

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:

Mravlje, A., 2014. Analiza požara in prrodukti gorenja v objektu lesnopredelovalne industrije. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Košir, M., somentorica Dovjak, M.): 92 str.

Datum arhiviranja:04-12-2014

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:

Mravlje, A., 2014. Analiza požara in prrodukti gorenja v objektu lesnopredelovalne industrije. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Košir, M., co-supervisor Dovjak, M.): 92 pp.

Archiving Date: 04-12-2014

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 ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

ANJA MRAVLJE

**ANALIZA POŽARA IN PRUDUKTI GORENJA V
OBJEKTU LESNOPREDELOVALNE INDUSTRIJE**

Diplomska naloga št.: 3411/KS

**FIRE ANALYSIS AND COMBUSTION PRODUCTS IN A
WOOD PROCESSING INDUSTRY FACILITY**

Graduation thesis No.: 3411/KS

Mentor:

doc. dr. Mitja Košir

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

doc. dr. Mateja Dovjak

Ljubljana, 27. 11. 2014

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

(Ta stran je namenoma prazna)

IZJAVE

Podpisana Anja Mravlje izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Analiza požara in produkti gorenja v objektu lesnopredelovalne industrije«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, november 2014

Anja Mravlje

(Ta stran je namenoma prazna)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	614.84(043.2)
Avtor:	Anja Mravlje
Mentor:	doc. dr. Mitja Košir
Somentorica:	doc. dr. Mateja Dovjak
Naslov:	Analiza požara in produkti gorenja v objektu lesnopredelovalne industrije
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	92 str., 16 pregl., 78 sl., 1 pril.
Ključne besede:	požar, produkti gorenja, faze požara, simulacija požara, koncentracije CO in CO ₂ , poliuretanski lak, požarna varnost

Izvleček

Na področju industrije se je povečala uporaba materialov in snovi, ki ogrožajo človekovo zdravje in življenje, še posebej v primeru požara. Zaradi tega je postalo vse bolj pomembno, da so industrijski objekti pravilno projektirani in da v primeru požara ne ogrožajo človekovega zdravja in življenja ter okolja. Za ocenjevanje požarne varnosti se izvajajo tudi požarne simulacije z računalniškimi programi. V prvem delu diplomske naloge sem povzela osnove gorenja, produkte gorenja in značilnosti požarov v objektih. Analizirala sem statistične podatke s področja požarov v Sloveniji. Nato sem proučila obstoječe zakonske zahteve na področju požarne varnosti in požarne gradnje. V drugem delu diplomske naloge sem izvedla simulacijo požara v objektu lesnopredelovalne industrije, v katerem uporabljajo različne lake. Objekt me je zanimal predvsem zaradi svoje velike požarne obremenjenosti. Simulacijo sem izvedla s programskim paketom Fire Dynamics Simulator (FDS) in Smokeview (SMW). Izvedla sem 8 različnih variant, s katerimi sem poskušala določiti vpliv prisotnosti laka, posameznih konstrukcijskih elementov, vetra in gašenja s CO₂ na dinamiko širjenja in koncentracije produktov gorenja. Na osnovi rezultatov simulacije sem za posamezne dele objekta naredila primerjavo med variantami. Analizirala sem dobljene koncentracije CO in CO₂ ter ugotovila ali potencialno ogrožajo človekovo zdravje in življenje. S pomočjo dobljenih rezultatov za CO in CO₂ sem predpostavila dinamiko gibanja morebitnih strupenih produktov gorenja, ki lahko nastanejo pri gorenju poliuretanskega laka. Na podlagi ugotovitev sem predlagala izboljšave za boljšo požarno varnost.

(Ta stran je namenoma prazna)

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 614.84(043.2)
Author: Anja Mravlje
Supervisor: Assist. Prof. Mitja Košir, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Prof. Mateja Dovjak, Ph.D.
Title: Fire analysis and combustion products in a wood processing industry facility
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 92 p., 16 tab., 78 fig., 1 ann.
Key words: fire, combustion products, stages of fire, fire simulation, CO and CO₂ concentrations, polyurethane coating, fire safety

Abstract

In industry the use of materials and substances that pose a threat to human health and life, especially in case of fire, has increased. Therefore it has become more and more important that industrial facilities be designed properly and that, in case of fire, they not pose a danger to human life and health and the environment. For the assessment of fire safety, fire simulations with computer software are made. In the first part of the thesis, I summarized the basics of combustion, combustion products and the characteristics of fires in buildings. I analyzed the fire statistics in Slovenia. I then examined the existing legal requirements for fire and building safety. In the second part of the thesis, I conducted a fire simulation in a wood processing industry facility where different wood coatings are used. I was particularly interested in the facility because of its large fire load. I conducted the fire simulation with Fire Dynamics Simulator (FDS) software package and Smokeview (SMW). I did 8 different fire simulation variants in which I have tried to determine the influence of the wood coating presence, individual design elements, wind and fire extinguishing with CO₂ on the dynamics and concentrations of combustion products. Based on the simulation results I made a comparison between the variants for the individual parts of the facility. I analyzed CO and CO₂ concentrations and determined whether they are a potential threat to human health and life. Based on the CO and CO₂ results, I estimated the dynamics of toxic combustion products, which can be generated by burning of the polyurethane wood coating. Finally, I suggested improvements for better fire safety.

(Ta stran je namenoma prazna)

ZAHVALA

Za ves naklonjen čas, strokovno pomoč in uporabne nasvete pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Mitji Koširju in somentorici doc. dr. Mateji Dovjak.

Zahvaljujem se tudi Davidu za vso pomoč z računalniško opremo, moralno podporo med študijem in pisanjem naloge ter ogromno optimizma v težkih trenutkih. Hvala staršem za finančno in moralno podporo v celotnem času mojega študija. Hvala tudi Eleni, Blažu in Pavletu, zaradi katerih so bile ure na faksu prijetnejše in študijska snov lažje obvladljiva.

Hvala lastniku objekta lesnopredelovalne industrije za sodelovanje.

Zahvaljujem se tudi vsem, ki so kakor koli pripomogli k nastanku te diplomske naloge.

(Ta stran je namenoma prazna)

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	III
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
ZAHVALA	IX
1 UVOD	1
2 NAMEN IN CILJI DIPLOMSKE NALOGE	2
3 OSNOVE GORENJA.....	3
3.1 Požarni trikotnik	3
3.2 Gorljive snovi	4
3.2.1 Gorenje vnetljivih trdnih snovi	4
3.2.2 Gorenje vnetljivih tekočin	5
3.2.3 Gorenje vnetljivih plinov	5
3.3 Širjenje požara.....	5
3.3.1 Prevajanje toplote	5
3.3.2 Prenos mase	6
3.3.3 Piroлиза.....	6
3.3.3.1 Gorenje lesa	7
3.4 Produkti gorenja.....	7
3.4.1 Dim.....	8
3.4.2 Ogljikov dioksid (CO ₂).....	8
3.4.3 Dušljivi plini.....	8
3.4.3.1 Ogljikov monoksid (CO).....	8
3.4.3.2 Vodikov cianid (HCN)	9
3.4.4 Dražilni plini	9
3.4.4.1 Vodikov klorid (HCl).....	9
3.4.4.2 Drugi dražilni plini	9
3.5 Vrste in lastnosti nevarnih snovi	10
3.5.1 Gorljive in vnetljive tekočine.....	10
3.5.2 Gorljivi in vnetljivi plini.....	10
3.5.3 Gorljive trdne snovi	10
3.5.3.1 Plastične mase	10
4 POŽAR V OBJEKTU.....	12
4.1 Faze požara	12
4.1.1 Faza vžiga	12
4.1.2 Faza rastočega požara	12
4.1.3 Faza požarnega preskoka (»flash-over«).....	13
4.1.4 Faza polno razvitega požara.....	13

4.1.5	Faza pojemajočega požara.....	13
4.2	Intenziteta požara in dejavniki, ki nanjo vplivajo	13
4.2.1	Količina dovedenega zraka	13
4.2.2	Odvajanje toplote iz prostora	13
4.2.3	Površina gorljivih materialov	14
4.2.4	Požarne lastnosti materialov	14
4.2.5	Požarna obremenitev.....	14
4.3	Požarna statistika.....	14
5	POŽARNA ZAKONODAJA	16
5.1	Zakon o varstvu pred požarom	16
5.2	Uredba (EU) št. 305/2011.....	16
5.2.1	Osnovna zahteva št. 2: varnost pri požaru	16
5.2.2	Osnovna zahteva št. 3: higiena, zdravje in okolje.....	17
5.3	Tehnična smernica TSG-1-001:2010	18
5.4	Preskušanje požarnih lastnosti gradbenih elementov	18
6	METODE	19
6.1	Modeliranje objekta s programsko opremo FDS in Pyrosim.....	19
6.2	Analiza rezultatov s programom Smokeview in programom za obdelavo razpredelnic.....	19
7	OBRAVNAVANA STAVBA	20
7.1	Konstrukcijski sklopi	21
7.1.1	Predelna stena.....	22
7.1.2	Medetažna konstrukcija – stanovanjski del	22
7.1.3	Medetažna konstrukcija – industrijski del	23
7.1.4	Zunanja stena	23
7.1.5	Okna.....	24
7.1.6	Vrata.....	24
7.2	Drugi materiali	24
7.3	Opis računskega modela	25
7.4	Zasnova simulacije in robni pogoji.....	25
7.4.1	Poliuretanski lak in reakcija gorenja	26
7.5	Merilne naprave	27

8	OBRAVNAVANE VARIANTE	30
8.1	Varianta A1	31
8.1.1	Rezultati A1	32
8.2	Varianta B1	36
8.2.1	Rezultati B1	37
8.3	Varianta B2	40
8.3.1	Rezultati B2	40
8.4	Varianta B3	44
8.4.1	Rezultati B3	44
8.5	Varianta B4	47
8.5.1	Rezultati B4	47
8.6	Varianta B5	51
8.6.1	Rezultati B5	51
8.7	Varianta B6	54
8.7.1	Rezultati B6	55
8.8	Varianta B7	59
8.8.1	Rezultati B7	59
9	PRIMERJAVA VARIANT	65
9.1	Razvoj požara	65
9.2	Lakirnica	67
9.3	Pisarna	70
9.3.1	Merilec C (pisarniški stol v kotu pisarne)	70
9.3.2	Merilec D (stol za sejno mizo v pisarni)	71
9.3.3	Pisarna – povzetek	73
9.4	Spodnje stanovanje	73
9.4.1	Merilec M3 – kavč	73
9.4.2	Merilec M3 – pod stopnicami	75
9.4.3	Merilec M3 – pred sobo	77
9.4.4	Spodnje stanovanje – povzetek	79
9.5	Zgornje stanovanje	79
9.5.1	Merilec M4 – kavč	79
9.5.2	Merilec M4 – kuhinja	81
9.5.3	Merilec M4 – vrata sobe	83
9.5.4	Merilec M4 – na vrhu stopnic	84
9.5.5	Zgornje stanovanje – povzetek	86

10	ZAKLJUČEK	87
VIRI.....		90

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: povezava med koncentracijo CO, časom izpostavljenosti in simptomi (Zbornica VZD, 2014)	9
Preglednica 2: strupeni produkti gorenja pri gorenju termoplastov (GZS, 2009).....	11
Preglednica 3: sestava predelne stene	22
Preglednica 4: sestava medetažne konstrukcije v stanovanjskem delu.....	22
Preglednica 5: sestava medetažne konstrukcije v industrijskem delu.....	23
Preglednica 6: sestava zunanje stene.....	23
Preglednica 7: podatki o oknih	24
Preglednica 8: drugi uporabljeni materiali	24
Preglednica 9: dimenzije računskih mrež.....	25
Preglednica 10: podatki o merilnih napravah	28
Preglednica 11: lastnosti posameznih variant	31
Preglednica 12: širjenje CO ₂ – "učinek žleba"	33
Preglednica 13: grafični prikaz vstopanja CO ₂ iz spodnjega stanovanja v zgornje (B2).....	43
Preglednica 14: grafični prikaz koncentracije CO ₂ pod stopnicami (B3)	45
Preglednica 15: vektorski prikaz koncentracije CO ₂ v spodnjem stanovanju pred sobo (B4)	49
Preglednica 16: grafični prikaz koncentracije CO ₂ na hodniku (B5).....	52

(Ta stran je namenoma prazna)

KAZALO SLIK

Slika 1: požarni trikotnik (Tomšič, 2010).....	3
Slika 2: klasifikacija gorljivih snovi (Zavarovalnica Triglav, 2013)	4
Slika 3: konvekcija, kondukcija in sevanje (Tomšič, 2010)	5
Slika 4: prikaz gorenja lesa (Tomšič, 2010).....	7
Slika 5: požarna krivulja (Zavod Vizija Varnosti, 2014).....	12
Slika 6: požari v letu 2013.....	14
Slika 7: požari v objektih v letu 2013	15
Slika 8: vzroki požarov v letu 2013.....	15
Slika 9: nosilnost, celovitost in izolativnost (Tomazin, 2010)	17
Slika 10: tloris pritličja	20
Slika 11: tloris 1. nadstropja	21
Slika 12: tloris 2. nadstropja	21
Slika 13: prikaz sestave predelne stene.....	22
Slika 14: prikaz sestave medetažne konstrukcije v stanovanjskem delu	22
Slika 15: prikaz sestave medetažne konstrukcije v industrijskem delu	23
Slika 16: prikaz sestave zunanje stene	23
Slika 17: videz oken (Satler okna in vrata, 2013)	24
Slika 18: mreže končnih elementov.....	25
Slika 19: tloris lakirnice	26
Slika 20: merilne naprave v 1. nadstropju	29
Slika 21: merilne naprave v 2. nadstropju	29
Slika 22: situacija v lakirnici pred začetkom požara (A1)	31
Slika 23: hitrost porabe goriva (A1)	32
Slika 24: hitrost porabe goriva v prvih dvajsetih sekundah (A1)	32
Slika 25: koncentracija CO v lakirnici (A1).....	33
Slika 26: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (A1).....	35
Slika 27: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (A1).....	36
Slika 28: situacija v lakirnici pred začetkom požara (B1)	36
Slika 29: hitrost porabe goriva (B1)	37
Slika 30: hitrost porabe goriva v prvih desetih sekundah (B1)	37
Slika 31: koncentracija CO v lakirnici (B1).....	38
Slika 32: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (B1).....	39
Slika 33: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (B1).....	39
Slika 34: vrtinčenje CO ₂ na mestu merilca na vrhu stopnic – rumena pika je merilec (B1) ...	40
Slika 35: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (B2).....	41
Slika 36: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (B2).....	42
Slika 37: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (B3).....	45
Slika 38: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (B3).....	46
Slika 39: začetni oblak CO ₂ (B3)	46
Slika 40: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (B4).....	48
Slika 41: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (B4).....	50
Slika 42: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (B5).....	53
Slika 43: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (B5).....	54
Slika 44: preračunane vrednosti vetra za smer x in y	55
Slika 45: hitrost porabe goriva (B6)	55
Slika 46: hitrost porabe goriva v prvih desetih sekundah (B6)	56

Slika 47: koncentracija CO v lakirnici (B6).....	56
Slika 48: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (B6).....	57
Slika 49: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (B6).....	58
Slika 50: hitrost porabe goriva (B7)	60
Slika 51: hitrost porabe goriva v prvih dvajsetih sekundah (B7).....	60
Slika 52: temperatura [°C] v ravnini, ki poteka skozi odprto okno lakirnice, t = 100 s (B7)	61
Slika 53: koncentracija CO v lakirnici (B7).....	62
Slika 54: koncentracija CO ₂ v spodnjem stanovanju (B7).....	63
Slika 55: koncentracija CO ₂ v zgornjem stanovanju (B7).....	64
Slika 56: hitrost porabe goriva.....	66
Slika 57: hitrost porabe goriva v prvih 20 s.....	66
Slika 58: hitrost porabe goriva med t = 100 s in t = 1000 s.....	67
Slika 59: koncentracija CO v lakirnici	68
Slika 60: koncentracija CO v lakirnici v prvih 20 s	69
Slika 61: koncentracija CO ₂ , merilec C (1. del).....	70
Slika 62: koncentracija CO ₂ , merilec C (2. del).....	71
Slika 63: koncentracija CO ₂ , merilec D (1. del).....	72
Slika 64: koncentracija CO ₂ , merilec D (2. del).....	72
Slika 65: koncentracija CO ₂ , merilec M3 – kavč (1. del)	74
Slika 66: koncentracija CO ₂ , merilec M3 – kavč (2. del)	74
Slika 67: koncentracija CO ₂ , merilec M3 – pod stopnicami (1. del).....	76
Slika 68: koncentracija CO ₂ , merilec M3 – pod stopnicami (2. del).....	76
Slika 69: koncentracija CO ₂ , merilec M3 – pred sobo (1. del).....	78
Slika 70: koncentracija CO ₂ , merilec M3 – pred sobo (2. del).....	78
Slika 71: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – kavč (1. del)	80
Slika 72: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – kavč (2. del)	80
Slika 73: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – kuhinja (1. del)	82
Slika 74: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – kuhinja (2. del)	82
Slika 75: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – vrata sobe (1. del).....	83
Slika 76: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – vrata sobe (2. del).....	84
Slika 77: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – na vrhu stopnic (1. del).....	85
Slika 78: koncentracija CO ₂ , merilec M4 – na vrhu stopnic (2. del).....	85

1 UVOD

Periodični požari v naravnem okolju so normalen pojav. Na ta način ogenj uniči staro vegetacijo, sprostijo se razni minerali, zemlja pa se odpočije. Ta naravni proces prispeva k pomlajevanju ekosistema. Medtem, ko je požar v naravnem okolju do neke stopnje celo zaželen, pa ravno nasprotno velja za požar v urbanem in industrijskem okolju. Človek se ogenj trudi nadzorovati in ga uporabljati v svoj prid že vse od njegovega odkritja v obdobju prazgodovine. Človekovo imetje in njegov dom so se skozi leta spreminjali, vendar pa sta se jih oba, prazgodovinski in moderni človek, trudila obvarovati pred požarom in drugimi nesrečami. Z razvojem družbe in posledično nastankom industrije je narasla gradnja industrijskih objektov, v katerih se uporabljajo snovi in materiali, ki so z vidika požarne varnosti nevarni. Zaradi tega je postalo vse pomembnejše, da takšne stavbe ustrezajo merilom požarnih predpisov in standardov ter da se nevarne snovi in materiali pravilno skladiščijo. V ta namen so se ustanovile različne inšpekcijske službe, ki v primeru neupoštevanja predpisov izdajo visoke globe. Kljub temu je širša javnost še vedno slabo podučena o nevarnostih, ki jih za zdravje in življenje predstavljajo nevarne snovi in materiali oziroma njihova nepravilna uporaba in skladiščenje, še posebej v primeru požara.

S problemi na področju požarne varnosti in produktov gorenja se je ukvarjalo že kar nekaj avtorjev. V diplomskem delu o uporabi PVC-ja v notranjem grajenem okolju in njegovem vplivu na zdravje (Senica, 2011) je bilo ugotovljeno, da PVC kot gradbeni proizvod negativno vpliva na zdravje uporabnika v celotni življenjski dobi (v rednih in izrednih razmerah). Izpostavljeno je bilo dejstvo, da so v primeru požara še posebej nevarne kombinacije strupenih produktov gorenja, kot na primer CO in CO₂. Poudarjena je bila tudi pozitivna vloga toplotnih detektorjev za zgodnje odkrivanje požara in razpršilcev. Ob uporabi teh sistemov so bile koncentracije strupenih produktov gorenja manjše. V članku o metodah za identifikacijo kemičnih spojin pri gorenju pesticidov (Chen in sod., 2012) je bilo izpostavljeno dejstvo, da največjo nevarnost za zdravje pri gorenju sintetičnih kemikalij predstavlja predvsem inhalacija strupenih plinov. Nevarnost takih požarov pa je predvsem v skladiščnih prostorih kmetijske in industrijske panoge. Med oksidacijo in termično dekompozicijo se žveplo, dušik, fosfor in klor pretvorijo v strupene onesnaževalce zraka. Pri tem pa se moramo zavedati, da izpusti v ozračje povzročajo večjo in dolgotrajnejšo škodo kot požar sam.

Zaradi omenjenih razlogov je postalo vse pomembnejše, da se objekti pravilno požarno projektirajo in ocenijo nevarnosti, ki jih za človekovo zdravje in življenje predstavljajo nevarne snovi v objektih. V ta namen so se razvile številne metode in programi za analiziranje poteka požara in produktov gorenja, ki pri tem nastanejo. V članku Kinsman in sod. (2001) o oceni nevarnosti požara v agrokemičnih skladiščih je omenjeno, da je modeliranje takšnih problemov izjemno zahtevno, saj je prisotnih veliko spremenljivk. Pri tem pa v članku opozarjajo tudi na problem pomanjkanja informacij o gorenju kemikalij in njihovih produktov gorenja. Poudarjajo, da požari v kemičnih skladiščih povzročajo dimne oblake, polne nevarnih snovi, da pa je težko določiti točne koncentracije teh snovi in da ni zanesljivih podatkov o učinkih na zdravje pri istočasni izpostavljenosti več zelo strupenim snovem. Na podoben problem opozarjajo tudi v članku o pirolizi, gorenju in produktih gorenja (tudi strupenih) trdne poliuretanske pene (Paabo in sod., 1987). V tem članku je izpostavljeno, da so sestave različnih poliuretanov lahko zelo podobne, vendar se njihovi produkti gorenja popolnoma razlikujejo in jih posledično, zaradi vsesplošnega pomanjkanja informacij s tega področja, lahko samo predvidevamo.

2 NAMEN IN CILJI DIPLOMSKE NALOGE

Namen diplomske naloge je analizirati požar v objektu lesnopredelovalne industrije. V izbranem objektu se uporabljajo razni poliuretanski laki, razredčila in trdilci. Ta objekt me je zanimal predvsem zaradi svoje potencialne velike požarne obremenjenosti.

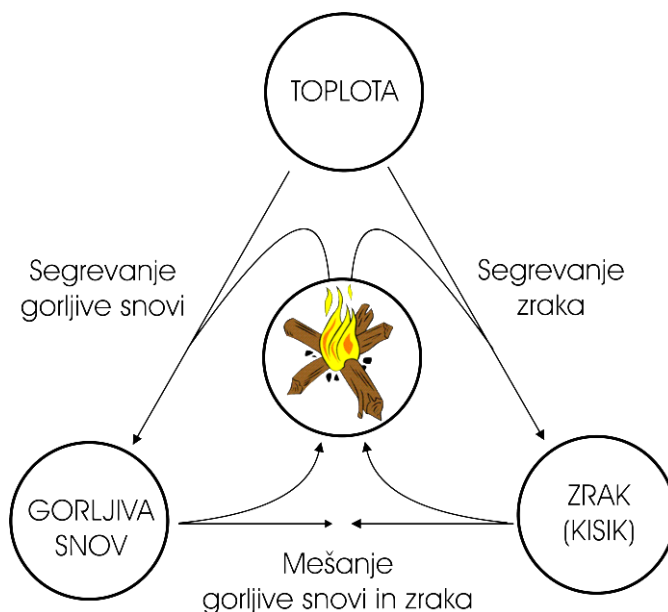
Cilji diplomske naloge:

- s pomočjo literature in drugih virov proučiti osnove gorenja, značilnosti požara, produkte gorenja in analizirati statistične podatke s področja požarov v Sloveniji;
- proučiti obstoječe zakonske zahteve na področju požarne varnosti in požarne gradnje;
- z ustrežno programsko opremo izvesti simulacijo požara v proučevanem objektu in določiti dinamiko gibanja produktov gorenja (CO in CO₂) ter njihovo koncentracijo v posameznih prostorih;
- ugotoviti ali dobljene koncentracije CO in CO₂ potencialno ogrožajo človekovo zdravje in življenje;
- s pomočjo dobljenih rezultatov za CO in CO₂ predpostaviti dinamiko gibanja morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka.

3 OSNOVE GORENJA

3.1 Požarni trikotnik

Požar je vsako nenadzorovano širjenje ognja v objektu ali okolju. Za nastanek požara potrebujemo gorivo, kisik in vir energije oziroma povzročitelj vžiga. Pri nekaterih materialih povzročitelj vžiga ni nujno prisoten, saj lahko do gorenja pride tudi zaradi spontanega vžiga. V literaturi so prej omenjene komponente (toplota, kisik in gorljiva snov) pogosto poimenovane požarni trikotnik (slika 1). Goriva so lahko v trdnem, tekočem ali plinastem agregatnem stanju. Med naj pogostejše vire vžiga spadajo vsakdanja sredstva, kot na primer vžigalniki, možni viri pa so tudi kemijske reakcije, trenje in podobno. Kisik, potreben za gorenje, običajno prihaja iz zraka (volumski delež kisika v zraku je 20,95 %). Ko raven kisika v okolici gorenja pade pod 15 % volumskega deleža, gorenja s plamenom ni več in začne se proces tlenja. Ta preneha, ko volumski delež pade pod 3 %. V nekaterih primerih lahko pri segrevanju kisik oddajajo tudi nekateri materiali (tako imenovani oksidanti), kot na primer kalijev permanganat in vodikov peroksid. Zato gorenje takih snovi poteka tudi v okolju z manj kisika (Štraus in sod., 2014).



Slika 1: požarni trikotnik (Tomšič, 2010)

Iz požarnega trikotnika (slika 1) je razvidno, da požar lahko pogasimo na tri načine:

- z odstranitvijo oziroma pokritjem goriva,
- s preprečitvijo dotoka kisika,
- z odvzemom toplote (ohlajanjem), s čimer preprečimo nadaljnji razvoj reakcije oziroma uparjanje snovi (GZS, 2009).

Za gašenje se najpogosteje uporablja voda, ki pa v nekaterih primerih lahko nepričakovano kemijsko reagira z gorljivimi snovmi. Do reakcije lahko pride med gorečo kovino in vodo, pri čemer se tvori vodik, ali pa med žarečim ogljem in vodo, pri čemer se tvorita ogljikov monoksid in vodik. Iz omenjenega razloga so se razvile še druge tehnike gašenja, kot na primer uvajanje kemikalij, ki se vežejo na proste atome in radikale ter tako prekinejo reakcijo gorenja (Friedman, 2009).

Gorljive snovi se med seboj razlikujejo po:

- hitrosti vžiga,
- hitrosti širjenja plamena po izpostavljeni površini,
- maksimalni stopnji sproščene toplote na enoto goreče površine,
- tvorbi zaščitne zoglenele plasti (zmanjša prevajane toplote in onemogoča dotok kisika do lesa),
- potrebni količini zraka na gram gorljive snovi,
- nastalih produktih gorenja (količini toplote, dima, strupenih plinov itd.),
- zahtevnosti gašenja z vodo, penami na vodni osnovi in inertnimi plini (Friedman, 2009).

3.2 Gorljive snovi

Vse gorljive snovi ne gorijo enako, zato glede na vrsto gorljive snovi ločimo različne tipe oziroma razrede požarov (slika 2).

Razred požara		Gorljiva snov
A	 požari gorljivih trdnih snovi	les, papir, slama, tekstil, premog ...
B	 požari vnetljivih tekočin	bencin, nafta, olja, voski, laki, alkoholi, benzen, smole ...
C	 požari vnetljivih plinov	zemeljski plin, butan, acetilen, vodik, utekočinjen naftni plin ...
D	 požari lahkih kovin	magnezij, aluminij v prahu ...
F	 požari jedilnih olj in maščob	jedilna olja in maščobe

Slika 2: klasifikacija gorljivih snovi (Zavarovalnica Triglav, 2013)

3.2.1 Gorenje vnetljivih trdnih snovi

Potek gorenja in spreminjanje snovi med gorenjem sta odvisna od sestave in lastnosti trdne snovi. Trdne snovi lahko gorijo:

- brez predhodnega razpada, z neposredno oksidacijo (tipičen primer je ogljik);
- s spremembo agregatnega stanja, tako da snov prehaja iz trdnega v tekoče in nato v plinasto agregatno stanje (parafin, mast, sintetične smole itd.);
- s pirolizo, to je s termičnim razpadom, pri katerem iz snovi izhajajo gorljivi plini (tako je gorenje večine gorljivih trdnih snovi) (GZS, 2009).

Kmalu po začetku gorenja plamen ni več odvisen od izvora vžiga, temveč od smeri širjenja plamena, predhodne segretosti površine in debeline trdne snovi. Hitrost širjenja plamena horizontalno ali navzdol je dokaj majhna, razen v primeru, ko je bila površina predhodno segreti. Navzgor je hitrost širjenja plamena večja. Vzrok za to je, da je pri gorenju navzgor kisik dovajan iz spodnje strani in je plamen v konstantnem stiku s površino ter jo tako

predhodno segreva. Kot že omenjeno, na hitrost širjenja ognja vpliva tudi debelina trdne snovi. Za širjenje požara mora plamen najprej segreti material na vžigno temperaturo. V primeru dvakrat debelejšega materiala bo potrebnega dvakrat več časa za segretje in plamen bo napredoval za polovico počasneje (Friedman, 2009).

3.2.2 Gorenje vnetljivih tekočin

Gorenje vnetljivih tekočin poteka v dveh fazah. Ob segrevanju vnetljiva tekočina oddaja hlapne, ki ob prisotnosti kisika in vira vžiga zgorevajo. Za vsako vnetljivo tekočino sta podani temperatura plamenišča in vžiga. Temperatura plamenišča je najnižja temperatura, pri kateri segreta snov odda dovolj hlapov, da se ti ob prisotnosti plamena hipno vnamejo. Pri temperaturi vžiga, ki je višja od temperature plamenišča, količina hlapov zadošča za kontinuirano gorenje brez prisotnosti plamena (Tomšič, 2010).

3.2.3 Gorenje vnetljivih plinov

Gorenje vnetljivih plinov je po načinu izgorevanja podobno gorenju hlapov vnetljivih tekočin. Reakcija gorenja se zgodi le v primeru, ko je koncentracija vnetljivega plina in kisika znotraj določenih meja, ki ju poznamo pod imenom spodnja in zgornja meja vnetljivosti. Kadar je koncentracija pod spodnjo mejo, primanjkuje goriva za razvoj reakcije, kadar je nad zgornjo mejo, pa kisika. Meje vnetljivosti so običajno navedene v volumskih odstotkih pri 25 °C in atmosferskem tlaku (GZS, 2009).

