maksimalni temperaturi doseženi pri približno 300 s, in sicer približno 100 °C pri P1\_50 oziroma približno 50 °C pri P1\_30. Tekom celotne simulacije so temperature v primerih P1\_50 in P1\_30 za povprečno 30 °C oziroma 10 °C višje od primerov z gostejšo mrežo. Iz slike 11 je tudi razvidno, da odstranitev desnega okna v modelu nima tako velikega vpliva na potek temperature kot pri merilniku Ts\_1, saj je merilnik Th\_1 lociran še 5 m bolj v notranjost prostora kot merilnik Ts\_1, ki je od odstranjenega okna oddaljen 2 m.

Vpliv gostote mreže na potek temperature pod stropom smo preučevali na rezultatih merilnika Td\_4 (slika 12). Za razliko od zgoraj predstavljenih rezultatov za merilnika Ts\_1 in Th\_1 se vpliv gostote mreže na temperaturo v prostoru, izmerjeno z merilnikom Td\_4, odraža z višanjem temperature pri zgoščevanju numerične mreže. Povprečna vrednost temperature vodoravnega platoja med 300 s in 800 s je v primeru P1\_50 okrog 300 °C, v primerih P1\_30, P1\_20 in P1\_15 okrog 350 °C ter v primeru P1\_10 povprečno 400 °C. Izkaže se, da so rezultati primerov P1\_30, P1\_20 in P1\_15 med seboj primerljivi, medtem ko v primerih P1\_50 in P1\_10 odstopajo z nekoliko nižjimi oziroma višjimi vrednostmi. Vpliv odstranitve desnega okna iz računskega modela je najbolj izrazit v primeru P1\_50, saj temperatura v trenutku pade za približno 120 °C. V primerih P1\_30, P1\_20 in P1\_15 je ta vpliv manjši, saj povzroči padec temperature za približno 80 °C. V primeru P1\_10 vpliva odstranitve okna na razvoj temperature ni zaznati.



Slika 12: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Td\_4 v primeru P1.

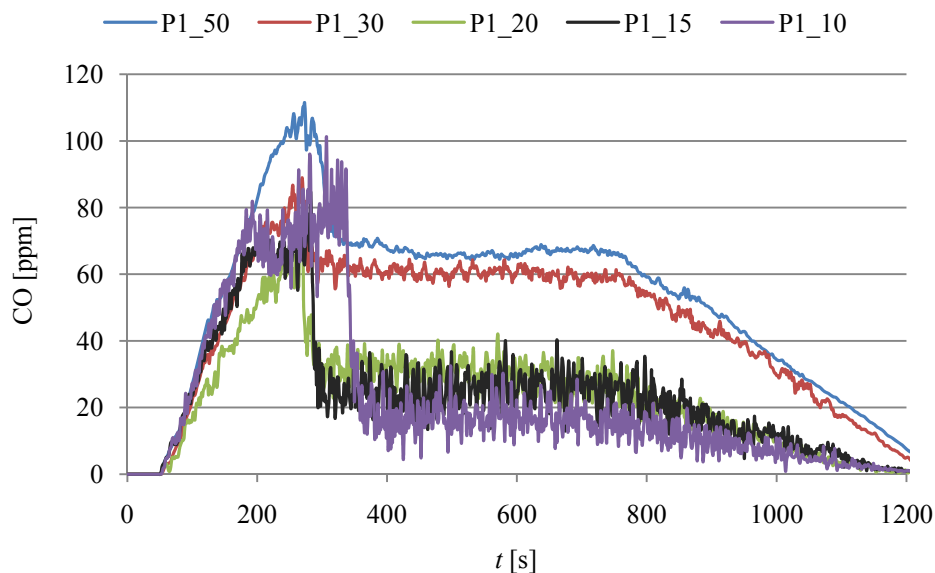
Podobno kot v [36] lahko tudi iz zgoraj predstavljenih rezultatov časovnega poteka temperature v izbranih treh točkah sklepamo, da so napovedi temperature zraka v spodnji hladnejši plasti pri redkejših mrežah precenjene. V zgornji toplejši plasti zraka pa so napovedane temperature pri redkejši mreži podcenjene (slika 12). Poleg tega je opaziti nekoliko boljše ujemanje napovedi poteka temperature pri različnih mrežah v zgornjem vročem kot v spodnjem hladnem sloju. Rezultati, ki niso v neposredni bližini plamen ali odprtin so tudi manj raztreseni. Nihanje rezultatov med posameznimi časovnimi intervali je posledica turbulentnega obnašanja zračnih tokov v bližini odprtin in plamenov [26]. Med zgoraj predstavljenimi časovnimi poteki temperature je ta vpliv najbolj opazen na rezultatih merilnika Th\_1 (slika 11), ki se nahaja v neposredni bližini severnih vrat in stopniščne odprtine.

### Vpliv mreže na koncentracije ogljikovega oksida

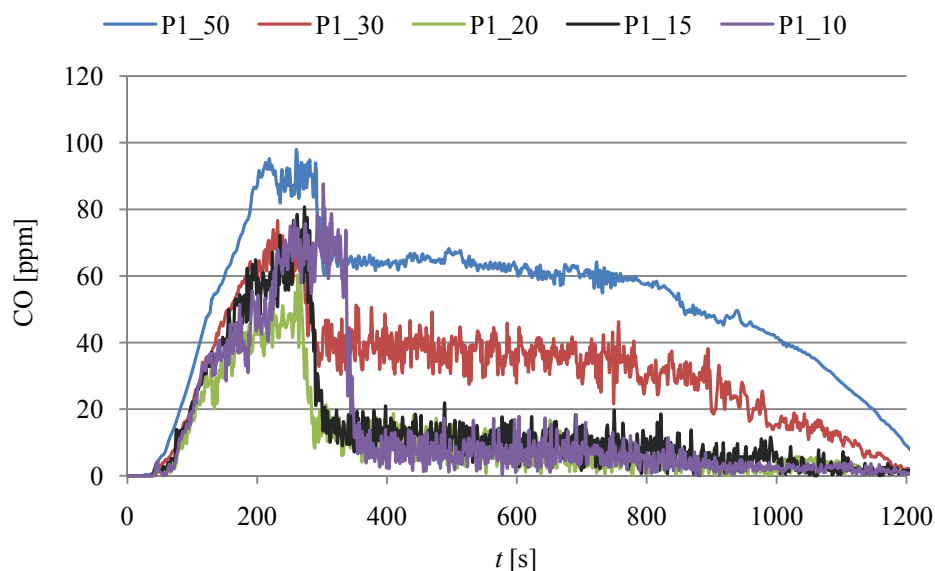
Vpliv gostote mreže na koncentracijo ogljikovega monoksida v zraku smo opazovali v dveh točkah v prostoru (merilnika CO\_302 in CO\_4). Za prikaz koncentracije CO v zraku smo uporabili enote ppm.

Na sliki 13 je prikazana časovna odvisnost koncentracije CO v zraku, izmerjena z merilnikom CO\_302. Razvidno je, da z zgoščevanjem mreže, koncentracija CO pada. Najvišja koncentracija CO je v vseh primerih dosežena okrog 300 s in znaša med 80 ppm in 110 ppm. Potem se v modelu odstrani okno, v prostor vstopi svež zunanji zrak, kar ima za posledico nenaden padec koncentracije CO v notranjem zraku. Nenadnemu padcu sledi stabilizacija koncentracije CO na vodoravnem platoju. Krivulji P1\_50 in P1\_30 sta med seboj primerljivi in prikazujeta koncentracije CO na vodoravnem platoju nekaj več kot 60 ppm, krivulji P1\_20 in P1\_15 pa približno 30 ppm. Krivulja P1\_10 ima

najkrajši vodoravni plato pri povprečni koncentraciji CO 20 ppm, zato pa ima nekoliko daljše obdobje maksimalne koncentracije CO okrog 80 ppm.



Slika 13: Časovni potek koncentracije ogljikovega oksida, izmerjen z merilnikom CO\_302 v primeru P1.



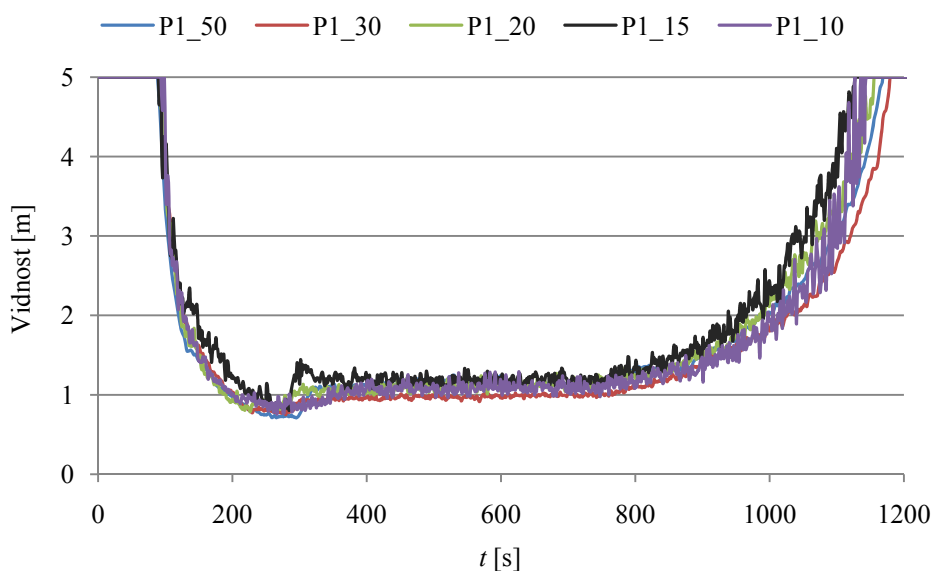
Slika 14: Časovni potek koncentracije ogljikovega oksida, izmerjen z merilnikom CO\_4 v primeru P1.

Pri rezultatih merilnika CO\_4 (slika 14) je zaznati podobno tendenco rezultatov kot pri prejšnjem merilniku. Koncentracija CO v prostoru se znižuje z večanjem gostote mrežnih celic. Odstranitev desnega okna iz simulacije okrog 300 s ponovno najbolj vpliva na rezultate iz primera P1\_10. Primeri

P1\_10, P1\_15 in P1\_20 prikazujejo zelo podobne rezultate, razlika je vidna le v nekoliko daljšem obdobju maksimalne koncentracije CO v primeru P1\_10. Zanimivo je, da je merilnik CO\_4 bližje izvoru požara, vendar koncentracija CO počasneje narašča in doseže celo nekoliko nižje maksimalne vrednosti kot pri merilniku CO\_302.

### Vpliv mreže na vidnost

Na sliki 15 je prikazan potek vidnosti skozi dim, izmerjen z merilnikom 1,9 m od tal na izhodu iz dnevnega prostora proti stopnišču. Ker uporabniki poznajo objekt, smo ocenili, da bi bila primerna vidnost na obravnavanem mestu 5 m.



Slika 15: Časovni potek vidnosti skozi dim, izmerjen z merilnikom V\_304 v primeru P1.

Vpliva gostote mreže na vidnost skoraj ni zaznati, saj predpisan požar povzroči veliko zadimljenost prostora v zelo kratkem času. Pri približno 200 s je vidnost na izbranem mestu le še slab meter. Ocena vidnosti v programu FDS je sicer odvisna od gostote dima, ki je prostorsko spremenljiv parameter. Poleg gostote dima sta pri oceni vidnosti uporabljena še brezdimenzijska konstanta faktor vidnosti, ki je za svetlobno odbijajoče znake za izhod enaka  $C = 3$  ter specifični koeficient porabe mase goriva  $K_m = 8700 \text{ m}^2/\text{kg}$  za gorenje plastike in lesa s plamenom [20]. S pojemanjem požara se zmanjšuje gostota dima in posledično povečuje vidnost, ki od 900 s naprej narašča proti začetni vrednosti.

### 3.5.2 Primer P5

Računski model, ki je osnova druge parametrične študije (P5), se po sami geometriji ne razlikuje od modela iz prve parametrične študije (P1). Z namenom preučevanja vpliva temperature vžiga elementa in prezračevanja na rast in razvoj požara v obravnavanem stanovanju (v nadaljevanju) smo v model P5 vključili (božično) drevo kot element opreme dnevnega prostora. Glede na model P1 so v modelu P5 nekoliko spremenjeni začetni ventilacijski pogoji. Odprtina za prehod v mansardo in severna vrata sta zaprta, južna vrata in srednje okno pa odprta tekom celotne simulacije. Ostale odprtine na južni fasadi se lahko odstranijo iz modela, če merilnik temperature doseže 300 °C. Bistvena razlika med obema modeloma je v osnovnem principu računalniškega simuliranja požara. V primeru P5 smo požar modelirali z več elementi "vent". Preglednica 10 prikazuje vhodne parametre, ki so bili pripisani gorljivim elementom v prostoru.

Preglednica 10: Podatki o modeliranih elementih pohištva v primeru P5.

Element pohištva	$A$ [m <sup>2</sup> ]	Material (pregl. 4)	Debelina [m]	HRRPUA [kW/m <sup>2</sup> ]	$T_{vžig}$ [°C]	$t_a$ [s]	$t_{ad}$ [s]	$t_2$ [s]	Potek HRR (t. 3.3.6)
zofa za tri osebe	3,40	pena	0,20	400	200	91	120	156	(b)
enosedežna zofa	2,42	pena	0,20	400	200				
klubska mizica	2,56	plastika	0,03	230	0	229	587	260	
jedilna miza	2,40	plastika	0,05	330	300				
stol	0,40	les	0,03	365	250	267	405	178	
kuhinja	6,48	kuhinja	0,05	500	200	229	727	200	
drevo	2,00	plastika	0,03	4500	250	23	94	89	(a)
omara	2,38	celuloza	0,20	600	250	155	5	350	

Če se simuliranje požara na način iz primera P1 uporablja pri večetažnih modelih z veliko prostori, se simuliranje razvoja požara na način iz primera P5, uporablja pri manjših modelih. Računalniško modeliranje manjših stavb, kamor upravičeno uvrstimo del pritlične etaže obravnavane vrstne hiše, je praviloma lahko bolj natančno, kakor pri modelih večjih stavb. Pojem natančno se nanaša predvsem na modeliranje ovir, ki predstavljajo pohištvo in drugo opremo znotraj prostorov. Pri tem se je potrebno zavedati, da realno stanovanje v veliko primerih ni tako skopo opremljeno. Povprečna enodružinska stanovanja po navadi krasijo razni dekorativni in uporabni predmeti, zavese, preproge in ne nazadnje tudi stavbno pohištvo ter obloge tal, sten ali stropov. V modelu P5 smo poizkušali celotno požarno obtežbo tipičnega stanovanja smiselno razporediti med izbrane gorljive ovire v modelu. Morebitna prisotnost možnih virov vžiga, ki so opisani v drugem poglavju te naloge, ima lahko za posledico vžig okoliških gorljivih materialov, s čimer se sproži začetek samovzdržnega gorenja. V primeru P5 smo predpostavili, da se ta proces zgodi s klubsko mizico v dnevni sobi, ki jo smatramo kot vir vžiga.

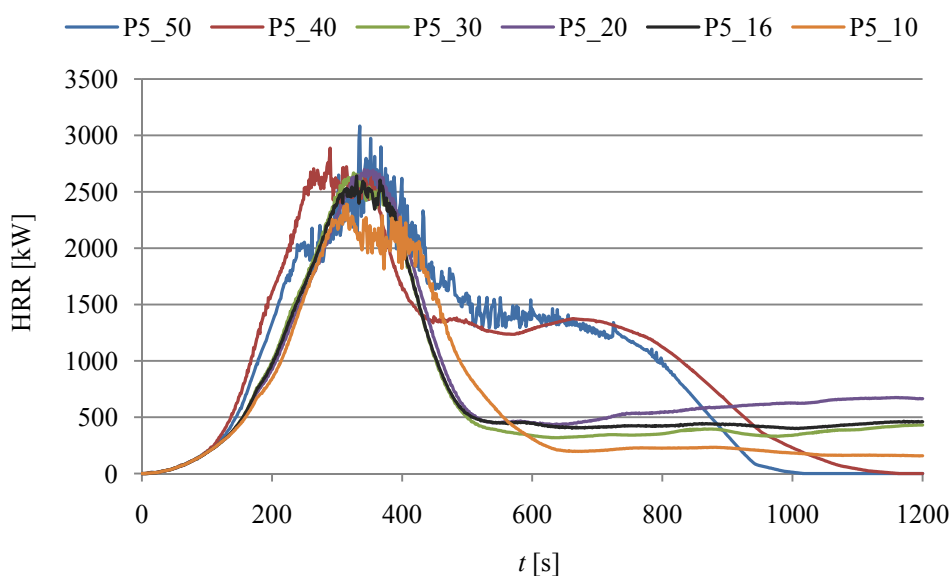
Mizica na začetku simulacije zagori hkrati iz vseh smeri. Nato se ogenj razširi na zofe, ki deloma zagorijo. Po določenem času postane požar kontroliran s strani kisika, katerega koncentracija v času maksimalne vrednosti HRR precej pade. Iz simulacij je razvidno, da takrat ogenj "odnese" skozi odprtine na južni strani objekta. Relativno pozno se vžge omara, ki pa gori najdlje izmed vseh elementov. Požar se iz dnevnega prostora ne razširi. V primeru P5 se ne sprosti toliko toplote, da bi se katerikoli steklo na južni fasadi objekta ogrelo na 300 °C, kar bi imelo za posledico odstranitev odprtine.

V preglednici 11 so prikazane oznake primerov, ki se med seboj razlikujejo le v dimenzijah mrežnih celic in številu celic, ki tvori celotno mrežo. V nadaljevanju je prikazan vpliv gostote mreže na časovni potek HRR in temperature.

Preglednica 11: Podatki o velikosti mrežne celice v primerih P5.

Oznaka	Dimenzije celice [m]	Skupno število celic
P5_50	0,51 x 0,49 x 0,52	2052
P5_40	0,40 x 0,40 x 0,39	4224
P5_30	0,30 x 0,30 x 0,31	9600
P5_20	0,20 x 0,20 x 0,20	31680
P5_16	0,17 x 0,16 x 0,16	56376
P5_10	0,10 x 0,10 x 0,10	267623

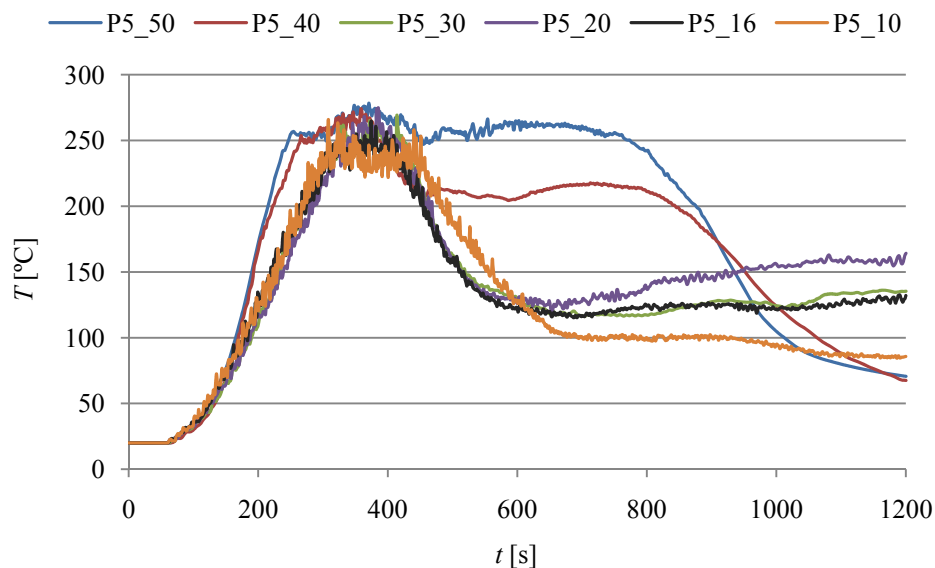
### Vpliv mreže na hitrost sproščanja toplote



Slika 16: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote v primeru P5.

Na sliki 16 je prikazan časovni razvoj količine HRR, izračunan za požarni scenarij P5. V fazi naraščanja požara do približno 280 s je potek HRR v primerih P5\_30, P5\_20, P5\_16 in P5\_10 enak, v primerih P5\_50 in P5\_40 pa nekoliko odstopa. Maksimalne vrednosti HRR so dosežene nekje od 250 s do 430 s in se gibljejo med približno 2600 kW v primeru P5\_50 oziroma P5\_40 in 2100 kW v primeru P5\_10, kar je približno 20 % odstopanje. Najdaljši plato maksimalnih vrednosti HRR je opaziti v primeru P5\_10 in je posledica nastanka požarnega preskoka v fazi razvitega požara. V nobenem od ostalih primerov do požarnega preskoka ne pride. Po fazi naraščanja požara in doseženi maksimalni vrednosti se krivulje razmeroma hitro obrnejo navzdol in požar preide v fazo pojemanja. Čas pričetka in vrednosti HRR so v fazi pojemanja požara pri vsakem primeru različni. Največje odstopanje glede na ostale je ponovno zaznati pri primerih z redkejšima mrežama. Tu se pri približno 450 s pojavi drugi, nekoliko daljši, približno 300 s trajajoči vodoravni plato. Takrat gori samo še omara. V ostalih primerih ostane omara edini goreč predmet v prostoru od 600 s naprej, vendar so poteki HRR različni. Razlago iščemo v različnem številu celic, ki pri različno gostih mrežah definira omaro. V primerih P5\_50 in P5\_40 ogenj zajame vse celice omare, ki gorijo celo hkrati, kar na sliki 16 prikazuje drugi vodoravni plato. V ostalih primerih simulacije pokažejo, da vse celice omare skoraj zagotovo ne gorijo istočasno. Različno število celic in posledično različna gorljiva površina omare sprošča različno količino toplote pri opazovanem času od 600 s naprej.

### Vpliv mreže na temperaturo



Slika 17: Časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Tk\_4 v primeru P5.

Vpliv gostote mreže na časovni potek temperature, izmerjen z merilnikom Tk\_4, je prikazan na sliki 17. Opaziti je trend padanja temperature z večanjem gostote mreže tekom celotne simulacije izbranega

požarnega scenarija. V fazi naraščanja in pojemanja požara je potek temperature v primerih P5\_50 in P5\_40 precej drugačen kot v ostalih primerih, za katere bi lahko rekli, da dajo podobne rezultate.

Če interpretiramo rezultate iz slike 17 z vidika vpliva požara na konstrukcijo, lahko povzamemo, da bi v primeru računanja dotičnega požarnega scenarija z redkejšima mrežama (primera P5\_50, P5\_40), dobili najbolj neugodne rezultate. V primeru P5\_50 traja nivo povprečno najvišje temperature okrog 260 °C od približno 260 s do nekje 780 s. V primeru P5\_40 je nivo povprečno najvišje temperature kakšnih 40 °C nižji, pa tudi vzdržuje se nekoliko krajši časovni interval. V primerih P5\_30, P5\_20 in P5\_16 temperatura doseže maksimalno vrednost okrog 250 °C, ki je vzdrževana približno 120 s, nato pa sledi padec na približno 130 °C pri času 600 s. Od tu naprej gori samo še omara, izmerjena temperatura pa se do konca simulacije (1200 s) giblje okrog 130 °C v P5\_30 in P5\_16 ter povprečno 20 °C višje v primeru P5\_20. Merilnik Tk\_4 ni v neposredni bližini požara, saj le-ta iz dnevnega prostora ne napreduje. Zato razumljivo tudi izmerjene temperature niso tako visoke, da bi v času trajanja požara ogrozile nosilnost armiranobetonske in jeklene nosilne konstrukcije.

Izračunan potek temperature v izbrani točki v primeru z najgostejšo mrežo se v fazi naraščanja požara ujema z izračunanimi časovno odvisnimi poteki temperatur v primerih P5\_30, P5\_20 in P5\_16. V preostalih fazah so vrednosti temperature v primeru P5\_10 večinoma nižje, trend spreminjanja pa zelo podoben. Povprečna maksimalna temperatura okrog 230 °C je vzdrževana nekje od 240 s do 450 s, kar je nekoliko dlje kot v primerih s srednje gosto mrežo, vendar bistveno krajše kot v P5\_50 ali P5\_40. Faza pojemanja požara se prične s padcem temperature na približno 100 °C pri 620 s. Omara v primeru P5\_10 oddaja toploto, ki v opazovani točki do konca simulacije vzdržuje temperaturo zraka okrog 90 °C, kar je približno 40 °C nižje kot v P5\_16 oziroma P5\_30.

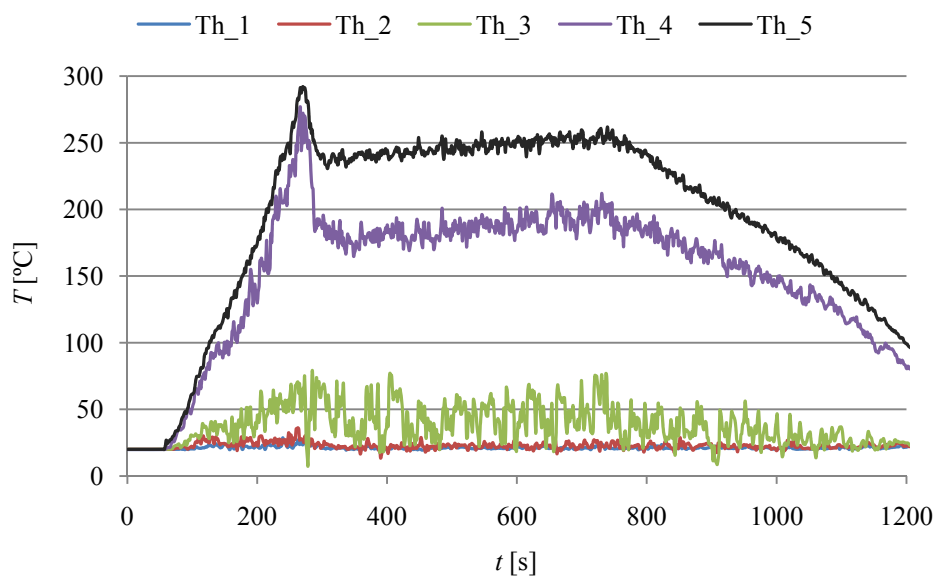
### 3.5.3 Primerjava rezultatov in izbor mreže

Na osnovi izvedenih parametričnih študij za različna požarna scenarija, lahko povzamemo, da gostota mreže vpliva na časovni potek temperature, HRR, CO in vidnosti. S primerjavo obeh študij ugotovimo, da gostota mreže precej bolj vpliva na izračunane vrednosti parametrov v primeru P5 kot v primeru P1. S to ugotovitvijo lahko na nek način podpremo predpostavko, da je potrebno računski model čim bolj razumno poenostaviti. V primeru P5 je podanih veliko več vhodnih parametrov za opis predvidenega požara kot v primeru P1, kjer je celoten požar skoncentriran na en "vent". Torej bolj kompleksen kot je model, tem večji je vpliv mreže na izbrane izhodne parametre.

Po primerjavi slike 9 in slike 16 se izkaže, da z zgoščevanjem mreže vrednost HRR pri določenem času predvsem v fazi razvitega požara na splošno pada tako v primeru P1 kot v primeru P5. Za razliko od primerjave slike 12 s sliko 17, kjer je trend ravno obraten. Poleg razumljivega drugačnega



časovnega poteka temperature, zaradi različne lokacije samih merilnikov in različnih požarnih scenarijev, je nepričakovana razlika, da v primeru P1 z zgoščevanjem mreže temperature rastejo, medtem ko v primeru P5 temperature z zgoščevanjem mreže na splošno padajo. Pri tem je potrebno poudariti, da se merilnika sicer razlikujeta v lokaciji, vendar oba podajata časovni potek temperature na višini 2,0 m od tal. Sprva smo si rezultate parametrične študije izvedene na primeru P1 logično razlagali. Osnova razlage je znano dejstvo, da se hladen zrak zadržuje pri tleh, saj vseskozi izpodriva toplega, ki se kopiči pod stropom. To potrjuje tudi slika 18 za primer P1\_20, kjer je prikazana časovna odvisnost temperature na navidezni vertikalni premici, ki se nahaja pred stopniščem. Časovni potek temperature je izmerjen v petih točkah, in sicer 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m ter 2,4 m od tal. Merilnik v neki točki pri različno gostih mrežah pade v različno veliko celico. FDS izračuna povprečno vrednost v tej celici. Večja kot je celica, večja količina zraka je v njej. S tem pa so dejansko prisotne višje razlike v temperaturi obravnavanega volumna zraka. Na višini merilnika 0,5 m od tal je torej logično, da je pri večjih celicah višja izmerjena temperatura kot pri manjših celicah, saj z večjim volumnom zajamemo več relativno toplejšega zraka kot z manjšim volumnom, kjer so razlike v temperaturi zraka manjše. Na višini 2,0 m od tal je zrak toplejši, zato z večjim volumnom celice (P1\_50) zajamemo več relativno hladnejšega zraka kot z manjšim volumnom (P1\_10). Tako so izmerjene temperature v določenih časovnih korakih v točki merilnika Td\_4 pri gostejših mrežah višje kot pri redkejših (slika 12).

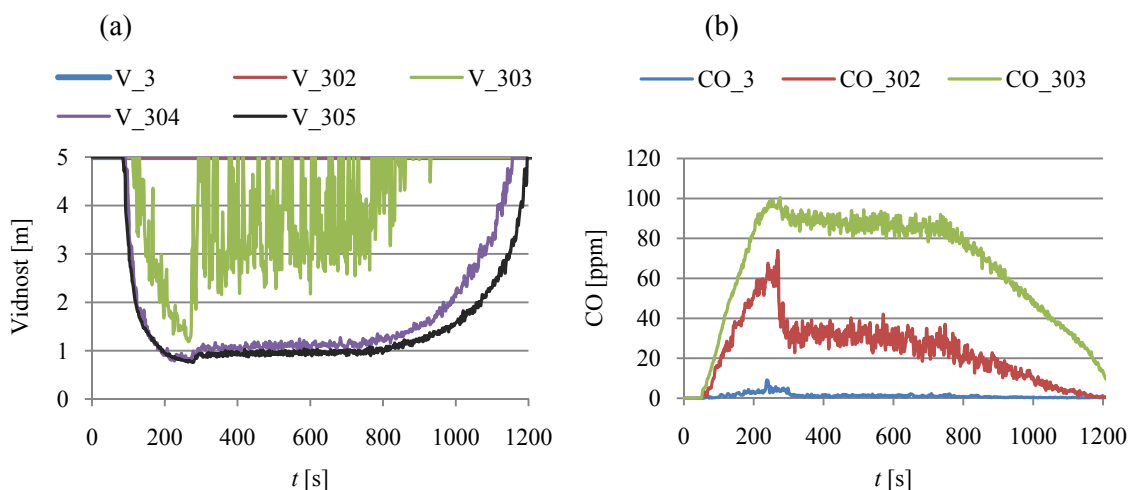


Slika 18: Časovni potek temperature po višini za primer P1\_20.

Ugotovljena razlika kaže na izredno nepredvidljivo dinamiko požara. To je tudi lep pokazatelj, da pri simulacijah požara v računalniških programih ne gre prehitro sklepati ugotovitev in posploševati rezultatov. Uporabnost računalniških orodij za napovedovanje širjenja požara in parametrov, ki

opisujejo njegove kritične posledice, se izkaže šele po pridobljeni vrsti izkušenj in znatni količini znanja.

Na tem mestu se zdi primerno prikazati še spreminjanje vidnosti (slika 19a) in koncentracije CO v zraku po višini (slika 19b). Merilnike vidnosti smo v modelu (primer P1\_20) locirali na sredino prehoda iz dnevnega prostora v stopnišče. Najnižji merilnik se nahaja na višini 0,4 m od tal, vsak naslednji pa 0,5 m višje. Skupno jih je torej pet. Iz slike 19 razberemo, da je na višini 0,9 m od tal vidnost tekom celotnega trajanja simulacije najmanj 5 m, kar smo tudi privzeli za zahtevano vrednost. Višje kot opazujemo vidnost skozi dim, tem slabša je. Na sliki 19b so prikazani rezultati treh merilnikov časovnega poteka koncentracije CO, ki se v modelu nahajajo med levo zofo za tri osebe in mizico v dnevnem prostoru. Najnižji je 0,7 m, vmesni 1,5 m ter najvišji 2,3 m od tal. Glede na to, da je CO lažji od zraka, se pričakovano zadržuje pod stropom. Na višini 0,7 m od tal se koncentracija CO v zraku tekom simuliranega požara skoraj ne poveša. Tik pod stropom je nivo povprečno maksimalne koncentracije CO v zraku 90 ppm prisoten nekje od 200 s do 800 s (10 min).



Slika 19: (a) Prikaz časovnega poteka vidnosti skozi dim po višini za primer P1\_20.

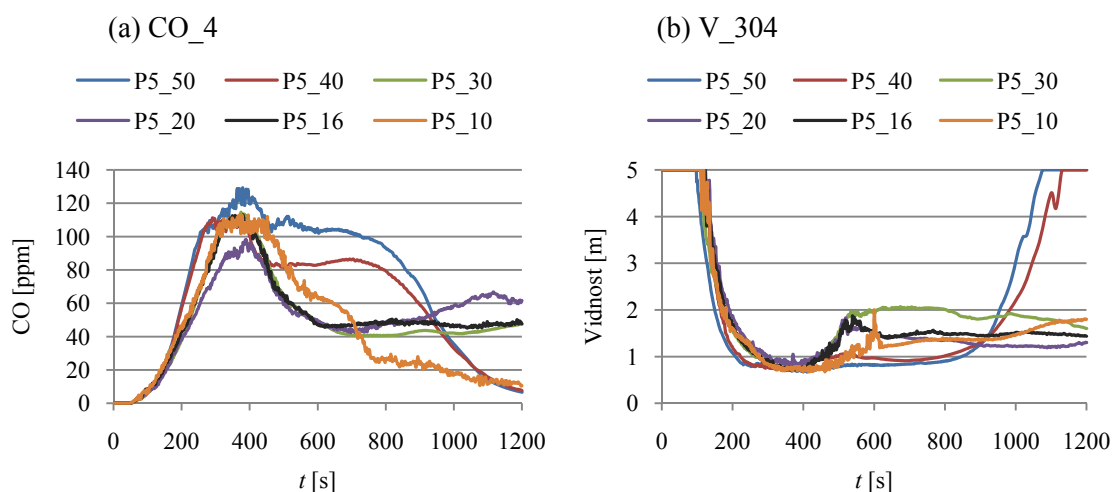
(b) Prikaz časovnega poteka koncentracije ogljikovega oksida po višini za primer P1\_20.

Vidnost skozi dim in koncentracije CO se v računalniških modelih po navadi opazujejo z namenom preučevanja vpliva na človeka. Ugotovimo, da so tekom celotnega trajanja požara, razmere tem boljše čim bližje tlorajskim jih opazujemo (slika 19). Poleg tega se v [37] izkaže tudi, da se vzdržne razmere najdlje ohranijo pri oknu, ki ni v neposredni bližini vžiga.

Izračunane koncentracije CO med predpisanim požarom v obravnavanem prostoru (slike 13, 14 in 19b) razen rahlega glavobola naj ne bi imele drugih vplivov na človeka, saj se zadržujejo krepko pod kritično mejo 1400 ppm [35]. Poudariti moramo, da je koncentracija CO v zraku znotraj programa v veliki meri pogojena z na začetku predpisano globalno reakcijo, saj FDS od uporabnika zahteva, da

sam poda nastalo količino saj in CO. Krivulje koncentracij CO v odvisnosti od časa so prikazane v sklopu študije vpliva velikosti celic numerične mreže na izbrane parametre in ne služijo podrobnejšemu preučevanju kritičnih razmer za človeka.

Podobno kot pri rezultatih prikazanih v [36] tudi pri izhodnih podatkih obeh parametričnih študij, predstavljenih v tej nalogi, konvergenca rezultatov pri različnih mrežah ni nujno prisotna. Najbolj je opazna pri višjih temperaturah v primeru P1, kar je razvidno iz slike 12. Iz rezultatov primera P5 lahko rečemo, da, z izjemo nekaterih odsekov kot na primer pri časovnem poteku temperature v fazi razvitega požara (slika 17), konvergence ni zaznati. Za potrditev te ugotovitve na sliki 20 predstavljamo še časovni potek CO, izmerjen z merilnikom CO\_4, in vidnosti, izmerjene z merilnikom V\_304.



Slika 20: (a) Časovni potek koncentracije ogljikovega oksida v zraku, izmerjen z merilnikom CO\_4 v primeru P5.

(b) Časovni potek vidnosti skozi dim, izmerjen z merilnikom V\_304 v primeru P5.

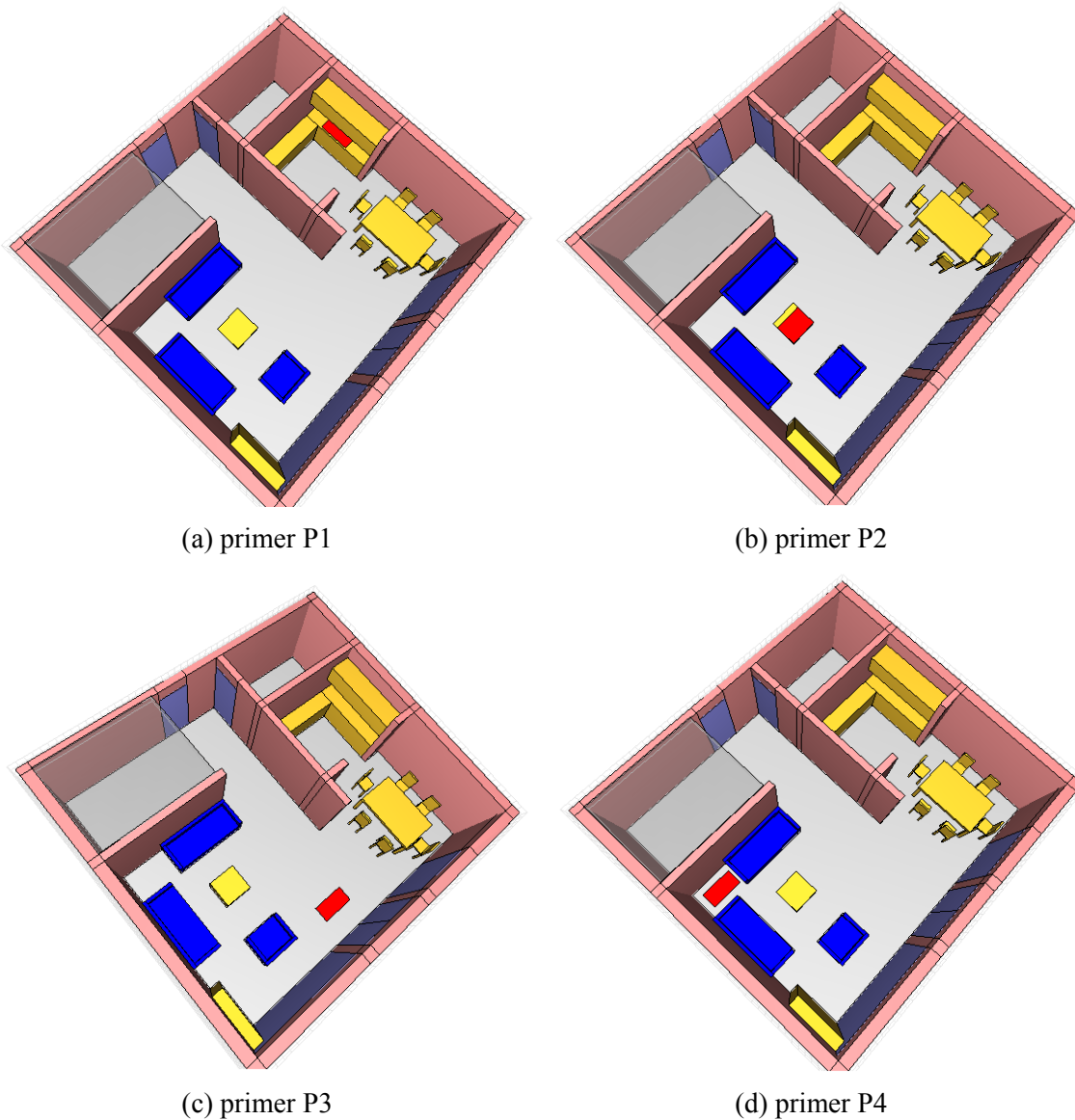
Zaključimo lahko, da je optimalno gostoto mreže potrebno iskati v kombinaciji z natančnostjo rezultatov in sprejemljivim računskim časom. Z vidika sprejemljivega računskega časa je potrebna uporaba relativno grobe mreže. Po drugi strani pa groba mreža povzroči pomanjkanje natančnosti rešitev. Na to temo se med drugim tudi v [36] pojavi trditev, da se z uporabo bolj fine mreže, dobijo bolj natančni rezultati. Na podlagi rezultatov, dobljenih iz izvedenih parametričnih študij, se s to trditvijo ne bi nujno strinjali. Podobno kot v [35] se nagibamo k dejstvu, da je potrebno najti nek (subjektivni) kompromis med grobo in fino mrežo.