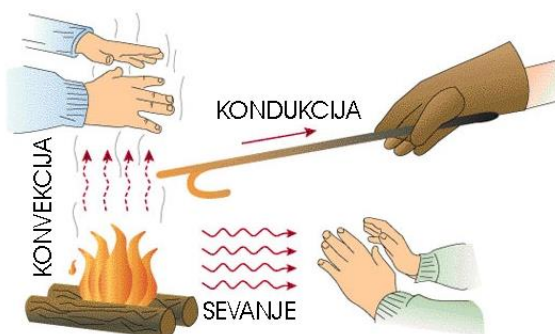
Plameni te kategorije se delijo na predhodno premešane in difuzijske. Pri predhodno premešanih plamenih sta vnetljivi plin in kisik v ustreznem razmerju premešana že pred reakcijo gorenja. Takšni plameni gorijo hitreje in so modre barve. Za difuzijske plamene je značilno, da se vnetljivi hlapi in kisik mešajo šele v fazi gorenja. Gorenje je počasnejše, barva plamena je običajno rumena. V splošnem velja, da je pri običajnem gorenju plamen difuzijski. Plamene dodatno kategoriziramo kot laminarne in turbulentne (veliki požari in požari z veliko hitrostjo gorenja so v splošnem turbulentni, majhni pa laminarni) (Friedman, 2009).

3.3 Širjenje požara

3.3.1 Prevajanje toplote

Toplota se prevaja na tri načine (slika 3):

- s kondukcijo (v tekočinah in trdnih snoveh),
- s sevanjem (v plinih in vakuumu),
- s konvekcijo (v plinih in kapljevinah) (Tomšič, 2010).



Slika 3: konvekcija, kondukcija in sevanje (Tomšič, 2010)

Kondukcija je prenos toplote skozi telo oziroma prenos toplote med telesi prek neposrednega stika. Pri tem velja Fourierjev zakon toplotne kondukcije, ki pravi, da toplota zmeraj teče s področja z višjo temperaturo proti območju z nižjo temperaturo. Toplotni tok je odvisen od vrste snovi, kar izrazimo s toplotno prevodnostjo. Toplotna prevodnost nam pove, kako hitro snov prevaja toploto. V primeru požara, ko je neka mejna ploskev v prostoru izpostavljena požarnim razmeram, se lahko zgodi, da pri prevelikem toplotnem toku od izpostavljene do neizpostavljene površine mejnih elementov pride do prehoda požara v sosednji prostor. Takemu načinu širjenja požara pravimo odpoved izolativnosti prostora (Friedman, 2009).

Pri sevanju ali radiaciji se toplota prevaja z izsevano in absorbirano energijo elektromagnetnega valovanja. Pri tem procesu molekulam ni treba biti v medsebojnem stiku, saj do sevanja pride tudi v vakuumu, suhem zraku, vodi in steklu. Radiacija ima spekter valovnih dolžin ali frekvenc. Za prenos toplote so najpomembnejši infrardeči valovi. Osnovni princip je, da vsako telo, ki ima temperaturo nad absolutno ničlo, zmeraj oddaja energijo v obliki sevanja v svoje okolje in prav tako sprejema energijo iz okolice. Višjo temperaturo kot ima telo, večja je stopnja oddane energije. V primeru požara lahko sevanje toplote skozi vgrajene odprtine (vrata in okna) in odprtine, ki so nastale zaradi požara, povzroči vžig gorljivih predmetov. Osnovni izvor radiacije je ogenj oziroma delci saj v plamenu. Precej manjši, vendar ne zanemarljiv, izvor radiacije so določene vroče molekule plina, predvsem vodna para in ogljikov dioksid (Bergant, 2014).

V splošnem je konvekcija kondukcija skozi premikajoč se medij, ki je lahko tekočina ali plin. Pri tem se toplota prenaša z enega na drugo mesto zaradi gibanja molekul po prostoru. Poznamo naravno in prisiljeno konvekcijo. Naravna konvekcija se pojavi, ko postane sistem nestabilen in posledično pride do mešanja z gibanjem mase (npr. kroženje vode v loncu med segrevanjem). Princip prisilne konvekcije je enak, le da je vzrok gibanja plinov prisilen (npr. z ventilatorji, črpalkami). V primeru požara lahko prekomeren tok vročih plinov skozi odprtine prostorov, ki so lahko vgrajene ali posledica požara, povzroči vžig vnetljivih predmetov v sosednjem prostoru. Tak mehanizme širjenja požara imenujemo porušitev celovitosti zaprtega prostora (Tomšič, 2010).

3.3.2 Prenos mase

Goreči predmeti lahko iz prostora, kjer je nastal požar, prehajajo skozi vgrajene ali s požarom povzročene odprtine. Tipičen primer tega so leteči ogorki in razlivanje goreče tekočine pod vrati, če ta nimajo praga (Friedman, 2009).

3.3.3 Piroliza

Piroliza je termični razpad organskih materialov pri dovajanju toplote brez dodatnega kisika. S takim mehanizmom večinoma gorijo snovi, ki so sestavljene iz ogljika in vodika. Pri gorenju se proizvajajo plini in trdna snov, tj. oglje. Običajno je reakcija pirolize endotermna, kar pomeni, da mora biti za razvoj reakcije dovedena določena količina toplote. Vrednost toplote se imenuje toplota uplinjanja. Za vžig trdne snovi mora biti njena površina segreta na dovolj visoko temperaturo, tako da so plini, ki nastanejo pri pirolizi, proizvedeni dovolj hitro, da presežejo spodnjo mejo vnetljivosti. Za večino trdnih organskih snovi je potrebna temperatura med 270 °C in 400 °C (EkoGrupa, 2011).

Piroliza poteka pri gorenju veliko trdnih organskih goriv, kot na primer pri lesu, papirju in celo nekaterih vrstah plastike. Pri gorenju lesa so vidni plameni posledica gorenja plinov, proizvedenih v procesu pirolize, tlenje pa je posledica gorenja oglja, ki ostane od pirolize. V

stavbah, kjer gorljivi elementi potekajo neprekinjeno preko meja prostora, se piroliza in posledično požar tako lahko širita dalje po objektu. Tak primer je širjenje požara znotraj debeline gorljivih sten in streh (Friedman, 2009).

3.3.3.1 Gorenje lesa

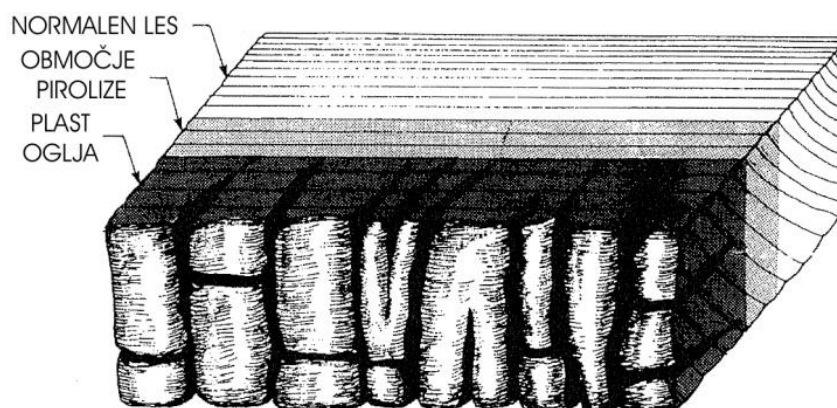
Les ima porasto strukturo in lahko absorbira velike količine vode (v ekstremnih pogojih tudi do 25 %). Posledično so požarne lastnosti lesa, predvsem hitrost vžiga, odvisne od deleža absorbirane vode. Les je sestavljen iz:

- 40–50 % celuloze,
- 20–30 % lignina,
- 20–30 % ogljikovih hidratov, maščob, mineralov itd.

Celuloza je kondenzacijski polimer glukoze. Lignin je polimer, ki veže vlakna celuloze in prispeva k trdnosti. Njegova dekompozicija se začne pri okoli 300 °C. Lahko ga segrevamo pri še višjih temperaturah, vendar bo približno polovica njegove originalne mase ostala v obliki oglja.

Suha lesna masa je sestavljena iz 51 % ogljika, 42 % kisika, 6 % vodika in 1 % dušika ter mineralov.

Postopek gorenja lesa je sestavljen iz več faz (slika 4). Prva faza je segrevanje in sušenje, ki poteka v območju do 100 °C. Pri drobnejšem in bolj suhem lesu je ta faza krajša. Pri vlažnem lesu je dim gostejši, težak in ga vleče k tlom. V naslednji fazi nastopita uplinjanje in termični razpad lesa (piroliza). Les vsebuje 70–80 % plinastih sestavin. Ko se temperatura zvišuje, se najprej izločijo plini, katerih vnetišče je med 240 in 250 °C. Taka sta kisik in vodik. V nadaljevanju razpadejo trdni elementi lesa (npr. celuloza, lignin) in preidejo v plinasto stanje. Med procesom termičnega razpada se lahko sproščajo nekatere agresivne snovi. Piroliza je endotermna reakcija, kar pomeni, da za razvoj potrebuje energijo, medtem ko je zgorevanje eksotermna reakcija. V fazi uplinjanja in termičnega razpada vzporedno potekata obe reakciji. V zadnji fazi nastopi gorenje lesnega oglja. Plamen je miren in svetel. Minerali, ki jih vsebuje les, ostanejo v obliki pepela (EkoGrupa, 2011).



Slika 4: prikaz gorenja lesa (Tomšič, 2010)

3.4 Produkti gorenja

Pri gorenju potekajo tako endotermne kot tudi eksotermne reakcije, ker pa se pri tem več toplote sprosti kot porabi, velja, da je gorenje eksotermna reakcija. Sproščena toplota se ne

more dovolj hitro odvajati, zato temperatura reaktantov narašča. Če je v procesu gorenja prisotnega dovolj kisika, potem govorimo o popolnem izgorevanju. Takrat nastajata ogljikov dioksid (CO_2) in voda ter oksidi drugih prisotnih elementov. V večini primerov pri gorenju ni prisotna zadostna količina kisika in takrat govorimo o nepopolnem izgorevanju. Pri tem, poleg že omenjenih produktov, nastajajo vmesni produkti. Ti nastanejo kot posledica razkroja večjih kompleksnih molekul ter zaradi pomanjkanja kisika ali prenizke temperature ne reagirajo in ostanejo nespremenjeni. Med požarom temperatura običajno narašča, zato se večina teh produktov, ki so pogosto toksični, razkroji. Kombinacija različnih strupenih plinov lahko povzroči popolnoma drugačne, včasih celo nasprotno fiziološke učinke (GZS, 2009). Poleg tega ni zanesljivih podatkov o tem, kakšni so učinki na zdravje pri istočasni izpostavljenosti več strupenim snovem (Kinsman in sod., 2001).

3.4.1 Dim

Dim je mešanica tekočih in trdnih delcev ter plinov, ki nastanejo med gorenjem. Trdni delci so luske ogljika, saje, pepel, sublimirani produkti pirolize in oksidi anorganskih snovi. Tekoči delci so katranu podobne kapljice ali meglica, ki je sestavljena iz tekočih produktov pirolize ali delno oksidiranih produktov in vode.

Dim je potencialno nevaren, saj lahko prenaša strupene plinske produkte. Poleg tega dim predstavlja optično oviro. Večja kot je količina dima v prostoru, težje se človek orientira in najde izhod. Ko je dim zadosti gost, oseba ne more več določiti položaja pohoštva, vrat in oken, čeprav prostor dobro pozna. S tem se podaljša čas evakuacije in posledično je večja možnost izpostavljenosti strupenim produktom gorenja (Stec, 2010).

3.4.2 Ogljikov dioksid (CO_2)

Ogljikov dioksid je plin brez barve in vonja. V majhnih količinah je prisoten v Zemljinem ozračju, kjer deluje kot toplogredni plin. Je le delno toksičen. Izpostavljenost 10 % CO_2 -ja v zraku povzroči glavobol in omotičnost. Bolj problematična posledica izpostavljenosti ogljikovemu dioksidu je pospešeno dihanje. Že 4 % (40.000 ppm) CO_2 -ja je dovolj, da se podvoji vnos zraka v pljuča, kar pomeni, da žrtev vdihne veliko več toksičnih produktov. Oseba, izpostavljena 0,5 % (5000 ppm) CO in 5 % (50.000 ppm) CO_2 , bo podlegla hitreje kot oseba, ki je izpostavljena samo 0,5 % (5000 ppm) CO. Ugotovljeno je bilo, da se pri 5 % (50.000 ppm) prisotnosti CO_2 vnos CO poveča za 50 % (Friedman, 2009).

3.4.3 Dušljivi plini

Dušljivi oziroma narkotični plini povzročajo zmanjšanje vnosa kisika v tkivo, zaradi česar pride do nezavesti ali celo smrti (Stec, 2010).

3.4.3.1 Ogljikov monoksid (CO)

Je brezbarven plin, brez vonja in okusa. Je skoraj iste gostote kot zrak, zato se z njim pomeša in je prisoten povsod v prostoru. Nastaja pri nepopolnem zgorevanju organskih snovi.

Pri gorenju materialov, ki vsebujejo ogljik, in nezadostni količini kisika za popolno izgorevanje je lahko volumski delež ogljikovega monoksida 5–6 % (50.000–60.000 ppm). Če imamo v prostoru stropne in stenske obloge iz lesa in se prostor napolni z vročimi plini, ki jim primanjkuje kisika, bo prišlo do pirolize lesa, pri čemer se bo proizvedla velika količina CO-ja. Količina ogljikovega dioksida v prostoru je odvisna od temperature vroče plasti zraka pod stropom, mešanja hladnega in vročega zraka, površine lesa v stiku z vročo plastjo in razmerja količine gorljive snovi ter kisika (Friedman, 2009).

Ogljikov monoksid se veže s hemoglobinom v krvi, ki nosi kisik iz pljuč v možgane in celotno telo. Ko se hemoglobin veže z ogljikovim monoksidom, nastane karboksihemoglobin, ki kisika ne prenaša več. 1,28 % (12.800 ppm) CO-ja v zraku povzroči smrt v 1–3 minutah, 0,3 % (3000 ppm) pa v 30 minutah (preglednica 1).

Preglednica 1: povezava med koncentracijo CO, časom izpostavljenosti in simptomi (Zbornica VZD, 2014)

Koncentracija CO	Čas izpostavljenosti	Simptomi
35 ppm (0,0035 %)	6–8 h	glavobol in slabost
100 ppm (0,01 %)	3 h	rahel glavobol
400 ppm (0,04 %)	1–2 h	glavobol
800 ppm (0,08 %)	45 min	omotičnost, slabost in krči
1600 ppm (0,16 %)	20 min	glavobol, vrtoglavica, slabost, povišanje srčne frekvenca
	manj kot 2 h	smrt
3200 ppm (0,32 %)	5–10 min	glavobol, vrtoglavica, slabost
	30 min	smrt
6400 ppm (0,64 %)	1–2 min	glavobol, vrtoglavica
	manj kot 20 min	krči, onemogočeno dihanje
12.800 ppm (1,28 %)	2–3 vdih	nezavest
	manj kot 3 min	smrt

3.4.3.2 Vodikov cianid (HCN)

Vodikov cianid je približno 25-krat bolj strupen kot ogljikov monoksid. Prisoten je v dimu gorljivih snovi, ki imajo organsko vezan dušik, še posebej pri požarih z omejeno ventilacijo. Primeri takih materialov so volna, najlon in poliuretani. Je v obliki zelo hlapljive brezbarvne tekočine ali plina, vonj ima po grenkih mandljih. Ko vodikov cianid skozi pljuča vstopi v krvni obtok, se veže z encimi v celicah in jih dezaktivira, tako da ne morejo sprejeti kisika. Že 0,2 ppm HCN-ja v krvi povzroči toksične simptome (zmedenost, slabost), večje koncentracije pa komo in smrt (Stec, 2010).

3.4.4 Dražilni plini

Dražilni plini povzročijo takojšna onesposobitev, predvsem zaradi vpliva na oči in zgornji dihalni trakt (Stec, 2010).

3.4.4.1 Vodikov klorid (HCl)

Vodikov klorid nastaja pri gorenju PVC-ja in drugih organskih spojin, ki vsebujejo klor in vodik. Pri sobni temperaturi je plin brez vonja. Močno draži sluznico v nosu, grlu in na območju zgornje dihalne poti. Simptomi, ki se pojavijo takoj, so hitro dihanje, zoženje dihalnih poti in modro obarvana koža. Koncentracije 50–100 ppm povzročijo otekanje žrela in so lahko usodne že po eni uri (Stec, 2010).

3.4.4.2 Drugi dražilni plini

Pri pirolizi različnih organskih spojin, kot na primer lesa, papirja in bombaža, se proizvaja ekstremno dražilen plin akrolein. Koncentracija 1 ppm že povzroči draženje oči in nosne sluznice. Ocenjeno je, da je smrtna koncentracija med 80 in 260 ppm pri dvajset-minutni izpostavljenosti.

Če so v požaru prisotni specifični materiali, se lahko proizvedejo dušikovi oksidi, amonijak, izocianati, formaldehid in druge spojine, ki so lahko v večjih količinah človeku nevarne (Stec, 2010).

3.5 Vrste in lastnosti nevarnih snovi

3.5.1 Gorljive in vnetljive tekočine

Zaradi pogostosti in količine uporabe predstavljajo gorljive in vnetljive tekočine veliko požarno nevarnost. Najpogostejša je njihova delitev v dve skupini, glede na temperaturo plamenišča:

- lahko vnetljive tekočine, ki imajo tlak pod 3 bari in plamenišče pod 38 °C;
- vnetljive tekočine, ki imajo plamenišče nad 38 °C.

V splošnem lahko rečemo, da večino zgoraj definiranih vnetljivih tekočin predstavljajo ogljikovodiki (spojine, ki vsebujejo ogljik in vodik). Ogljikovodiki so lahko plini (npr. metan, etan), tekočine (npr. bencin, petrolej), zelo viskozne tekočine (npr. katrani) ali trdne snovi (npr. parafin). Vsi ogljikovodiki so gorljivi, delimo jih na nasičene in nenasičene. Nasičeni so manj reaktivni, medtem ko so nenasičeni zelo lahko vnetljivi in imajo v splošnem tudi nižjo temperaturo vrelišča in plamenišča (GZS, 2009).

3.5.2 Gorljivi in vnetljivi plini

Za pline sta značilna nizka gostota in spremembe volumna, ki jih spremljajo spremembe tlaka in temperature. Pline delimo na stisnjene, utekočinjene in pod tlakom raztopljene.

Stisnjeni plini se pri sobni temperaturi, če so pod tlakom v jeklenki ali drugi tlačni posodi, ne utekočinijo (npr. metan, kisik). Utekočinjeni plini se pri sobni temperaturi in povišanih tlakih vsaj deloma utekočinijo (npr. propan, butan). Najbolj znan predstavnik pod tlakom raztopljenih plinov je *dissous* plin za varjenje. *Dissous* plin je acetilen, ki je raztopljen v acetonu pod tlakom 120–150 kPa. Ta način se uporablja zato, ker lahko acetilen že pri majhnih nadtlakih eksplodira, z raztapljanjem v acetonu pa ga je mogoče shranjevati v jeklenkah (GZS, 2009).

3.5.3 Gorljive trdne snovi

3.5.3.1 Plastične mase

Plastične mase so spojine, pri katerih je večje število enakih ali podobnih molekul (monomerov) povezanih v veliko molekulo (polimer). Osnovni sestavni element je večinoma ogljik. Polimeri z dolgimi linearnimi molekulami so termoplasti. Zanje je značilno, da se pri segrevanju najprej zmečajo, nato pa stalijo in stečejo. Termoplasti v tekoči obliki se pri temperaturi plamenišča vžgejo. Pri višjih temperaturah se zgodi dekompozicija oziroma razpadanje na monomere. Ko jih ohlajamo, se spet strdijo.

Preglednica 2: strupeni produkti gorenja pri gorenju termoplastov (GZS, 2009)

Vrsta termoplasta	Strupeni produkti gorenja
vsebuje atome dušika (N)	dušikovi oksidi (NO_x), amoniak (NH_3) in vodikov cianid (HCN)
vsebuje atome klora (Cl)	vodikov klorid (HCl) in fosgen (COCl_2)
vsebuje atome broma (Br)	vodikov bromid (HBr) in karbonil bromid (COBr_2)
vsebuje atome fluora (F)	vodikov fluorid (HF) in karbonil fluorid (COF_2)

Druga velika skupina polimerov so duromeri ali termostabilni polimeri. Zaradi načina postavitve posameznih linearnih verig se duromeri pri segrevanju ne talijo in so zato požarno varnejši kot termoplasti. Gorijo podobno kot les. Pri izdelavi polimerov oziroma proizvodnji plastičnih mas se pogosto uporabljajo katalizatorji. Običajno so to snovi, ki so oksidanti in pospešujejo reakcije sinteze. Tipičen primer so peroksidi, kovinski halidi in kovinski alkili. Te snovi so zelo lahko vnetljive in reaktivne tako v trdnem ali tekočem agregatnem stanju. Nevarne so tudi penjene plastične mase, ki se lažje vžgejo in lažje gorijo (GZS, 2009).

4 POŽAR V OBJEKTU

4.1 Faze požara

Tipičen požar v objektu poteka v naslednjih fazah (slika 5):

- vžig,
- rastoči požar,
- požarni preskok ali s tujko »flash-over«,
- polno razviti požar,
- pojemajoči požar (Zavod Vizija Varnosti, 2014).



Slika 5: požarna krivulja (Zavod Vizija Varnosti, 2014)

4.1.1 Faza vžiga

Vžig oziroma faza vžiga je prva faza gorenja požara. V tej fazi začne goreti gorljivi material. Prisotni morajo biti vsi trije elementi požarnega trikotnika (zrak, toplota in gorljiva snov). Do vžiga lahko pride zaradi direktnega plamena, stika z drugimi vročimi ali gorečimi materiali, samovžiga, eksotermne kemijske reakcije, električne iskre, iskre zaradi trenja itd. (Toming 1, 2013).

4.1.2 Faza rastočega požara

Fazi vžiga sledi faza rastočega požara, ko je hitrost razvoja požara odvisna predvsem od lastnosti gorljivih materialov. Prezračevanje, geometrija prostora in lastnosti obodnih gradbenih elementov tedaj nimajo ključnega vpliva na hitrost razvoja. Goreči materiali postanejo izvor vžiga za še negoreče materiale. Temperatura počasi narašča.

Pri počasnem gorenju (npr. v primeru tlenja) plamena ni, količina sproščene toplote je majhna, dim in morebitni gorljivi plini zapolnijo prostor. Ker je količina sproščene toplote majhna, je tudi toplotni vzgon majhen in na gibanje dima ter drugih plinov vpliva zgolj pretok okoliškega zraka. Pri hitrem požaru (npr. gorenju kompaktnega lesa) prevladuje gorenje s plameni (GZS, 2009).

4.1.3 Faza požarnega preskoka (»flash-over«)

Ko se zaradi zviševanja temperature zraka oziroma dimnih plinov (500–600 °C) pod stropom zaprtih prostorov in posledično toplotnega sevanja vroče plinaste plasti v zelo kratkem času vžgejo vsi gorljivi materiali v prostoru, potem pravimo, da se je zgodil požarni preskok ali s tujko »flash-over«. Da do požarnega preskoka pride, je potrebno toplotno sevanje okoli 15 do 20 kW/m² (Dubravac, 2014).

4.1.4 Faza polno razvitega požara

Za to fazo je značilno, da požar zajame vse gorljive materiale v prostoru. Naraščanje temperature ni več izrazito, pozneje začne temperatura počasi padati. Zaradi pomanjkanja kisika večina materialov v tej fazi ne zgore, temveč pride do pirolize. Hitrost sproščanja toplote je največja; nanjo ključno vplivajo zunanji faktorji, kot na primer ventilacija, geometrija prostora in lastnosti obodnih struktur prostora. Če požar nima zadostne ventilacije, najverjetneje ne preide v fazo požarnega preskoka, oziroma sam ugasne. Prav tako ne pride do požarnega preskoka, če materiali gorijo počasi, oziroma se toplota sprošča počasi. V tej fazi se požar običajno širi v sosednje prostore in na sosednje objekte (GZS, 2009).

4.1.5 Faza pojemajočega požara

V fazi pojemajočega požara prične zmanjkovati gorljivega materiala in kisika, zato požar pojema. Če je do pojemanja požara prišlo zaradi pomanjkanja kisika in ne zaradi pomanjkanja gorljivega materiala, lahko ob ponovnem dovajanju kisika (razbitje okenskega stekla, odprtje vrat), tudi po razmeroma dolgem času, požar ponovno preide v fazo intenzivne rasti (Toming 1, 2013).

4.2 Intenziteta požara in dejavniki, ki nanjo vplivajo

Intenziteta gorenja oziroma hitrost sproščanja toplote ključno vpliva na konstrukcijske elemente. Odvisna je od:

- količine dovedenega zraka,
- odvajanja toplote iz prostora,
- površin gorljivih materialov,
- požarnih lastnosti materialov,
- požarne obremenitve (GZS, 2009).

4.2.1 Količina dovedenega zraka

V normalni atmosferi materiali gorijo pri 21 % deležu kisika v zraku. Med gorenjem se kisik porablja in ko njegov delež v zraku pade pod 15 %, v večini primerov taka koncentracija ne zadostuje za nadaljnje gorenje. Izjema so materiali, ki pri segrevanju sami oddajajo kisik in posledično lahko gorijo v atmosferi z nižjim deležem kisika (npr. peroksidi, nitrati, permanganati) (Štraus in sod., 2014).

V primeru požara z omejenim dotokom svežega zraka je ventilacija tista, ki določa potek požara. Za take požare je značilno počasno naraščanje temperature, predčasno zmanjšanje intenzitete gorenja in pogosto tudi ugasitev. V primeru požara z zadostno količino kisika potek požara določajo požarne lastnosti materialov in lastnosti obodnih konstrukcijskih elementov (GZS, 2009).

4.2.2 Odvajanje toplote iz prostora

Količina toplote, ki jo absorbirajo obodni elementi in ki se iz prostora odvede v okolico, vpliva na hitrost gorenja in na temperaturo v prostoru. Ključno vlogo pri tem imajo toplotne lastnosti

obodnih gradbenih elementov, to je toplotna kapaciteta in toplotna prevodnost. Vroči dimni plini se iz prostora v okolico odvajajo tudi skozi vertikalne in horizontalne odprtine. Pri tem se znižuje temperatura v prostoru in posledično gradbeni elementi utrpijo manjše poškodbe (GZS, 2009).

4.2.3 Površina gorljivih materialov

Gorenje trdnih in tekočih snovi se zmeraj začne na površini snovi. Materiali, ki imajo večjo specifično površino, se hitreje vžgejo in raje gorijo. Tipičen primer tega so lesni sekanci in debela drva. Čeprav gre za isti material, se sekanci zaradi večje specifične površine vžgejo veliko prej kot debela drva (Friedman, 2009).

4.2.4 Požarne lastnosti materialov

Širjenje požara v prostoru nastanka požara in v sosednje prostore je odvisno predvsem od požarnih lastnosti gradbenih materialov, kot na primer gorljivosti, vnetljivosti, toplotne prevodnosti in emisivnosti, temperature vžiga in samovžiga, hitrosti širjenja plamena po površini, hitrosti sproščanja toplote itd. Negorljivi materiali ne gorijo s plamenom, požar se preko njih lahko širi samo posredno, to je s prenosom toplote. Pri gorljivih materialih pa se požar širi tako neposredno kot posredno (GZS, 2009).

4.2.5 Požarna obremenitev

Požarna obremenitev je skupna količina toplote, ki se sprosti pri popolnem sežigu vseh gorljivih materialov v obravnavanem prostoru. Količino toplote, ki se sprosti, izrazimo v kJ/kg in je za vsak material drugačna (npr. pri gorenju papirja se sprosti veliko manj toplote kot pri gorenju kerozina) (GZS, 2009).

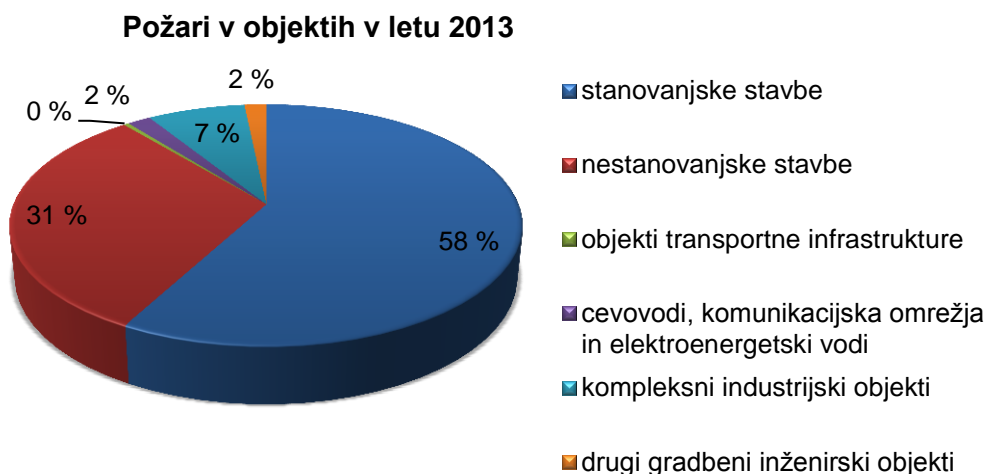
4.3 Požarna statistika

Vsi statistični podatki so povzeti po javnih poročilih spletne strani SPIN (Uprava RS za zaščito in reševanje, 2014).

V letu 2013 je bilo v Sloveniji evidentiranih 6988 požarov. Najpogostejši so bili požari v objektih (53 %), sledili so požari v naravi (32 %) (slika 6).



Slika 6: požari v letu 2013



Slika 7: požari v objektih v letu 2013

Med požari v objektih (slika 7) so bili najpogostejši požari v stanovanjskih stavbah (58 %) in nestanovanjskih stavbah (31 %) ter kompleksnih industrijskih objektih (7 %).

Glavni vzroki za požare (slika 8) so bile gradbene in tehnične pomanjkljivosti (52 %). Kot pogost vzrok gradbenih in tehničnih pomanjkljivosti so bili navedeni neustrezno stanje dimniških naprav (52 %), poškodba naprav oziroma kratek stik (23 %), neustrezno tehnično stanje prostorov in naprav (5 %) ter vžig gorljivih oziroma lahko vnetljivih snovi (1 %).



Slika 8: vzroki požarov v letu 2013

5 POŽARNA ZAKONODAJA

5.1 Zakon o varstvu pred požarom

Kmalu po osamosvojitvi Slovenije je bil sprejet Zakon o varstvu pred požarom (ZVPoz), Ur. l. RS, št. 71/93, ki je vzpostavil osnovna načela požarne preventive, upravno in strokovno organiziranost ter nadzor nad izvajanjem predpisov.

Zakon ureja sistem varstva pred požarom, ki obsega organiziranje, načrtovanje, izvajanje, nadzor ter financiranje dejavnosti in ukrepov varstva pred požarom. Cilj dejavnosti in ukrepov varstva pred požarom je varovati ljudi, živali, premoženje in okolje pred požarom in eksplozijo.

Konec leta 2012 je bil sprejet Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu pred požarom (ZVPoz-D), Ur. l. RS, št. 83/12. Z njim so bile vpeljane nekatere spremembe in dopolnitve, ki se nanašajo predvsem na področja izdelave projektne dokumentacije, nadzora nad vgrajenimi sistemi požarne zaščite, usposabljanja in zbiranja podatkov ter evidenc.