Na podlagi simulacij dveh požarnih scenarijev z uporabo različnih numeričnih mrež v računalniškem modelu dela pritlične etaže enega stanovanja, je po našem mnenju z vidika računskega časa in

natančnosti prikazanih rezultatov optimalna izbira mreže z dimenzijami ene celice 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m. Skupno število celic v modelu je torej 31680.

### 3.6 Vpliv lokacije izvora požara

V nadaljevanju prikažemo vpliv lokacije izvora požara na potek požara v pritličju enostanovanjske vrstne hiše. Med seboj smo primerjali štiri primere (P1, P2, P3, P4), ki se razlikujejo v poziciji izvora požara. V preglednici 12 so prikazane oznake primerov, kratki opisi lokacij požara in višine  $z$  izvora požara od tal. Grafično je lokacija izvora požara prikazana na sliki 21, kjer je izvor požara prikazan z rdečim pravokotnikom.



Slika 21: Lokacija izvora požara.

Preglednica 12: Opis lokacij izvora požara s pripadajočimi oznakami primerov.

Oznaka	Lokacija požara	$z$ [m]
P1	kuhinjski pult	0,9
P2	mizica v dnevnem prostoru	0,6
P3	pred izhodom na teraso na J strani	0
P4	levi zgornji kot dnevnega prostora	0

Lastnosti požara so enake kot v primeru P1, na podlagi katerega smo izvedli parametrično študijo mreže. V vsakem primeru je torej požar modeliran z enim elementom "vent", površine  $0,5 \text{ m}^2$ , ki mu je predpisana hitrost sproščanja toplote po načinu (a) (glej 3.3.6). Pri računu projektnega požara smo upoštevali, da je hitrost razvoja požara hitra  $t_a = 150 \text{ s}$ , gostota požarne obtežbe  $q_{f,d} = 200 \text{ MJ/m}^2$  in največja hitrost sproščanja toplote na  $1 \text{ m}^2$  požara v gorivno nadzorovanih pogojih  $RHR_f = 250 \text{ kW/m}^2$  na območju požara  $A_f = 12 \text{ m}^2$ . V vseh primerih smo predpostavili, da se požar ne razširi po celotnem požarnem sektorju, vendar se omeji na manjše območje in ga obravnavamo kot lokaliziran požar. Vse modelirane ovire v prostoru so negorljive. Začetni ventilacijski pogoji so prav tako enaki v vseh primerih. Odprtina v stropni plošči je odprta tekom celotne simulacije. Ostale odprtine so sprva zaprte. Po 60 s se odprejo severna, po 120 s simulacije pa še južna vrata. Ovire, ki predstavljajo ostale odprtine na južni fasadi, se iz modela odstranijo, če je dosežena temperatura  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Kot je že bilo omenjeno se tak način podajanja požara v računalniških modelih uporablja predvsem za opazovanje vpliva požara na konstrukcijo pri večjih objektih. Mesto nastanka požara se izbere glede na konfiguracijo objekta in pričakovano stopnjo razvoja požara. Globalno se nato za najprimernejše požarne scenarije opazuje potek maksimalne temperature in koncentracije CO na izbranih lokacijah [35]. V tem delu diplomske naloge smo želeli preveriti kako opisan pristop modeliranja požara vpliva na HRR, temperaturo in koncentracije CO pri manjših objektih. Velikost mrežne celice v izvedenih simulacijah je  $0,20 \text{ m} \times 0,20 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$  in je izbrana na podlagi rezultatov parametričnih študij.

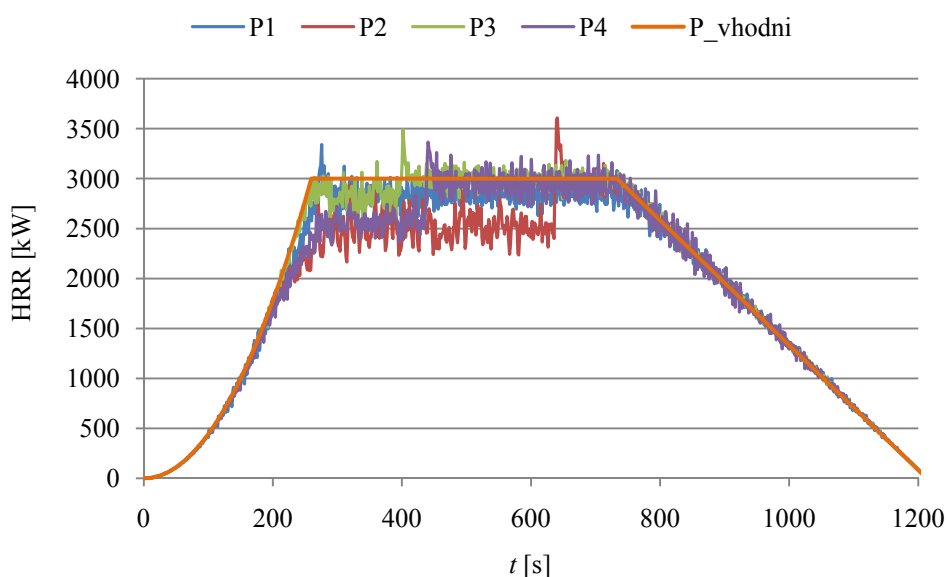
Iz grafov izbranih parametrov v odvisnosti od časa, prikazanih v nadaljevanju, se nazorno vidi kako velik je vpliv geometrije na potek požara. Nenadna sprememba vrednosti opazovanih parametrov pri določenem času v posameznem primeru je posledica odstranitve ene izmed ovir, ki predstavlja okno v računskih modelih. V preglednici 13 je za obravnavane primere prikazan čas odstranitve desnega ( $t_D$ ) oziroma levega ( $t_L$ ) dela oken, ko merilnik temperature na mestu oken doseže  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . To je temperatura pri kateri smo predpostavili, da se steklo zdrobi.

Preglednica 13: Čas odstranitve ovir iz modela.

Varianta	$t_L$ [s]	$t_D$ [s]
P1	/	270
P2	640	/
P3	400	/
P4	440	/

### Hitrost sproščanja toplote

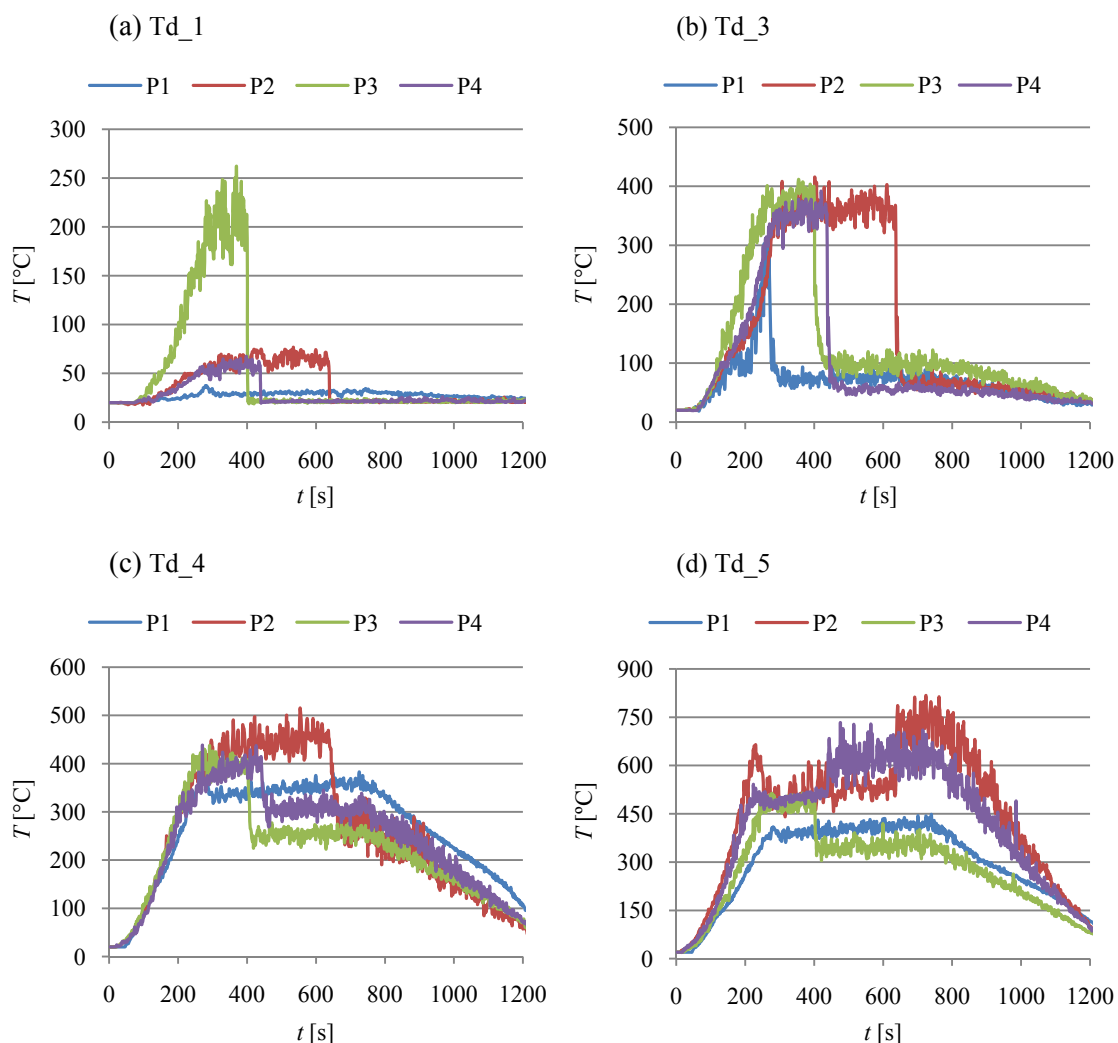
Ujemanje vhodnega (P\_vhodni) z izračunanimi poteki HRR (P1 – P4) je na sliki 22 lepo razvidno in pričakovano. HRR se stabilizira okrog maksimalne vrednosti 3000 kW v vseh primerih, vendar ob različnih časih. Najbolj opazen je nenaden dvig HRR na maksimalno vrednost v primerih P2 in P4 pri približno 640 s oziroma 440 s. HRR v vseh primerih doseže maksimalno raven po odstranitvi oken v računalniških modelih. Torej potek požara v modelih določa prezračevanje oziroma dovod svežega zraka.



Slika 22: Primerjava časovnega poteka hitrosti sproščanja toplote za primere z različnimi lokacijami izvora požara.

### Temperatura

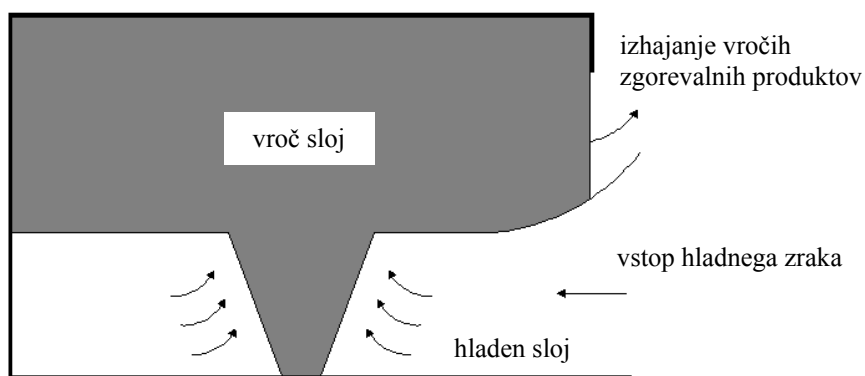
Dinamika gibanja zraka po višini je za obravnavane požarne scenarije prikazana z rezultati merilnikov časovnega poteka temperature v dnevnem prostoru, ki se nahajajo 0,5, 1,5, 2,0 in 2,4 m nad tlemi (slika 23). Izvor požara se nahaja najbližje merilnikom v primeru P2, nekoliko dlje v primerih P3 in P4, najbolj odmaknjen pa je v primeru P1.



Slika 23: Primerjava časovnih potekov temperature, izmerjenih z merilniki Td, med primeri z različnimi lokacijami izvora požara.

Na sliki 23a se opazi vpliv višine izvora požara na temperaturo zraka pri tleh. Primer P3 doseže skoraj štirikrat višjo temperaturo zraka kot ostale. "Vent", s katerim je požar modeliran, se v primeru P3 nahaja na tleh, v P2 pa 0,6 m nad tlemi. Ker se topel zrak dviga, hladen pa se zadržuje pri tleh, je razumljivo, da je temperatura v primeru P2 nižja kot v primeru P3. Vendar se nivo maksimalne temperature v primeru P2 vzdržuje bistveno dlje kot pri primeru P3. Tudi v primeru P4 je izvor požara na tleh, vendar je potek temperature primerljiv s primerom P2, kar prikazuje vpliv ovir v prostoru na dinamiko segrevanja zraka. Na višini 1,5 m (slika 23b) od tal maksimalna temperatura zraka v vseh variantah doseže malo manj kot 400 °C. Čas vzdrževanja maksimalne temperature je pri vsakem primeru različen in je pogojen z odstranitvijo oken. Ko v prostor vstopi svež zrak, se vroč dim, ki nastaja pri gorenju, ohladi na približno 100 °C pri vsakem primeru. Na višini 2,0 m od tal (slika 23c) se maksimalne temperature zraka gibljejo med 350 °C in 450 °C. Odstranitev oken povzroči bistveno nižji padec temperatur kot 0,5 m nižje oziroma v primeru P1 sploh nima vidnejšega vpliva. Najdaljši plato najvišje temperature povzroči požar v primeru P2, ki je tudi najbližje merilniku. Pod stropom je

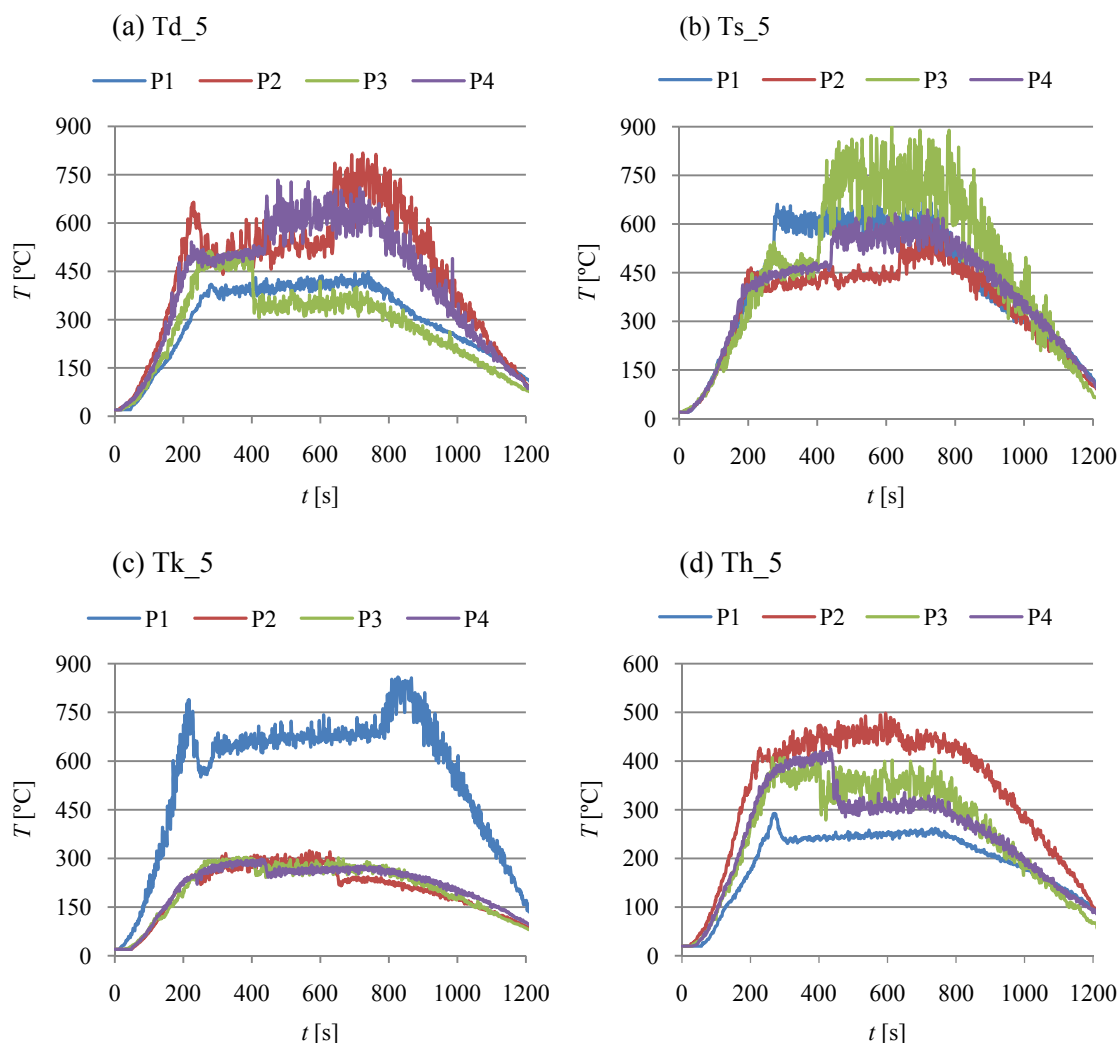
maksimalna temperatura malo čez 800 °C dosežena v primeru P2. Kljub temu bi imel na stropno konstrukcijo bolj neugoden vpliv požar P4, pri katerem je plato maksimalne temperature povprečno 650 °C vzdrževan vsaj 300 s, za razliko od primera P2, kjer se plato najvišje temperature povprečno 700 °C vzdržuje približno 200 s (slika 23d). V primeru P1 se maksimalna temperatura stabilizira okrog 400 °C in se vzdržuje več kot 500 s. Odstranitev levega okna v primeru P1 nima vidnejšega vpliva na potek temperature pod stropom v dnevnem prostoru. V primeru P3 je izvor požara neposredno pred odprtinami, zato dovod svežega zraka v prostor povzroči padec temperature. Pri primerih P2 in P4 pa sta izvora požara nekoliko bolj odmaknjena od odprtini, katerih odstranitev povzroči opazen dvig temperature. Ko se odprtina odstrani, hladen zrak prodre v prostor od spodaj, na vrhu pa iz njega izhaja vroč dim. Vstopanje čistega ter s kisikom bogatega zraka dodatno spodbuja podtlak, ki nastaja v spodnjem hladnem delu v požar zajetega prostora. Podtlak vpliva, da skozi odprtine v prostor vstopa okoliški zrak, kar omogoča nadaljevanje in spodbujanje oksidacije. V zgornji toplejši plasti zraka se pojavlja nadtlak, ki poriva zgorevalne produkte iz prostora in tako vpliva na širjenje produktov zgorevanja po objektu [16]. Ob požaru se torej izoblikujeta vroč zgornji sloj in hladen spodnji sloj zraka. Meja med slojema je praktično zelo težko določljiva, v študijske namene pa je delitev med njima bolj jasna [34]. Dvig temperature po odstranitvi odprtini si razlagamo tako, da hladen zrak na hitro potisne vroč dim proti stropu, zato ta ne more na hitro izstopiti iz prostora. Dinamika zraka po odstranitvi odprtine je prikazana na sliki 24.