5.2 Uredba (EU) št. 305/2011

Direktiva 89/106/EEC o gradbenih proizvodih je bila leta 1991 prenesena v pravni red vseh držav članic EU. V Sloveniji je začela veljati leta 2000 z Zakonom o gradbenih proizvodih (ZGPro, Ur. l. RS, št. 52/00 s spr.). Ker je bila Direktiva 89/106/EEC pomanjkljiva in se je v različnih državah različno izvajala, je leta 2011 pričela veljati (glavnina se je začela uporabljati leta 2013) Uredba (EU) št. 305/2011, Ur. l. EU, št. 88, in razveljavila Direktivo. Uredba zagotavlja, da so informacije o lastnostih gradbenih proizvodov, ki so dane na trg, harmonizirane na nivoju EU, da so te informacije natančne in zanesljive ter da so pravila in pogoji za namestitev oznake CE jasnejša.

V Uredbi so definirane tudi osnovne zahteve za gradbene objekte:

- mehanska odpornost in stabilnost,
- varnost pri požaru,
- higiena, zdravje in okolje,
- varnost in dostopnost pri uporabi,
- zaščita pred hrupom,
- varčevanje z energijo in ohranjanje toplote,
- trajnostna raba naravnih virov.

5.2.1 Osnovna zahteva št. 2: varnost pri požaru

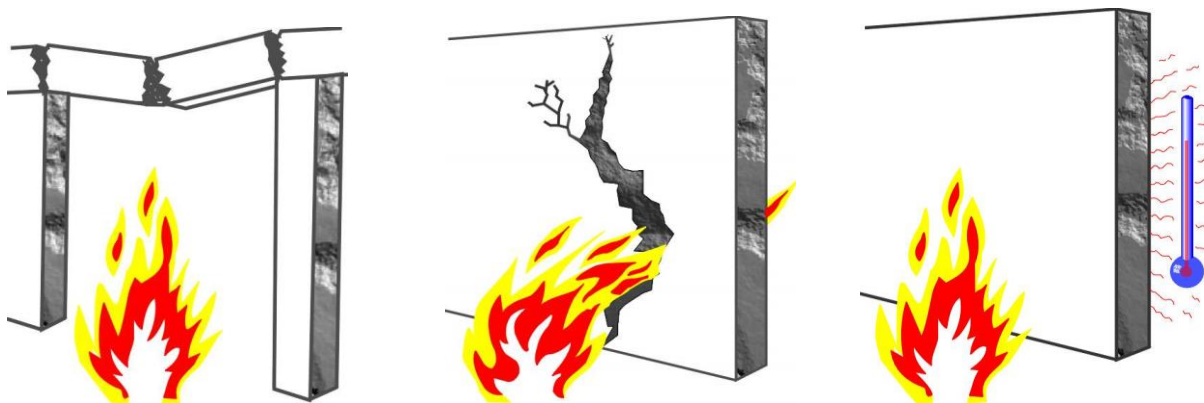
Gradbeni objekti morajo biti načrtovani in grajeni tako, da je ob izbruhu požara:

- a) določen čas še ohranjena nosilnost konstrukcije,
- b) omejeno nastajanje in širjenje požara in dima v gradbenem objektu,
- c) omejeno širjenje požara na sosednje gradbene objekte,
- d) mogoče osebam v objektu zapustiti objekt ali da jih je mogoče rešiti na drug način,
- e) upoštevana varnost reševalnih ekip.

Posamezni kriteriji za izpolnjevanje osnovnih zahtev so podani v razlagalnih dokumentih. Razlagalni dokument osnovne zahteve št. 2 obravnava objekte v okviru varnosti pri požaru. Določa izdelke in razrede izdelkov ter njihove lastnosti, ki se nanašajo na njihovo zadovoljivo uporabo.

Kriteriji za oceno požarne odpornosti izdelkov so (slika 9):

- nosilnost (R), ki označuje odpornost nosilnega dela stavbe proti zrušitvi;
- celovitost (E), ki označuje odpornost dela stavbe s funkcijo požarnega ločevanja proti vdoru ognja, dima in vročih plinov;
- izolativnost (I), ki označuje odpornost dela stavbe s funkcijo požarnega ločevanja proti prenosu prekomerne vročine.



Slika 9: nosilnost, celovitost in izolativnost (Tomazin, 2010)

Poleg simbola se napiše še pripona, ki označuje izmerjeno delovanje v minutah (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360).

Označevanje lahko razširimo še:

- s toplotnim sevanjem (W), kjer izolativnost nadzorujemo na podlagi oddanega sevanja;
- z mehansko trdnostjo (M), ko obravnavamo posamezne mehanske vplive;
- s samozapiranjem (C) za vrata, opremljena s samozapiranjem;
- s prepuščanjem dima (S) za elemente s posebno omejitvijo širjenja dima.

5.2.2 Osnovna zahteva št. 3: higiena, zdravje in okolje

Gradbeni objekti morajo biti načrtovani in grajeni tako, da skozi celoten življenjski cikel ne bodo ogrožali higiene ali zdravja in varnosti delavcev, oseb v objektu ali sosedov oziroma prekomerno vplivali na kakovost okolja ali podnebje skozi njihov cel življenjski cikel, predvsem zaradi:

- a) sproščanja strupenih plinov,
- b) emisij nevarnih snovi, hlapnih organskih spojin, toplogrednih plinov ali nevarnih delcev v zraku v zaprtih prostorih ali zraku na prostem,
- c) emisij nevarnega sevanja,
- d) izpusta nevarnih snovi v podzemno vodo, morske vode, površinske vode ali zemljo,
- e) izpusta nevarnih snovi v pitno vodo ali snovi, ki imajo drug negativen vpliv na pitno vodo,
- f) napačnega odvajanja odpadne vode, emisij izpušnih plinov ali napačnega odstranjevanja trdnih ali tekočih odpadkov,
- g) vlage v delih objekta ali na površinah znotraj objekta.

5.3 Tehnična smernica TSG-1-001:2010

Po Zakonu o graditvi objektov (Ur. l. RS, št. 102/04 s spr.), je tehnična smernica opredeljena kot dokument, s katerim se za določeno vrsto objekta uredijo natančnejša opredelitev osnovnih zahtev, pogoji za projektiranje in razredi gradbenih proizvodov oziroma materialov, ki se smejo vgrajevati, z namenom, da se zagotovi zanesljivost objekta ves čas njegove življenjske dobe.

Tehnična smernica TSG-1-001:2010 je nastala na podlagi Pravilnika o požarni varnosti v stavbah (Ur. l. RS, št. 31/04, 10/05, 83/05, 14/07 in 12/13) in je sestavljena iz štirih poglavij:

- širjenje požara na sosednje objekte,
- nosilnost konstrukcije in širjenje požara po stavbah,
- evakuacijske poti in sistemi za javljanje in alarmiranje,
- naprave za gašenje in dostop gasilcev.

Stavbe je treba načrtovati tako, da se požar določen čas ne bo mogel razširiti na sosednje objekte. To lahko zagotovimo z ustrezno izbiro materialov ter požarno zaščito fasade in strehe objekta, z ustreznim odmikom objekta, delitvijo stavbe na požarne sektorje in vgradnjo sprinklerskega sistema.

Kot je navedeno v osnovni zahtevi št. 2 – varnost pri požaru, morajo biti stavbe projektirane in grajene tako, da njihova nosilna konstrukcija v primeru požara določen čas ohrani potrebno nosilnost. V ta namen gradimo požarne sektorje in uporabljamo požarnovarne materiale, ki izpolnjujejo kriterije nosilnosti, celovitosti in izolativnosti.

V primeru požara mora biti na voljo zadostno število ustreznih evakuacijskih poti in izhodov, ki uporabniku omogočajo, da hitro in varno zapusti stavbo. Treba je upoštevati, da je evakuacijska pot praviloma tudi pot za dostop gasilcev v stavbo ter pot za gašenje in reševanje v stavbi.

Stavbe in njihova oprema morajo biti projektirane in grajene tako, da so v primeru požara zagotovljene naprave oziroma oprema, ki jo za gašenje lahko uporabijo usposobljeni gasilci in tudi drugi uporabniki.

5.4 Preskušanje požarnih lastnosti gradbenih elementov

V preteklosti je vsaka država razvila svoje preizkusne metode za klasifikacijo gradbenih materialov, kar pa je oviralo pretok blaga med državami. Prav zato je Evropska organizacija za standardizacijo (CEN) pripravila nove postopke preizkušanja in klasifikacije gradbenih materialov.

Razvili so nov preizkusni postopek, tako imenovani test SBI. Vpeljanih je bilo sedem glavnih razredov za klasifikacijo gradbenih materialov: A1, A2, B, C, D, E in F. Ti razredi predstavljajo različno stopnjo gorljivosti materiala. Materiali evrorazreda A1 in A2 so negorljivi in zaradi njih ne more priti do požarnega preskoka. Isto velja za materiale, ki so v razredu B, le da so ti težko vnetljivi. Za materiale v preostalih skupinah (C, D, E in F) velja, da obstaja možnost, da bo po določenem času nastopil požarni preskok. V evrorazredu F so materiali, za katere požarne lastnosti niso bile določene ali pa pri preizkusu niso zadostili kriterijem za uvrstitev v višji razred (Tomazin, 2010).

6 METODE

6.1 Modeliranje objekta s programsko opremo FDS in Pyrosim

Nist Fire Dynamics Simulator (NIST, 2010) ali krajše FDS je računalniški program, ki se uporablja za simuliranje požarne dinamike. Razvil ga je ameriški National Institute of Standards and Technology.

FDS izvede simulacijo z dinamiko tekočin tako, da izračuna tok plinov, ki nastanejo pri gorenju. Pri tem numerično rešuje sistem Navier–Stokesovih enačb, ki se uporabljajo za termične tokove majhnih hitrosti, kot na primer prenos dima in toplote, ki nastaneta pri požaru. Značilnosti programa so:

- large eddy simulation (LES) – matematični model turbulence, ki se uporablja pri računu dinamike tekočin (dela z Navier–Stokesovimi enačbami);
- zgorevalni model mešalnih razmerij – model predvideva, da se stopnja gorenja uravnava z mešalnim razmerjem, to je razmerjem plina v določeni točki toka, ki izvira iz goriva;
- radiacijski model – radiacijski prenos toplote temelji na reševanju enačb za radiacijo v idealnem plinu;
- pravokotne mreže – možna je uporaba več pravokotnih numeričnih mrež, kar omogoča natančnejši izračun dela simulacije;
- robni pogoji – za vse trdne površine so predpisane potrebne fizikalne lastnosti in toplotni robni pogoji.

Za modeliranje požara je najprej treba podati vhodne podatke v obliki besedilne datoteke. Treba je podati fizične karakteristike simuliranega prostora, računsko mrežo, izvor ognja in preostale robne pogoje ter podatke o napravah in merilcih, ki beležijo rezultate simulacije in jih zapišejo v izhodne datoteke. Ker je izračun obsežen in posledično tudi dolgotrajen, nam program za hitrejši izračun omogoča uporabo paralelnih procesorjev več računalnikov (McGrattan in sod., 2007).

Pri večjih in zahtevnejših objektih je zapis podatkov v vhodno besedilno datoteko zamuden in zahteven, zato so se razvili različni grafični vmesniki, prek katerih definiramo vse potrebne podatke, ki jih FDS potrebuje za izračun simulacije. Primer takega grafičnega vmesnika je Pyrosim (Thunderhead engineering, 2011). Program ima uporabniku prijazen meni in razna orodja, s katerimi preprosto narišemo 3D-model in definiramo vse potrebne parametre.

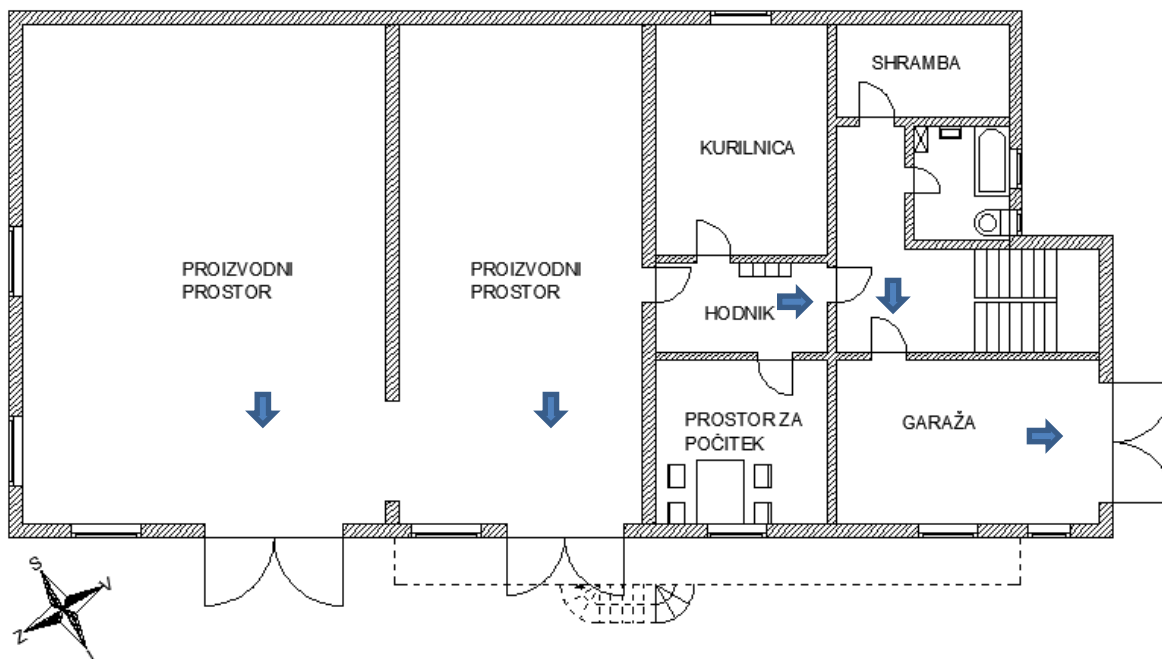
6.2 Analiza rezultatov s programom Smokeview in programom za obdelavo razpredelnic

Smokeview (NIST, 2010) ali krajše SMW je vizualizacijski program, ki omogoča prikaz rezultatov simulacij, izračunanih s programom FDS. Omogoča nam grafični prikaz količin na računski mreži skozi celoten čas simulacije. Program upravljamo prek preprostega sistema menijev. Izračunane količine lahko poljubno vklapljammo in izklapljammo, kar nam omogoča pregled in analizo rezultatov.

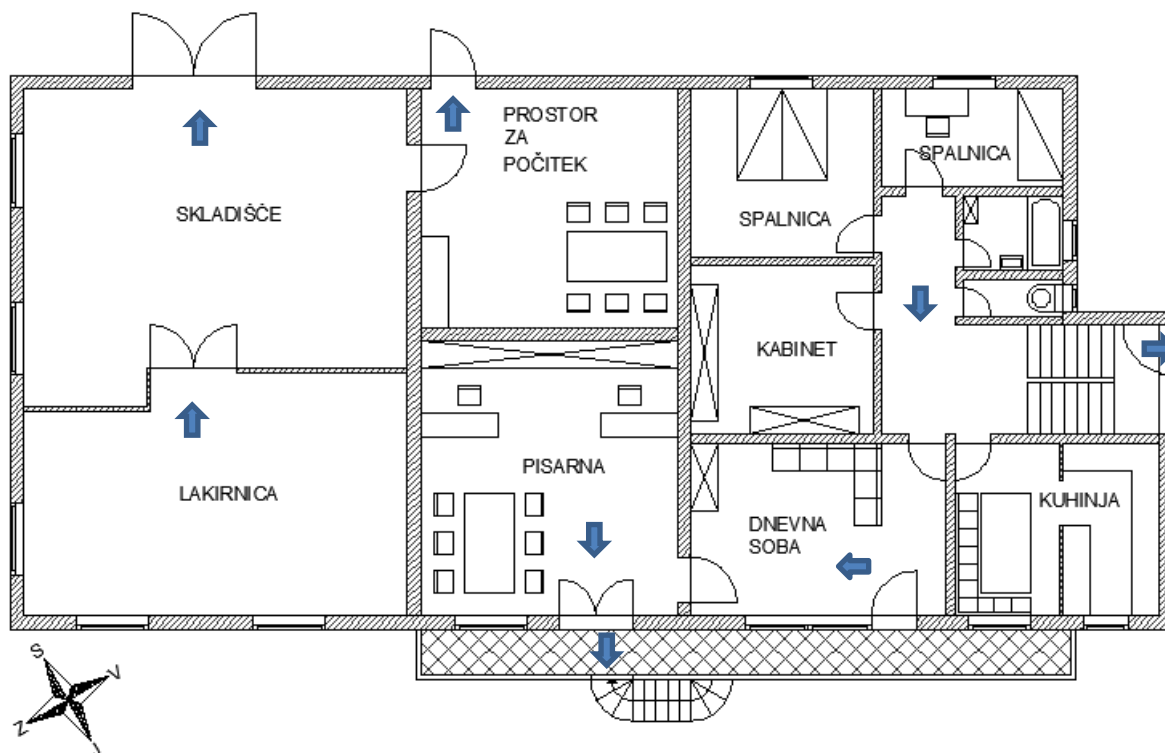
S programom za obdelavo razpredelnic lahko dobljene rezultate iz simulacij predstavimo v obliki grafov in tako ustvarimo primerjave med variantami simulacij.

7 OBRAVNAVANA STAVBA

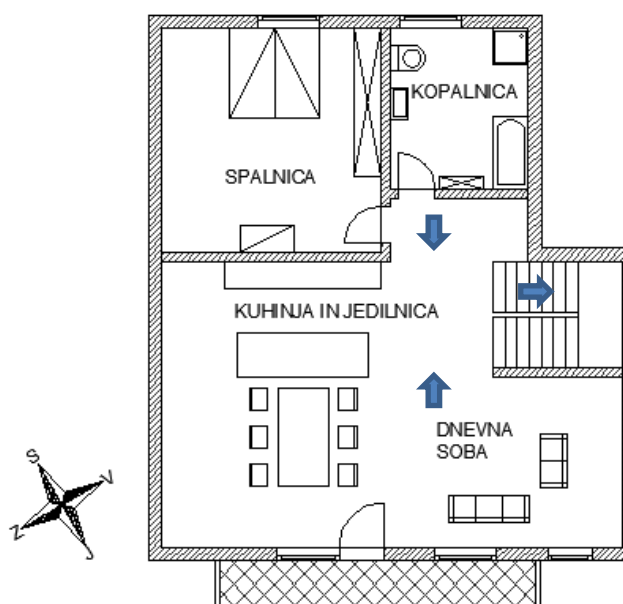
Objekt je sestavljen iz industrijskega in stanovanjskega dela, kot je prikazano na slikah spodaj (slika 10, slika 11, slika 12). V prvem nadstropju stanovanjskega dela živi lastnika podjetja, v drugem nadstropju pa mlada družina. V industrijskem delu objekta se izvaja lesnopredelovalna industrija, pri čemer se uporabljajo razne poliuretanske barve in razredčila. V pritličju objekta ni materialov, ki bi pri gorenju lahko proizvajali strupene produkte. Tam so naprave za žaganje lesa in sanitarije, zato smo to etažo iz analize popolnoma izpustili in se osredotočili samo na prvo in drugo nadstropje objekta.



Slika 10: tloris pritličja



Slika 11: tloris 1. nadstropja

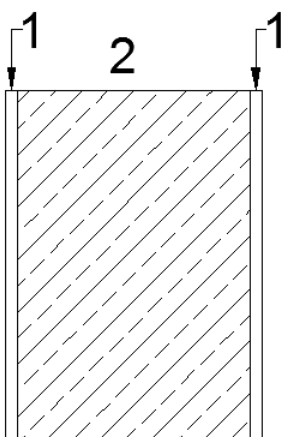


Slika 12: tloris 2. nadstropja

7.1 Konstrukcijski sklopi

Pri modeliranju so bile uporabljene sestave konstrukcijskih sklopov, ki so predstavljene v naslednjih poglavjih. Informacije o sestavah so bile pridobljene delno iz načrtov objekta, delno z ogledom stavbe. Lastnosti posameznih materialov so pridobljene iz uporabniškega priročnika za program TEDI (Perdan in sod., 2012).

7.1.1 Predelna stena

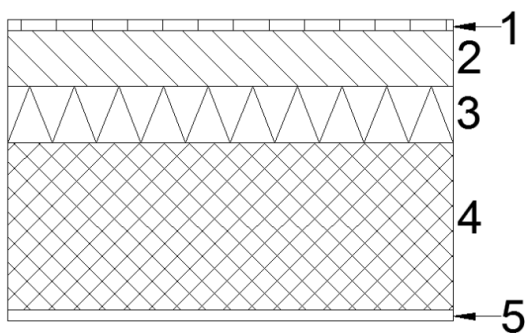


Slika 13: prikaz sestave predelne stene

Preglednica 3: sestava predelne stene

		Debelina [cm]	Gostota [kg/m ³]	Specifična toplota [J/kgK]	Toplotna prevodnost [W/mK]
1	Omet	1	2100	1050	1,4
2	Penobetonski bloki	20	800	1050	0,35
1	Omet	1	2100	1050	1,4

7.1.2 Medetažna konstrukcija – stanovanjski del

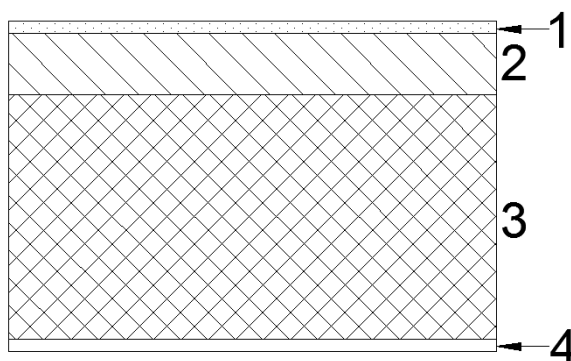


Slika 14: prikaz sestave medetažne konstrukcije v stanovanjskem delu

Preglednica 4: sestava medetažne konstrukcije v stanovanjskem delu

		Debelina [cm]	Gostota [kg/m ³]	Specifična toplota [J/kgK]	Toplotna prevodnost [W/mK]
1	Parket	1	700	1670	0,21
2	Cementni estrih	5	2200	1050	1,4
3	Zvočna izolacija (EPS)	5	30	1260	0,034
4	AB plošča	15	2500	960	2,33
5	Omet	1	2100	1050	1,4

7.1.3 Medetažna konstrukcija – industrijski del

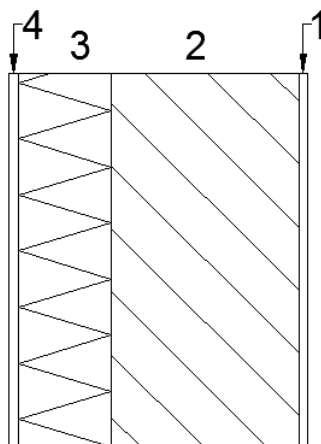


Slika 15: prikaz sestave medetažne konstrukcije v industrijskem delu

Preglednica 5: sestava medetažne konstrukcije v industrijskem delu

		Debelina [cm]	Gostota [kg/m ³]	Specifična toplota [J/kgK]	Toplotna prevodnost [W/mK]
1	Epoksi premaz	0,3	1100	1050	0,17
2	Cementni estrih	5	2200	1050	1,4
3	AB-plošča	20	2500	960	2,33
4	Omet	1	2100	1050	1,4

7.1.4 Zunanja stena



Slika 16: prikaz sestave zunanje stene

Preglednica 6: sestava zunanje stene

		Debelina [cm]	Gostota [kg/m ³]	Specifična toplota [J/kgK]	Toplotna prevodnost [W/mK]
1	Omet	1	2100	1050	1,4
2	Opeka	20	1200	920	0,47
3	Penobetonski bloki	10	15	1260	0,032
4	Omet	1	2100	1050	1,4

7.1.5 Okna

Preglednica 7: podatki o oknih

Material okvira	les
Tip zasteklitve	dvoslojno steklo
Toplotna prehodnost okna U_w [W/m^2K]	1,2
Toplotna prehodnost stekla U_g [W/m^2K]	1



Slika 17: videz oken (Satler okna in vrata, 2013)

7.1.6 Vrata

V stanovanjskem delu so vrata iz masivnega bukovega lesa, v industrijskem delu pa so kovinska.

7.2 Drugi materiali

Za modeliranje notranje opreme in pohištva so bili poleg zgoraj navedenih materialov uporabljeni še materiali iz preglednice 8. Lastnosti posameznih materialov so pridobljene iz uporabniškega priročnika za program TEDI (Perdan in sod., 2012).

Preglednica 8: drugi uporabljeni materiali

	Gostota [kg/m^3]	Specifična toplota [J/kgK]	Toplotna prevodnost [W/mK]	Emisivnost [-]
Les	500	2090	0,14	0,9
Tekstil	28	1700	0,05	0,9
Jeklo	7850	460	45,8	0,95
PVC	1380	1290-1590	0,134-0,192	0,95
Poliuretanski lak	972	2450	0,17	1

7.3 Opis računskega modela

Model je sestavljen iz petih mrež končnih elementov. Takšna razdelitev je bila potrebna zaradi lažjega modeliranja oziroma podajanja geometrije. Coni M1 in M2 predstavljata industrijski del objekta, cone M3, M4 in M5 pa stanovanjski del (slika 18). Industrijski in stanovanjski del sta povezana samo z enim vrati, ki so na stiku con M1 in M3 oziroma med pisarno in dnevno sobo.



Slika 18: mreže končnih elementov

Računska mreža je najgostejša v coni M1, saj tam požar izbruhne in se pojavijo prvi produkti gorenja. V preostalih conah je mreža manj gosta, saj za opazovanje dinamike gibanja plinov in njihovih koncentracij ni potrebna takšna natančnost, poleg tega pa se tako skrajša čas, ki ga računalnik potrebuje za izračun simulacije. Dimenzije con in končnih elementov so podane v preglednici 9.

Preglednica 9: dimenzije računskih mrež

		M1	M2	M3	M4	M5
Dimenzije [m]	x	14,70	14,70	10,60	10,60	10,60
	y	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20
	z	2,60	5,70	2,60	2,85	2,85
Dimenzije končnih elementov [m]		0,16 x 0,16 x 0,16	0,32 x 0,32 x 0,32	0,32 x 0,32 x 0,32	0,32 x 0,32 x 0,32	0,32 x 0,32 x 0,32
Število končnih elementov		132.480	37.260	11.880	13.365	13.365

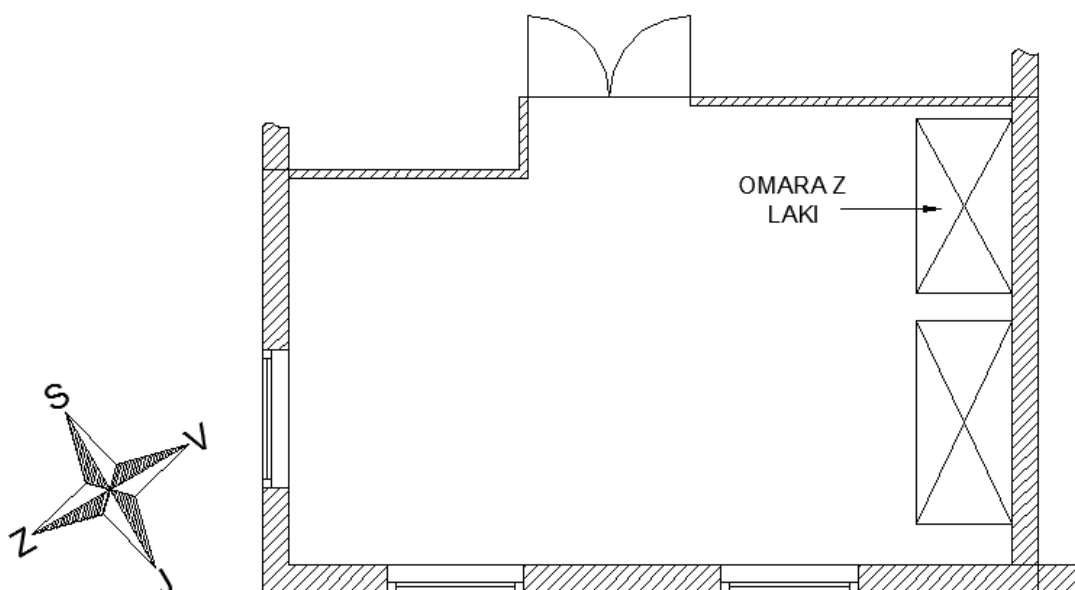
7.4 Zasnova simulacije in robni pogoji

Simulacija je zasnovana tako, da do izvora požara pride v lakirnici (slika 19). Vzrok za nastanek požara je poškodba električne napeljave oziroma kratek stik. Ta povzroči, da se vžge les, ki je zložen v prostoru. Količina lesa je odvisna od števila naročil in njihovih obsežnosti ter posledično zelo variira. Včasih je lakirnica popolnoma prazna, včasih pa je v njej velika količina lesenih izdelkov. S simulacijo sem hotela preveriti najbolj kritično varianto, to je varianto, ko bi bila v lakirnici prisotna velika količina lesenih izdelkov. Zaradi velike količine lesa, za katero sem predpostavila, da je v prostoru, sem predvidela, da je hitrost širjenja požara velika, in zato sem v okviru standarda EN 1991-1-2 za sproščeno toploto na

enoto površine upoštevala vrednost 500 kW/m^2 . Če to vrednost pomnožimo s površino $0,49 \text{ m}^2$, na kateri se požar zgodi, dobimo moč začetnega požara, ki je 245 kW .

Predvidena temperatura zraka je $20 \text{ }^\circ\text{C}$, zračni tlak 1013 mbar in vlažnost zraka 40% . Vrednosti so bile izbrane s pomočjo podatkov pridobljenih iz bližnje vremenske postaje. Simulacija je bila izvedena za prvih 1000 s od nastanka požara. Takšen časovni interval sem izbrala zato, ker me je zanimalo predvsem širjenje produktov gorenja v daljšem časovnem obdobju in posledično potencialne nevarnosti za gasilne in reševalne ekipe, ki bi na kraj nesreče prišle v času 10 min ali več.

Na tem mestu je treba povedati, da program pri izračunu koncentracije CO_2 ne upošteva volumskega deleža ogljikovega dioksida v zraku ($0,033 \%$ oz. 330 ppm).



Slika 19: tloris lakirnice

Večina lakov, razredčil in trdilcev je v ločenem shranjevalnem prostoru zunaj objekta. V lakirnici je le manjša količina lakov, ki je namenjena sprotni rabi. Predpostavila sem, da so v prostoru štiri posode poliuretanskega laka. Delavec vzame posodo s police, pri čemer mu embalaža zdrsne iz roke in lak se polije po tleh. Nastane velika luža, ki jo namerava takoj očistiti. V prostoru nima potrebne opreme, zato odide skozi vrata in se odpravi iskat vse potrebno. V tem času izbruhne prej opisani požar. Ko se požar širi, začne goreti tudi lak.