Slika 24: Delitev prostora na vroč in hladen sloj [34].

Na sliki 25 prikazujemo časovne poteke temperature pod stropom na štirih lokacijah v prostoru za obravnavane požarne scenarije. Z opazovanjem poteka temperature pod stropom ocenjujemo vpliv požara na konstrukcijo. Pri interpretaciji slike se ne bomo osredotočali na višino temperature, saj samo z enim merilnikom ne dobimo dovolj razumnih rezultatov za morebitno uporabo le-teh za dimenzioniranje nosilne konstrukcije [38]. Na podlagi slike 25 bomo ocenjevali zgolj vpliv lokacije izvora požara na potek temperature v izbranih točkah.





Slika 25: Primerjava časovnega poteka temperature pod stropom med primeri z različnimi lokacijami izvora požara.

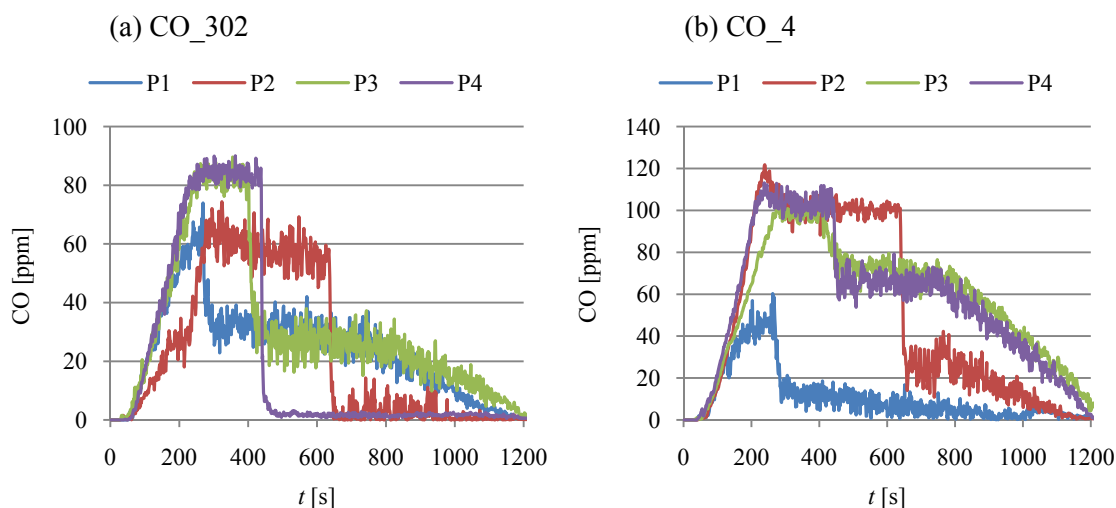
Najbolj neugoden vpliv na stropno konstrukcijo ima požar, ki se nahaja najbližje merilniku. To se najbolj nazorno vidi na sliki 25c. Izvor požara v primeru P1 se tu nahaja najbližje merilniku  $Tk\_5$ . Od merilnikov  $Td\_5$  in  $Th\_5$  je požar v primeru P1 bolj oddaljen in posledično manj kritičen. Požar v primeru P3 je v neposredni bližini merilnika  $Ts\_5$  in na tem mestu povzroči najbolj neugoden razvoj temperature (slika 25b). Relativno blizu je tudi merilniku  $Td\_5$  (slika 25a), vendar sta na tem mestu kritična požarna scenarija P2 oziroma P4. Pri slednjih ima pok stekla za posledico dvig temperature, medtem ko je v primeru P3 viden padec temperature. V primeru P3 po odstranitvi levega okna toplota izhaja iz modela, v primerih P2 in P4 pa vstop svežega zraka pospeši gorenje. Na mestu merilnika  $Ts\_5$  povzroči sprememba v ventilaciji dvig temperature v vseh požarnih scenarijih. Največji dvig je opazen v primeru P3, kljub temu, da se nahaja najbližje odprtini. Na sliki 25d vidimo, da je najnižja temperatura dosežena v primeru P1, saj je izvor požara najbolj izoliran od merilnika. Zanimivo je, da med izvorom požara (primer P3) in merilnikom ni nobene ovire pa vendar je najvišja temperatura dosežena v primeru P2, kjer je izvor požara nekoliko zamaknjen v levo in za steno. Pri opazovanju

razvoja temperature na več lokacijah znotraj prostora pri različnih pozicijah izvora požara opazimo, da imata na dinamiko požara velik in težko predvidljiv vpliv geometrija prostora in ventilacijski pogoji.

Zaključimo lahko, da je požarni scenarij P1 najbolj kritičen v kuhinji. Po odstranitvi desnega okna se topel zrak giba proti odprtini, kar ima za posledico relativno neugoden potek temperature tudi na mestu Ts\_5 (slika 25b). Kuhinja je v obravnavanem modelu nekoliko izolirana od ostalega dela, zato je tudi požar bolj kot ne omejen znotraj nje. Požarni scenarij P3 je najbolj kritičen v neposredni bližini izvora, medtem ko v točkah Td\_5 in Th\_5 odstranitev levega okna povzroči padec temperature. Požarna scenarija P2 in P4 sta v obravnavanem modelu najbolj neugodna z vidika nosilnosti stropne konstrukcije tako v neposredni bližini izvora požara (slika 25a) kot tudi nekoliko bolj stran (slika 25d).

### Koncentracija ogljikovega oksida

Na sliki 26 je prikazan časovni potek koncentracije CO v dveh točkah v modelu. S pomočjo prikazanih koncentracij CO želimo med seboj primerjati ugodnost oziroma neugodnost obravnavanih požarnih scenarijev. Na vrednosti maksimalnih koncentracij se pri tem ne osredotočamo, saj le-te ob predpisani reakciji nimajo velikega vpliva na človeka. Podobno kot zgoraj ugotovimo, da so kritični požarni scenariji P2, P3 in P4. V primeru P1 so koncentracije CO nižje kot v ostalih primerih, kar je izrazito opazno na sliki 26b. V vseh primerih po odstranitvi odprtine v modelu koncentracije CO v zraku ekstremno padejo. Največji padec je opaziti v primerih, kjer se izvor požara nahaja v neposredni bližini merilnika in odprtine (slika 26a).



Slika 26: Primerjava časovnega poteka koncentracije ogljikovega oksida med primeri z različnimi lokacijami izvora požara.

### 3.7 Vpliv temperature vžiga ovire drevesa

Vpliv temperature vžiga ovire drevesa na dinamiko požara prikažemo na primeru P6. Požar je v tem primeru (P6) modeliran z več elementi "vent". Od primera P5 (glej 3.5.2) se nekoliko razlikuje v ventilacijskih pogojih in nekaterih vhodnih parametrih. Za zofe, klubsko mizico in drevo je tokrat predpostavljen pesimistični potek HRR, ostalim elementom pa je enako kot v primeru P5 predpisan povprečni potek HRR [30]. V modelu je zmanjšana tudi debelina jedilne mize in božičnega drevesa ter znižana temperatura vžiga jedilne mize in stolov okrog nje. Vhodni parametri, ki so predpisani gorljivim elementom v modelu, so prikazani v preglednici 14. Polje o temperaturi vžiga (božičnega) drevesa je obarvano sivo, saj smo ta parameter med simulacijami spreminjali. Izvedli smo štiri simulacije primera P6, kjer je bila pri vsaki podana drugačna temperatura vžiga božičnega drevesa, in sicer najnižja 90 °C (P6\_90), vmesni 120 °C (P6\_120) in 150 °C (P6\_150) ter najvišja 180 °C (P6\_180). Božično drevo smo modelirali kot oviro, ki se nahaja na višini 0,6 m od tal vzporedno z izhodom na teraso. Velikost mrežne celice v izvedenih simulacijah je 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m in je izbrana na podlagi rezultatov parametričnih študij.

Preglednica 14: Podatki o modeliranih elementih pohištva v primeru P6.

Element pohištva	$A$ [m <sup>2</sup> ]	Material (pregl. 4)	Debelina [m]	HRRPUA [kW/m <sup>2</sup> ]	$T_{vžig}$ [°C]	$t_a$ [s]	$t_{ad}$ [s]	$t_2$ [s]	Potek HRR (t. 3.3.6)
zofa za tri osebe	3,40	pena	0,20	500	200	91	120	156	(b)
enosedežna zofa	2,42	pena	0,20	500	200				
klubsko mizica	2,56	plastika	0,03	330	0	229	587	260	
jedilna miza	2,40	plastika	0,05	330	180				
stol	0,40	les	0,03	365	150				
kuhinja	6,48	kuhinja	0,05	500	200	229	727	200	
drevo	2,00	plastika	0,01	5500		23	94	89	(a)
omara	2,38	celuloza	0,20	600	250	155	5	350	

V primerih P6 smo predvideli, da so severna vrata sprva zaprta. Odprejo se pri času 400 s od začetka simulacije. Takrat se iz modela odstrani tudi odprtina, ki predstavlja prehod v mansardo. Desno okno in vrata na teraso na južnem delu stavbe sta tekom simulacije zaprta. Leva odprtina na jugu stavbe je tokrat za 1,0 m krajša z desne strani. Ovire, ki predstavljajo te odprtine, se iz modela odstranijo v primeru, da se segrejejo do 300 °C.

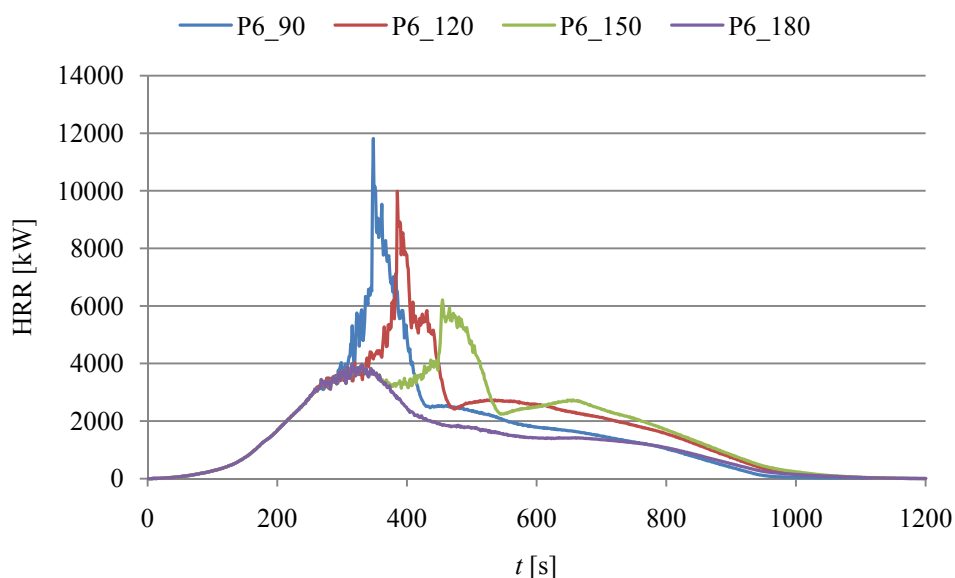
Z opazovanjem simulacije požara smo za vsak primer približno ocenili čas odstranitve ovire iz modela, ki ponazarja levo ( $t_L$ ) oziroma desno okno ( $t_D$ ) ter čas vžiga omare ( $t_{omara}$ ) in božičnega

drevesa ( $t_{drevo}$ ). Poleg tega je v preglednici 15 v zadnjih dveh stolpcih opisno predstavljeno ali se tekom simulacije vžgejo stoli oziroma jedilna miza, s čimer se lahko ustvari slika o napredovanju požara. V prvem stolpcu je predstavljena maksimalna dosežena vrednost hitrosti sproščanja toplote ( $HRR_{max}$ ) v posameznem primeru.

Preglednica 15: Pregled pomembnih sprememb tekom požara za primer P6.

Oznaka primera	$HRR_{max}$ [kW]	$t_L$ [s]	$t_D$ [s]	$t_{omara}$ [s]	$t_{drevo}$ [s]	stoli	jedilna miza
P6_90	11800	350	/	370	380	da	malo
P6_120	10000	380	590	390	400	da	da
P6_150	6000	450	650	380	470	da	da
P6_180	4000	/	/	390	/	malo	/

Na sliki 27 je prikazan časovni potek HRR primerov P6.



Slika 27: Vpliv temperature vžiga drevesa na časovni potek hitrosti sproščanja toplote.

Potek požara v začetni fazi je v vseh primerih enak do nekje 300 s simulacije. Klubska mizica v dnevnem prostoru se vžge in ogenj nato napreduje na zofe. Pri tem se sprošča toplota, ki se z znanimi mehanizmi prenaša po prostoru in segreva zrak ter predmete. Količina sproščene toplote je tolikšna, da se zrak tik pod stropom segreje do 600 °C, kar predstavlja mejo za nastanek požarnega preskoka. V fazi razvitega požara se nato v vseh primerih vžge omara pri približno 380 s. Sprosti se tudi toliko toplote, da se vžge božično drevo, če je temperatura vžiga drevesa 150 °C oziroma manj. V primeru s temperaturo vžiga drevesa 180 °C, se le-to ni vžgalo, torej je tudi požar ostal omejen na dnevni prostor. Na podlagi predstavljenih podatkov lahko sklepamo, da je vžigu drevesa pripomogla tudi

odstranitev ovire, s katero je modelirano levo okno. Iz preglednice 15 je razvidno, da steklo levega okna počí približno 20 s pred vžigom božičnega drevesa. V primeru, ko se božično drevo vžge pri 150 °C, ni opaziti tako nenadnega in strmega naraščaja HRR kot v primerih z nižjima temperaturama vžiga drevesa pa tudi maksimalna vrednost HRR je nesorazmerno nižja od vrednosti v prejšnjih dveh primerih (P6\_90 in P6\_120). Potreben čas, da se ovira, ki v modelu ponazarja božično drevo, segreje na 150 °C, znaša ob upoštevanju vseh okoliščin požara približno 470 s. V tem času pa so klubska mizica in zofe že prešle v fazo pojemanja požara, torej je količina sproščene energije v času vžiga drevesa manjša kot v primerih P6\_90 in P6\_120. To je verjetno tudi razlog, da v primeru P6\_90 kljub vžigu drevesa, požar v celoti ne zajame tudi jedilne mize in stolov okrog nje. V primerih P6\_120 in P6\_150 se požar iz dnevnega prostora razširi naprej na stole in nato še na jedilno mizo. Pri tem je sproščena toplota dovolj velika, da se desno okno segreje na 300 °C in se posledično odstrani iz simulacije ( $t_D$ ). Ocenimo, da se po odstranitvi desnega okna prične faza pojemanja požara, saj do takrat klubska mizica in zofe že pogorijo ter gorita le še omara in jedilna miza. Do vžiga kuhinje ne pride v nobeni simulaciji primera P6.

Iz predstavljenih rezultatov lahko povzamemo, da nižja kot je temperatura vžiga drevesa, hitreje se leto vžge in višja je maksimalna vrednost HRR. V štirih primerih z različno temperaturo vžiga drevesa smo dobili štiri relativno različne požarne scenarije. Iz tega lahko povzamemo, da več kot je neznanih začetnih parametrov, več je možnih načinov širjenja požara. S tem pa se zmanjšuje zanesljivost napovedovanja razvoja požara. Strinjamo se z ugotovitvami podanimi v [23], da je za natančno obravnavanje problema razvoja požara potrebno dobro poznati vhodne parametre. Izkaže se, da so še najbolj zanesljive tiste simulacije, ki temeljijo na predhodno izvedenih eksperimentih in so v neposredni zvezi z modelom.

### 3.8 Vpliv prezračevanja

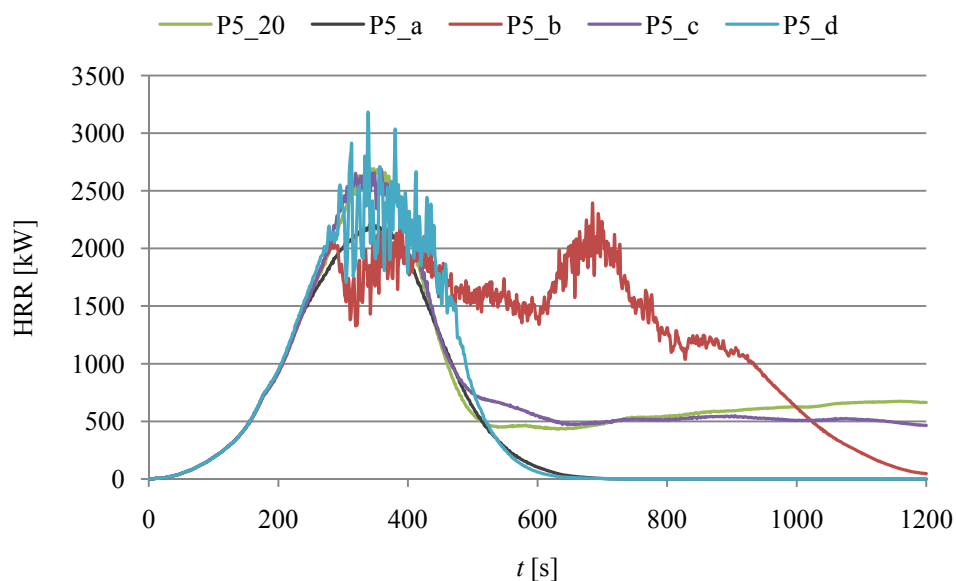
Dinamika požara znotraj prostora je kompleksen proces, katerega napovedovanje dodatno otežijo kritični dogodki kot na primer vžig sosednjih elementov, pok stekla, požarni preskok ali aktivacija sprinklerjev, saj lahko drastično spremenijo potek požara. Poleg naštetega na potek požara bistveno vplivajo tudi odprtine, ki omogočajo odvajanje vročih dimnih plinov iz prostora v okolico. Zaradi tega se znižuje temperatura v prostoru, kar ima za posledico tudi manjše poškodbe gradbenih elementov in ostale opreme v prostoru. Na temperaturo v prostoru in na hitrost gorenja vplivajo še toplotne lastnosti (npr. toplotna kapaciteta in toplotna prevodnost) obodnih gradbenih elementov, ki nekaj sproščene toplote pri požaru absorbirajo.

Za preučevanje vpliva spremenljivih pogojev prezračevanja v modelu pritličja obravnavane stavbe smo izvedli vrsto simulacij. Na sliki 28 so predstavljeni časovni poteki HRR izbranih primerov.