7.4.1 Poliuretanski lak in reakcija gorenja

Poliuretanski lak, ki je v tem objektu, je lak na osnovi alkidne smole in organskih topil. Vsi podatki o laku so pridobljeni iz varnostnega spričevala (priloga A). Koncentracije snovi, ki ga sestavljajo, so naslednje:

- 2,5 % metil etil keton
- 2,5 % 2-metoksi 1-metil etil acetat
- 10–25 % toluen
- 25–50 % ksilen
- 2,5 % metanol

Je lahko vnetljiv. Temperatura plamenišča je 4 °C, vrelišča pa 78,50 °C. Pri vdihavanju in stiku s kožo je zdravju škodljiv. Draži oči, dihalni sistem in kožo. Pri normalnih pogojih uporabe in skladiščenja je stabilen in nereaktiven. Pri gorenju in razpadanju lahko nastanejo nevarni produkti, kot na primer ogljikov monoksid, ogljikov dioksid, oksidirane dušikove spojine itd.

Prevladujoča reakcija gorenja, ki sem jo modelirala v programu, ni gorenje poliuretanskega laka, temveč gorenje lesa. Razlog za to je tehnične narave. Pri vsakem popolnem izgorevanju nastajata ogljikov dioksid in voda, ki pa nista toksična (CO₂ je toksičen samo pri zelo velikih koncentracijah). Moj namen je bil proučiti predvsem količine strupenih in nevarnih plinov, ki nastajajo pri nepopolnem izgorevanju. Zaradi občutljivosti teme je na spletu in v literaturi za širšo javnost dostopnih zelo malo informacij s tega področja. Podatki o gorenju omenjenega poliuretanskega laka, ki sem jih lahko pridobila, so torej zelo pomanjkljivi. Poleg tega je definiranje nepopolne reakcije gorenja v programu izredno zahtevno in presega obseg tega diplomskega dela. Zaradi omenjenih razlogov je bilo očitno, da reakcije gorenja laka ne bom mogla modelirati tako, da bi bilo prikazano dejansko stanje in da bi bili rezultati realni. Posledično sem se odločila za prevladujočo reakcijo gorenja lesa. Dodaten razlog za prevladujočo reakcijo gorenja lesa je dejstvo, da je v lakirnici veliko več lesa kot pa laka, zato bo gorel predvsem les in ne lak.

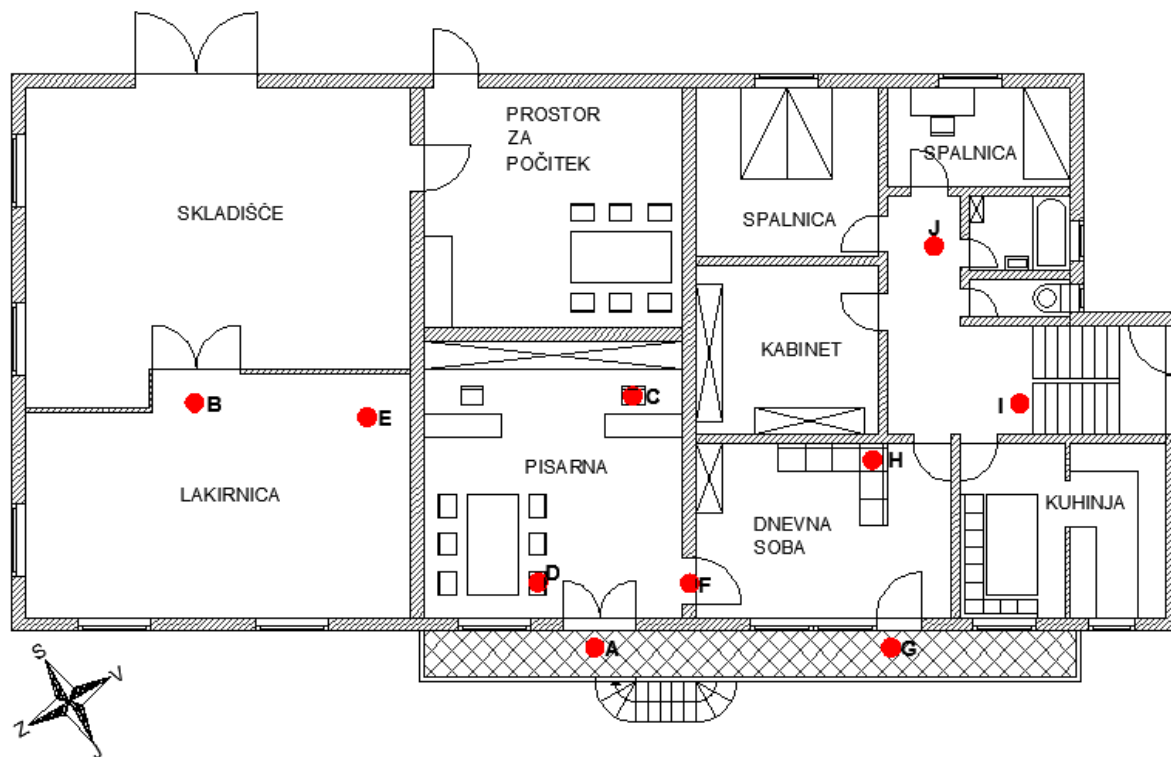
Ker gorenja poliuretanskega laka ni bilo mogoče modelirati, posledično ni bilo mogoče spremljati dinamike njegovih produktov gorenja in predvideti njihove količine. Dejstvo je, da se med procesom gorenja sproščajo dim, ogljikov dioksid in ogljikov monoksid, ki se od mesta nastanka požara širijo po celotnem objektu. V tem procesu lahko nastajajo drugi strupeni produkti gorenja, kot na primer dušikove spojine. Ker njihove koncentracije ni mogoče določiti, sem predpostavila, da se širijo z dimom in da njihovo dinamiko gibanja aproksimiramo tako, da v objektu spremljamo dinamiko gibanja in koncentracijo CO ter CO₂. Za natančnejše rezultate o njihovi dinamiki gibanja in koncentracijah bi bile potrebne dodatne raziskave, ki presegajo obseg te diplomske naloge.

7.5 Merilne naprave

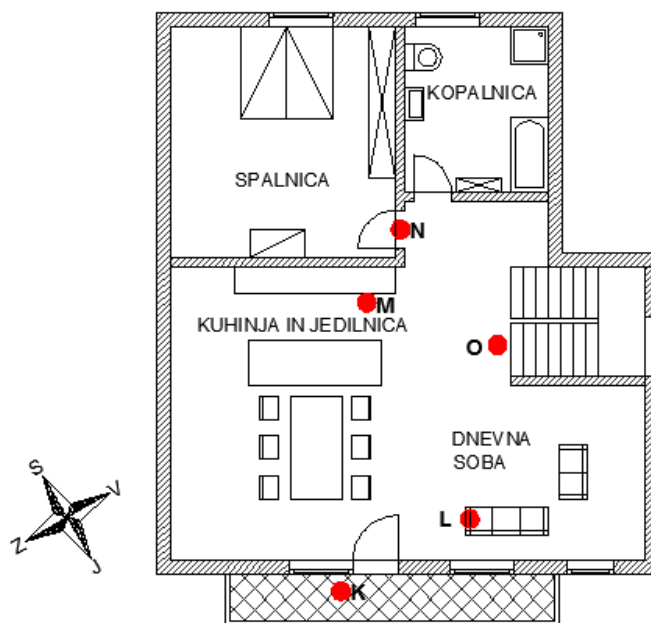
Podatki o merilnih napravah, ki so bile nameščene v modelu, so v preglednici 10 ter na slikah 20 in 21. Merilne naprave so bile postavljene na višino nosa oziroma ust povprečno visoke odrasle osebe. Povprečno visoka odrasla oseba naj bi po podatkih Statističnega urada RS merila 1,71 m. Postavljene so bile na mesta v objektu, kjer bi se osebe lahko dalj časa zadrževale ali pa so pomembna z vidika evakuacijskih poti.

Preglednica 10: podatki o merilnih napravah

		Opis lokacije	Koordinate			Količina
			x [m]	y [m]	z [m]	
M1	A	balkon	12,79	2,20	1,60	CO [ppm], CO ₂ [ppm], temperatura [°C], vidljivost [m]
	B	lakirnica	4,01	7,56	1,60	CO [ppm], temperatura [°C], vidljivost [m]
	C	pisarniški stol	13,76	7,72	1,20	CO ₂ [ppm]
	D	stol za mizo	11,99	4,10	1,20	CO ₂ [ppm]
	E	nad laki	7,80	7,25	0,90	temperatura [°C]
	F1	vrata med M1-M3	14,87	3,61	0,90	temperatura [°C]
	F2	vrata med M1-M3	14,87	3,61	1,20	temperatura [°C]
	F3	vrata med M1-M3	14,87	3,61	1,50	temperatura [°C]
	F4	vrata med M1-M3	14,87	3,61	1,70	temperatura [°C]
M3	G	balkon	19,18	2,20	1,60	CO [ppm], CO ₂ [ppm], temperatura [°C]
	H	kavč	18,88	6,31	0,90	CO ₂ [ppm]
	I	pod stopnicami	22,11	7,55	1,60	CO ₂ [ppm]
	J	na hodniku pred sobo	20,23	11,00	1,60	CO ₂ [ppm]
M4	K	balkon	18,71	2,20	4,45	CO [ppm], CO ₂ [ppm], temperatura [°C]
	L	kavč	21,16	3,77	3,75	CO ₂ [ppm]
	M	kuhinja	19,47	8,00	4,45	CO ₂ [ppm]
	N	vrata spalnice	20,59	9,58	4,45	CO ₂ [ppm]
	O	na vrhu stopnic	22,11	7,55	4,45	CO ₂ [ppm]



Slika 20: merilne naprave v 1. nadstropju



Slika 21: merilne naprave v 2. nadstropju

8 OBRAVNAVANE VARIANTE

Obravnanih je bilo osem variant. Lastnosti posameznih variant so prikazane v preglednici 11. A1 in B1 sta osnovni varianti, v obeh je zasnova enaka:

- okno v lakirnici je odprto;
- odprta so okna in vrata iz pisarne na balkon;
- odprta so vrata iz pisarne v dnevno sobo (vrata med conama M1 in M3);
- odprta so vsa vrata med prostori v spodnjem stanovanju;
- vsa okna v spodnjem stanovanju so zaprta;
- odprto je stopnišče med spodnjim in zgornjim stanovanjem;
- vsa vrata med prostori v zgornjem stanovanju so odprta;
- odprta so balkonska vrata in pripadajoče okno v zgornjem stanovanju.

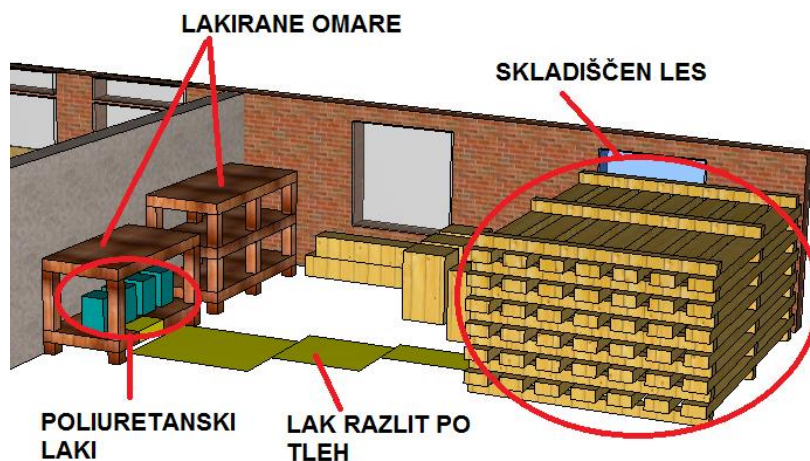
Edina razlika med A1 in B1 je nelakiran oziroma s poliuretanskim lakom lakiran les, ki je skladiščen v lakirnici (sliki 22 in 28). Namen teh dveh variant je proučiti vpliv lakiranega lesa na razvoj požara in na dinamiko širjenja produktov gorenja. Preostale variante izhajajo iz B1. V varianti B2 so zaprta vsa okna v zgornjem stanovanju. Namen te variante je bil proučiti dinamiko širjenja produktov gorenja iz spodnjega v zgornje stanovanje in oceniti vpliv odprtih oziroma zaprtih oken v zgornjem stanovanju na prebivalce objekta in reševalne ekipe. V varianti B3 so zaprta vrata med conama M1 in M3 z namenom proučiti dinamiko širjenja produktov gorenja iz zgornjega v spodnje stanovanje in oceniti vlogo ločilnih vrat M1-M3. V varianti B4 so zaprta vsa vrata med prostori v spodnjem stanovanju, z izjemo vrat med dnevno sobo in hodnikom. Namen te variante je proučiti vpliv manjšega volumna na koncentracije in dinamiko širjenja produktov gorenja. Varianta B5 izhaja iz B4. B5 ima dodatno zaprto stopnišče med spodnjim in zgornjim stanovanjem. Poleg proučitve vpliva manjšega volumna na koncentracije in dinamiko širjenja produktov gorenja je bil namen te variante proučiti tudi koncentracije produktov gorenja, ki se zaradi zaprtosti stopnišča nabirajo na eni izmed evakuacijskih poti. V varianti B6 je prisoten veter, značilen za geografsko lego objekta. Namen te variante je proučiti vpliv vetra na dinamiko širjenja produktov gorenja v objektu. Zanimalo me je tudi, ali sta zaradi vetra bolj ogrožena zdravje in življenje prebivalcev stanovanjskega dela objekta. V varianti B7 je v lakirnici nameščen sistem za gašenje s CO₂, s katerim se izvede gašenje požara. Namen te variante je proučiti učinkovitost izbranega sistema oziroma ugotoviti morebitne pomanjkljivosti.

Preglednica 11: lastnosti posameznih variant

	A1	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Nelakiran les	•							
Lakiran les		•	•	•	•	•	•	•
Odperta vrata in okna iz pisarne na balkon	•	•	•	•	•	•	•	•
Odperta vrata med conama M1 in M3	•	•	•		•	•	•	•
Zaprta vrata med conama M1 in M3				•				
Odperta vrata med dnevno sobo in hodnikom v spodnjem stanovanju	•	•	•	•	•	•	•	•
Odperta vrata med drugimi prostori v spodnjem stanovanju	•	•	•	•			•	•
Zaprta vrata med drugimi prostori v spodnjem stanovanju					•	•		
Zaprta vsa okna v spodnjem stanovanju	•	•	•	•	•	•	•	•
Odperto stopnišče med spodnjim in zgornjim stanovanjem	•	•	•	•	•		•	•
Zaprto stopnišče med spodnjim in zgornjim stanovanjem						•		
Odperta vrata med prostori v zgornjem stanovanju	•	•	•	•	•	•	•	•
Zaprta vsa okna v zgornjem stanovanju			•					
Odperta balkonska vrata in pripadajoče okno v zgornjem stanovanju, preostala okna v zgornjem stanovanju zaprta	•	•		•	•	•	•	•
Veter							•	
Gašenje s CO ₂								•

8.1 Varianta A1

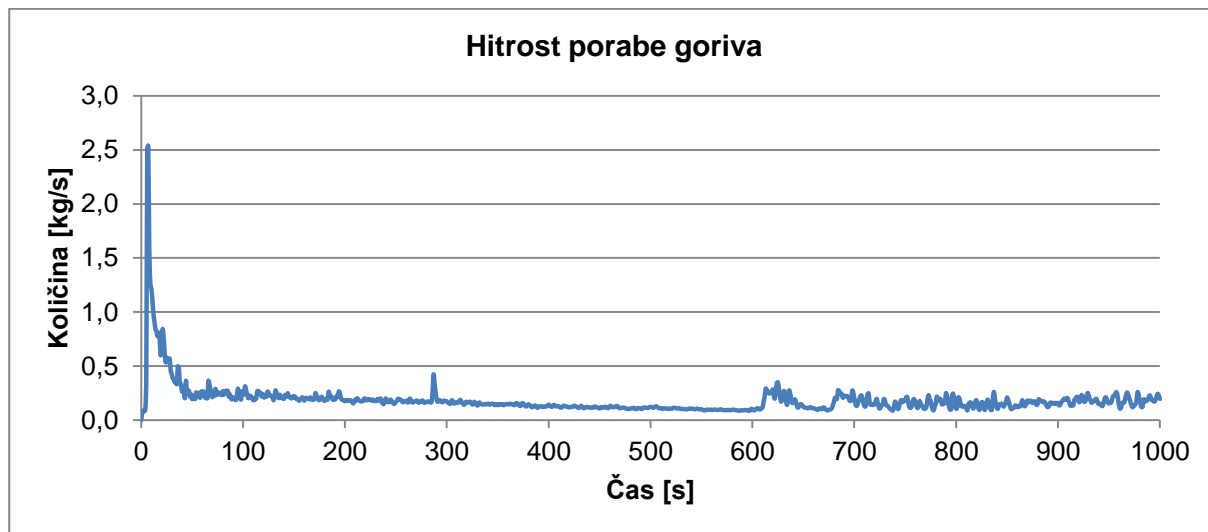
V lakirnici je skladiščen nelakiran les. Ko je delavec zapustil prostor in odšel iskat opremo za čiščenje, je pustil odprto eno okno, vrata v skladišče pa je zaprl. Ker je zunaj lep dan, imajo v pisarni odprto okno, zračnike pod stropom in vrata na balkon. Vrata med industrijskim in stanovanjskim delom so odprta. Odprta so tudi vsa vrata med prostori v stanovanjskem delu in stopnišče. Vsa okna v spodnjem stanovanju so zaprta. Isto velja za okna v zgornjem stanovanju, z izjemo balkonskih vrat in enega okna. Zaradi okvare na električni napeljavi nastane požar na skladiščnem lesu (slika 22). Skladiščen les ima lastnosti, ki so navedene v preglednici 8.



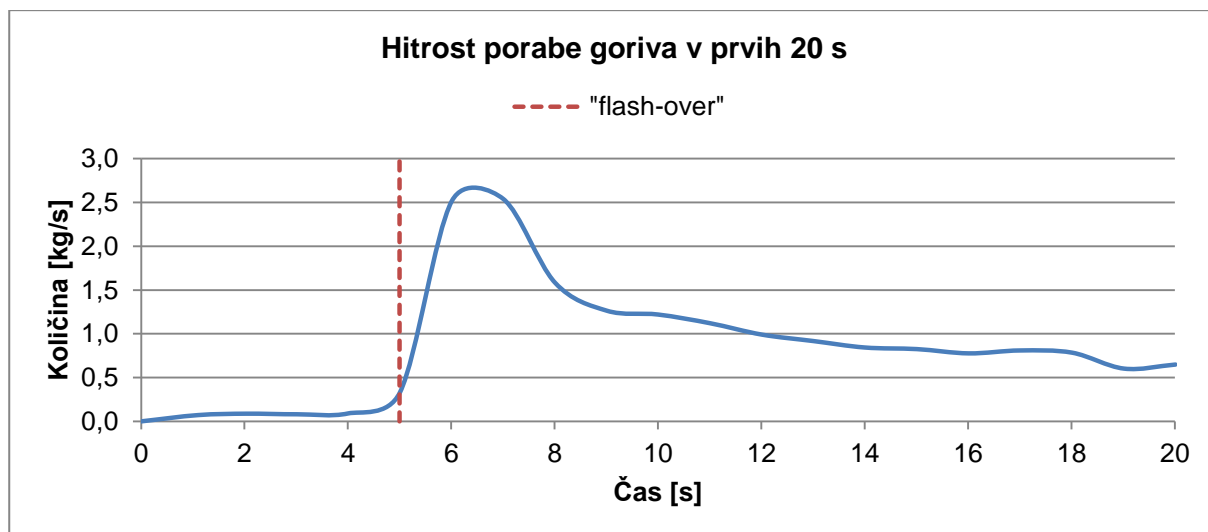
Slika 22: situacija v lakirnici pred začetkom požara (A1)

8.1.1 Rezultati A1

Ko v lakirnici zagori les, se požar hipoma razširi na lak, ki je polit po tleh (slika 22). Zaradi velike količine vnetljivih snovi že v 5 s nastopi požarni preskok, oziroma s tujko »flash-over«, kar je razvidno s slike 24. Približno v $t = 8$ s nastopi faza pojemajočega požara. Do tako hitrega pojemanja pride zaradi pomanjkanja kisika, saj je edini dovod zraka odprto okno, ki pa je tudi edini odvod dima in plinov, ter zaradi manjše količine goriva. S slike 23 razberemo tudi, da je hitrost porabe goriva od časa $t = 600$ s dalje malenkost večja. Razlog za povečanje hitrosti je, da takrat začnejo goreti lakirane omare in embalaže s poliuretanskim lakom (slika 22). Maksimalna izmerjena sproščena toplota je približno 22.000 kW.



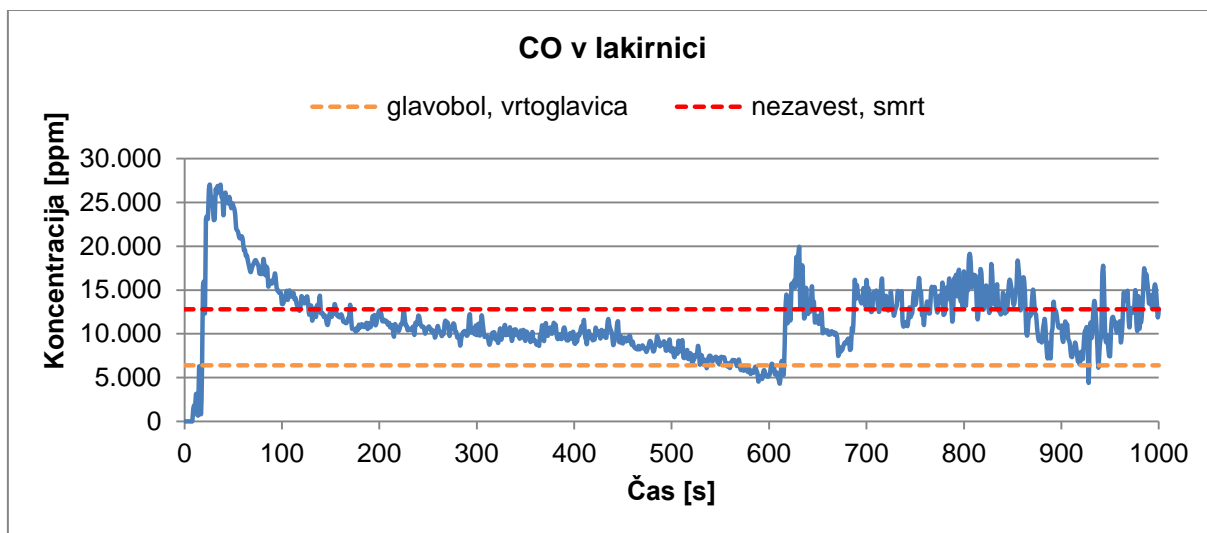
Slika 23: hitrost porabe goriva (A1)



Slika 24: hitrost porabe goriva v prvih dvajsetih sekundah (A1)

Merilec B na višini 1,6 m (slika 20), ki je v lakirnici, je v času $t = 15$ s izmeril maksimalno temperaturo 744 °C. Problematično je tudi dejstvo, da je temperatura v lakirnici celoten čas simulacije višja od 250 °C. Ob tako hitrem razvoju požara je vidljivost na merilnem mestu B zelo hitro slaba. Na tem merilnem mestu je že v času $t = 7$ s vidljivost samo 5,7 m, v času $t = 11$ s je 1 m in v času $t = 30$ s le še 0,5 m.

Zaradi pomanjkanja zraka v lakirnici nastaja pri gorenju ogljikov monoksid (slika 25). Največ ga nastane v prvih 100 s, nato koncentracija CO pada, od približno $t = 600$ s naprej pa zaradi gorenja lakiranih omar in embalaž poliuretanskega laka spet narašča (slika 22). Največja vrednost je dosežena v času $t = 26$ s, ko je izmerjena koncentracija 27.046 ppm. Oseba, ki bi bila izpostavljena takšni koncentraciji, bi že po nekaj vdihih padla v nezavest. Na sliki 25 sta vrisani liniji, ki predstavljata mejni koncentraciji, pri katerih že zelo hitro pride do napisanih simptomov. Meja za glavobol in vrtoglavico je pri 6400 ppm, za nezavest in smrt pa pri 12.800 ppm. Mejne vrednosti so podrobneje predstavljene v preglednici 1.

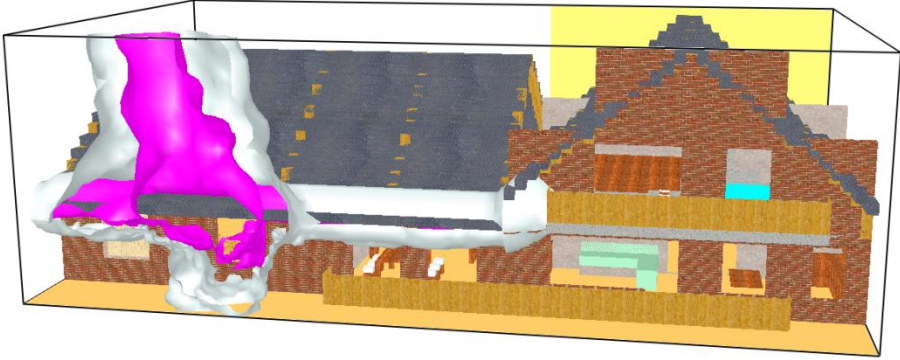
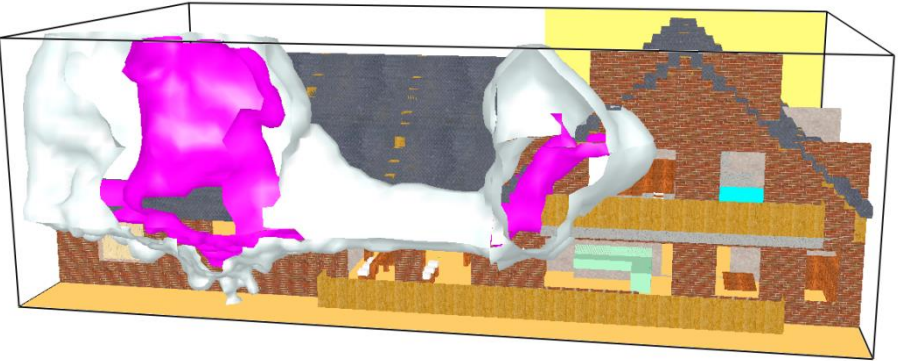
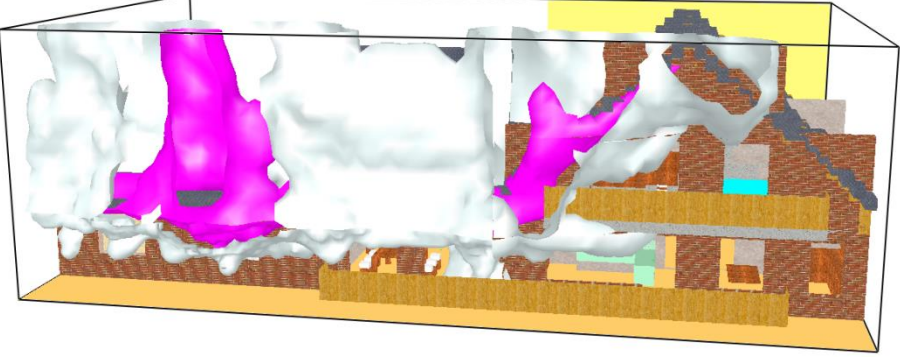
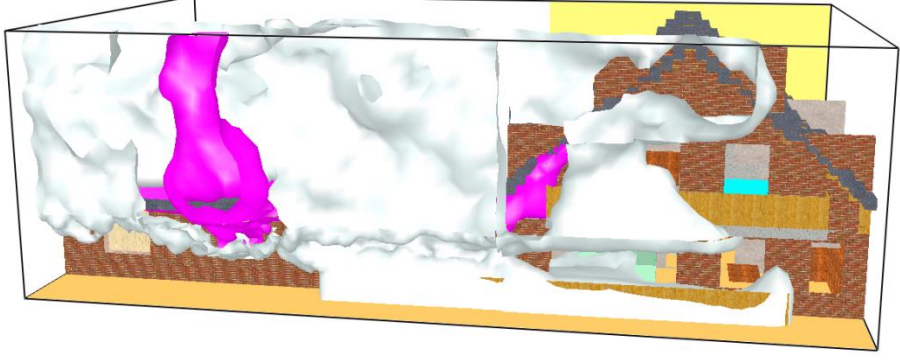


Slika 25: koncentracija CO v lakirnici (A1)

Zanimivo je, da do prenosa dima in plinov na stanovanjski del pride zaradi oblike oziroma postavitve strehe. Streha namreč določeno količino dima in plinov ujame oziroma deluje kot neke vrste žleb. Dim oz. plini, ki so ujeti pod streho, potem potujejo vzdolž industrijskega dela in nato skozi okna vstopijo v stanovanjski del. Opisani pojav se zgodi v vseh osmih variantah in je za primer CO_2 viden v preglednici 12. Situacijo še poslabšajo lesene balkonske ograje, ki zadržujejo produkte gorenja in tako povzročajo, da jih v objekt vstopi še večja količina, kar je vidno na zadnji sliki v preglednici 12.

Preglednica 12: širjenje CO_2 – "učinek žleba"

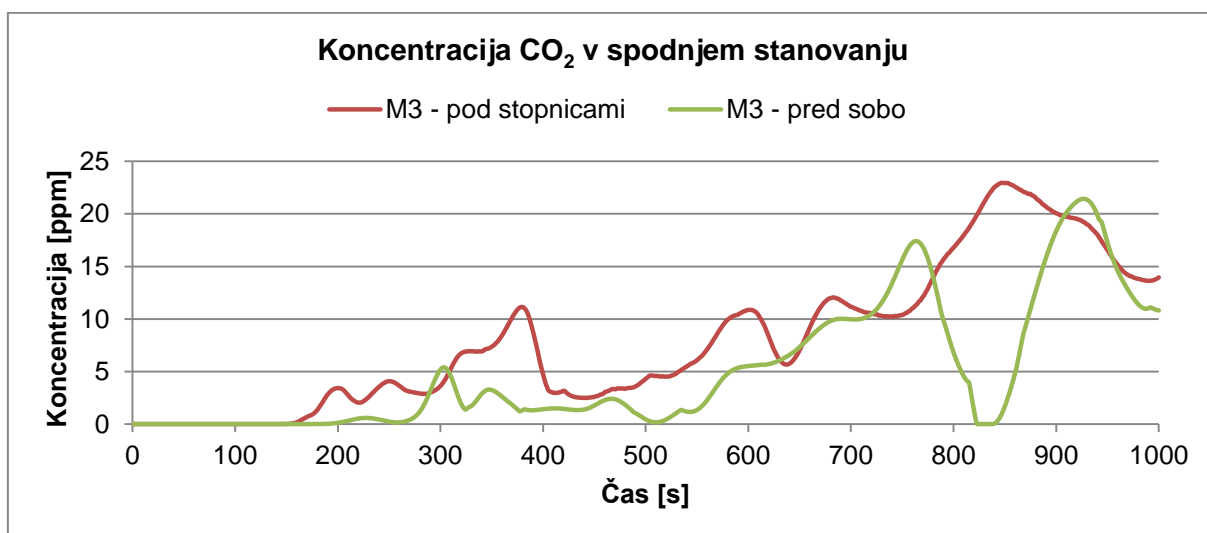
Čas	Širjenje CO_2 (bela barva predstavlja 10 ppm, vijoličasta pa 5000 ppm)
$t = 5$ s	<p>CO_2 skozi odprto okno izstopi iz lakirnice.</p>

<p>t = 9 s</p>	 <p>CO₂ potuje vzdolž strehe na industrijskem delu objekta proti stanovanjskemu delu (streha deluje kot žleb).</p>
<p>t = 13 s</p>	 <p>CO₂ potuje ob strehi stanovanjskega dela objekta navzgor in vstopa na zgornji balkon.</p>
<p>t = 19 s</p>	 <p>Na stiku strehe med industrijskim in stanovanjskim delom objekta se je nabrala večja količina plina, ki se začne spuščati navzdol – na spodnji balkon.</p>
<p>t = 125 s</p>	 <p>Plin je v celoti napolnil volumen spodnjega balkona. Balkon deluje kot zadrževalnik produktov gorenja.</p>

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

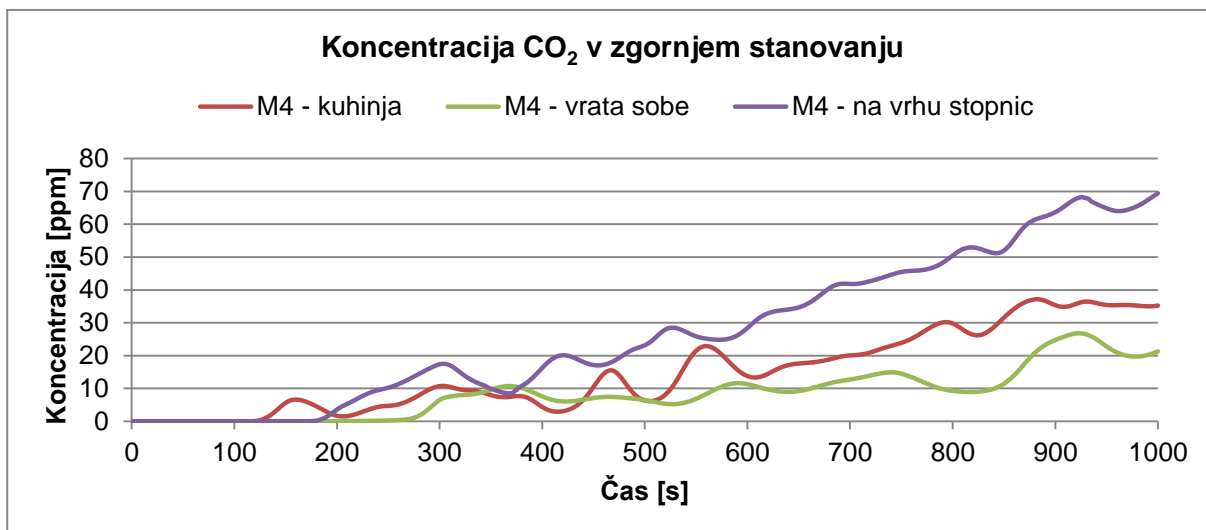
Merilca, ki sta nameščena v pisarni, zaznata večje koncentracije CO₂. Merilec D (slika 20) na stolu za sejno mizo zazna plin v t = 9 s, medtem ko ga merilec C na pisarniškem stolu zazna šele v t = 21 s. Razlog za takšno zakasnitev je pozicija obeh merilnih naprav, saj je merilec D bližje oknu kot merilec C. Že kmalu po 50 s od začetka požara začne koncentracija ogljikovega dioksida na obeh merilnih mestih hitro naraščati, kar je posledica hitrega razvoja požara v lakirnici. Proti koncu simulacije je izmerjena koncentracija na obeh merilnih mestih približno enaka in znaša 120 ppm.

Merilec pod stopnicami zazna CO₂ v času t = 72 s, merilec pred sobo pa v času t = 88 s. Na obeh merilnih mestih koncentracija plina narašča dokaj enakomerno, z izjemo nekaj vmesnih skokov. Na sliki 26 je na mestu merilca pred sobo opaziti večji padec vrednosti okoli t = 770 s. Plin se nabira pod stropom, in ko se ga nabere toliko, da doseže višino podboja vrat v sobe spodnjega stanovanja, vstopi v sobe in s tem se na merilnem mestu pred sobo ustvari primanjkljaj plina, zato tudi pride do prej omenjenega padca vrednosti. Posledično nihajo izmerjene vrednosti na merilnem mestu pod stopnicami.



Slika 26: koncentracija CO₂ v spodnjem stanovanju (A1)

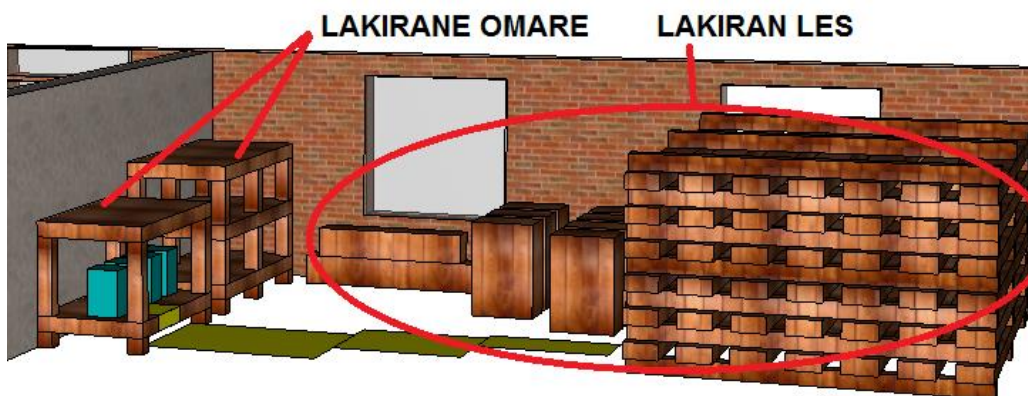
Ogljikov dioksid najprej zazna merilec v kuhinji, in sicer v času t = 33 s, naslednji ga zazna merilec na vrhu stopnic v času t = 92 s in kot zadnji merilec na vratih sobe v času t = 100 s. Na vseh treh merilnih mestih je naraščanje dokaj enakomerno (slika 27). Prvih 300 s so vrednosti na vseh treh mestih dokaj enake, nato pa se začnejo kazati odstopanja. Največje odstopanje oziroma naraščanje koncentracije je opaziti na merilcu na vrhu stopnic. Iz tega lahko sklepamo, da prvih 300 s na koncentracijo CO₂ v zgornjem stanovanju vpliva plin, ki vstopi skozi okno in balkonska vrata zgornjega stanovanja, nato pa predvsem dotok plina iz spodnjega stanovanja (preko stopnic).

Slika 27: koncentracija CO₂ v zgornjem stanovanju (A1)

Za osebo, ki bi bila v trenutku požara v lakirnici, bi bila situacija usodna v več pogledih. Oseba ne bi imela možnosti za preživetje zaradi visoke temperature in velike koncentracije CO. Maksimalna temperatura je dosežena že v času $t = 15$ s. V istem času je dosežena tudi koncentracija CO, pri kateri človek čuti glavobol in vrtoglavico. Problematično je tudi dejstvo, da je od časa $t = 600$ s naprej koncentracija CO večinoma nad mejo 12.800 ppm, ki že pri nekaj vdihih povzroči nezavest in smrt. Zaradi tega bi bila situacija za vsakogar, ki bi v prostor vstopil brez ustrezne opreme, v trenutku usodna. Če izvzamemo lakirnico, je največja koncentracija CO₂ izmerjena na merilcu A, ki je na balkonu pred pisarno (slika 20). Ta lokacija sicer res leži na evakuacijski poti (slika 11), vendar je koncentracija premajhna (443 ppm), da bi lahko vplivala na človekovo zdravje in varnost. Na preostalih merilnih mestih v objektu so vrednosti še manjše. Posledično lahko tudi predvidevamo, da v objektu (z izjemo lakirnice) ni morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka, kot na primer dušikovih spojin, oziroma vsaj ne v koncentracijah, ki bi ogrožale zdravje.

8.2 Varianta B1

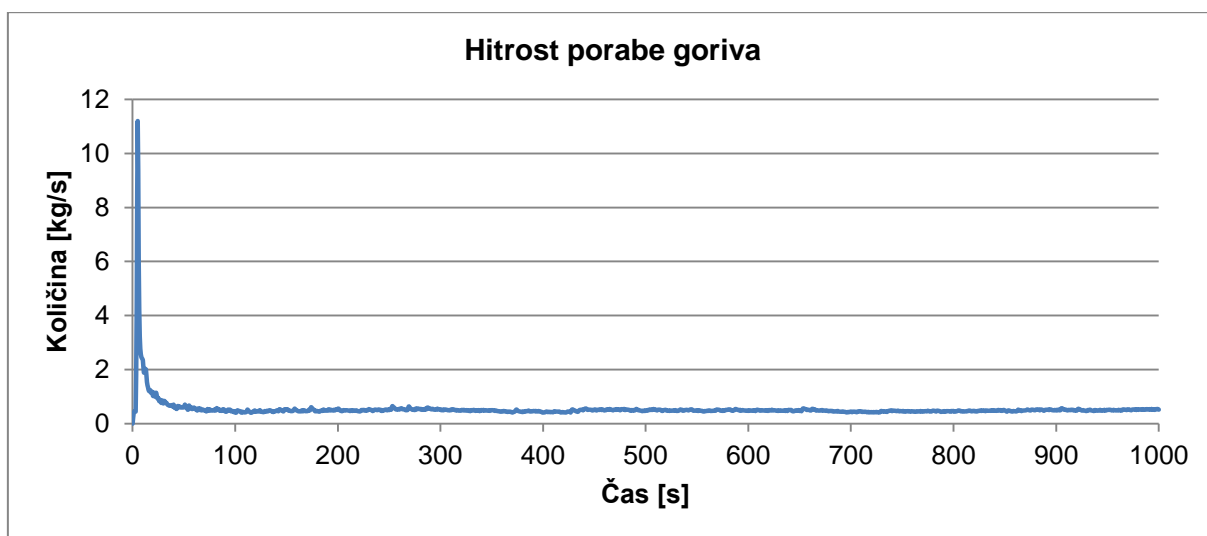
V lakirnici je skladiščena enaka količina lesa kot v varianti A1, le da je bil les predhodno lakiran s poliuretanskim lakom (slika 28). Leseni elementi so debeli 2 cm, lak pa je nanesen v več plasteh, tako da je njegova skupna debelina 1 mm. Odprtine v objektu so odprte oziroma zaprte tako, kot je opisano v varianti A1.



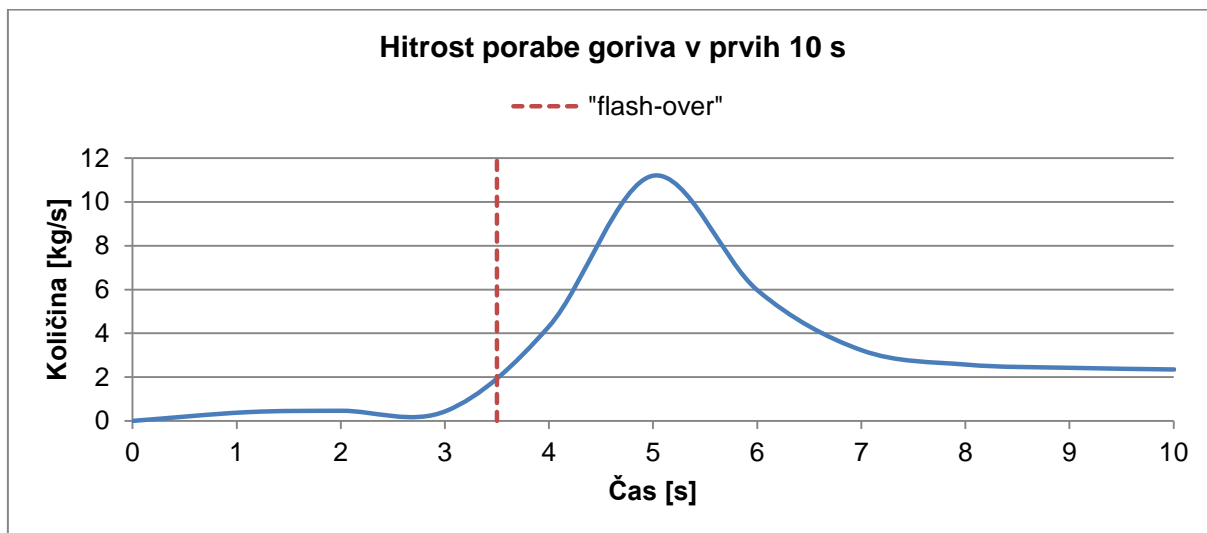
Slika 28: situacija v lakirnici pred začetkom požara (B1)

8.2.1 Rezultati B1

Zaradi prisotnosti lakiranega lesa v lakirnici se požar razvije zelo hitro. Do pojava »flash-over« pride že v času $t = 3,5$ s (slika 30). Sledi faza polno razvitega požara, kmalu po peti sekundi pa nastopi faza pojemajočega požara. Maksimum sproščene toplote je dosežen že v času $t = 5$ s in znaša 59.369 kW. Začetni skok je posledica gorenja velike količine lakiranega lesa in razlitega laka. Za tem se količina kisika zmanjša in požar se umiri. Ker je gorljivega materiala še vedno dovolj, pride do nadaljnjega gorenja, ki pa je enakomernejše (slika 29).



Slika 29: hitrost porabe goriva (B1)

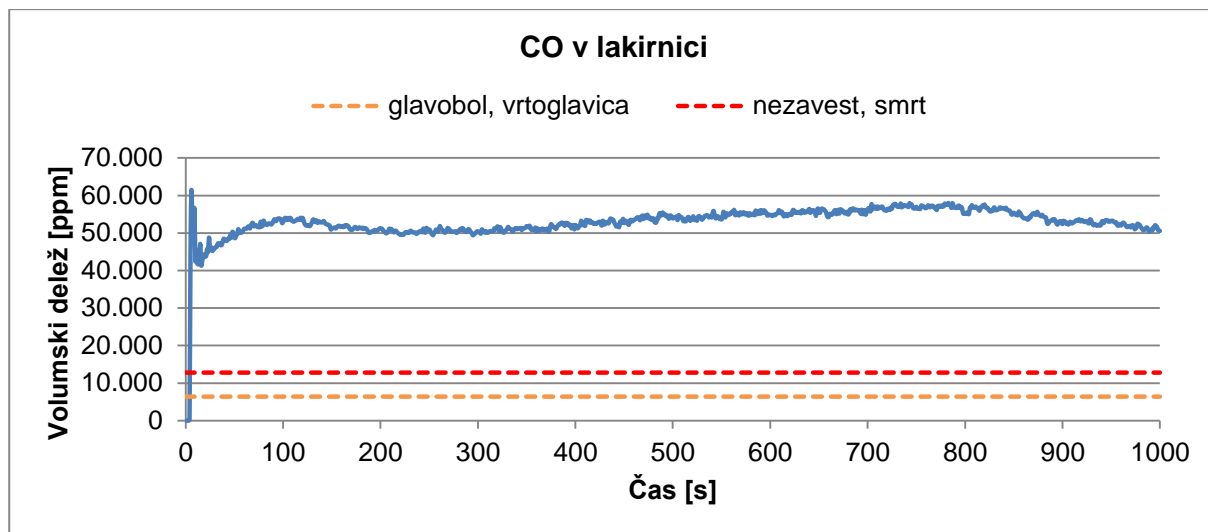


Slika 30: hitrost porabe goriva v prvih desetih sekundah (B1)

V lakirnici je bila na merilnem mestu B (slika 20) maksimalna temperatura 730 °C izmerjena v času $t = 7$ s. Tudi po 1000 s simulacije je temperatura na tem mestu še zmeraj visoka, in sicer okoli 300 °C. Na istem merilnem mestu je v času $t = 5$ s vidljivost 1,87 m, v času $t = 7$ s znaša 0,72 m, v času $t = 30$ s pa le še 0,47 m.

Koncentracija ogljikovega monoksida v lakirnici je velika (slika 31). Maksimalna vrednost je 61.485 ppm, dosežena pa je že v $t = 6$ s. Po hitrem začetnem skoku sicer sledi padec koncentracije CO, vendar ta ne pade pod 40.000 ppm. Taka količina CO-ja bi bila seveda za

vsakogar v trenutku smrtna. Linije na sliki 31 so vrisane pri istih mejnih vrednostih, kot sem napisala v varianti A1.

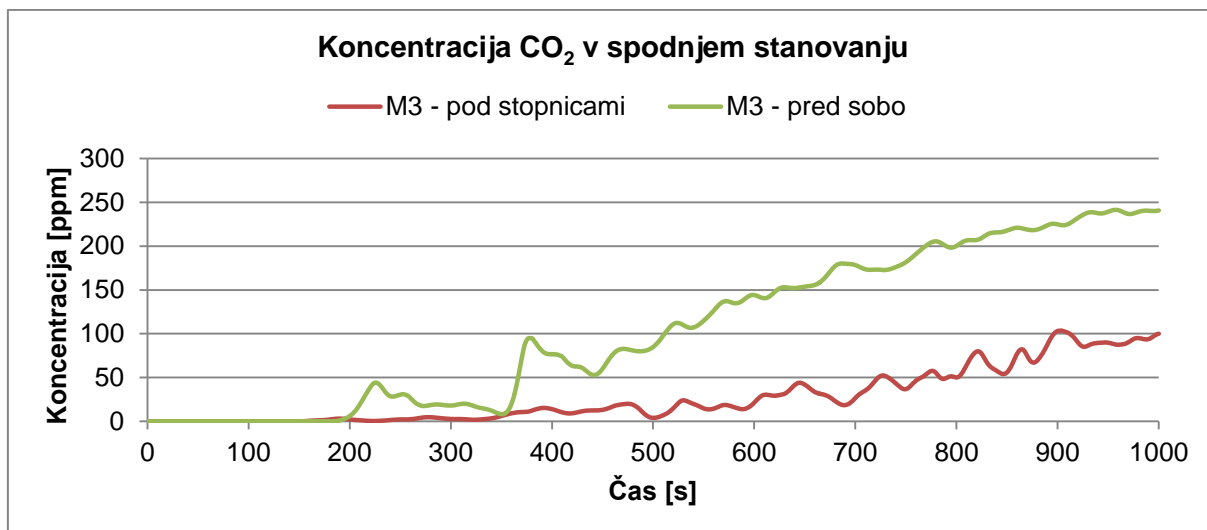


Slika 31: koncentracija CO v lakirnici (B1)

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

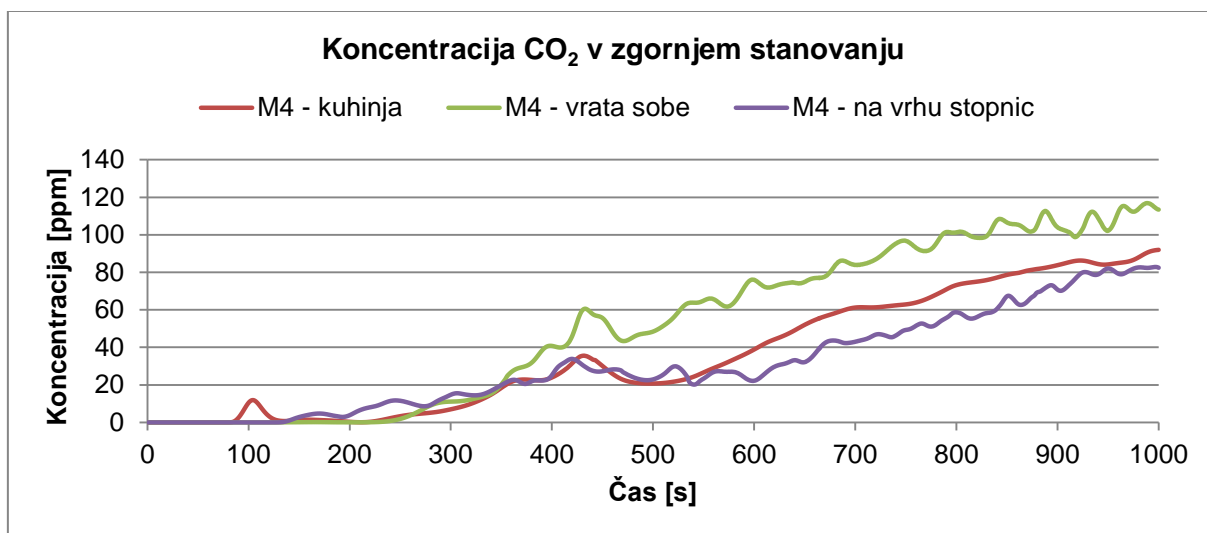
Merilec D na stolu za sejno mizo v pisarni zazna CO₂ v času $t = 7$ s, merilec C na pisarniškem stolu v kotu pisarne pa v času $t = 17$ s. Razlog za zamik je lokacija merilcev, tako kot sem že omenila pri varianti A1. Kmalu po 50 s od začetka požara začne koncentracija plina na obeh merilnih mestih naraščati. Naraščanje je na obeh mestih precej enako, vse do približno $t = 250$ s, ko začne koncentracija na merilcu D padati, medtem ko na merilcu C še malenkost narašča. Koncentracija plina na merilnem mestu C začne padati v času $t = 450$ s, vendar je skozi celotno simulacijo večja kot na merilnem mestu D. Razlog za to je prav tako pozicija merilcev. Merilec D je namreč nekje na sredini poti med oknom in vrati, ki ločujejo coni M1 in M3. Ta vrata so v tej varianti odprta in plini se zato od okna transportirajo proti njim. Merilec D je torej na bolj pretočnem mestu, medtem ko je merilec C postavljen na manj pretočnem mestu. Merilec C je postavljen v kotu pisarne, kjer se plini zadržujejo dalj časa. Maksimalna koncentracija CO₂ na merilcu D je izmerjena v času $t = 300$ s, in sicer 219 ppm, na merilnem mestu C pa v $t = 377$ s v vrednosti 331 ppm.

Merilec pod stopnicami zazna ogljikov dioksid v času $t = 68$ s, merilec pred sobo pa v času $t = 88$ s. Na merilnem mestu pod stopnicami koncentracija plina enakomerno narašča vse do konca simulacije; takrat je tudi izmerjena maksimalna vrednost 104 ppm. Na merilnem mestu pred sobo koncentracija prav tako dokaj konstantno narašča. Na sliki spodaj (slika 32) je razvidno, da pred sobo pride do opaznejšega padca izmerjenih vrednosti približno v času $t = 370$ s. Takrat je višina plina pod stropom že tolikšna, da doseže podboj vrat, in plin nato vstopi v spalnice. Posledično na mestu merilne naprave nastane primanjkljaj, ki je na sliki spodaj viden kot padec izmerjenih vrednosti. Maksimalna koncentracija je na tem merilnem mestu prav tako izmerjena na koncu simulacije, in sicer 241 ppm. Razlog za večje izmerjene količine na tem merilnem mestu spet leži v poziciji naprav. Merilec pod stopnicami je namreč na bolj pretočnem mestu, saj na tem mestu plini iz spodnjega stanovanja uhajajo v zgornje, merilec pred sobo pa je na koncu dokaj ozkega hodnika, kjer se plini zadržujejo v večji količini.

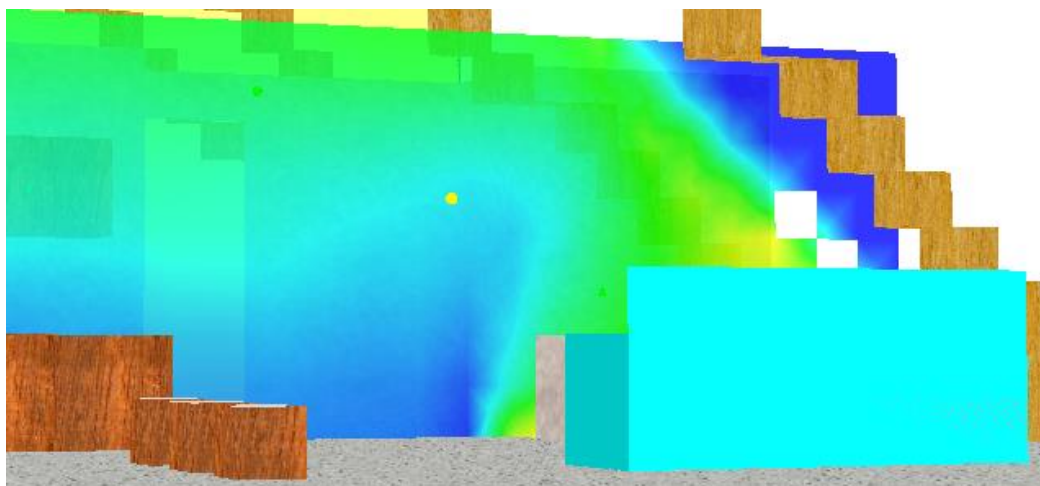


Slika 32: koncentracija CO₂ v spodnjem stanovanju (B1)

V zgornjem stanovanju CO₂ prvi zazna merilec v kuhinji, in sicer v času $t = 24$ s, nato pa v približno 70. sekundi plin hkrati zaznata še preostala dva merilca. Do približno $t = 350$ s koncentracija na vseh treh merilnih mestih narašča enako, nato pa je opaziti večje vrednosti na lokaciji merilca na vratih sobe. Takšno odstopanje vrednosti od preostalih dveh merilnih mest je posledica dotoka plina iz spodnjega stanovanja. Isti pojav bi moral biti viden tudi v meritvah na vrhu stopnic, vendar je merilec postavljen ravno na lokaciji, kjer se plin vrtinči (slika 34). Na vseh treh merilnih mestih je opazen skok v približno 430. sekundi. Gre za pojav »začetnega oblaka«, ki je viden na sliki 39. Čelo oblaka je tako visoko, da vpliva na zabeleženo vrednost na merilnem mestu. Za čelom pa je oblak nižji, tako da ga merilec ne zazna.



Slika 33: koncentracija CO₂ v zgornjem stanovanju (B1)



Slika 34: vrtnčenje CO₂ na mestu merilca na vrhu stopnic – rumena pika je merilec (B1)

Maksimalna temperatura (730 °C) je v lakirnici izmerjena že v $t = 7$ s, 2 s prej pa je dosežena tudi koncentracija CO, ki povzroča nezavest in smrt. Oseba, ki bi bila ob začetku požara v lakirnici, bi imela približno 3 s časa za evakuacijo, nato pa bi temperatura v prostoru presegla 50 °C. Problematično je dejstvo, da se temperatura v lakirnici tudi po 1000 s simulacije še vedno giblje okrog 300 °C. Pri tako visoki temperaturi je nevarno, da bi prišlo do širjenja požara v sosednje prostore zaradi konvekcije, kondukcije in radiacije. Prav tako je problematično, da je koncentracija CO tudi po 1000 s simulacije še zmeraj nad 50.000 ppm. Ob tako veliki koncentraciji CO v lakirnici lahko predvidevamo, da je velika oziroma zdravju nevarna tudi koncentracija morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka. Če izvzamemo lakirnico, je največja koncentracija CO₂ izmerjena na merilcu na balkonu pred pisarno. Izmerjena koncentracija je 748 ppm. V spodnjem stanovanju je največja vrednost CO₂ izmerjena na kavču (318 ppm), v zgornjem stanovanju pa na vratih sobe (117 ppm). Tako zgoraj kot spodaj so bile maksimalne vrednosti izmerjene povsem na koncu simulacije. Izmerjene vrednosti sicer niso zdravju nevarne, vendar se je treba vprašati, koliko bi vrednosti še narasle, če reševalne ekipe ne bi prišle v 1000 s od začetka požara. Koncentracija CO₂ tudi po 30 min ne bi bila zdravju nevarna, vendar ne moremo predvideti učinka na zdravje pri istočasni izpostavljenosti CO₂ in morebitnim strupenim produktom gorenja poliuretanskega laka.

8.3 Varianta B2

Ta varianta izhaja iz variante B1. Edina razlika je v oknih zgornjega stanovanja, ki so zdaj vsa zaprta. Namen te variante je proučiti vpliv zgornjih oken na dinamiko gibanja in koncentracijo produktov gorenja.

8.3.1 Rezultati B2

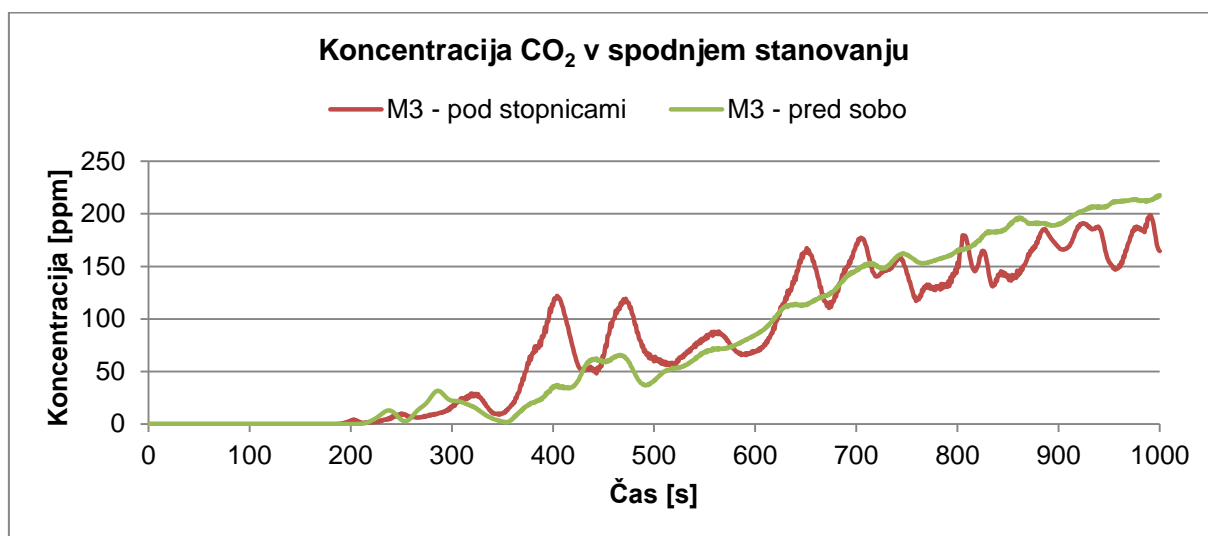
Splošna dinamika požara (razvoj, hitrost porabe goriva) je enaka kot pri varianti B1, saj je zasnova požara enaka. Enaka je tudi situacija v lakirnici (temperatura, koncentracija CO in CO₂ ter vidljivost).