Uporabljena je bila mreža z velikostjo celice 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m. Podatki o geometriji in načinu gorenja so enaki kot v primeru P5\_20 (glej 3.5.2). Primeri P5\_a, P5\_b, P5\_c in P5\_d se med seboj in od primera P5\_20 razlikujejo v začetnih pogojih prezračevanja, ki so predstavljeni v preglednici 16. Oznaka 300 °C pomeni, da je odprtina na začetku zaprta, če pa je tekom simulacije dosežena temperatura 300 °C, se ovira, ki predstavlja to odprtino odstrani iz modela. Izkaže se, da pogoj ni izpolnjen v nobenem od primerov.

Preglednica 16: Začetni pogoji ventilacije.

Primer	Severna vrata	Južna vrata	Levo okno	Sredinsko okno	Desno okno	Odprtina v stropni plošči
P5_20	zaprto	odprto	300 °C	odprto	300 °C	zaprto
P5_a	zaprto	300 °C	odprto	300 °C	300 °C	zaprto
P5_b	zaprto	300 °C	za 1 m krajše z desne – odprto, sicer 300 °C	300 °C	300 °C	zaprto
P5_c	zaprto	zaprto	300 °C	300 °C	odprto	zaprto
P5_d	zaprto	zaprto	300 °C	300 °C	300 °C	odprto



Slika 28: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote pri različnih ventilacijskih pogojih.

Prezračevanje se v posameznih primerih precej razlikuje, napovedan potek HRR pa je opazno drugačen le v primeru P5\_b (slika 28). V vseh primerih je viden enak potek faze začetnega požara približno do 240 s. V tem času se ogenj iz vira vžiga (klubska mizica) razširi na zofe. Nato na potek gorenja vidneje vplivajo ventilacijski pogoji. Fazo razvitega požara lahko enačimo z doseženim vrhom, to je v P5\_20 in P5\_c približno 2600 kW ter v primeru P5\_a približno 2200 kW. Za primer

P5\_d lahko rečemo, da faza razvitega požara traja nekoliko dlje, približno do časa 150 s, maksimalna dosežena vrednost HRR pa je pri tem povprečno 1800 kW. Faze pojemanja požara obravnavanih primerov se med seboj bolj razlikujejo. Podobnost v poteku požara v fazi pojemanja je opaziti le v primerih P5\_20 in P5\_c, v katerih vodoravni plato od približno 550 s naprej ponazarja gorenje omare. V primeru P5\_b gori samo še omara nekje od 850 s pa do konca simulacije. V primerih P5\_a in P5\_d omara ne zagori in, ko prenehajo goreti zofe ter klubska mizica, požar ugasne (pri pribl. 620 s).

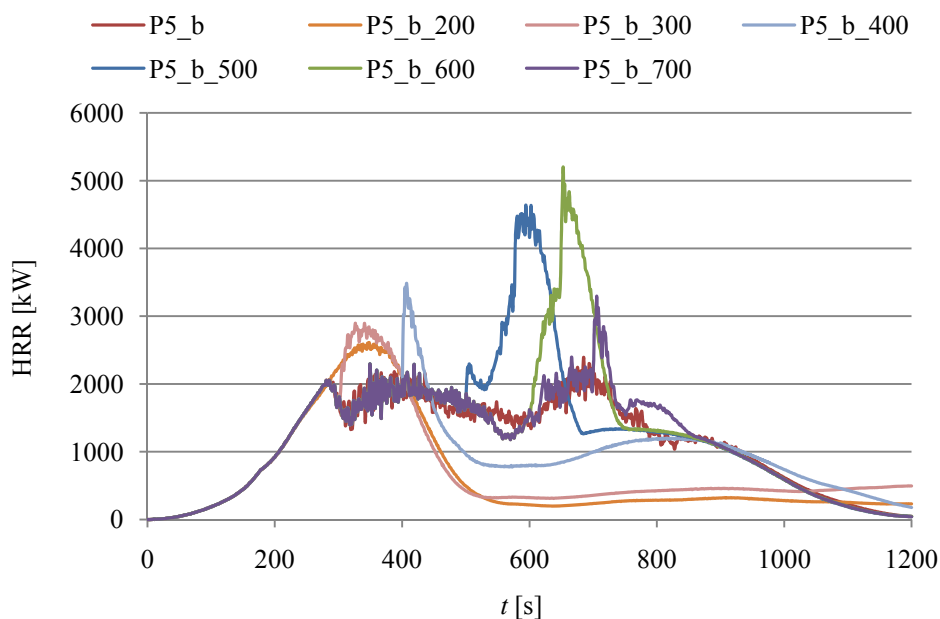
V vseh primerih, razen P5\_a, je gorenje nadzorovano s strani kisika. V primeru P5\_a je odprto levo okno tekom celotne simulacije, ravno z namenom, da požar v prostoru ne bi bil kontroliran s koncentracijo kisika. Kljub temu se ogenj ne razširi po prostoru. Predvidevamo, da se skozi odprtino in preko oboda stavbe izgubi več toplotne kot pa se je sprosti v procesu gorenja.

V primerih P5\_20, P5\_c in P5\_d pride po sproščeni dovolj veliki količini toplotnega toka do manjšega požarnega preskoka. Koncentracija kisika v zraku že pred požarnim preskokom ni bila visoka, po njem pa se poraba kisika še poveča. Stopnja sproščanja goriva je predpisana, zato ob pomanjkanju kisika v prostoru ostajajo nezgoreli plini goriva, ki lahko preprečujejo vstop svežega zraka v prostor. Sčasoma se vroči dimni plini začnejo v obliki gorečih delcev premikati proti odprtinam, ki niso v neposredni bližini ognja. V primeru P5\_d je to odprtina v stropni plošči, v primeru P5\_20 sredinsko okno in južna vrata, v primeru P5\_c pa desno okno. Proces gorenja se po tem relativno hitro zaključi, saj so toplotne izgube v okolico večje od sproščene toplote. Vstopanje svežega zraka v prostor očitno ni dovolj hitro oziroma ne v zadostni količini, da bi omogočilo reakcijo sproščenih plinov goriva s kisikom in s tem podaljšalo proces gorenja.

V primeru P5\_b koncentracija kisika v prostoru upada do približno 280 s, ko se pojavi tudi požarni preskok. Vroči dimni plini nato gorijo vse nekje do časa 800 s. Očitno je bilo v primeru P5\_b z lokacijo in dimenzijami odprtine vzpostavljeno ravnovesje med energijskimi izgubami in vstopanjem zadostne količine kisika, ki je z zgorevanjem omogočila ohranitev procesa gorenja in s tem sproščanja toplote. Podobno kot v [23] smo v primeru P5\_b opazili zadrževanje vročih dimnih plinov v obliki plamenov v bližini odprtin. To lahko vodi k previsokim napovedim temperature blizu odprtin in prenizkim stran od njih. V primeru P5\_b pa lahko pripomore tudi k vžigu drevesa okrog 600 s, kar je na sliki 28 opazno v povečanju HRR. Požarni scenarij P5\_b se je izkazal za najbolj neugodnega, saj dinamika zraka povzroči daljše ohranjanje sproščene toplote na enaki ravni (ocenjeni na povprečno 1800 kW).

Nepredvidljiv vpliv ventilacije smo želeli predstaviti s primerjavo poteka HRR v primerih z enakimi začetnimi pogoji prezračevanja ter odpiranjem severnih vrat ob različnih časih tekom simulacije (slika 29). Začetni pogoji prezračevanja so enaki kot v primeru P5\_b (preglednica 16), kjer so severna vrata

vseskozi zaprta. Ostalim primerom, katerih časovni potek HRR je prikazan na sliki 29, je poleg imena P5\_b dodan še čas odstranitve ovire, ki predstavlja severna vrata, iz modela. Na primer ime primera P5\_b\_400 pomeni, da so ventilacijski pogoji enaki kot v primeru P5\_b. Razlika je v tem, da se severna vrata, ki so sprva zaprta, odprejo pri 400 s in ostanejo odprta do konca simulacije. V vseh modelih je uporabljena mreža 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m.



Slika 29: Časovni potek hitrosti sproščanja toplote pri različnih časih odpiranja severnih vrat.

V primerih P5\_b\_200 in P5\_b\_300 je maksimalna vrednost HRR višja kot v primeru P5\_b. Pri približno 500 s se ogenj iz zof prenese na omaro, ki je nato edini goreč predmet v prostoru. Odstranitev severnih vrat v požarnih scenarijih P5\_b\_200 in P5\_b\_300 ima na razmere v prostoru ugoden vpliv glede na primer P5\_b. Toplotne izgube skozi odprtine in preko oboda stavbe so dovolj velike, da požar postopoma zamre še preden pride do požarnega preskoka. V primeru P5\_b\_400 ima odstranitev severnih vrat prav tako ugoden vpliv glede na primer P5\_b. Požarni preskok, ki je v primeru P5\_b\_400 opazen od nekje 300 s naprej, se kmalu po spremembi ventilacijskih pogojev zaključi in požar preide v fazo pojevanja. Od približno 580 s do konca v prostoru gori le še omara, ki ohranja povprečno vrednost HRR okrog 1000 kW do nekje 900 s. V primerih P5\_b\_500 in P5\_b\_600 vstop svežega zraka v prostor pri času 500 s oziroma 600 s povzroči nenaden vžig celotnega elementa "vent", s katerim je modelirano drevo. Pri tem temperatura zraka naraste, kar ima za posledico odstranitev levega in sredinskega okna okrog 580 s v P5\_b\_500 oziroma okrog 650 s v P5\_b\_600. Vžig drevesa je na sliki 29 viden v povišanju HRR in doseženih maksimalnih vrednostih okrog 5000 kW. Po spremembi ventilacije v primerih P5\_b\_500 oziroma P5\_b\_600 ni opaziti gibanja gorečih dimnih plinov proti severnim vratom. Po doseženih maksimalnih vrednostih začne globalni HRR padati in se na kratko stabilizira okrog 1100 kW. Takrat je gorenje drevesa končano in do konca gori



samo še omara. Požarni scenarij P5\_b\_700 je ugodnejši od prejšnjih dveh. Po odprtju severnih vrat je ponovno opaziti goreče plamene v zraku in vžig drevesa, kar je na sliki 29 vidno s skokom HRR na maksimalno vrednost približno 3300 kW okrog 700 s. Po požarnem preskoku požar hitro upade, pojenja tudi gorenje drevesa in tako kot v vseh primerih do konca gori zgolj omara.

Iz zgoraj prikazanih rezultatov povzamemo, da imajo lahko velike odprtine blizu požara ugoden vpliv na razmere v prostoru. Skoznje se v okolico odvaja toplota, kar zmanjša temperature v prostoru in lahko povzroči relativno hiter zaključek gorenja. Manjše odprtine lahko v pravi kombinaciji povzročijo ekstremne požarne scenarije. Ocena velikosti odprtin je odvisna od volumna požarnega sektorja. Možnih kombinacij ventilacijskih pogojev je že ob nekaj odprtinah ogromno, še posebej, če vključimo še njihovo naknadno odpiranje oziroma zapiranje. Ponovno se izkaže, da je zanesljivejši pristop simuliranja požara v modelih z znanimi začetnimi podatki. Poleg tega se v [23] dotaknejo tudi vprašanja o natančnosti napovedovanja rezultatov v bližini odprtin in plamenov, predvsem v fazah po požarnem preskoku oziroma odstranitvi stekla. Ob neznanih pogojih prezračevanja je trenutno najbolj smiselno z vidika zanesljivosti simulirati objekte s čim manj naknadno odprtimi odprtinami. Pri simulaciji požara v kompleksnejših modelih so nujni predhodno pridobljeni podatki, bodisi iz neposredno z modelom povezanih eksperimentov ali podobno kot v [22] in [37] iz rekonstrukcije dogodkov po nesrečah s pomočjo video posnetkov.

## 4 PREVERJANJE ODPORNOSTI JEKLENEGA NOSILCA V POŽARNEM PROJEKTNEM STANJU

V tem poglavju je na preprost način prikazana uporaba performančnega projektiranja za dokaz požarne odpornosti jeklenega nosilca HEA 280 v primeru najbolj neugodnega požarnega scenarija. Glede na ugotovitve iz prejšnje točke je kritični požar lokaliziran v dnevnem prostoru in zajema območje neposredno okrog nosilca. V požarnem delu analize je na podlagi izbranega požarnega scenarija in projektnega požara pridobljen kritični časovni potek temperature zraka vzdolž nosilca. Za ta del analize je uporabljen program FDS. Za oceno požarne odpornosti nosilca so uporabljene poenostavljene računske metode kot jih predpisujejo standardi Evrokod. S temperaturno analizo je določena časovna razporeditev temperature po prečnem prerezu obravnavanega nosilca. V mehanski analizi pa je s poenostavljenimi metodami, ki jih podaja SIST EN 1993-1-2 [5], preverjena odpornost nosilca v požarnem projektne stanju.

### 4.1 Postopki projektiranja požarnovarnih konstrukcij

Požarna varnost gradbenih konstrukcij predstavlja pomemben del njihove varnosti. Z ustreznim projektiranjem požarne odpornosti konstrukcij zagotavljamo ustrezno varnost le-teh med požarom. Za oceno obnašanja konstrukcije oziroma njenega dela med požarom se med drugim uporabljajo modeli naravnih požarov, ki jih skladno s [27] razdelimo na poenostavljene in točnejše požarne modele. Poenostavljeni požarni modeli opisujejo jakost požara v obliki modeliranih požarnih krivulj, ki podajajo spreminjanje temperature plinov v okolici površine elementa kot funkcijo časa in temeljijo na fizikalnih parametrih. Parametri, ki določajo pogoje v požarnem sektorju so: površina sektorja, prezračevanje, toplotne lastnosti materiala oboda, gostota požarne obremenitve, hitrost razvoja požara, uporaba različnih aktivnih ukrepov gašenja in drugi. Točnejši požarni modeli temeljijo na osnovi ohranjanja mase in energije ter upoštevanju lastnosti plinov. Med točnejše požarne modele se med drugim uvrščajo tudi hidrodinamični računski modeli, ki podajajo časovno in prostorsko odvisen razvoj temperature v sektorju. FDS zadosti zgornjim kriterijem, zato je požarna analiza obravnavanega jeklenega nosilca izvedena z uporabo točnejšega ali naprednega požarnega modela.

Dokaz požarne varnosti konstrukcije oziroma njenega dela je osnovan na uporabi računskega modela konstrukcijskega sistema, ki mora skladno s [5] odražati pričakovano obnašanje konstrukcije oziroma njenega dela med požarom. Pri tem je potrebno dokazati, da v celotnem času  $t$  izpostavljenosti konstrukcije oziroma njenega dela požaru velja:

$$R_{fi,d} \geq E_{fi,d}, \quad (12)$$

kjer je  $E_{fi,d}$  projektna vrednost notranjih sil pri požarnem projektnejem stanju, določena v skladu z [27] in  $R_{fi,d}$  pripadajoča projektna odpornost v požarnem projektnejem stanju. Požarna odpornost elementa gradbene konstrukcije je sposobnost, da določen čas izpolnjuje zahteve glede stabilnosti (nosilnosti), celovitosti in/ali toplotne izolativnosti.

Za zadostitev zahteve (12) so v standardih Evrokod dovoljene naslednje metode projektiranja:

- *detajliranje* v skladu s priznanimi projektnimi rešitvami (s tabeliranimi podatki oziroma s preizkušanjem),
- *poenostavljene računske metode* za določene vrste konstrukcijskih elementov in
- *napredne računske metode* za simulacijo mehanskega obnašanja konstrukcijskih elementov, delov konstrukcij ali celotnih konstrukcij med požarom. Napredne računske metode morajo omogočiti realno oceno obnašanja konstrukcije med požarom. Takšna ocena je mogoča samo v primeru, če ti modeli vsebujejo vse bistvene fizikalne in kemijske procese obnašanja konstrukcije in njenih sestavnih delov med požarom.

V tej nalogi so uporabljene poenostavljene računske metode za oceno požarne odpornosti enostavnih jeklenih konstrukcijskih elementov, kot jih predpisujejo standardi Evrokod. Poenostavljene računske metode projektiranja, ki so namenjene le približni oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov gradbenih konstrukcij, so razdeljene v dva nepovezana dela. To sta:

- *temperaturna analiza*: pri temperaturni analizi glede na toplotni vpliv določimo časovno razporeditev temperatur obravnavanega konstrukcijskega elementa (v nadaljevanju nosilca),
- *mehanska analiza*: v mehanski analizi preverjamo požarno varnost nosilca skladno z zahtevo (12). Pri tem lahko uporabimo poenostavljene metode, ki jih podaja standard [5].

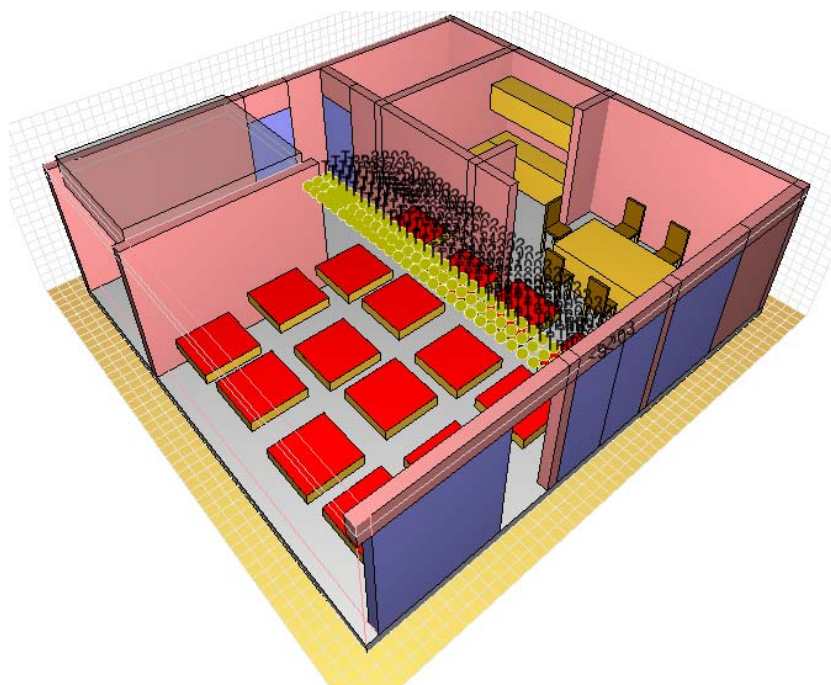
V nadaljevanju sta predstavljena oba dela analize. Pred tem je določen ustrezen požarni scenarij.

## 4.2 Projektni požarni scenarij in projektni požar (primer P7)

Požarni scenarij predstavlja kvalitativen opis poteka požara s časovno opredeljenimi ključnimi dogodki, ki označujejo požar in ga razlikujejo od drugih možnih požarov. Navadno definira proces vžiga in širjenja požara, stopnjo polno razvitega požara ter stopnjo pojemanja požara upoštevajoč lastnosti okolice in sistema zgradbe, ki vplivajo na potek požara. Za določitev časovno odvisnega temperaturnega profila zraka v okolici obravnavanega nosilca HEA 280 smo na podlagi predhodnih analiz izbrali požarni scenarij P7.

V primeru P7 je požar, po zgledu [28], modeliran v obliki šahovnice s 16 elementi "vent". Ti so velikosti 1 m x 1 m in so razporejeni po dnevnem prostoru kot prikazuje slika 30. Od tal so naključno

dvignjeni 0,8 m oziroma 1,0 m, kar ima bolj neugodne posledice za nosilno stropno konstrukcijo kot če bi bil požar modeliran na tleh [39]. Vsakemu elementu "vent" so predpisane enake lastnosti požara, za katerega je značilno sproščanje toplote po načinu (a) (glej 3.3.6). Upoštevali smo, da je hitrost razvoja požara srednja  $t_a = 300$  s, gostota požarne obtežbe  $q_{f,d} = 780$  MJ/m<sup>2</sup> in največja hitrost sproščanja toplote na 1 m<sup>2</sup> požara v gorivno nadzorovanih pogojih  $RHR_f = 375$  kW/m<sup>2</sup>. Območje požara je omejeno na dnevni prostor z ocenjeno površino  $A_f = 16$  m<sup>2</sup>. Vse modelirane ovire v prostoru so negorljive. V modelu se nahajata dve odprtini, in sicer odprtina v stropni plošči za prehod v mansardo ter odprtina, širine 1 m in višine 2,4 m na južni fasadi (slika 30). Ventilacijski pogoji se tekom simulacije ne spreminjajo. V primeru P7 je uporabljena velikost celice mreže 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m.