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Situacija v pisarni je zelo podobna kot v varianti B1. Prav tako kot v varianti B1 merilec D na stolu za sejno mizo zazna ogljikov dioksid v $t = 7$ s, merilec C na pisarniškem stolu v kotu

prostora pa v $t = 17$ s. Na mestu merilca D koncentracija plina hitro naraste, saj je merilec postavljen poleg okna. Hitro naraščanje je tudi posledica velike količine plinov, ki v lakirnici nastanejo ob začetku požara in se nato transportirajo na balkon pred pisarno. Plini se tam ulovijo v balkonsko ograjo, tako da ta deluje kot nekakšen zadrževalnik. Na lokaciji merilca C koncentracija CO_2 narašča počasneje, saj je merilec postavljen v najbolj oddaljen kot pisarne in posledično dogajanje na balkonu pred pisarno nanj ne vpliva. Po 300 s od začetka požara začne koncentracija na merilcu D padati, na merilcu C pa naraščati. Tako kot sem že opisala v varianti B1, je razlog za ta pojav pozicija obeh merilcev.

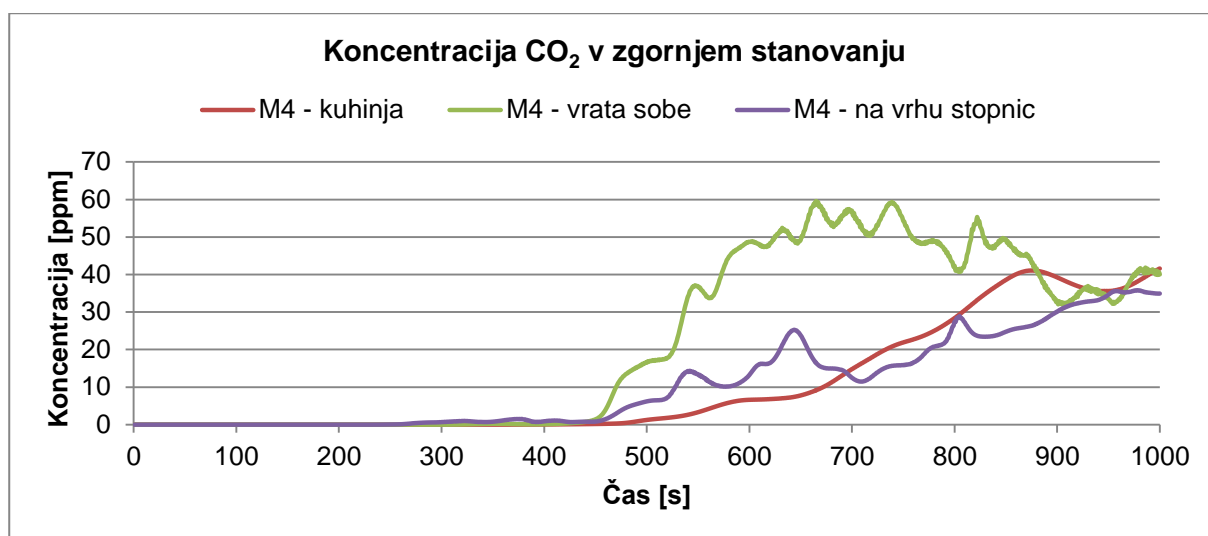
V spodnjem stanovanju merilec pod stopnicami zazna CO_2 v času $t = 111$ s, merilec pred sobo pa v $t = 125$ s. Na lokaciji merilca pred sobo koncentracija plina narašča dokaj enakomerno (slika 35). V približno 470. s je opaziti nihanje izmerjenih vrednosti na tej lokaciji, ki je posledica vstopanja plina v spalnice in posledično primanjkljaja plina na hodniku, tako kot sem že opisala v varianti B1. Iz grafa koncentracije plina pod stopnicami je razvidno, da med naraščanjem vrednosti nenehno nihajo. To nihanje je posledica neenakomernega prehajanja plina preko stopnišča v zgornje stanovanje. Na lokaciji merilca pod stopnicami namreč pride do kopičenja plina, ko pa je njegova količina tolikšna, da se ne more več zadrževati pod stopniščem in stropom hodnika, se del plina transportira preko stopnišča navzgor. Maksimalna izmerjena koncentracija na merilnem mestu pred sobo in na merilnem mestu pod stopnicami je približno 208 ppm.



Slika 35: koncentracija CO_2 v spodnjem stanovanju (B2)

Ker so v tej varianti vse zunanje odprtine v zgornjem stanovanju zaprte, poteka edina pot, po kateri lahko produkti gorenja pridejo v zgornje stanovanje, preko pisarne, spodnjega stanovanja in stopnišča. Merilec na vrhu stopnic zazna ogljikov dioksid že v času $t = 129$ s. S slike 36 je razvidno, da koncentracija CO_2 na tem mestu med simulacijo sicer narašča, vendar se vmes pojavljajo posamezni skoki izmerjenih vrednosti. Ti skoki so posledica neenakomernega prehajanja plina iz spodnjega v zgornje stanovanje. Kot sem že omenila, se plini nabirajo pod podestom, in ko je njihova količina zadostna, se dvignejo v zgornje stanovanje. Deloma so skoki tudi posledica pozicije merilca. Plini se namreč dvigajo ob steni mansarde, potujejo ob stropu do nasprotne stene, se tam obrnejo oziroma potujejo proti tlam in nazaj proti stopnišču (preglednica 13). Merilec je ravno v sredini med zgornjim in spodnjim tokom, oziroma tam, kjer se plin vrtinči. Maksimalna vrednost na tem merilnem mestu je

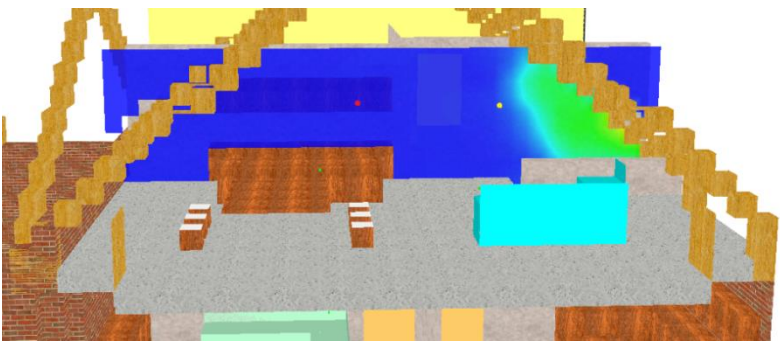
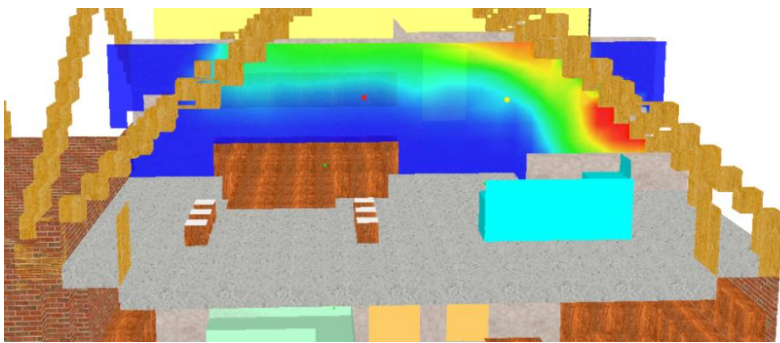
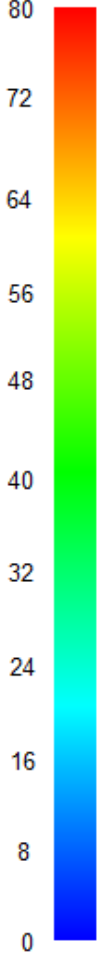
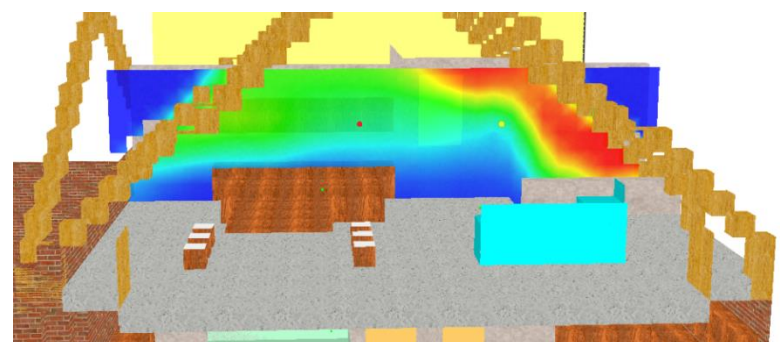
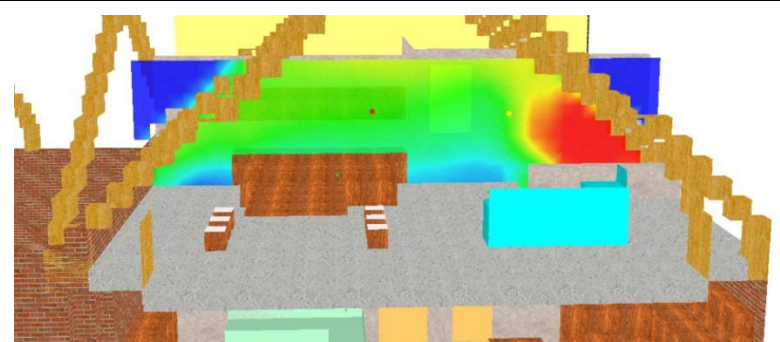
dosežena v času $t = 979$ s, in sicer 36 ppm. Merilec v kuhinji zazna CO_2 v času $t = 175$ s, maksimum pa je dosežen ob koncu simulacije, in sicer 42 ppm. Koncentracija plina med simulacijo narašča dokaj konstantno, pojavi se le manjši skok proti koncu simulacije, ki je posledica prej omenjenega kroženja zraka. Za razliko od merilca v kuhinji naraščanje koncentracije CO_2 na vratih sobe ni enakomerno. Približno na polovici simulacije vrednosti hipoma narastejo in v času $t = 665$ s dosežejo maksimum 60 ppm. V zadnji petini simulacije koncentracija pada. Razlog za tako hipen skok je, da so vrata dokaj majhna odprtina, zato se je plin za kratek čas ujel vanjo. Pozneje plin skozi vrata vstopi v spalnico in se porazdeli po celotnem prostoru, s tem pa se tudi zmanjša koncentracija na vratih. S slike je razvidno, da se okoli časa $t = 900$ s vsi prostori v zgornjem stanovanju napolnijo z ogljikovim dioksidom do take mere, da je njegova koncentracija na višini 1,6 m približno enaka na vseh lokacijah merilcev.



Slika 36: koncentracija CO_2 v zgornjem stanovanju (B2)

Ker je stanje v lakirnici enako kot v varianti B1, je tudi stopnja nevarnosti v tem prostoru enaka, kot je zapisano v varianti B1. Če izvzamemo lakirnico, je največja koncentracija CO_2 spet izmerjena na balkonu pred pisarno. Predvidevamo, da je na tem mestu (če izvzamemo lakirnico) tudi največja koncentracija strupenih plinov, ki bi lahko nastali pri gorenju poliuretanskega laka. V stanovanjskem delu je največja koncentracija CO_2 izmerjena na kavču v spodnjem stanovanju (305 ppm), kar bi bilo lahko neugodno, če bi oseba spala na kavču. Sicer koncentracija tam ni zdravju nevarna, je pa lahko potencialno nevarna v kombinaciji z drugimi strupenimi produkti gorenja, katerih koncentracije in posledic ne moremo točno določiti. Najmanjša koncentracija CO_2 je bila izmerjena v zgornjem stanovanju, zato lahko predvidevamo, da je tam tudi najmanjša koncentracija morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka. S slike 36 je razvidno, da koncentracija CO_2 v zgornjem stanovanju začne vidno naraščati šele po dobrih 400 s od nastanka požara, zaradi česar je jasno, da zaprta okna v zgornjem stanovanju prispevajo k varnosti prebivalcev tega stanovanja. Ti bi se v času 400 s preko stopnišča in vhodnih vrat (slika 11) lahko evakuirali, ne da bi bila pri tem ogrožena njihovo zdravje in življenje.

Preglednica 13: grafični prikaz vstopanja CO₂ iz spodnjega stanovanja v zgornje (B2)

Čas	Koncentracija CO ₂ [ppm]	
t = 400 s	 <p data-bbox="391 667 1316 734">CO₂ preko stopnišča vstopi v zgornje stanovanje. Rumena pika predstavlja merilec na vrhu stopnic, rdeča merilec v kuhinji.</p>	
t = 600 s	 <p data-bbox="391 1081 1316 1149">Plin se dviga ob steni mansarde in potuje pod stropom. Največja koncentracija plina je nad stopniščem oz. ob steni mansarde.</p>	
t = 800 s	 <p data-bbox="391 1518 1316 1653">Ko plin pod stropom prispe na drugo stran prostora, se ob steni spusti k tlam. Nad stopnicami se že vidi vrtnčenje plina. Čeprav sta oba merilca na sliki na enaki višini, zaradi česar predvidevamo, da bosta odčitala enake vrednosti, to ni tako, kar se tudi lepo vidi na sliki.</p>	
t = 1000 s	 <p data-bbox="391 2000 1316 2080">Ko plin trči ob tla, se obrne nazaj proti stopnišču. Nad stopniščem se še zmeraj vrtniči plin.</p>	

8.4 Varianta B3

Ta varianta prav tako izhaja iz variante B1. V tej varianti lastnik zaradi želje po zasebnosti zapre vrata med stanovanjskim in industrijskim delom. Namen te variante je proučiti vpliv ločevalnih vrat M1-M3.

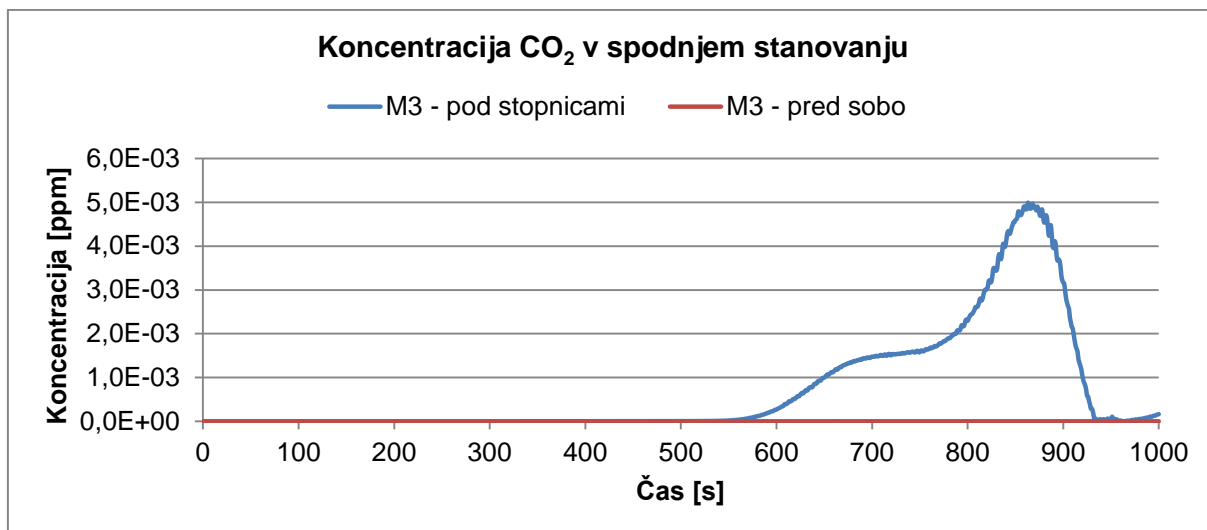
8.4.1 Rezultati B3

Splošna dinamika požara (razvoj, hitrost porabe goriva) je tudi v varianti B3 enaka kot pri varianti B1, saj je zasnova požara enaka. Enaka je tudi situacija v lakirnici (temperatura, koncentracija CO in CO₂ ter vidljivost).

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Prav tako kot v varianti B1 tudi v tej varianti merilec D (na stolu za sejno mizo) zazna ogljikov dioksid v času $t = 7$ s, merilec C (na pisarniškem stolu v kotu prostora) pa v $t = 17$ s. Na obeh merilnih mestih v pisarni koncentracija plina prvih 300–400 s narašča dokaj enakomerno. Merilec C spet zabeleži večjo maksimalno koncentracijo CO₂. Razlog je, kot sem že omenila v prejšnjih variantah, pozicija merilca. Merilec C je namreč v kotu prostora, kjer morajo plini spremeniti svojo prvotno smer gibanja, in zaradi tega je plinov na takih lokacijah več. Pozneje, ko se plin prerazporedi po prostoru, se koncentracija v kotu prostora zmanjša. Merilec D prične po 400 s od začetka požara beležiti rahlo padanje koncentracije plina, ki poteka vse do konca simulacije. Ker so vrata med conama M1 in M3 zaprta, vemo, da je lahko edini vzrok za padanje koncentracije manjši dotok plina z balkona pred pisarno. Na koncu simulacije je koncentracija CO₂ na obeh merilnih mestih enaka, saj plin ni nikamor odtekal, temveč se je samo prerazporedil po prostoru, tako da je bila njegova koncentracija po celotni pisarni na isti višini enaka.

Ker so ločevalna vrata med industrijskim in stanovanjskim delom zaprta, poteka edina pot, po kateri lahko produkti gorenja vstopijo v spodnje stanovanje, preko zgornjega stanovanja in nato skupnega stopnišča. CO₂ v spodnjem stanovanju je v času $t = 90$ s prvi zaznal merilec pod stopnicami. Koncentracija plina začne vidneje naraščati v času $t = 560$ s. S slike 37 je razvidno, da je maksimalna vrednost dosežena v času $t = 863$ s, in sicer 5×10^{-3} ppm, takoj za tem pa merilec zazna upad koncentracije. Tako velik skok je posledica gibanja plina pod stropom. Ko je izmerjen maksimum, je oblak ogljikovega dioksida skoncentriran ravno na mestu merilca, nato pa se prerazporedi v okolico, kar je vidno v preglednici 14 (rumena pika predstavlja merilec M3 – pod stopnicami). Merilec pred sobo zabeleži neprimerljivo manjše vrednosti v primerjavi z merilcem pod stopnicami. Plin zazna šele v času $t = 304$ s, maksimalna koncentracija pa je izmerjena na koncu simulacije in znaša $8,4 \times 10^{-17}$ ppm. Razlika nastane zaradi pozicije merilnih naprav. Merilec pod stopnicami je nameščen ravno na takem mestu, da zabeleži gibanje oblaka pod stropom (preglednica 14). Merilec pred sobo pa je od stopnišča oddaljen toliko, da gibanje plina pod stropom nanj ne vpliva. Lahko bi rekli, da nam merilec pred sobo poda realnejše podatke o tem, kakšna je koncentracija ogljikovega dioksida v spodnjem stanovanju.



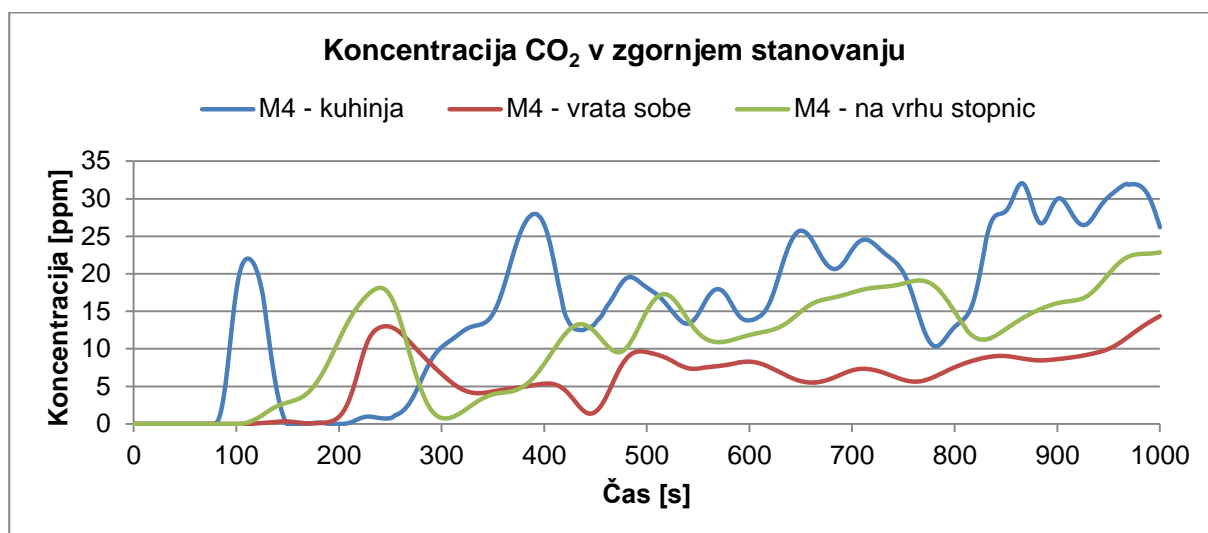
Slika 37: koncentracija CO₂ v spodnjem stanovanju (B3)

Preglednica 14: grafični prikaz koncentracije CO₂ pod stopnicami (B3)

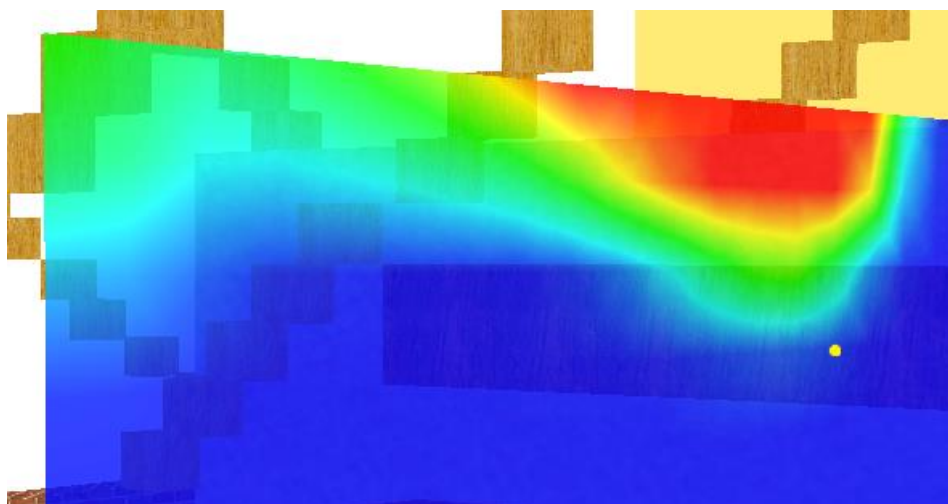
Čas	Koncentracija CO ₂ [ppm] (rumena pika predstavlja merilec pod stopnicami)
t = 860 s	<p>Na merilnem mestu pod stopnicami je izmerjena maksimalna koncentracija CO₂. Vidi se, kako je oblak plina skoncentriran na mestu merilca.</p>
t = 1000 s	<p>Oblak plina se prerazporedi pod stropom. Posledično je na lokaciji merilca koncentracija precej manjša.</p>

Na sliki 38 so prikazani rezultati merilcev v zgornjem stanovanju. Merilec v kuhinji v času t = 114 s izmeri lokalni maksimum v vrednosti 22 ppm, za tem pa koncentracija CO₂ pade skoraj na nič. Pozneje vrednosti spet narastejo z nekaj vmesnimi skoki. Merilec na vrhu stopnic

izmeri lokalni maksimum v času $t = 238$ s, in sicer v vrednosti 18 ppm. Temu prav tako sledita padec in nato naraščanje. Merilec na vratih sobe izmeri lokalni maksimum v času $t = 248$ s v vrednosti 13 ppm. Po lokalnem maksimumu prav tako sledi padec koncentracije, nato pa naraščanje. V vseh treh primerih je začetni lokalni maksimum posledica začetnega oblaka plina, kar je vidno na sliki 39 (rumena pika predstavlja merilec v kuhinji). Začetni oblak je spredaj visok in sega tako globoko v prostor, da merilec na višini 1,6 m zabeleži njegovo prisotnost. Sprednjemu visokemu delu pa sledi nizek del, ki ne sega dovolj globoko v prostor, da bi ga omenjeni merilec lahko zaznal. Prav zato pride do pojava lokalnega maksimuma, nato pa vrednosti na vseh treh merilnih mestih drastično upadejo. Prvi lokalni maksimum zabeleži merilec v kuhinji, zadnji pa merilec na vratih sobe, kar je tudi logično, saj je merilec v kuhinji najbližje oknu, merilec na vratih sobe pa je najbolj oddaljen. Drugi skoki koncentracije CO_2 so posledica vstopanja plina v sobe in spodnje stanovanje. Pri tem na vratih in nad stopniščem koncentracija plina upade. Ker ga je v preostalem delu zgornjega stanovanja več, nastanejo plinski tokovi. Ti poskušajo uravnati koncentracijo plina, tako da bi ga bilo povsod enako, in prav to je razlog za nihanje izmerjenih vrednosti. Največja koncentracija CO_2 v zgornjem stanovanju je izmerjena na merilnem mestu v kuhinji, in sicer 32 ppm.



Slika 38: koncentracija CO_2 v zgornjem stanovanju (B3)



Slika 39: začetni oblak CO_2 (B3)

Ker je stanje v lakirnici enako kot v varianti B1, je tudi stopnja nevarnosti v tem prostoru enaka, kot je zapisano v varianti B1. Če izvzamemo lakirnico, je največja koncentracija CO₂ spet izmerjena na balkonu pred pisarno (748 ppm). Približno istega velikostnega reda je tudi koncentracija na obeh merilnih mestih v pisarni. Maksimalna koncentracija CO₂ v stanovanjskem delu je izmerjena v kuhinji zgornjega stanovanja (32 ppm), minimalna pa v spodnjem stanovanju na merilnem mestu pred sobo ($8,4 \times 10^{-17}$ ppm). Sklepamo lahko, da so tako razporejeni tudi morebitni strupeni produkti gorenja poliuretanskega laka. Iz dobljenih rezultatov te variante je razvidno, da ločevalna vrata bistveno prispevajo k omejevanju širjenja produktov gorenja v stanovanjski del objekta. Idealno bi bilo, da bi se osebe, ki bi bile v pisarni, evakuirale preko balkona in balkonskih stopnic, tako da bi ločevalna vrata ostala zaprta. Za osebe v stanovanjskem delu objekta bi bilo najbolje, da bi uporabile evakuacijske izhode v stanovanjskem delu. Idealno bi bilo, da bi isti režim uporabljale tudi reševalne ekipe. Ločevalna vrata namreč skoraj popolnoma zavarujejo spodnje stanovanje in evakuacijske poti pred produkti gorenja, zato bi bilo smiselno, da bi imela mehanizem za samodejno zapiranje.

8.5 Varianta B4

Zasnova te variante prav tako izhaja iz B1. Razlika je le ta, da lastnik zapre vsa vrata med prostori v spodnjem stanovanju, z izjemo vrat, ki iz dnevne sobe vodijo na hodnik. Prav tako sta še zmeraj odprta stopnišče in ločevalna vrata med stanovanjskim in industrijskim delom. Namen te variante je proučiti spremembe koncentracij produktov gorenja, če je volumen, po katerem se lahko širijo, manjši.

8.5.1 Rezultati B4

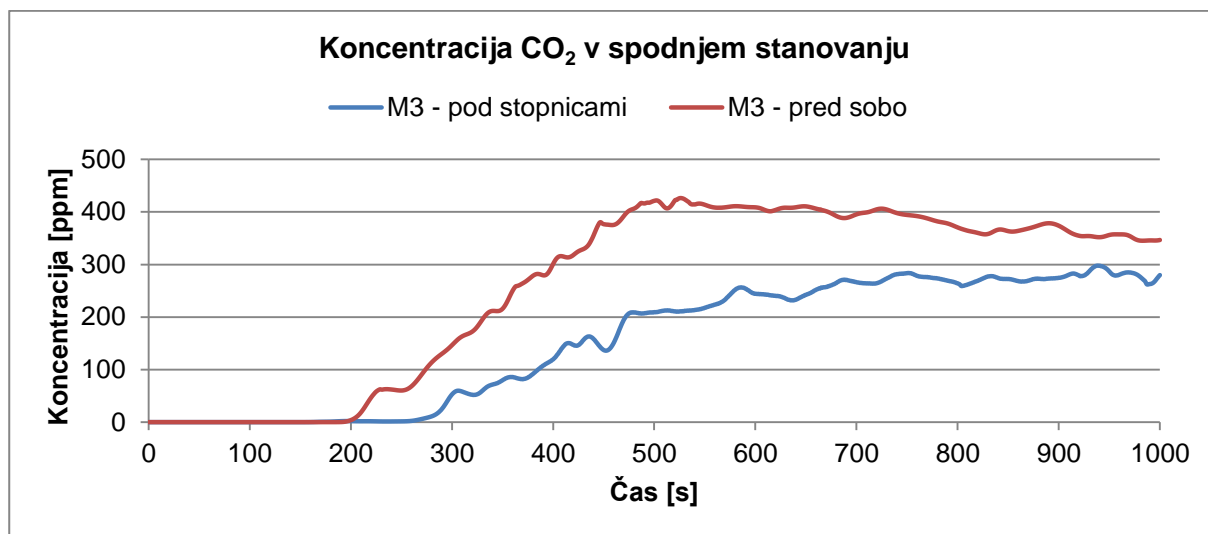
Splošna dinamika požara (razvoj, hitrost porabe goriva) je tudi v varianti B4 enaka kot pri varianti B1, saj je zasnova požara enaka. Enaka je tudi situacija v lakirnici (temperatura, koncentracija CO in CO₂ ter vidljivost).

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Tudi v tej varianti je situacija v pisarni zelo podobna kot v prejšnjih variantah. Merilec D (na stolu za sejno mizo) zazna ogljikov dioksid v času $t = 7$ s, merilec C (na pisarniškem stolu v kotu prostora) pa v $t = 17$ s. Zaradi bližine okna na merilnem mestu D koncentracija plina narašča hitreje kot na merilnem mestu C. Na merilnem mestu D koncentracija narašča tja do $t = 300$ s, ko je izmerjena največja vrednost, to je 232 ppm. Zaradi oddaljenosti merilca C od okna je maksimalna koncentracija na tem mestu izmerjena nekoliko pozneje, in sicer v času $t = 335$ s (318 ppm). Razlog za večjo vrednost na merilcu C je pozicija merilca, kot sem podrobneje opisala v prejšnjih variantah. Po 300 oz. 335 s je na obeh merilnih mestih v pisarni opazno vidno padanje izmerjenih vrednosti, ki traja vse do konca simulacije. Padanje je deloma posledica manjšega dotoka CO₂ z balkona pred pisarno in deloma odtekanja plina skozi ločevalna vrata v stanovanjski del. Na koncu simulacije se izmerjene vrednosti na obeh merilnih mestih v pisarni gibajo okrog 100 ppm.