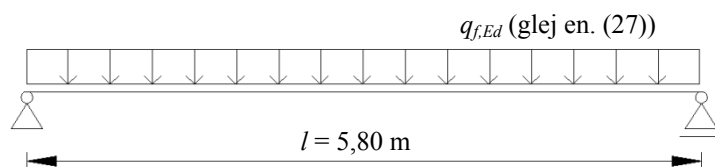


Slika 30: Računski model v primeru P7.

Jekleni nosilec HEA 280 ni modeliran v simulaciji P7, saj po ugotovitvah v [36], ne bi bistveno spremenil toka zraka okrog njega. Torej izpustitev ovire nosilca iz modela nima pomenljivega vpliva na dosežene maksimalne temperature zraka okrog nosilca. Merilniki temperature so locirani v vsaki celici vzdolž namišljenega nosilca, in sicer v celici tik pod stropom, ki predstavlja sredino namišljenega nosilca ter v levi in desni sosednji celici. Skupno je v modelu 84 merilnikov temperature, ki so na sliki 30 prikazani z rumenimi pikami in naj hkrati služijo tudi za prikaz lokacije jeklenega nosilca v prostoru. Z upoštevanjem rezultatov skupine sosednjih merilnikov se izognemo morebitnemu lokalnemu odstopanju rezultatov in hkrati pridobimo na njihovi zanesljivosti [38]. Za določitev najbolj neugodnega napovedanega časovnega poteka temperature zraka vzdolž nosilca smo uporabili povprečenje v prostoru kot je predlagano v [36]. Izračunali smo povprečje temperatur, izmerjenih s

šestimi sosednjimi merilniki vzdolž nosilca. Na podlagi dobljenega najbolj neugodnega časovnega poteka temperature smo preverili požarno odpornost jeklenega nosilca HEA 280 kot je prikazano v nadaljevanju.

### 4.3 Podatki o obtežbi, materialu in geometriji prečnega prereza



Slika 31: Računski model nosilca.

Prečni prerez:

HEA 280:	$h = 270 \text{ mm}$	$r = 24 \text{ mm}$	$I_z = 4760,0 \text{ cm}^4$
	$b = 280 \text{ mm}$	$d = 196 \text{ mm}$	$I_t = 62,10 \text{ cm}^4$
	$t_f = 13 \text{ mm}$	$A = 97,3 \text{ cm}^2$	$I_w = 785400 \text{ cm}^6$
	$t_w = 8 \text{ mm}$	$W_{el,y} = 1010,0 \text{ cm}^3$	

Obtežba:	$g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
	$q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
	$b = 2,9 \text{ m}$ (vplivna širina znaša polovico razpetine nosilca)

Material:	jeklo S 235, $f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$
	$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$
	$G = 8100 \text{ kN/cm}^2$

### 4.4 Temperaturna analiza

Pri določanju temperatur nosilca med požarom ne naredimo velike napake, če predpostavimo, da je temperatura celotnega požarnega prostora ali pa vsaj dela na območju vzdolž nosilca enakomerna, kar bistveno poenostavi temperaturno analizo. V tem primeru izračunamo časovno razporeditev temperatur med požarom le v karakterističnem prečnem prerezu nosilca, saj se temperatura vzdolž nosilca ne spreminja. Pri tem je potrebno, skladno z metodo za izračun razvoja temperatur po prečnem prerezu jeklenega nosilca [5], upoštevati temperaturno odvisnost specifične toplote jekla, ki je ena izmed temperaturno odvisnih toplotnih lastnosti jekla.

#### 4.4.1 Toplotne lastnosti ogljikovih jekel

##### Specifična toplota

Skladno s [5] je na sliki 32 in s sistemom enačb (13) - (16) prikazano spreminjanje specifične toplote jekla  $c_a$  v odvisnosti od temperature:

- za  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$  :

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3 \quad [\text{J/kgK}] \quad (13)$$

- za  $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$  :

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J/kgK}] \quad (14)$$

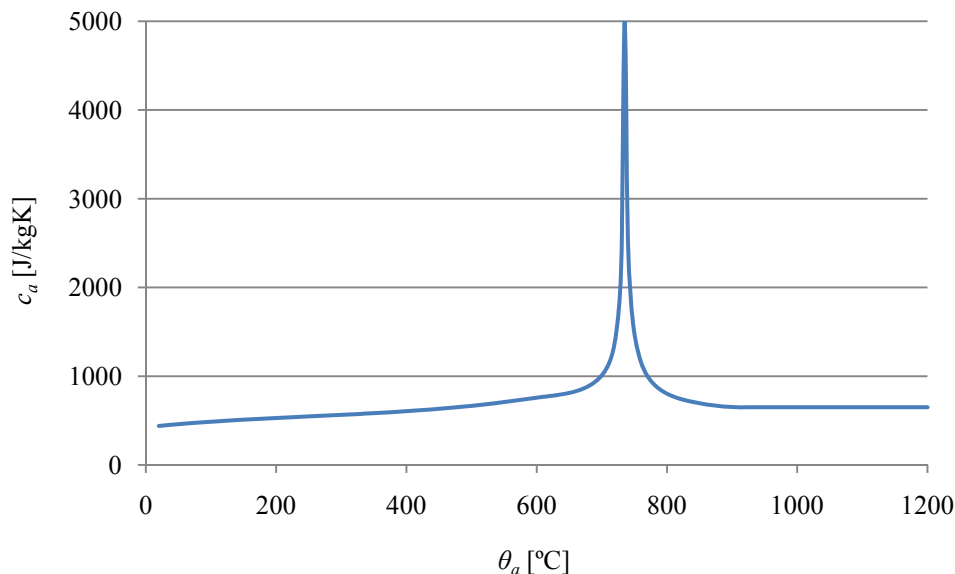
- za  $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$  :

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [\text{J/kgK}] \quad (15)$$

- za  $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$  :

$$c_a = 650 \quad [\text{J/kgK}] \quad (16)$$

kjer je  $\theta_a$  [°C] temperatura jekla.



Slika 32: Specifična toplota jekla v odvisnosti od temperature.

## Gostota

Za gostoto jeka  $\rho_a$  se predpostavi, da je neodvisna od temperature:

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3. \quad (17)$$

## Projektne vrednosti toplotnih lastnosti jekla

Projektne vrednosti toplotnih lastnosti materiala  $X_{d,fi}$  se izračunajo na način:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (18)$$

če povečanje vrednosti lastnosti deluje na varnost ugodno, oziroma na način:

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,\theta}, \quad (19)$$

če povečanje vrednosti lastnosti deluje na varnost neugodno. V enačbah (18) in (19) je  $X_{k,\theta}$  vrednost toplotne lastnosti materiala v požarnem projektnejem stanju, ki je v splošnem odvisna od temperature materiala,  $\gamma_{M,fi}$  pa delni varnostni faktor ustrezne lastnosti materiala v požarnem projektnejem stanju. Skladno s [5] je priporočena vrednost za  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ .

### 4.4.2 Razvoj temperatur v nezaščitenih jeklenih elementih

Ob predpostavki, da je potek temperature po jeklenem prerezu enakomeren, podaja [5] poenostavljen postopek za račun razvoja temperature nezaščitenih jeklenih elementov. V nezaščitenih jeklenih elementih prirastek temperature  $\Delta\theta_{a,t}$  v časovnem intervalu  $\Delta t$  določimo z naslednjo enačbo, ki jo rešujemo iterativno:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (20)$$

kjer so:

- $k_{sh}$  korekcijski faktor za vplive zasenčenja,
- $A_m/V$  faktor prereza za nezaščiten jekleni element [ $\text{m}^{-1}$ ],
- $A_m$  površina elementa na enoto dolžine [ $\text{m}^2/\text{m}$ ],
- $V$  volumen elementa na enoto dolžine [ $\text{m}^3/\text{m}$ ],

- $c_a$  specifična toplota jekla [J/kgK],  
 $\rho_a$  gostota jekla [kg/m<sup>3</sup>],  
 $\dot{h}_{net}$  projektna vrednost neto toplotnega toka na enoto površine [W/m<sup>2</sup>] in  
 $\Delta t$  časovni interval [s].

Za I- prereze pod vplivom realnega požara se korekcijski faktor za vplive zasenčenja izrazi kot:

$$k_{sh} = [A_m / V]_b / [A_m / V], \quad (21)$$

kjer je  $[A_m / V]_b$  faktor prereza za namišljeno škatlo, ki objema I-prerez. V [5] so v obliki preglednice podani nekateri primeri za določitev faktorja prereza za nezaščitene jeklene elemente. Faktor  $A_m / V$  ne sme biti manjši od 10 m<sup>-1</sup>. Časovni interval  $\Delta t$  ne sme biti daljši od 5 sekund.

Projektno vrednost neto toplotnega toka  $\dot{h}_{net}$  določimo v skladu s [27]. Na površini, izpostavljeni ognju, je potrebno toplotni tok  $\dot{h}_{net}$  skozi površino elementa določiti ob upoštevanju prenosa toplote zaradi konvekcije ter sevanja:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [\text{W/m}^2]. \quad (22)$$

Konvekcijski del neto toplotnega toka  $\dot{h}_{net,c}$  je sorazmeren temperaturni razliki okolice in površine ter se zapiše z izrazom:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2], \quad (23)$$

kjer je  $\alpha_c$  [W/m<sup>2</sup>K] prestopni koeficient,  $\theta_g$  [°C] temperatura plinov v okolici požaru izpostavljenega elementa in  $\theta_m$  [°C] temperatura površine elementa. Skladno s [27] smo za prestopni koeficient privzeli vrednost  $\alpha_c = 35$  W/m<sup>2</sup>K.

Toplotni pretok zaradi sevanja na enoto ploščine mejne ploskve je določen z izrazom:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2], \quad (24)$$

kjer so:

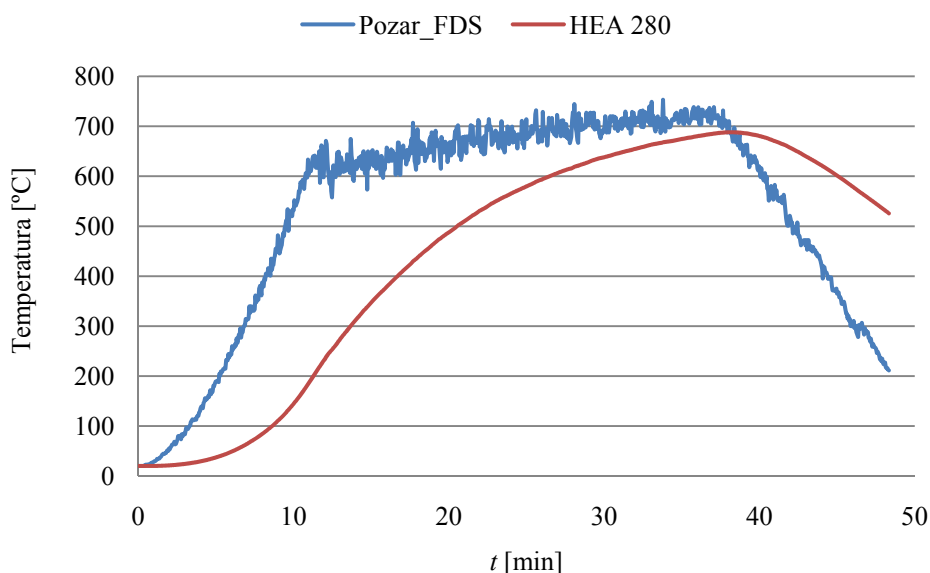
- $\Phi$  faktor oblike,  
 $\varepsilon_m$  emisivnost površine elementa,  
 $\varepsilon_f$  emisivnost plamenskega telesa,



- $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta ( $= 5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]),  
 $\theta_r$  efektivna temperatura sevanja požara [°C] in  
 $\theta_m$  površinska temperatura elementa [°C].

Pri tem upoštevamo, da je faktor oblike  $\Phi = 1$  in emisivnost plamenskega telesa  $\varepsilon_f = 1$ . Skladno s [5] je emisivnost jeklenih površin za ogljikovo jeklo  $\varepsilon_m = 0,7$ .

Slika 33 prikazuje najbolj neugoden časovni potek temperature zraka v okolici obravnavanega nosilca iz primera P7 (Pozar\_FDS) in časovni razvoj temperature v obravnavanem nosilcu (HEA 280), ki je dobljen s temperaturno analizo (enačbe (20) - (24)). Maksimalna temperatura nosilca znaša  $\theta = 688$  °C in je dosežena po približno 38 minutah od začetka požara. Kot je že bilo omenjeno, se predpostavi, da je po celotnem prečnem prerezu nosilca temperatura enaka ( $\theta = 688$  °C).



Slika 33: Časovni razvoj temperature zraka v okolici nosilca, dobljen s programom FDS in časovni razvoj temperature v jeklenem nosilcu HEA 280.

#### 4.5 Mehanska analiza

Skladno s [5] požarno odpornost ocenimo s pomočjo poenostavljenih računskih metod. Te metode temeljijo na konservativnih predpostavkah in zajemajo dokaj preproste računske postopke, primerne za dokazovanje nosilnosti posameznih elementov jeklenih konstrukcij ter v določenih primerih tudi enostavnih podkonstrukcijskih sistemov. Nikakor pa te metode niso primerne za analizo celotne konstrukcije, ki je izpostavljena požaru. Požarno odpornost prostoležečega jeklenega nosilca torej dokažemo skladno z enačbo (12).

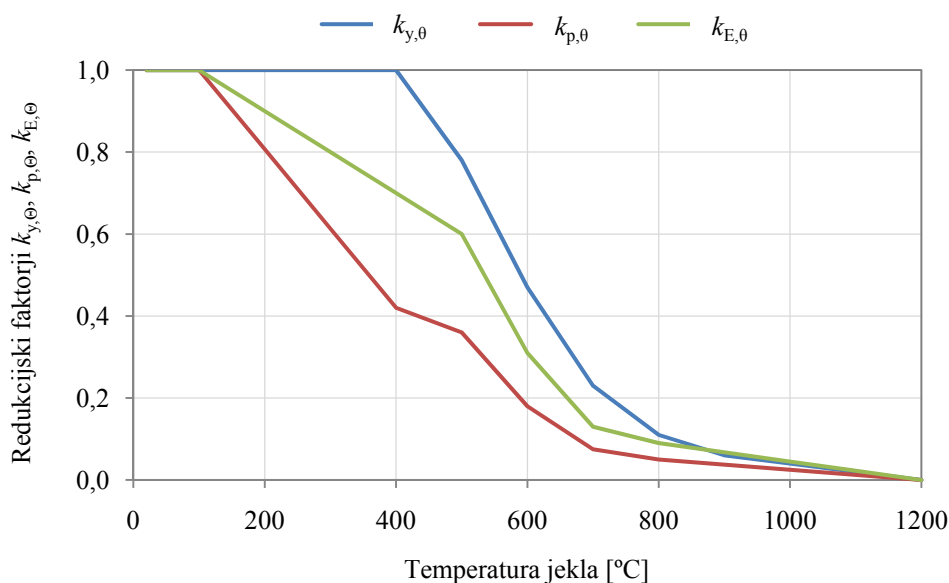
#### 4.5.1 Mehanske lastnosti ogljikovih jekel pri povišanih temperaturah

Z višanjem temperature se zmanjšuje togost jeklenih elementov, saj tako modul elastičnosti kakor tudi napetost na meji tečenja nelinearno padata. Izbira ustreznega materialnega modela jekla pri povišanih temperaturah je zato bistvenega pomena. Skladno s [5] se pri hitrosti segrevanja med 2 in 50 K/min trdnostne in deformacijske lastnosti jekla pri povišani temperaturi določijo iz napetostno-deformacijske zveze, ki je opisana s tremi temperaturno odvisnimi parametri. Ti parametri so: meja proporcionalnosti  $f_{p,\theta}$ , karakteristična napetost na meji tečenja  $f_{y,\theta}$  in elastični modul  $E_{a,\theta}$ . Določijo se s pomočjo tako imenovanih redukcijskih faktorjev za:

- efektivno napetost tečenja glede na napetost tečenja pri  $20^\circ\text{C}$ :  $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$ ,
- mejo proporcionalnosti glede na napetost tečenja pri  $20^\circ\text{C}$ :  $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$  in
- elastični modul glede na elastični modul pri  $20^\circ\text{C}$ :  $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$ .

Za mehanske lastnosti jekla pri  $20^\circ\text{C}$  privzamemo vrednosti iz [41] za projektiranje pri normalni temperaturi. Spreminjanje redukcijskih faktorjev  $k_{p,\theta}$ ,  $k_{y,\theta}$  in  $k_{E,\theta}$  v odvisnosti od temperature je prikazano na sliki 34 in v preglednici 17.

V nadaljevanju bomo potrebovali pri temperaturi  $\theta = 688^\circ\text{C}$  redukcijski faktor za efektivno napetost tečenja glede na napetost tečenja pri  $20^\circ\text{C}$   $k_{y,\theta}$  in redukcijski faktor za elastični modul glede na elastični modul pri  $20^\circ\text{C}$   $k_{E,\theta}$ . Določimo ju s pomočjo preglednice 17, pri čemer uporabimo linearno interpolacijo in dobimo vrednosti  $k_{y,\theta} = 0,258$  ter  $k_{E,\theta} = 0,151$ .



Slika 34: Spreminjanje redukcijskih faktorjev v odvisnosti od temperature.

Preglednica 17: Redukcijski faktorji pri povišanih temperaturah.

$\theta$ [°C]	$k_{y,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

### Projektne vrednosti mehanskih lastnosti materiala

Projektne vrednosti mehanskih (trdnostnih in deformacijskih) lastnosti materiala  $X_{d,fi}$  se izračunajo na naslednji način:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \cdot \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}}, \quad (25)$$

kjer je  $k_{\theta}$  temperaturno odvisen redukcijski faktor mehanske lastnosti materiala,  $X_k$  je karakteristična vrednost mehanske lastnosti materiala za projektiranje pri normalni temperaturi in  $\gamma_{M,fi}$  je delni varnostni faktor za ustrezno lastnost materiala v požarnem projektnejem stanju. Skladno s [5] je priporočena vrednost za  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ .

#### 4.5.2 Kombinacija vplivov

Za požarno projektno stanje v skladu s [40] zapišemo kombinacijo vplivov za nezgodna projektna stanja z enačbo:

$$\sum_{j>1} G_{k,j} + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (26)$$

kjer je:

$G_{k,j}$  karakteristična vrednost stalnega vpliva  $j$ ,

- $Q_{k,1}$  karakteristična vrednost prevladujočega spremenljivega vpliva 1,  
 $Q_{k,i}$  karakteristična vrednost spremljajočega spremenljivega vpliva  $i$  in  
 $\psi_2$  faktor za navidezno stalno vrednost spremenljivega vpliva.

Priporočene vrednosti faktorja za navidezno stalno vrednost spremenljivega vpliva  $\psi_2$  so za vplive v stavbah podani v [40] v obliki preglednice. Tako je za bivalne prostore (kategorija uporabe A)  $\psi_2$  enak 0,3.