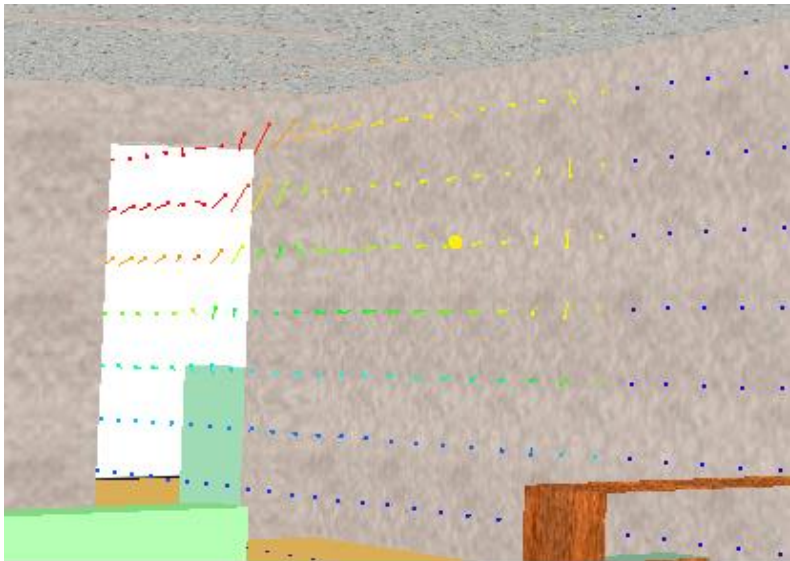
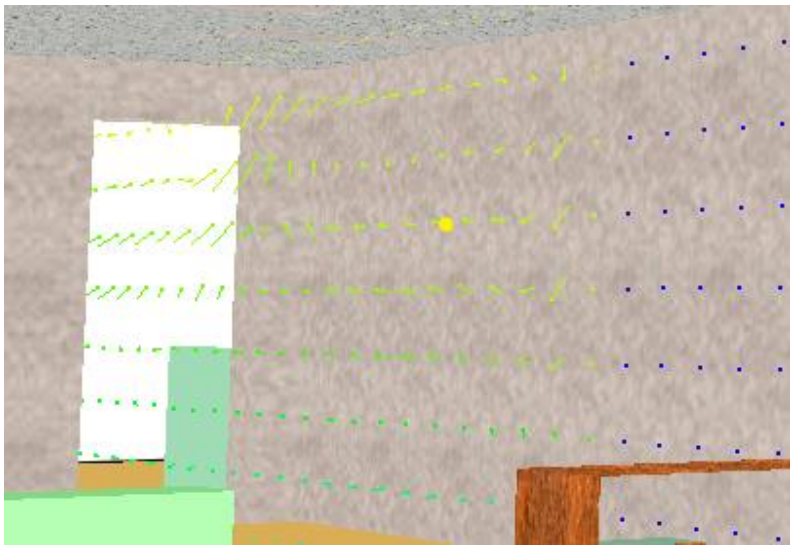
Ker so vrata v obe spalnici, kabinet, kuhinjo in kopalnico zaprta, imajo produkti gorenja na voljo manj volumna za širjenje. Posledično se na določenih lokacijah zbirajo v večjih količinah. Merilec pod stopnicami zazna plin v času $t = 67$ s. V času $t = 260$ s začne koncentracija ogljikovega dioksida na tem merilnem mestu vidno naraščati (slika 40). Maksimalno vrednost doseže v času $t = 938$ s, in sicer 298 ppm. Merilec pred sobo zazna

plin v času $t = 90$ s, njegova koncentracija pa začne vidno naraščati v času $t = 200$ s. Koncentracija CO_2 na tem merilnem mestu hitro narašča in v $t = 526$ s doseže maksimum v vrednosti 426 ppm. Ko je maksimum dosežen, koncentracija upada, kar je posledica manjšega dotoka ogljikovega dioksida v prostor. Koncentracija plina na balkonu pred pisarno se zmanjša in posledično se manjši delež plina transportira v pisarno in nato v dnevno sobo ter hodnik spodnjega stanovanja (preglednica 15). Razlog za hitrejše naraščanje in večjo koncentracijo plina pred sobo je lokacija merilca. Merilec pred sobo je na koncu dokaj ozkega hodnika, kjer se plin nabira. Lokacija merilca pod stopnicami pa je bolj odprte narave in zato se plin tam ne nabira, temveč se prosto dviga po stopnišču v zgornje stanovanje.



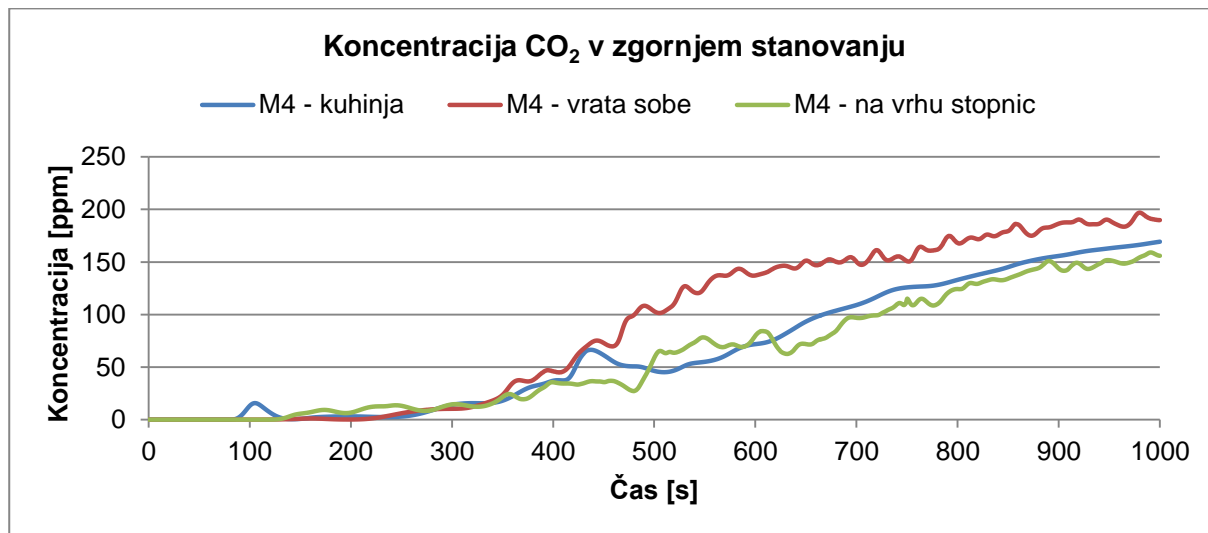
Slika 40: koncentracija CO_2 v spodnjem stanovanju (B4)

Preglednica 15: vektorski prikaz koncentracije CO₂ v spodnjem stanovanju pred sobo (B4)

Čas	Koncentracija CO ₂ [ppm] (rumena pika predstavlja merilec M3 – pred sobo)	
t = 460 s		<p>Malo preden je na merilnem mestu pred sobo izmerjena maksimalna koncentracija CO₂, je dotok plina iz smeri dnevne sobe velik. Vidi se prehajanje velike količine plina pod stropom in pod podbojem vrat.</p>
t = 1000 s		<p>V drugi polovici simulacije se zmanjša dotok plina z balkona v pisarno in nato v dnevno sobo ter hodnik. Vidi se, da pod stropom in podbojem vrat iz dnevne sobe prehaja manjša količina plina, zaradi česar merilec pred sobo zabeleži upad koncentracije CO₂.</p>

Vrata v prej omenjene prostore spodnjega stanovanja so zaprta, zato se več plina transportira po stopnicah navzgor v zgornje stanovanje. Poleg tega plin prej doseže merilce v zgornjem stanovanju. V t = 18 s ogljikov dioksid najprej zazna merilec v kuhinji, v času t = 51 s pa še merilec na vrhu stopnic in na vratih sobe. Najvišjo koncentracijo izmeri merilec na vratih, in sicer v vrednosti 197 ppm, srednje merilec v kuhinji (169 ppm), najmanjšo, v vrednosti 159 ppm, pa merilec na vrhu stopnic. Razlog za razlike v maksimalnih vrednostih je

spet lokacija merilcev. Merilec na vrhu stopnic je na najbolj odprtem mestu, kjer se plini ne nabirajo, medtem ko je pozicija merilca na vratih bolj zaprte narave in količina plina je tam večja. Na sliki 41 je opaziti nihanje izmerjenih vrednosti na vseh treh merilnih mestih. Nihanje je posledica neenakomernega prehajanja produktov gorenja iz spodnjega stanovanja v zgornje, pri čemer pride do vrtnčenja zračnih in plinskih tokov, kot sem že podrobneje opisala v varianti B1 in B2. Omenjeni pojav je prikazan na sliki 34 in v preglednici 13.



Slika 41: koncentracija CO₂ v zgornjem stanovanju (B4)

Ker je stanje v lakirnici enako kot v varianti B1, je tudi stopnja nevarnosti v tem prostoru enaka, kot je zapisano v varianti B1. Če izvzamemo lakirnico, je največja koncentracija CO₂ spet izmerjena na balkonu pred pisarno (748 ppm). Na obeh merilnih mestih v pisarni je koncentracija plina približno polovico manjša. V stanovanjskem delu objekta je največja koncentracija ogljikovega dioksida izmerjena pred sobo (426 ppm), najmanjša pa na kavču v zgornjem stanovanju (143 ppm). Predvidevamo lahko, da so tako razporejeni tudi morebitni strupeni produkti gorenja poliuretanskega laka. Ta varianta je najbolj neugodna za stanovalce v sobah spodnjega stanovanja. Če te osebe ne bi zaznale, kaj se dogaja zunaj, in bi na hodnik pred sobo vstopile v času $t = 500$ s, bi vdihnile največjo koncentracijo produktov gorenja (strupenih in nestrupenih) v celotnem stanovanjskem delu. Situacija je neugodna tudi za stanovalce zgornjega stanovanja, saj se največja količina produktov gorenja nabira ravno na njihovi evakuacijski poti. Če bo stanovalec takoj opazil, da se je zanetil požar, in v prvih sto do dvesto sekundah odšel iz objekta, potem nevarnosti za njegovo zdravje ni pričakovati. Bolj neugodno pa je, če bi stanovalec na primer spal in bi se zbudil šele po štiristo ali petsto sekundah od nastanka požara. Če bi ta oseba izbrala evakuacijsko pot preko hodnika, dnevnice, sobe, pisarne in balkona, bi bila v času $t = 500$ s na vratih spalnice izpostavljena 103 ppm CO₂, pod stopnicami 209 ppm, v dnevni sobi približno 250 ppm in na balkonu M1 233 ppm CO₂. Takšne koncentracije ogljikovega dioksida same po sebi sicer niso zdravju nevarne, treba pa se je zavedati, da CO₂ pospešuje dihanje, kar bi lahko privedlo do tega, da bi stanovalec vdihnil večjo količino drugih produktov gorenja, ki so lahko potencialno zdravju nevarni.

8.6 Varianta B5

Osnovne predpostavke in robni pogoji izhajajo iz variante B4. Edina razlika je stopnišče med zgornjim in spodnjim stanovanjem, ki je tokrat zaprto. S tem ukrepom sem želela preveriti vpliv stopnišča na prenos produktov gorenja.

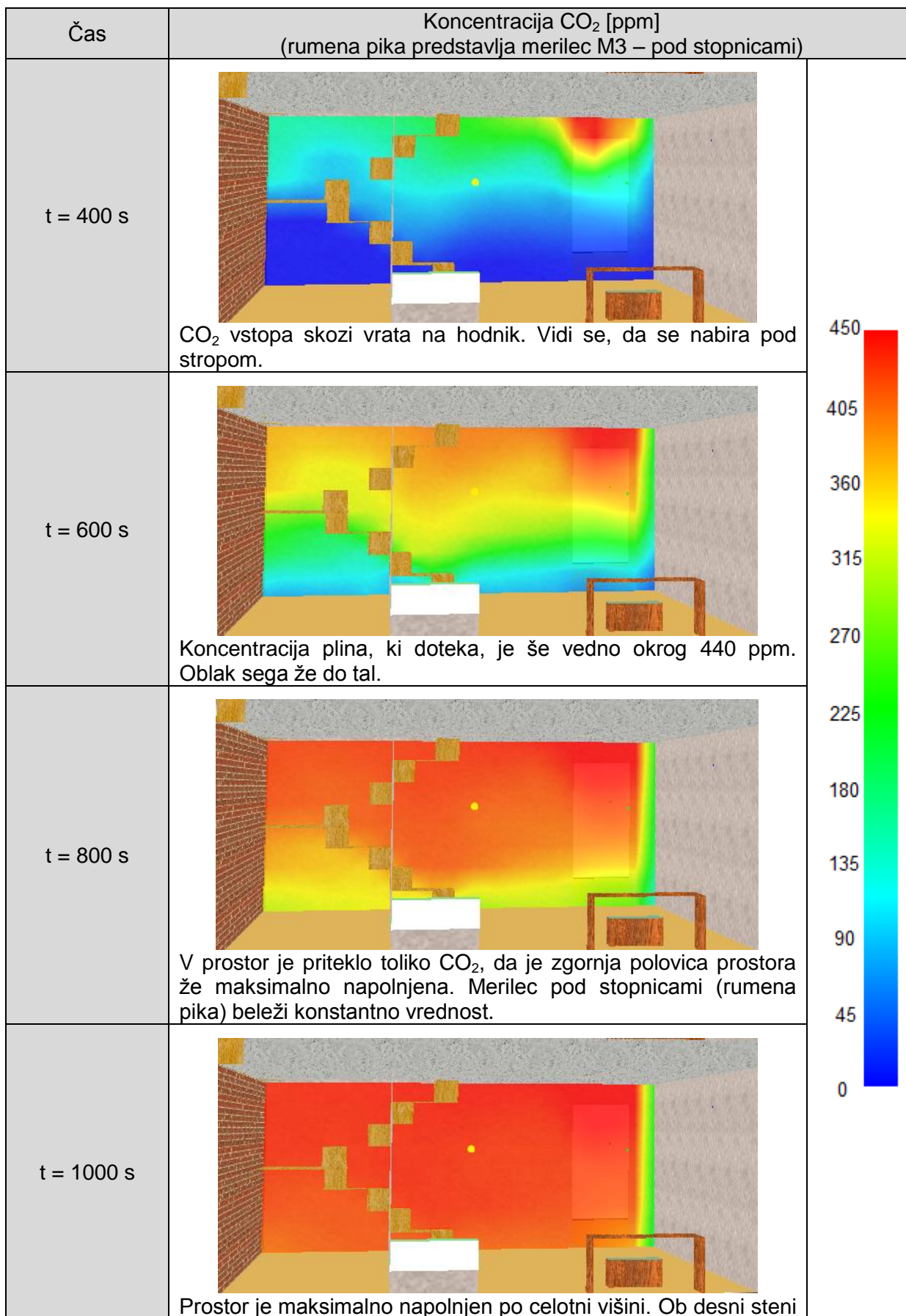
8.6.1 Rezultati B5

Splošna dinamika požara (razvoj, hitrost porabe goriva) je tudi v varianti B4 enaka, kot pri varianti B1, saj je zasnova požara enaka. Enaka je tudi situacija v lakirnici (temperatura, koncentracija CO in CO₂ ter vidljivost).

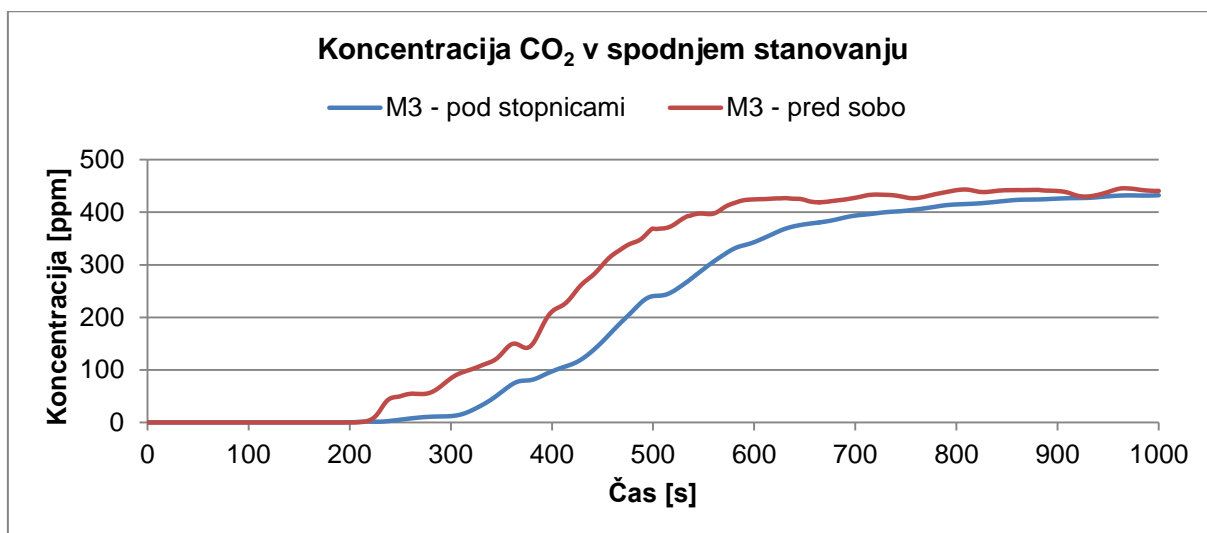
V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Prav tako kot v prejšnjih variantah (z izjemo A1) tudi v tej varianti merilec D (slika 20) zazna ogljikov dioksid v času $t = 7$ s, merilec C pa v $t = 17$ s. Na obeh lokacijah prvih 300–400 s koncentracija plina narašča. Merilec C na pisarniškem stolu v kotu prostora je maksimalno koncentracijo 285 ppm izmeril v času $t = 443$ s. Merilec D na stolu za sejno mizo je maksimalno koncentracijo 259 ppm izmeril prej ($t = 267$ s), saj je bližje oknu. Največja vrednost je manjša, kar je prav tako posledica lokacije merilca, kot sem že omenila v prejšnjih variantah. Po približno štiristo oziroma petsto sekundah od začetka požara začne koncentracija ogljikovega dioksida upadati. Razlog za to je manjša hitrost gorenja oziroma moč požara in posledično manjši dotok plina z balkona v pisarno. Čeprav je dotok plina z balkona manjši, pa je približno v $t = 850$ s mogoče opaziti ponovno naraščanje koncentracije CO₂. Do ponovnega naraščanja pride, ker se hodnik popolnoma napolni s plinom in ta nima kam odtehati, saj je stopnišče zaprto. Posledično se začne ogljikov dioksid preko dnevne sobe vračati v pisarno, zaradi česar pride do prej omenjenega ponovnega naraščanja koncentracije CO₂.

Ogljikov dioksid v spodnje stanovanje vstopi skozi pisarno, od kjer se širi v dnevno sobo in nato na hodnik, naprej pa se ne more širiti. Merilec pod stopnicami zazna plin v času $t = 109$ s, vidneje pa začne koncentracija naraščati po približno dvesto sekundah od začetka simulacije (slika 42). Maksimalna vrednost na tem merilnem mestu je dosežena na koncu simulacije, in sicer 432 ppm. Merilec pred sobo zazna plin v času $t = 123$ s, vrednosti pa začnejo vidneje naraščati ob približno istem času kot na mestu merilca pod stopnicami. Maksimalna vrednost je prav tako izmerjena na koncu simulacije, in sicer 446 ppm. Na mestu merilca pred sobo koncentracija hitreje narašča, saj je ta merilec nameščen na koncu dokaj ozkega hodnika in se plin tam bolj nabira. S slike 42 je razvidno, da koncentracija na obeh merilnih mestih narašča do približno enake vrednosti, to je 440 ppm, nato pa je do konca simulacije konstantna. Razlog za to je količina plina, ki vstopi na hodnik. Koncentracija plina, ki iz dnevne sobe vstopi na hodnik, je celoten čas simulacije približno konstantna in se giblje okrog 440 ppm. Ker je hodnik zaprt prostor, se plin ne more širiti. Posledično se najprej nabere pod stropom, nato pa se prostor postopoma polni vse do tal, dokler ni koncentracija na vseh mestih okrog 440 ppm. Poleg tega ga določena količina s hodnika uhaja nazaj v dnevno sobo. Ker je koncentracija plina proti koncu simulacije konstantna, je očitno, da se je celoten prostor maksimalno napolnil ter da iz prostora uhaja ravno tolikšna količina plina, kot ga vstopi, tako da se koncentracija plina v prostoru ne spreminja (preglednica 16).

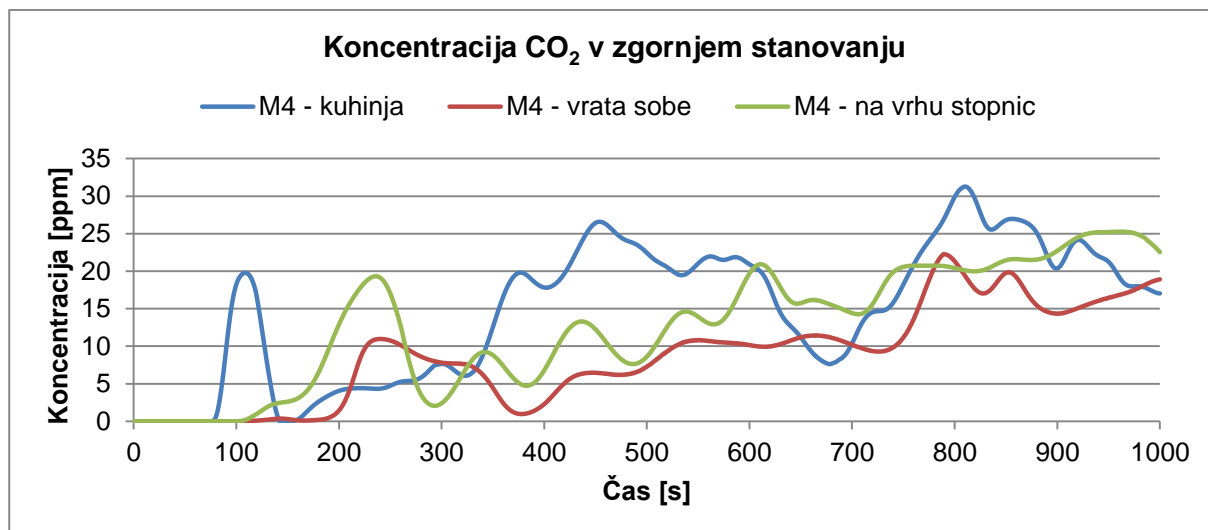
Preglednica 16: grafični prikaz koncentracije CO₂ na hodniku (B5)

	prihaja zaradi poenostavitve, ki jo naredi program, do manjših koncentracij (zelen pas ob steni). Računske celice so široke 0,32 m, ta stena pa je tanjša. Ker program računa le z danimi celicami, pri tej steni naredi poenostavitve, zaradi česar pride do računske napake. Leva stena je enakih dimenzij kot računska celica, zato program poenostavitve ne naredi in do napake ne pride.	
--	---	--



Slika 42: koncentracija CO₂ v spodnjem stanovanju (B5)

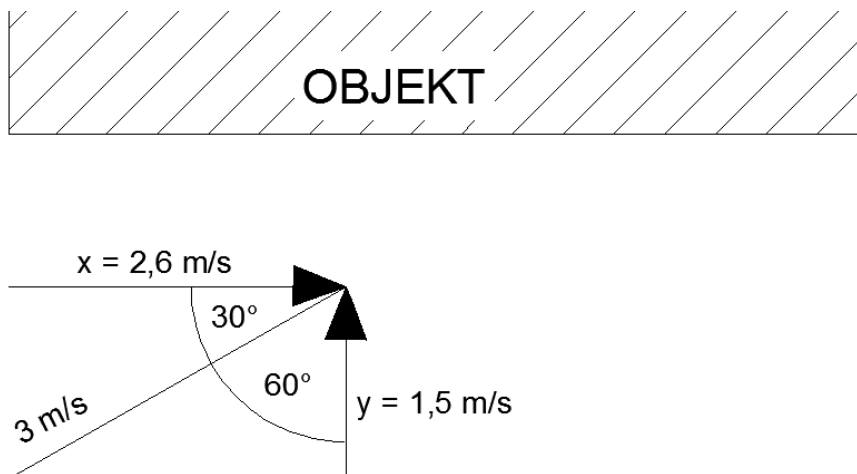
Stopnišče je zaprto, zato lahko produkti gorenja v zgornje stanovanje vstopijo le skozi odprta balkonska vrata in pripadajoče okno. Posledično je količina produktov gorenja v primerjavi s preostalim stanovanjskim delom objekta manjša. CO₂ v času $t = 24$ s prvi zazna merilec v kuhinji, kar je tudi logično, saj je izmed vseh treh merilcev nameščen najbližje balkonskemu oknu. Nato v $t = 50$ s plin zazna merilec na vrhu stopnic, 3 s pozneje pa še merilec na vratih sobe. Na sliki 43 je iz vrednosti, pridobljenih na merilcu v kuhinji v času $t = 107$ s, opaziti hipno povečanje koncentracije, nato pa ta pade skoraj na nič. Isti pojav je dobrih 100 s pozneje mogoče opaziti na preostalih dveh merilnih mestih. Ta pojav je posledica začetnega oblaka CO₂, kar sem podrobneje opisala v varianti B3, in je viden na sliki 39. Drugi skoki so posledica vstopanja plina v sobe. Pri tem se na določenih mestih koncentracija plina zmanjša, na drugih pa ostane enaka, zato nastanejo zračni in plinski tokovi, s katerimi se poskuša ustvariti ravnovesje. Zaradi opisanega gibanja merilne naprave zabeležijo takšne skoke in padce v izmerjenih vrednostih. Maksimalno koncentracijo CO₂ v zgornjem stanovanju izmeri merilec v kuhinji, in sicer 31 ppm.

Slika 43: koncentracija CO₂ v zgornjem stanovanju (B5)

Ker je stanje v lakirnici enako kot v varianti B1, je tudi stopnja nevarnosti v tem prostoru enaka, kot je zapisano v varianti B1. Če izvzamemo lakirnico, je največja koncentracija CO₂ spet izmerjena na balkonu pred pisarno (748 ppm). Na obeh merilnih mestih v pisarni je bila koncentracija ogljikovega dioksida približno enakega velikostnega reda. Največja koncentracija plina v stanovanjskem delu je bila izmerjena na merilnem mestu M3 – pred sobo (446 ppm), najmanjša pa na kavču v zgornjem stanovanju (16 ppm). Sklepamo lahko, da se na enak način po objektu razporedijo tudi morebitni strupeni produkti gorenja poliuretanskega laka. Ta varianta postane neugodna nekje po 600–800 s od začetka požara, ko se hodnik v celoti napolni z maksimalno možno koncentracijo produktov gorenja (strupenih in nestrupenih). Tedaj se namreč produkti začnejo vračati v dnevno sobo in pisarno, dokler tudi tam ni dosežena maksimalna možna koncentracija. Za osebo, ki bi se zadrževala v eni izmed sob spodnjega stanovanja ali pa v zgornjem stanovanju in bi se evakuirala šele na primer v času $t = 800$ s, bi bila situacija izjemno neugodna. Oseba bi namreč vstopila na hodnik, kjer bi bila koncentracija CO₂ dobrih 400 ppm. Takšna koncentracija bi bila prisotna po celotni višini prostora. Če bi se oseba odločila evakuirati preko dnevne sobe, pisarne in balkona, bi bila v dnevni sobi izpostavljena enaki situaciji. Takšna koncentracija CO₂ sicer ni zdravju nevarna, ne moremo pa določiti učinka na človekovo zdravje pri izpostavljenosti takšni koncentraciji CO₂ v kombinaciji z morebitnimi strupenimi produkti gorenja poliuretanskega laka.

8.7 Varianta B6

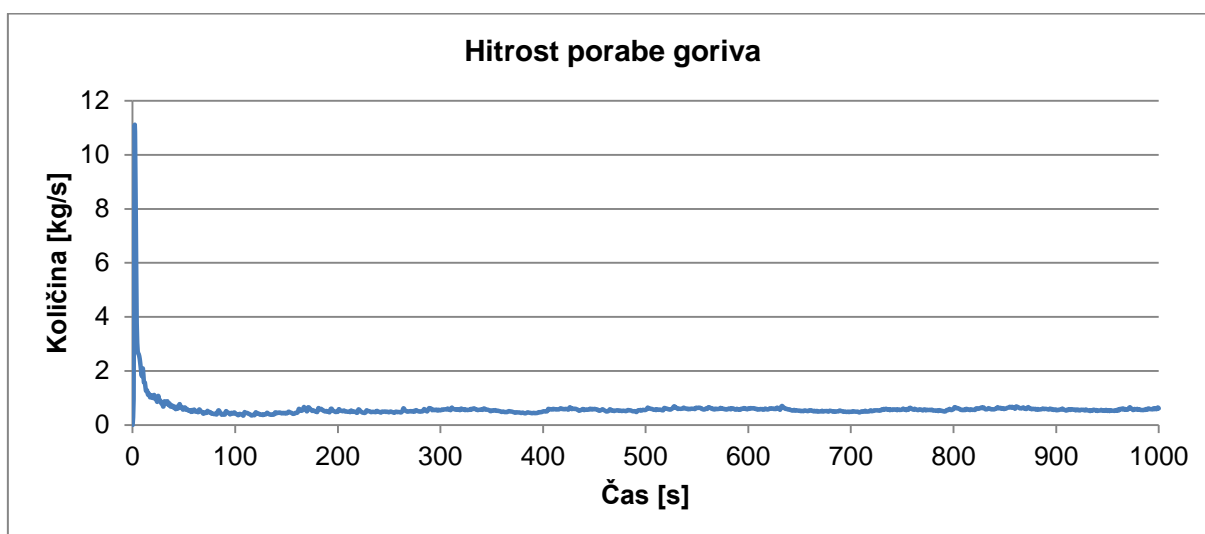
Geometrija objekta in odprtost oziroma zaprtost odprtin je pri tej varianti enaka kot pri varianti B1. Ker objekt leži v dokaj vetrovnem delu Slovenije, sem v tej varianti proučila, kako bi veter vplival na širjenje produktov gorenja po objektu. Povprečna letna hitrost vetra za to območje je med 3 in 4 m/s (Space.si, 2010). Najbolj kritična in tudi dokaj pogosta je smer vetra, ki piha iz zahoda. Ker je v programu treba vnesti vrednosti za smer x in y, sem uporabila povprečno letno hitrost 3 m/s iz zahoda in nato preračunala na ustrezni vrednosti, kot je prikazano na sliki 44.