#### 4.5.3 Obremenitev nosilca v požarnem projektnejem stanju $E_{fi,d}$

Projektne vrednosti notranjih sil pri požarnem projektnejem stanju  $E_{fi,d}$  določimo skladno z nezgodnim projektnejem stanjem pri času  $t = 0$  po [40]. Uporabimo elastično analizo, kjer je obremenitev znatno manjša v primerjavi z obremenitvijo, ki jo uporabimo za običajno dimenzioniranje pri normalni temperaturi. Na podlagi kombinacije vplivov lastne teže  $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$  in koristne obtežbe nosilca  $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$  za požarno projektno stanje izračunamo obremenitev:

$$q_{f,Ed} = g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k = (2 \text{ kN/m}^2 + 0,3 \cdot 2 \text{ kN/m}^2) \cdot 2,9 \text{ m} = 7,54 \text{ kN/m}. \quad (27)$$

Nato določimo projektno vrednost upogibnega momenta na sredini razpona:

$$M_{f,Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot l^2}{8} = \frac{7,54 \text{ kN/m} \cdot 5,8 \text{ m}^2}{8} = 31,7 \text{ kNm} \quad (28)$$

in projektno vrednost strižne sile za požarno projektno stanje:

$$V_{f,Ed} = \frac{q_{f,Ed} \cdot l}{2} = \frac{7,54 \text{ kN/m} \cdot 5,8 \text{ m}}{2} = 21,9 \text{ kN}. \quad (29)$$

#### 4.5.4 Kontrola nosilnosti elementa po SIST EN 1993-1-2

Projektna nosilnost  $R_{fi,d}$  se običajno določi ob predpostavljani konstantni temperaturi po prečnem prerezu s prilagoditvijo projektne nosilnosti pri normalni temperaturi po [41]. Pri tem je treba upoštevati mehanske lastnosti jekla pri povišani temperaturi (glej 4.5.1).

### Razvrstitev prečnih prerezov

Za potrebe poenostavljenih pravil se lahko prečne prereze razvrsti v različne razrede kompaktnosti na enak način kot pri normalni temperaturi, vendar ob upoštevanju zmanjšane parametra  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85, \quad (30)$$

kjer je  $f_y = 235$  MPa napetost tečenja pri 20 °C.

Pasnica, tlak:

$$\frac{c}{t} = \frac{b/2 - t_w/2 - r}{t_f} = 8,6 < 14 \cdot \varepsilon = 11,9 \Rightarrow 3. \text{ razred kompaktnosti} \quad (31)$$

Stojina, upogib:

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = 24,5 < 72 \cdot \varepsilon = 61,2 \Rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti} \quad (32)$$

Prerez uvrstimo v 3. razred kompaktnosti.

### Nosilnost v primeru bočne zvrnitve

Zadostiti je potrebno pogoju:

$$M_{f,Ed} \leq M_{b,f,Rd}, \quad (33)$$

kjer je  $M_{f,Ed}$  projektna vrednost upogibnega momenta pri požarnem projektnejem stanju in  $M_{b,f,Rd}$  projektna vrednost nosilnosti na bočno zvrnitev pri požarnem projektnejem stanju, ki jo določimo z izrazom:

$$\begin{aligned} M_{b,f,Rd} &= \chi_{LT,f} \cdot W_{el,y} \cdot k_{y,0,com} \cdot f_y / \gamma_{M,f} = \\ &= 0,545 \cdot 1010 \text{cm}^3 \cdot 0,258 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0 = 3343,8 \text{ kNcm}, \end{aligned} \quad (34)$$

kjer je:

$W_{el,y}$  elastični odpornostni moment prereza,

$\chi_{LT,f}$  redukcijski faktor za bočno zvrnitev pri požarnem projektne stanju in  
 $k_{y,\theta,com}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri najvišji temperaturi tlačene pasnice  
 $\theta_{a,com} = 688 \text{ °C}$  ( $k_{y,\theta,com} = 0,258$ ).

Vrednost  $\chi_{LT,f}$  se določi na naslednji način:

$$\chi_{LT,f} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} = \frac{1}{1,099 + \sqrt{1,099^2 - 0,817^2}} = 0,545 \quad (35)$$

z redukcijskim faktorjem za bočno zvrnitev:

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + 0,65 \cdot 0,817 + 0,817^2 \right] = 1,099, \quad (36)$$

kjer je

$$\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{235 / f_y [\text{MPa}]} = 0,65 \quad (37)$$

in

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com}} = 0,625 \cdot \sqrt{0,258 / 0,151} = 0,817, \quad (38)$$

kjer je  $k_{E,\theta,com} = 0,151$  redukcijski faktor za modul elastičnosti pri najvišji temperaturi jekla v tlačeni pasnici  $\theta_{a,com} = 688 \text{ °C}$  doseženi v času  $t = 38 \text{ min}$ .

Relativna vitkost pri bočni zvrnitvi pri normalni temperaturi  $\bar{\lambda}_{LT}$  se določi z izrazom:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1010 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{60793 \text{ kNcm}}} = 0,625. \quad (39)$$

$M_{cr}$  je elastični kritični moment bočne zvrnitve, izračunan po enačbi:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi}{k_z l} \sqrt{EI_z GI_t + \frac{\pi^2 EI_z EI_\omega}{(k_\omega l)^2}} = 60793 \text{ kNcm}, \quad (40)$$

pri čemer je:

$C_I = 1,13$  koeficient, ki zajema vpliv poteka upogibnih momentov vzdolž nosilca za nosilec s prečno obtežbo, ki deluje v težišču prečnega prereza,  
 $k_z = 1, k_{\omega} = 1$  robni pogoji in  
 $l = 580 \text{ cm}$  dolžina nosilca.

Kontrola bočne zvrnitve:

$$M_{f,Ed} = 31,7 \text{ kNm} \leq M_{b,f,Rd} = 33,4 \text{ kNm} \quad \checkmark \quad (41)$$

### Strižna nosilnost

Zadostiti je potrebno pogoju:

$$V_{f,Ed} \leq V_{f,Rd} \quad (42)$$

kjer je  $V_{f,Ed}$  projektna vrednost strižne sile pri požarnem projektnejem stanju in  $V_{f,Rd}$  projektna vrednost strižne nosilnosti pri požarnem projektnejem stanju, ki jo določimo z izrazom:

$$V_{f,Rd} = k_{y,\theta_{web}} \cdot V_{Rd} \cdot [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,f}] = 0,258 \cdot 264,8 \text{ kN} \cdot [1,0/1,0] = 68,4 \text{ kN}, \quad (43)$$

kjer je:

$V_{Rd}$  projektna strižna nosilnost bruto prečnega prereza pri normalni temperaturi,  
 $k_{y,\theta_{web}}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri temperaturi jekla  $\theta_{web}$  ( $k_{y,\theta_{web}} = 0,258$ ) in  
 $\theta_{web}$  povprečna temperatura stojine prečnega prereza.

V primeru enakomerne razporeditve temperature po prečnem prerezu je povprečna temperatura stojine prečnega prereza kar enaka enakomerni temperaturi po prečnem prerezu  $\theta_{web} = 688 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Projektna strižna nosilnost pri normalni temperaturi se določi z izrazom:

$$V_{Rd} = \frac{A_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{19,5 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 264,8 \text{ kN}, \quad (44)$$

kjer je  $A_w$  površina stojine:

$$A_w = t_w \cdot h_w = t_w \cdot (h - 2 \cdot t_f) = 0,8 \cdot (27 - 2 \cdot 1,3) = 19,5 \text{ cm}^2. \quad (45)$$

Preverimo pogoj (42):

$$V_{f,Ed} = 21,9\text{kN} \leq V_{f,Rd} = 68,4\text{kN} \quad \checkmark \quad (46)$$

Z enačbama (41) in (46) je prikazano izpolnjevanje pogojev nosilnosti na bočno zvrnitev (33) in strižne nosilnosti (42) obravnavanega nosilca, kar pomeni da nosilec prenese predpisano požarno obremenitev in ohrani nosilnost v primeru požarnega scenarija P7.



## 5 ZAKLJUČEK

V prvem delu diplomske naloge je bil prikazan danes še vedno zelo aktualen predpisni način projektiranja požarne varnosti v stavbah. V skladu s 7. členom Pravilnika o požarni varnosti v stavbah [4], kar pomeni v skladu s priporočenimi požarnovarnostnimi ukrepi, predpisanimi v Tehnični smernici za graditev TSG-1-001:2010 Požarna varnost v stavbah [7], je bila izdelana zasnova požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš. Načrtovane rešitve ukrepov varstva pred požarom so bile opisane v tekstualnem in znakovno prikazane v grafičnem delu zasnove požarne varnosti. V obliki strnjene povzetka vsebine izdelane zasnove je bil izpolnjen tudi obrazec izkaz požarne varnosti stavbe.

Drugi del diplomske naloge smo posvetili numerični simulaciji razvoja požara v pritličju enostanovanjske vrstne hiše in s tem povezanimi parametričnimi študijami. Analize smo izvedli z uporabo računalniškega programa Fire Dynamics Simulator. S parametričnimi študijami gostote numerične mreže smo ugotovili velik in nesorazmeren vpliv mreže na rezultate numeričnih simulacij, ki je še izrazitejši pri kompleksnejših modelih. Pokazali smo, da je optimalno gostoto mreže v kombinaciji z natančnostjo rezultatov in sprejemljivim računskim časom potrebno iskati za vsak primer posebej, kar je lahko zelo zamudno. Tu pridejo do izraza pridobljene izkušnje, saj se lahko z njimi ta postopek bistveno skrajša in s tem prihrani na času. Sledila je študija vpliva lokacije izvora požara na izbrane parametre. Ta je pokazala, da je izbor meril, ki se jih želi z numerično simulacijo razvoja požara preveriti, ključnega pomena, saj je njihovem izboru potrebno ustrezno prilagoditi vhodne podatke. S študijama vpliva temperature vžiga ovire drevesa in prezračevanja na izbrane parametre je bila prikazana pomembnost pravilne izbire vrednosti vhodnih parametrov, saj lahko že njihove minimalne spremembe vodijo k precej različnim požarnim scenarijem.

V tretjem delu diplomske naloge smo na preprostem primeru prikazali vedno bolj uveljavljen koncept performančnega projektiranja konstrukcij, pri čemer smo preverili odpornost jeklenega nosilca HEA 280 v požarnem projektnem stanju. Požarno analizo obravnavanega jeklenega nosilca smo razdelili na tri fizikalno smiselne in matematično nepovezane faze. V prvi fazi smo na podlagi rezultatov in izkušenj, predstavljenih v drugem delu naloge, ocenili časovni razvoj temperature v okolici nosilca. Pri tem smo upoštevali najbolj neugoden požarni scenarij. V drugi fazi smo določili časovno spreminjanje temperature v karakterističnem prečnem prerezu nosilca. V zadnji, tretji fazi pa smo z uporabo poenostavljenih računskih metod dokazali, da je nosilec ustrezno požarno odporen, saj ohranja nosilnost v celotnem času izpostavljenosti tudi najbolj neugodnemu požarnemu scenariju.

Za razliko od predpisnega načina projektiranja, kjer so zahteve jasno definirane v raznih standardih in smernicah, zahteva performančni način projektiranja požarne varnosti zelo širok spekter teoretičnega

znanja in ustrezne izkušnje. Poleg tega so pri tovrstnem načinu projektiranja, za doseganje zadovoljive zanesljivosti rezultatov, potrebni številni podatki, ki jih lahko pridobimo le z usmerjenimi eksperimenti (ustrezna baza podatkov danes javno še ni dostopna). Žal so ti eksperimenti pogosto dolgotrajni in povezani z visokimi stroški ter zato za vsakdanjo rabo nesprejemljivi. Ne preseneča torej, da se inženirji v vsakdanji praksi k performančnemu pristopu požarnega načrtovanja še vedno zatekajo zgolj izjemoma. Glede na povedano lahko zaključimo, da bi k širjenju uporabe performančnega načina projektiranja požarne varnosti objektov veliko pripomogla že izdaja dokumenta, v katerem bi bile strnjene dosedanje ugotovitve in podani okvirni napotki za kakovostno rabo koncepta performančnega projektiranja. Zagotovo bi k temu dodatno doprinesla tudi izdaja knjižnice podatkov o lastnostih in načinu gorenja različnih vrst materialov.

## VIRI

- [1] Zakon o graditvi objektov (ZGO-1). Uradni list RS št. 110-5387/2002: 13084.
- [2] Zakon o varstvu pred požarom. Uradni list RS št. 71-2577/1993: 3702.
- [3] Wang, Y., Burgess, I., Wald, F., Gillie, M. 2012. Performance-Based Fire Engineering of Structures. Boca Raton idr., CRC Press: 396 str.
- [4] Pravilnik o požarni varnosti v stavbah. Uradni list RS št. 31-1359/2004: 3752.
- [5] SIST EN 1993-1-2:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje.
- [6] IZS MST 01/2010. Smernica za izdelavo zasnove požarne varnosti. Inženirska zbornica Slovenije, Matična sekcija inženirjev tehnologov in drugih inženirjev: 8 str.
- [7] Tehnična smernica TSG - 1 - 001: 2010. Požarna varnost v stavbah. Ministrstvo za okolje in prostor: 60 str.
- [8] Pravilnik o študiji požarne varnosti. Uradni list RS št. 13-527/1998: 810.
- [9] Uredba o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena. Uradni list RS št. 33-1359/2003: 3868.
- [10] Glavnik, A., Jug, A. 2010. Priročnik o načrtovanju požarne varnosti. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 289 str.
- [11] Buchanan, A. H. 2002. Structural Design for Fire Safety. New Zealand, University of Canterbury: 421 str.
- [12] Society of Fire Protection Engineers. 2008. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4th Edition. Boston, National Fire Protection Association.
- [13] Pravilnik o zaščiti stavb pred delovanjem strele. Uradni list RS št. 28-1192/2009: 3974.
- [14] Pravilnik o izbiri in namestitvi gasilnih aparatov. Uradni list RS št. 67-2964/2005: 6952.
- [15] Pravilnik o požarnem redu. Uradni list RS št. 39-2147/1997: 3528.
- [16] Uporaba računalniških modelov na področju varstva pred požarom. 2007.  
[http://www.sos112.si/slo/tdocs/smernica\\_21.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/smernica_21.pdf) (Pridobljeno 14.10.2012)
- [17] Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV). 2012.  
[http://code.google.com/p/fds-smv/wiki/Downloads\\_Overview?tm=2](http://code.google.com/p/fds-smv/wiki/Downloads_Overview?tm=2) (Pridobljeno 8.9.2012)
- [18] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., idr. 2010. Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5.
- [19] Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for forced and natural convection flows. 2006.  
[http://www.cfd.cad.pl/Thesis\\_P\\_Smardz\\_Rev\\_B.pdf](http://www.cfd.cad.pl/Thesis_P_Smardz_Rev_B.pdf) (Pridobljeno 13.11.2012)

- [20] McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., Floyd, J. 2010. NIST Special Publication 1019-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology: 246 str.
- [21] PyroSim User Manual. 2010.  
<http://www.thunderheadeng.com/downloads/pyrosim/PyroSimManual.pdf>  
(Pridobljeno 13.11.2012)
- [22] Madrzykowski, D., Walton, W. D. 2004. Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations. NIST Special Publication SP-1021: 489 str.
- [23] Rein, G., Empis, A. C., Carvel, R (ur.). 2007. The Dalmarnock Fire Test: Experiments and Modelling. Edinburgh, University of Edinburgh, School of Engineering and Electronics: p. 193-210.
- [24] Jahn, W., Rein, G., Torero, J. L. 2008. The Effect of Model Parameters on the Simulation of Fire Dynamics. Fire Safety Science 9: 1341-1352.  
[doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-1341](https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-1341)
- [25] Drysdale, D. 2002. An Introduction to Fire Dynamics. Chichester, John Wiley and Sons: 451 str.
- [26] Fire Design in Europe. 2010. [http://people.fsv.cvut.cz/~wald/COST\\_C26\\_Prague/pdf/5-1\\_Fire%20design%20in%20Europe\\_sm.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~wald/COST_C26_Prague/pdf/5-1_Fire%20design%20in%20Europe_sm.pdf) (Pridobljeno 18.11.2012)
- [27] SIST EN 1991-1-2:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije.
- [28] Proposal for standardization of performance based design fires in buildings. 2011.  
[http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/fire/ifer/WP6/Thought%20for%20Eurocodes%20upgrade\\_Finland%201%2030%2010%202011.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/fire/ifer/WP6/Thought%20for%20Eurocodes%20upgrade_Finland%201%2030%2010%202011.pdf) (Pridobljeno 19.10.2012)
- [29] Mayfield, C., Hopkin, D. 2011. Design Fires for Use in Fire Safety Engineering. Garston, Watford, BRE Trust: 67 str.
- [30] Natori, A., Kakae N., Kitahori, J., idr. 2006. Development of a Simple Estimation Method of Heat Release Rate based on Classification of Common Combustibles into Category Groups. Fire Science and Technology 25, 1: 31-54.
- [31] Bwalya, A. C., Sultan, M. A., Benichou, N. 2004. Towards the development of design for residential buildings: literature review and survey results of fire loads in canadian homes. Edinburgh, Interflam 2004, 10th International Fire Science and Engineering Conference: 1-6.
- [32] Babrauskas, V., Peacock, R. D. 1992. Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard. Fire Safety Journal 18, 3: 255-272.
- [33] Smernica za uporabo požarnovarnostnega inženirstva pri projektiranju stavb, 6. del: Varnost ljudi – evakuacija, vedenje in odziv uporabnikov stavb. 2004.

- [34] Glavnik, A. (koordinator). 2011. Priročnik odvod dima in toplote. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 425 str.
- [35] Bounagui, A., Bénichou, N., McCartney, C., Kashef, A. 2004. Grid Optimization for the Full-scale Test Facility to Evaluate the Fire Performance of Houses – Part 1 – Basement Fires.
- [36] Heinisuo, M., Laasonen, M., Hyvarinen, T., Berg, T. 2008. Product model in fire safety concept, effect of grid size and obstacles.
- [37] Reconstructing the Station Nightclub Fire – Computer Modeling of the Fire Growth and Spread. 2007. <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire07/PDF/f07061.pdf> (Pridobljeno 22.8.2012)
- [38] Heinisuo, M., Laasonen, M., Hyvarinen, T. 2008. Product modeling in fire safety concept, calculation of steel temperatures.
- [39] Pada, D. 2009. Simulation and Study of Natural Fire in a Wide-Framed Multipurpose Hall with Steel Roof Trusses. Acta Polytechnica 49, 1: 66-70.
- [40] SIST EN 1990:2004. Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij.
- [41] SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

## SEZNAM PRILOG

PRILOGA A:	IZKAZ POŽARNE VARNOSTI STAVBE.....	A1
PRILOGA B:	GRAFIČNI DEL ZASNOVE POŽARNE VARNOSTI ENOSTANOVANJSKIH VRSTNIH HIŠ .....	B1
PRILOGA C:	KLASIFIKACIJA GRADBENIH MATERIALOV GLEDE ODZIVA NA OGENJ PO SIST EN 13501-1 .....	C1

## PRILOGA A: IZKAZ POŽARNE VARNOSTI STAVBE

### Podatki o stavbi

Naziv stavbe: 11211 – Večstanovanjske stavbe

Lokacija stavbe: /

Investitor: /

Odgovorni vodja projekta: /

Odgovorni projektant požarne varnosti: /

Datum izdelave projektne dokumentacije: /

### Požarnovarnostni ukrepi

	Načrtovani ukrepi (PGD)	Izvedeni ukrepi (PID)														
		Ukrep	Datum in podpis	Opombe												
<b>Širjenje požara na sosednje objekte</b>																
Odmiki od mej parcele:	Odmiki objekta od sosednjih parcelnih mej ali cest so naslednji: <ul style="list-style-type: none"> <li>• od sredine javne ceste na južni strani je odmik najmanj 12,5 m,</li> <li>• od sredine javne ceste na vzhodni in zahodni strani je odmik 6,5 m,</li> <li>• od parcelne meje na severni strani je odmik več kot 9,0 m.</li> </ul>															
Požarne lastnosti fasadnih oblog:	ETICS fasada z gorljivo izolacijo razreda najmanj B-d1.															
<b>Nosilnost konstrukcije ter širjenje ognja po stavbi</b>																
Požarna odpornost nosilne konstrukcije:	Požarna odpornost nosilne konstrukcije najmanj R 60. Zunanje stene s požarno odpornostjo REI 60.															
Razdelitev stavbe v požarne sektorje:	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Oznaka</th> <th>Opis</th> <th>Površina</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PS1 - PS4</td> <td>stanovanje</td> <td>186,7 m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>PS1a - PS4a</td> <td>kurilnica</td> <td>5,9 m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>PS5, PS6</td> <td>garaže</td> <td>66,0 m<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Oznaka	Opis	Površina	PS1 - PS4	stanovanje	186,7 m <sup>2</sup>	PS1a - PS4a	kurilnica	5,9 m <sup>2</sup>	PS5, PS6	garaže	66,0 m <sup>2</sup>			
Oznaka	Opis	Površina														
PS1 - PS4	stanovanje	186,7 m <sup>2</sup>														
PS1a - PS4a	kurilnica	5,9 m <sup>2</sup>														
PS5, PS6	garaže	66,0 m <sup>2</sup>														

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice

Požarna odpornost na mejah požarnih sektorjev:	<p>Požarna odpornost mejnih elementov požarnih sektorjev najmanj (R)EI 60.</p> <p>Požarni zid kot zaščita prenosa požara preko strehe v horizontalni smeri RE 60.</p> <p>Streha garaž kot zaščita prenosa požara v vertikalni smeri REI 60.</p> <p>Vrata:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>v stanovanja in garaže EI<sub>130</sub></li> <li>v kurilnico EI<sub>130-C2</sub> (Odpirati se morajo navzven in imeti mehanizem na jekleno vzmet za avtomatsko zapiranje.)</li> </ul> <p>Inštalacijski jaški:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>EI 60, neprepustni za dim in med seboj ločeni po namembnosti</li> <li>iz negorljivih materialov</li> <li>toplotna izolacija prezračevalnih kanalov razreda A1, A2, B ali C</li> </ul> <p>Požarne lopute:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>EI 60-S</li> </ul>			
<b>Evakuacijske poti</b>				
Največje število uporabnikov:	Največje predvideno skupno število oseb v celotnem objektu je 20.			
Število izhodov iz stavbe:	Iz pritličja sta v vsakem stanovanju izvedena 2 izhoda, širine 80 cm ter po 1 izhod iz vsake garaže.			
<b>Naprave za gašenje in dostopne poti</b>				
Oskrba z vodo:	Hidrantno omrežje mora zagotoviti 10 l/s požarne vode, pri obratovnem tlaku najmanj 2,5 bar.			
Število zunanjih hidrantov v oddaljenosti do 80 m od objekta (nadtalni ali podtalni):	1 nadtalen zunanji hidrant, premera najmanj DN 80, v predpisanih razdaljah od objekta.			
Naprave za gašenje z vodo, peno, plini in praškom:	Skupaj je predvidenih 8 gasilnikov tipa 21A (S-6, prah 6 kg) – po 1 v pritličju in mansardi vsakega stanovanja.			
Število dostopov do stavbe za gašenje in reševanje z gasilskimi vozili:	Dostop k objektu in delovna površina za intervencijo sta zagotovljena s severne strani.			

se nadaljuje ...



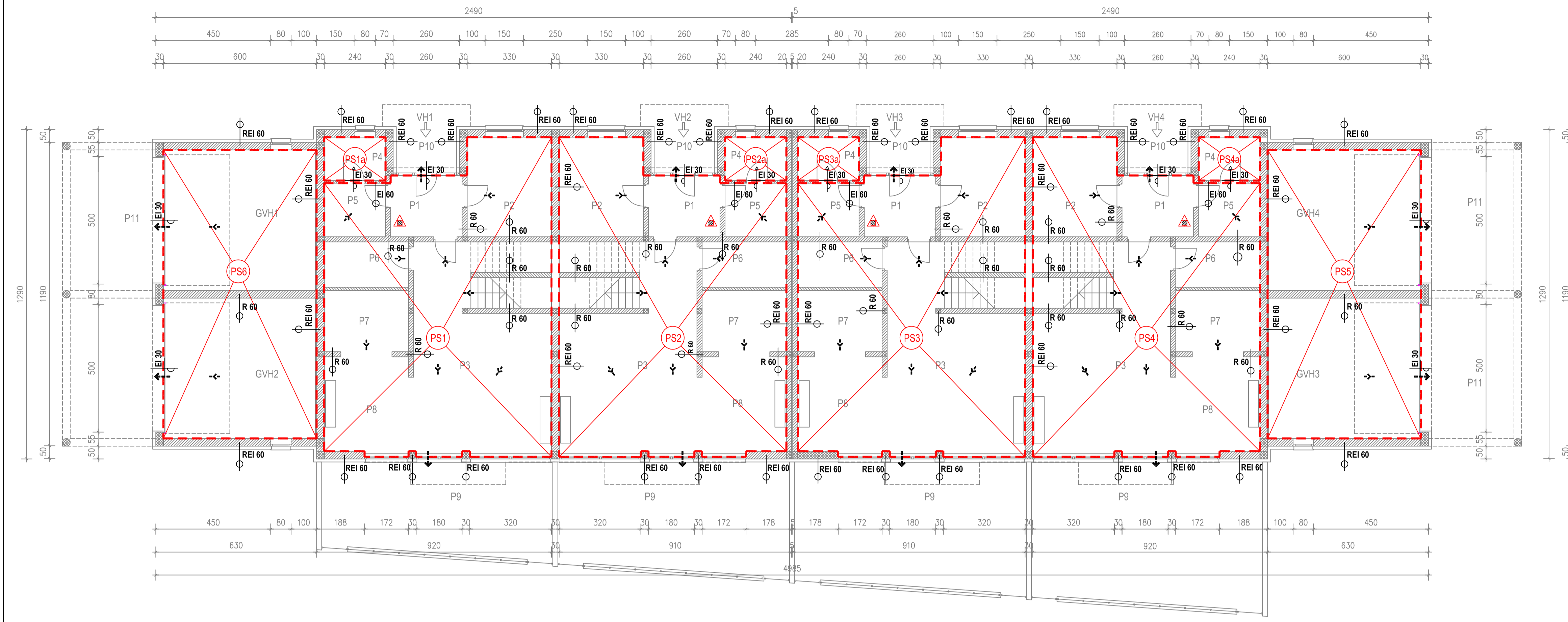
... nadaljevanje preglednice

Število strani stavbe, do katerih je mogoč dostop gasilskih vozil:	Dostop gasilskih vozil neposredno do objekta je mogoč s severne, vzhodne in zahodne strani.			
<b>Strelovodne instalacije in ozemljitve</b>				
Strelovodne instalacije in ozemljitve:	Strelovodna instalacija je predvidena. Upošteva se standard SIST EN 1024.			

## **PRILOGA B: GRAFIČNI DEL ZASNOVE POŽARNE VARNOSTI ENOSTANOVANJSKIH VRSTNIH HIŠ**

Načrtovani požarnovarnostni ukrepi so z grafičnimi znaki prikazani na risbah:

- List št. 1: Tloris pritličja
- List št. 2: Tloris mansarde



- LEGENDA GRAFIČNIH ZNAKOV:
- Požarni sektor
  - Požarna odpornost 60 minut
  - Vrata s požarno odpornostjo 30 min, samozapiralna
  - Vrata s požarno odpornostjo 30 min
  - Izход iz objekta
  - Smer unika v sili
  - Ročni gasilni aparat (na prah)
  - Meja požarnega sektorja
  - AB - ARMIRANI BETON
  - OPEČNI BLOK
  - OPEČNI PREDELNIK
  - MAVČNO KARTONSKA PREDELNA STENA
  - ROB AB PLOŠČE NAD MANSARDO

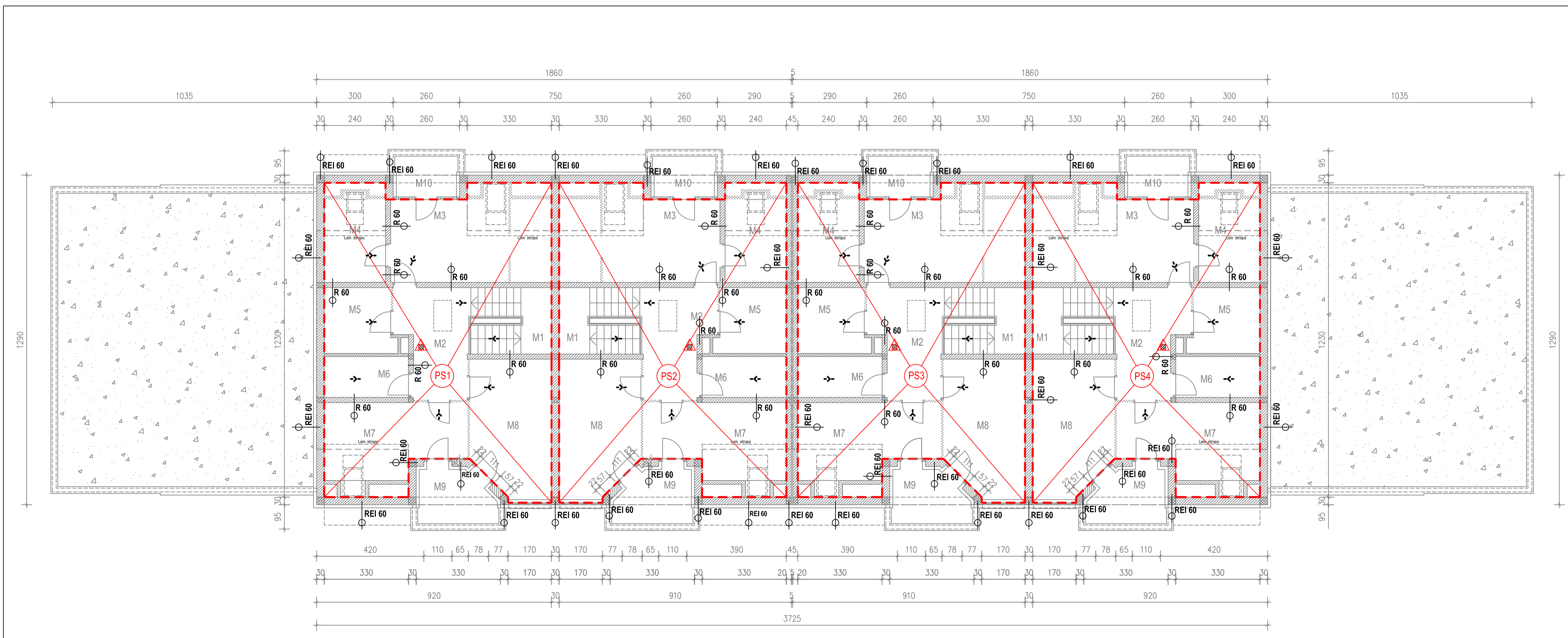
VH1 - PRITILČJE		185,35	m <sup>2</sup>
NOTRANJE POVRŠINE		123,05	m <sup>2</sup>
P1 VETROLOV		6,70	m <sup>2</sup>
P2 KABINET		12,90	m <sup>2</sup>
P3 DNEVNI PROSTOR		35,00	m <sup>2</sup>
P4 KUHINJICA		4,10	m <sup>2</sup>
P5 GARDEROBA		5,05	m <sup>2</sup>
P6 KOPALNICA		5,90	m <sup>2</sup>
P7 KUHINJA		7,90	m <sup>2</sup>
P8 JEDILNICA		12,50	m <sup>2</sup>
GVH1 GARAJA		33,00	m <sup>2</sup>
ZUNANJE POVRŠINE		62,30	m <sup>2</sup>
P9 TERASA Z ZELENICO		36,50	m <sup>2</sup>
P10 NADKRT VHOV		4,30	m <sup>2</sup>
P11 NADKRT PARIKROŠČE		21,50	m <sup>2</sup>

VH2 - PRITILČJE		191,30	m <sup>2</sup>
NOTRANJE POVRŠINE		123,05	m <sup>2</sup>
P1 VETROLOV		6,70	m <sup>2</sup>
P2 KABINET		12,90	m <sup>2</sup>
P3 DNEVNI PROSTOR		35,00	m <sup>2</sup>
P4 KUHINJICA		4,10	m <sup>2</sup>
P5 GARDEROBA		5,05	m <sup>2</sup>
P6 KOPALNICA		5,90	m <sup>2</sup>
P7 KUHINJA		7,90	m <sup>2</sup>
P8 JEDILNICA		12,50	m <sup>2</sup>
GVH2 GARAJA		33,00	m <sup>2</sup>
ZUNANJE POVRŠINE		68,25	m <sup>2</sup>
P9 TERASA Z ZELENICO		42,45	m <sup>2</sup>
P10 NADKRT VHOV		4,30	m <sup>2</sup>
P11 NADKRT PARIKROŠČE		21,50	m <sup>2</sup>

VH3 - PRITILČJE		197,10	m <sup>2</sup>
NOTRANJE POVRŠINE		123,05	m <sup>2</sup>
P1 VETROLOV		6,70	m <sup>2</sup>
P2 KABINET		12,90	m <sup>2</sup>
P3 DNEVNI PROSTOR		35,00	m <sup>2</sup>
P4 KUHINJICA		4,10	m <sup>2</sup>
P5 GARDEROBA		5,05	m <sup>2</sup>
P6 KOPALNICA		5,90	m <sup>2</sup>
P7 KUHINJA		7,90	m <sup>2</sup>
P8 JEDILNICA		12,50	m <sup>2</sup>
GVH3 GARAJA		33,00	m <sup>2</sup>
ZUNANJE POVRŠINE		74,05	m <sup>2</sup>
P9 TERASA Z ZELENICO		48,25	m <sup>2</sup>
P10 NADKRT VHOV		4,30	m <sup>2</sup>
P11 NADKRT PARIKROŠČE		21,50	m <sup>2</sup>

VH4 - PRITILČJE		202,80	m <sup>2</sup>
NOTRANJE POVRŠINE		123,05	m <sup>2</sup>
P1 VETROLOV		6,70	m <sup>2</sup>
P2 KABINET		12,90	m <sup>2</sup>
P3 DNEVNI PROSTOR		35,00	m <sup>2</sup>
P4 KUHINJICA		4,10	m <sup>2</sup>
P5 GARDEROBA		5,05	m <sup>2</sup>
P6 KOPALNICA		5,90	m <sup>2</sup>
P7 KUHINJA		7,90	m <sup>2</sup>
P8 JEDILNICA		12,50	m <sup>2</sup>
GVH4 GARAJA		33,00	m <sup>2</sup>
ZUNANJE POVRŠINE		79,75	m <sup>2</sup>
P9 TERASA Z ZELENICO		53,95	m <sup>2</sup>
P10 NADKRT VHOV		4,30	m <sup>2</sup>
P11 NADKRT PARIKROŠČE		21,50	m <sup>2</sup>

Opisnik: 0000 - 0000 - 0000	Revizija: 0000 - 0000	Datum revizije: 0000 - 0000	Šifra revizije: 0000 - 0000 - 0000	Rev. št.: 0000 - 0000
Projekt - naslov opisane naloge: <b>Analiza požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš</b>			Naziv: <b>Zasnova požarne varnosti</b>	
Številka projekta: 0000 - 0000 - 0000	Izobila: Sabina Huč	Datum izobila: november 2012	Del objekta: Tloris pritilčja	Merilo: 1 : 100
Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo			Šifra zbirnice: 00000 - 00000 - 0000	Stran: Priloga B List št.: 1



- LEGENDA GRAFIČNIH ZNAKOV:
- Požarni sektor
  - Požarna odpornost 60 minut
  - Vrata s požarno odpornostjo 30 min, samozapiralna
  - Vrata s požarno odpornostjo 30 min
  - Izход iz objekta
  - Smer unika v sili
  - Ročni gasilni aparat (na prah)
  - Meja požarnega sektorja
  - AB - ARMIRANI BETON
  - OPEČNI BLOK
  - OPEČNI PREDELNIK
  - MAVČNO KARTONSKA PREDELNA STENA
  - ROB AB PLOŠČE NAD MANSARDO

VH1, VH2, VH3, VH4 - MANSARDA		102,55	m <sup>2</sup>
M1 STOPNIŠČE		8,20	m <sup>2</sup>
M2 HODNIK		10,90	m <sup>2</sup>
M3 SPALNICA		20,85	m <sup>2</sup>
M4 KOPALNICA		8,00	m <sup>2</sup>
M5 GARDEROBA		6,95	m <sup>2</sup>
M6 KOPALNICA		5,40	m <sup>2</sup>
M7 OTROŠKA SOBA		15,45	m <sup>2</sup>
M8 OTROŠKA SOBA		16,30	m <sup>2</sup>
M9 BALKON		6,45	m <sup>2</sup>
M10 BALKON		4,05	m <sup>2</sup>

Opisnik: 0000 - 0000 - 0000	Revizija: 0000 - 0000	Datum revizije: 0000 - 0000	Šifra revizije: 0000 - 0000 - 0000	Rev. št.: 0000 - 0000
Projekt - naslov opisane naloge: <b>Analiza požarne varnosti enostanovanjskih vrstnih hiš</b>			Naziv: <b>Zasnova požarne varnosti</b>	
Številka projekta: 0000 - 0000 - 0000	Izobila: Sabina Huč	Datum izobila: november 2012	Del objekta: Tloris mansarde	Merilo: 1 : 100
Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo			Šifra zbirnice: 00000 - 00000 - 0000	Stran: Priloga B List št.: 2

**PRILOGA C: KLASIFIKACIJA GRADBENIH MATERIALOV GLEDE  
ODZIVA NA OGENJ PO SIST EN 13501-1**

KLASIFIKACIJA				OPIS
<b>A1</b>	A1			
<b>A2</b>	A2 - s1,d0	A2 - s1,d1	A2 - s1,d2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• negorljivi materiali</li> <li>• materiali malo prispevajo k razvoju požara</li> </ul>
	A2 - s2,d0	A2 - s2,d1	A2 - s2,d2	
	A2 - s3,d0	A2 - s3,d1	A2 - s3,d2	
<b>B</b>	B - s1,d0	B - s1,d1	B - s1,d2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• težko gorljivi materiali</li> <li>• materiali zelo malo prispevajo k razvoju požara</li> </ul>
	B - s2,d0	B - s2,d1	B - s2,d2	
	B - s3,d0	B - s3,d1	B - s3,d2	
<b>C</b>	C - s1,d0	C - s1,d1	C - s1,d2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• težko gorljivi materiali</li> <li>• materiali malo prispevajo k razvoju požara</li> </ul>
	C - s2,d0	C - s2,d1	C - s2,d2	
	C - s3,d0	C - s3, d1	C - s3,d2	
<b>D</b>	D - s1,d0	D - s1,d1	D - s1,d2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• težko gorljivi materiali</li> <li>• materiali imajo še sprejemljiv prispevek k požaru</li> </ul>
	D - s2,d0	D - s2,d1	D - s2, d2	
	D - s3,d0	D - s3,d1	D - s3,d2	
<b>E</b>	E		E - d2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• normalno gorljivi materiali</li> <li>• materiali imajo še sprejemljiv odziv na ogenj</li> </ul>
<b>F</b>	F			<ul style="list-style-type: none"> <li>• ni zahtev – se ne smejo uporabljati kot izpostavljen gradbeni proizvod</li> </ul>

Oznake s1, s2 in s3 označujejo stopnjo sproščanja dima:

- s1 – malo ali nič dima
- s2 – veliko dima
- s3 – zelo veliko (ogromno) dima

Oznake d1, d2 in d3 označujejo stopnjo kapljanja gorečih delcev:

- d1 – nič
- d2 – nekaj
- d3 – precej