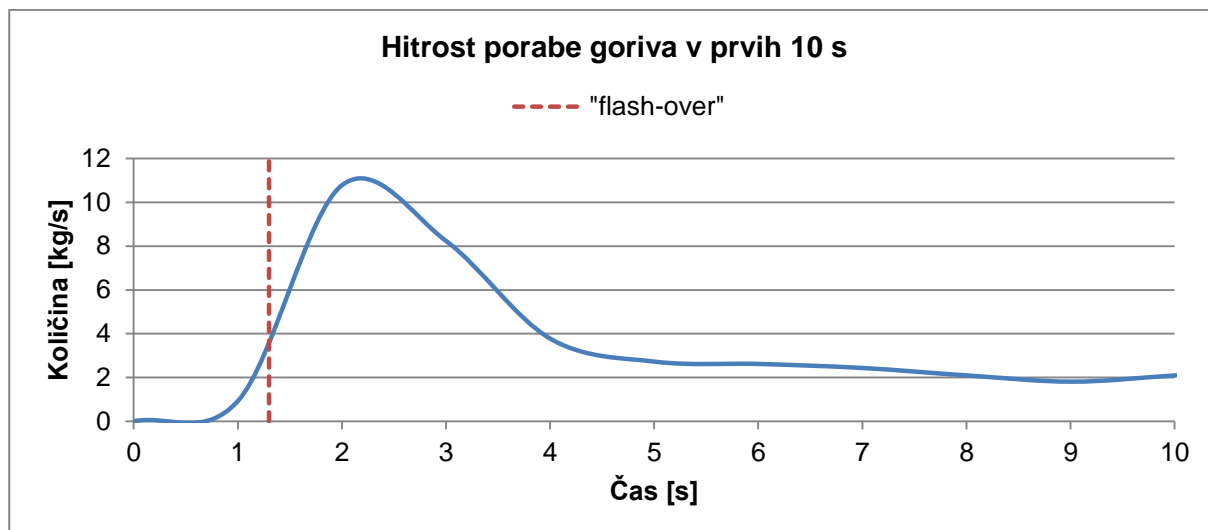
Slika 44: preračunane vrednosti vetra za smer x in y

8.7.1 Rezultati B6

Pri tej varianti je razvoj požara zelo hiter. S slike 46 je razvidno, da do pojava »flash-over« pride že kmalu po prvi sekundi. V fazi polno razvitega požara je hitrost porabe goriva približno 11 kg/s , kar je posledica velike količine lakiranih lesenih elementov in poliuretanskega laka, ki je polit po tleh (slika 28). Ko požar preide v fazo pojemanja, je hitrost porabe goriva malo manj kot 1 kg/s (slika 45). Maksimalna sproščena toplota, ki je izmerjena, še preden minejo 3 s, znaša približno 55.000 kW .



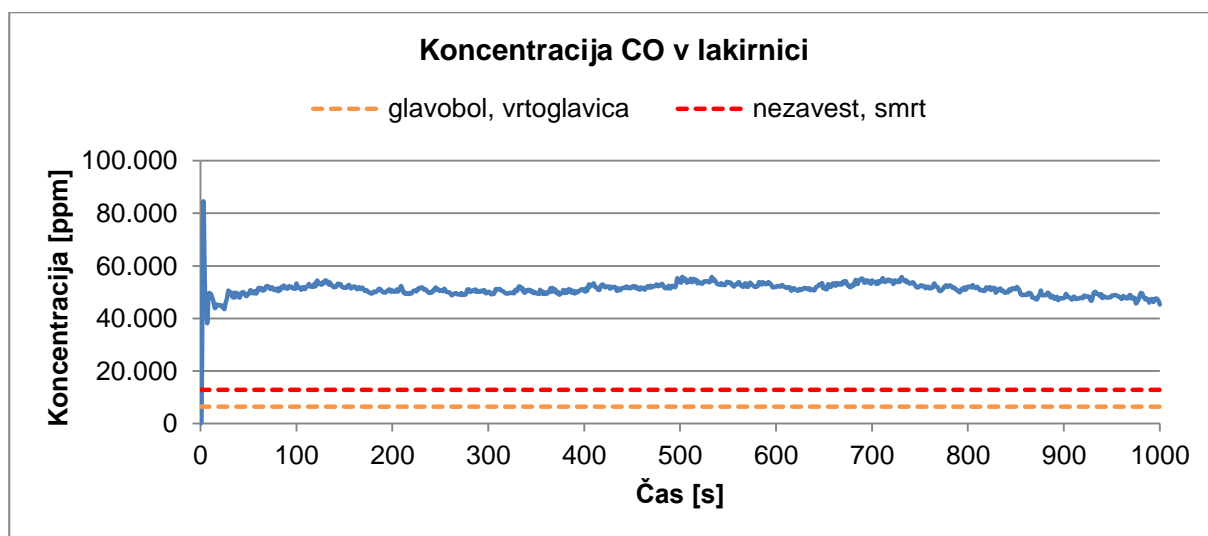
Slika 45: hitrost porabe goriva (B6)



Slika 46: hitrost porabe goriva v prvih desetih sekundah (B6)

Zaradi tako burnega razvoja požara zelo hitro naraste tudi temperatura. V lakirnici je na merilnem mestu B (slika 20) maksimalna temperatura dosežena v času $t = 4$ s, in sicer 895 °C. Zaskrbljujoče je tudi dejstvo, da temperatura med celotno simulacijo ne pade pod 300 °C. Na istem merilnem mestu je vidljivost po petih sekundah 0,71 m, po sedmih sekundah 0,63 m in po tridesetih sekundah 0,47 m.

Ob tako hitrem in burnem razvoju požara je pričakovati velike koncentracije ogljikovega monoksida in ogljikovega dioksida. Merilec B (slika 20) v lakirnici je izmeril koncentracijo CO 84.578 ppm, ki je dosežena že v času $t = 3$ s. Po začetnem skoku se koncentracija CO v lakirnici sicer zmanjša, vendar do konca simulacije ne pade pod 40.000 ppm (slika 47). Problematično je dejstvo, da je meja, pri kateri že nekaj vdihov CO povzroči nezavest in smrt, dosežena že v $t = 2$ s. Linije za simptome (slika 47) so, kot že omenjeno v varianti A1, vnesene za vrednosti, ki so podane v preglednici 1.

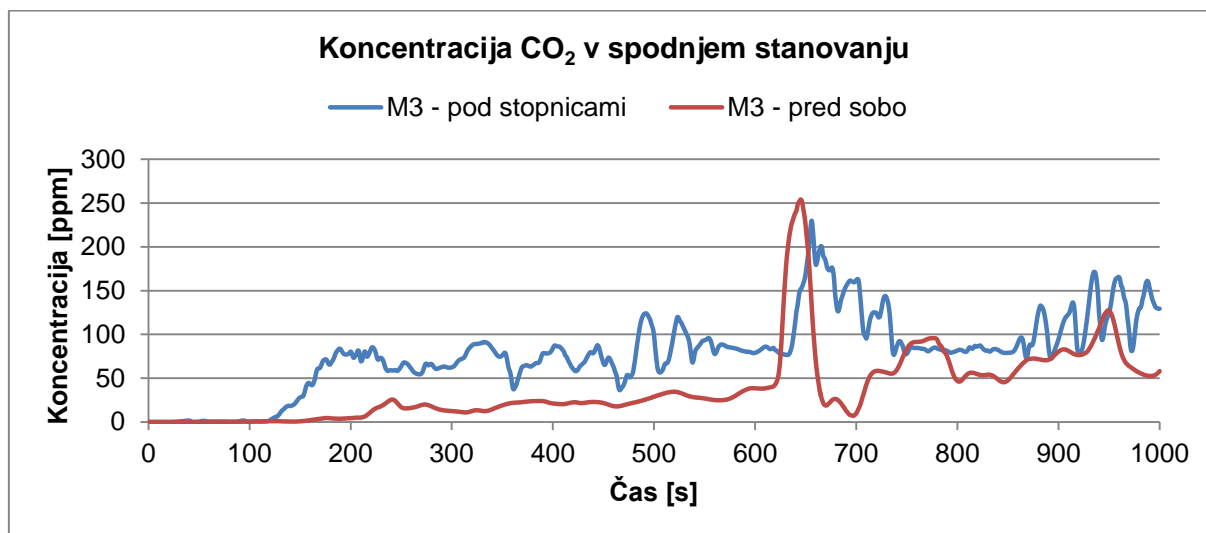


Slika 47: koncentracija CO v lakirnici (B6)

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Zaradi vpliva vetra se produkti gorenja po objektu širijo precej hitreje. Merilec D (na stolu za sejno mizo) zazna CO₂ že v času t = 1 s, merilec C (na pisarniškem stolu v kotu pisarne) pa v t = 2 s. Na merilnem mestu D koncentracija prvih 50 s narašča, nato pa so vrednosti do konca simulacije dokaj konstantne, z nekaj vmesnimi skoki. Maksimalna koncentracija CO₂ je na tem merilnem mestu izmerjena v času t = 978 s in znaša 465 ppm, povprečna koncentracija na tej lokaciji pa je 133 ppm. Na merilnem mestu C koncentracija plina prvih 400 s narašča, ko je dosežena maksimalna vrednost 465 ppm, nato pa vrednosti rahlo padajo vse do konca simulacije. V primerjavi z vrednostmi na merilnem mestu C so vrednosti na merilnem mestu D veliko bolj konstantne, kar je posledica pozicije merilnih naprav. Merilec D je namreč nameščen pri oknu, kjer je dotok plinov z balkona konstanten, poleg tega pa se na njegovi lokaciji plini ne kopičijo, temveč preko njega potujejo dalje v prostor. Ravno nasprotno pa velja za merilec C v kotu pisarne.

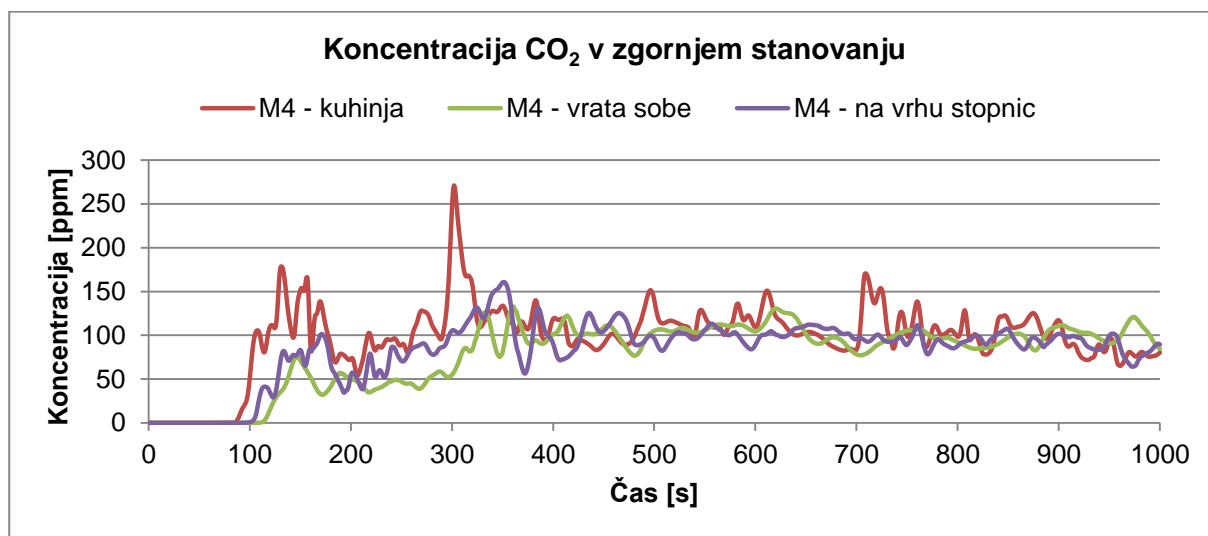
Tako v zgornjem kot tudi spodnjem stanovanju so merilci zaznali CO₂ že po nekaj sekundah od začetka požara. Merilec pod stopnicami zazna ogljikov dioksid v času t = 4 s, merilec pred sobo pa v času t = 8 s. Na obeh merilnih mestih je količina plina začela vidno naraščati po dobrih 100 s od začetka simulacije (slika 48). Koncentracija CO₂ narašča dokaj enakomerno, z izjemo skoka, ki se na merilcu pod stopnicami zgodi v času t = 656 s (230 ppm) in na merilcu pred sobo v času t = 645 s (254 ppm). Iz analize rezultatov simulacije je bilo razvidno, da na obeh merilnih mestih do približno t = 610 s prevladuje vpliv zgornjega stanovanja. Do takrat namreč večina plina na hodnik pride iz zgornjega stanovanja, preko stopnic. Skok je posledica spodnjega stanovanja, do njega pa pride, ko iz dnevne sobe na hodnik vstopi velik oblak plina. Velika količina plina se nato prerazporedi v sobe in stopnišče, zato vrednosti na obeh merilnih mestih takoj za tem padejo in nato spet naraščajo po istem trendu kot prvih 610 s.



Slika 48: koncentracija CO₂ v spodnjem stanovanju (B6)

V zgornjem stanovanju je koncentracija ogljikovega dioksida prav tako začela vidno naraščati po prvih 100 s od nastanka požara (slika 49). Prvi je plin zaznal merilec v kuhinji, ker je najbližje oknu, nato merilec na vrhu stopnic in zadnji merilec na vratih, saj je nameščen na najbolj zaprtem in oddaljenem mestu zgornjega stanovanja. Na vseh treh merilnih mestih se po približno 150 s pojavi prvi večji skok v izmerjenih vrednostih, ki je posledica začetnega oblaka plina. Ta pojav je podrobneje opisan v varianti B3 in je viden na sliki 39. Ko se začetni

oblak razkadi oziroma gre mimo lokacije merilca, začne koncentracija padati. Po dobrih 300 s od začetka simulacije skozi okno vstopi večji oblak plina. Plinski oblak po levi strani prostora potuje proti kuhinji, kjer merilec izmeri koncentracijo CO₂ 271 ppm. Ko se plinski oblak zaleti v steno kuhinje, se ga nekaj razkadi po prostoru, nekaj pa potuje proti lokaciji merilca na vrhu stopnic in nato proti merilcu na vratih spalnice. Na vrhu stopnic je maksimalna izmerjena koncentracija CO₂ 161 ppm, na vratih spalnice pa 133 ppm. Proti koncu simulacije koncentracije na vseh treh lokacijah padajo, kar je posledica manjšega dotoka plina v prostor, predvsem pa konstantnega odvajanja plina po stopnicah v spodnje stanovanje. Da vrednosti v spodnjem stanovanju proti koncu simulacije naraščajo, je vidno tudi na sliki 48.



Slika 49: koncentracija CO₂ v zgornjem stanovanju (B6)

V lakirnici je maksimalna temperatura 895 °C izmerjena že v času $t = 4$ s. Poleg tega je meja, pri kateri že nekaj vdihov CO povzroči nezavest in smrt, v lakirnici dosežena že po dveh sekundah. Za osebo, ki bi bila ob začetku požara prisotna v tem prostoru, bi bila situacija seveda usodna. Temperatura v lakirnici med simulacijo ne pade pod 300 °C, zaradi česar obstaja nevarnost širjenja požara s konvekcijo, kondukcijo in radiacijo. Poleg tega je koncentracija CO ob koncu simulacije več kot 40.000 ppm. Kombinacija visoke temperature, velike koncentracije CO in slabe vidljivosti bi bila v trenutku usodna za vsakogar, ki bi ostal ujet v lakirnici ali pa bi poskusil vstopiti vanjo. Predvidevamo lahko, da je izjemno velika tudi koncentracija morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka. Če izvezemo lakirnico, je največja koncentracija CO₂ izmerjena na balkonu pred pisarno (1267 ppm). Na obeh merilnih mestih v pisarni je koncentracija 465 ppm. Največja koncentracija v stanovanjskem delu je izmerjena na kavču spodnjega stanovanja (339 ppm), najmanjša pa na kavču zgornjega stanovanja (114 ppm). Iz analize razberemo, da je ta varianta prvih 600 s bolj neugodna za prebivalce zgornjega stanovanja, ker se tam plin prej nabere in prej doseže maksimalne vrednosti. Delno sta za to kriva balkon M4 in postavitev strehe, zaradi katerih se plin na balkon dovaja in zadržuje na mestu (preglednica 12), delno pa je za to kriva zasnova zgornjega stanovanja, ki je urejeno v odprtem oziroma modernem slogu, tako da se lahko produkti gorenja neovirano širijo. Spodnje stanovanje je prostorsko bolj pregrajeno, zato plini potrebujejo več časa, da se prebijejo vanj. Čeprav je spodnje stanovanje z vidika produktov gorenja v prvih 600 s varnejše, se situacija proti koncu simulacije spremeni. Zaradi dovajanja plina iz zgornjega stanovanja količina plina v

spodnjem stanovanju namreč narašča. Podobno dinamiko gibanja lahko predvidimo tudi za druge strupene produkte, ki lahko nastanejo pri gorenju poliuretanskega laka. Prej omenjene koncentracije CO₂ v stanovanjskem delu sicer niso zdravju nevarne, ne moremo pa določiti stopnje nevarnosti za človekovo zdravje, ki bi jo lahko povzročila kombinacija takšne koncentracije CO₂ in drugih strupenih produktov gorenja, ki so lahko prisotni zaradi gorenja poliuretanskega laka.

Iz dobljenih rezultatov je razvidno, da sta predpostavljeni smer in hitrost vetra v primeru takšnega požara izredno neugodni. Takšen veter je še posebej neugoden za stanovanjski del objekta. S tem ko veter piha iz zahoda, pospeši gibanje produktov gorenja iz lakirnice proti pisarni in stanovanjskemu delu. Lahko bi rekli, da veter iz zahoda poveča »učinek žleba«, ki je prikazan v preglednici 12.

8.8 Varianta B7

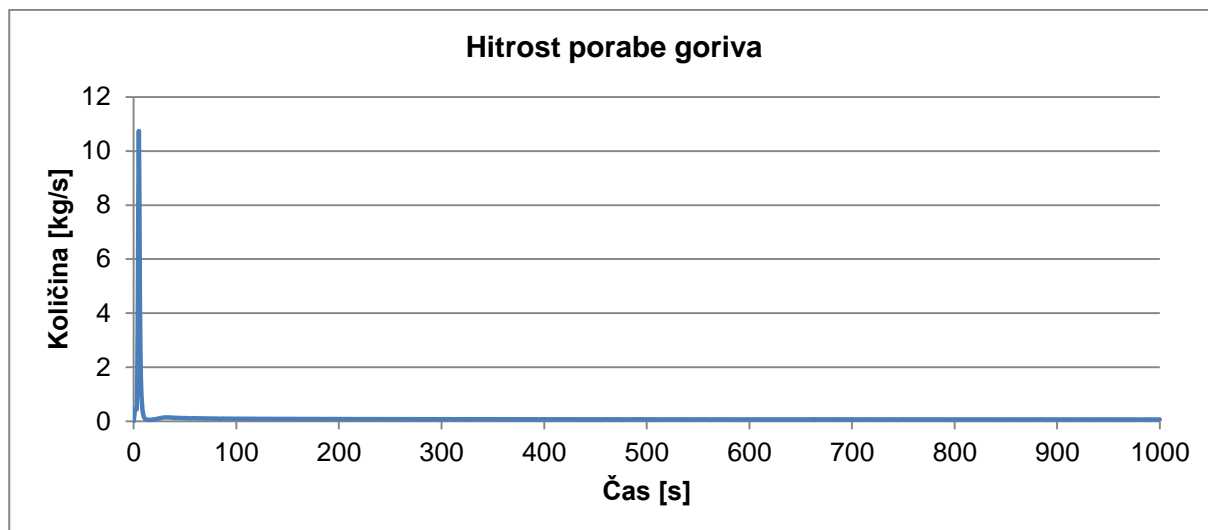
V tej varianti, ki prav tako izhaja iz B1, sem se osredotočila na gašenje požara. Zaradi prisotnosti poliuretanskih lakov je gašenje z vodo izključeno. Poliuretanski lak lahko namreč reagira z vodo, zato sem se odločila za gašenje s sistemom, ki v prostor vpihava CO₂.

Gašenje z ogljikovim dioksidom se izvaja pri požarih razreda B in C (slika 2). Takšno gašenje je primerno za požare v kuhinjah, delavnicah, laboratorijih in objektih, kjer so aparati pod električno napetostjo. Pri gašenju s CO₂ ni škodljivih posledic za okolje. CO₂ kot gasilno sredstvo deluje na principu izpodrivanja kisika. Običajen volumski delež kisika v zraku je približno 21 %, ko pa v prostor vpihavamo ogljikov dioksid, delež kisika pade pod 15 %, kar praviloma prekine proces gorenja. V zaprtih prostorih je lahko gašenje s CO₂ nevarno za zdravje ljudi, zato je treba upoštevati čas za evakuacijo (aktiviranje z zakasnitvijo, opozorilni alarmi) (Zavod Vizija Varnosti, 2009).

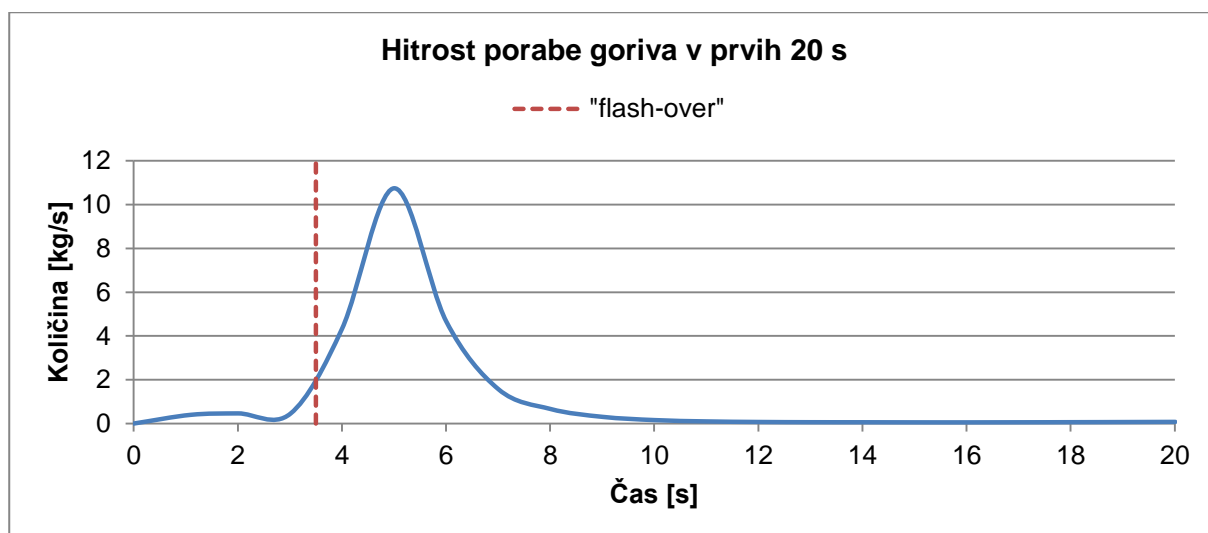
V varianti B7 večja zakasnitev ne bi bila smiselna, saj je razvoj požara izjemno hiter in bi zakasnitev povzročila več škode kot koristi. Sistem gašenja je sestavljen iz 13 odprtih, nameščenih na stropu, skozi katere se v primeru požara vpihava CO₂. Sistem se sproži, ko je na merilnem mestu sredi lakirnice dosežena temperatura 60 °C. Masni tok, ki prehaja skozi odprtine, je 20 kg/(m²s). Takoj ko se sistem sproži, se sproži tudi alarm in vklopijo opozorilni znaki. Tako so osebe v objektu obveščene o požaru in se lahko pravočasno evakuirajo.

8.8.1 Rezultati B7

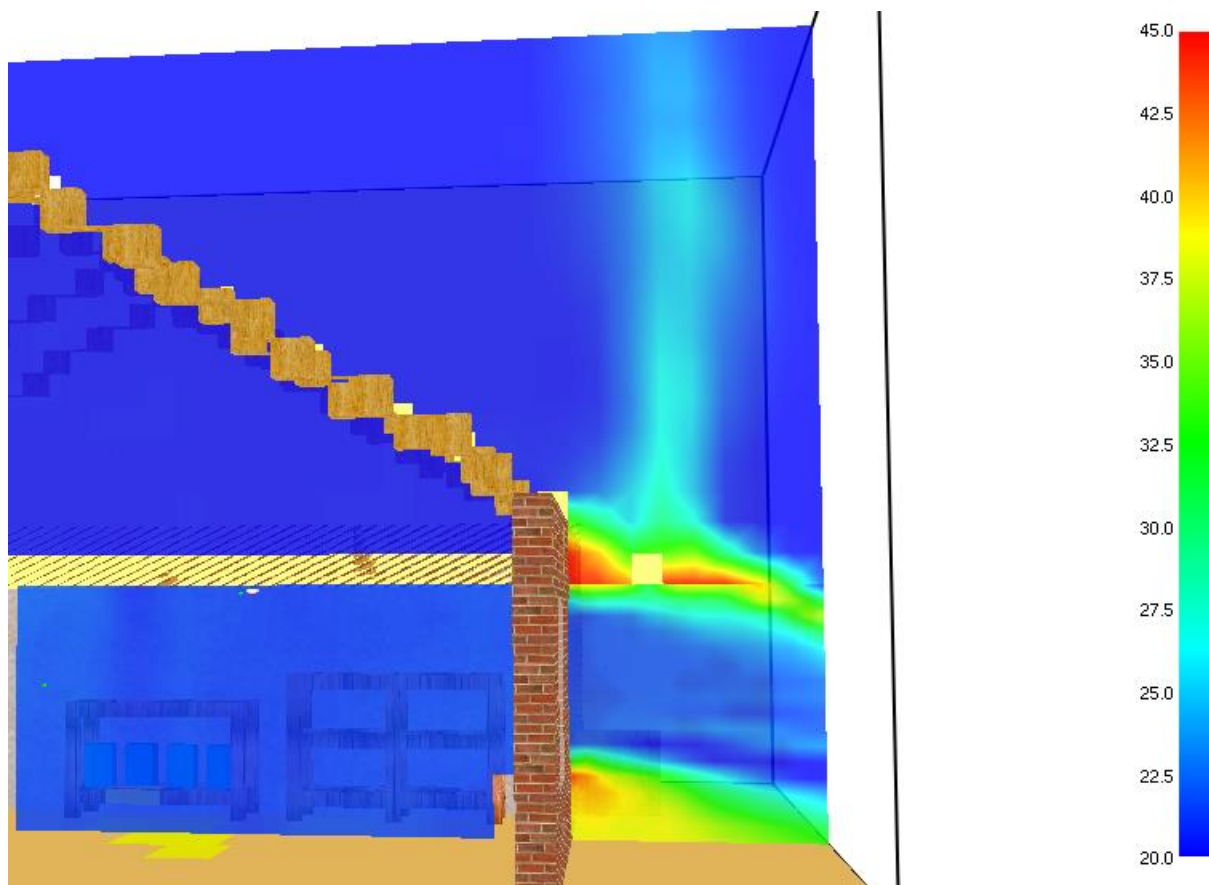
Pri tej varianti, prav tako kot pri varianti B1, do pojava »*flash-over*« v lakirnici pride malo pred četrto sekundo (slika 51). V času $t = 4$ s je dosežena temperatura pri kateri se vključi sistem za gašenje. Kljub temu učinek gašenja ni viden takoj. Požar doseže polno razvito fazo v času $t = 5$ s, ko je hitrost porabe goriva slabih 11 kg/s. Takoj za tem gašenje s CO₂ doseže svoj namen, saj hitrost porabe goriva hipoma pade (slika 50), vendar pa vrednosti med celotno simulacijo ne dosežejo ničle. Na koncu simulacije je namreč hitrost porabe goriva 0,07 kg/s. Požar v lakirnici sicer pogasimo, vendar zaradi odprtega okna in posledično dotoka kisika gori okno samo in področje pod streho (slika 52). Maksimalna izmerjena sproščena toplota je 52.679 kW.



Slika 50: hitrost porabe goriva (B7)



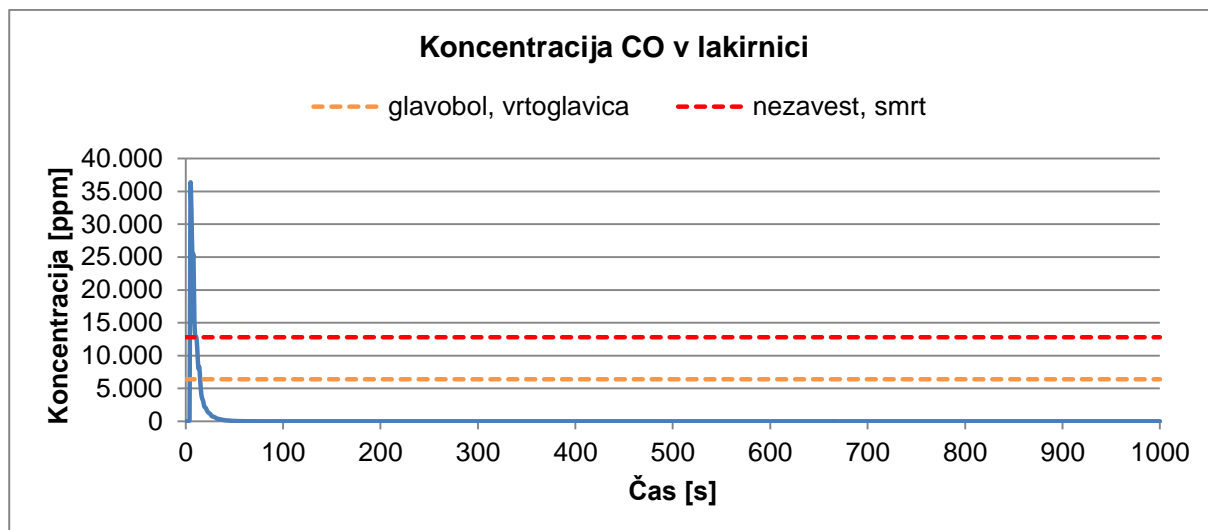
Slika 51: hitrost porabe goriva v prvih dvajsetih sekundah (B7)



Slika 52: temperatura [°C] v ravnini, ki poteka skozi odprto okno lakirnice, t = 100 s (B7)

V lakirnici je na višini 1,6 m (merilno mesto B, slika 20) maksimalna temperatura dosežena v času $t = 7$ s in znaša 574 °C. Temperatura nato naglo pade, tako da je že v $t = 17$ s 56 °C, na koncu simulacije pa je dosežena temperatura zunanjega okolja (20 °C), kar pomeni, da je požar v prostoru pogašen. Na istem merilnem mestu je vidljivost v času $t = 5$ s $1,88$ m, v času $t = 7$ s $1,04$ m in v času $t = 30$ s $18,55$ m. Popolna vidljivost je dosežena v času $t = 34$ s.

Koncentracija ogljikovega monoksida na začetku simulacije zaradi burnega razvoja požara hipoma naraste. Maksimalna koncentracija je dosežena v $t = 5$ s in znaša 35.833 ppm. Ob istem času je dosežena tudi mejna koncentracija, pri kateri lahko že nekaj vdihov povzroči nezavest in smrt. Takoj naslednjo sekundo se koncentracija vidno zmanjša. V $t = 11$ s se zmanjša že toliko, da vrednost pade pod mejo nevarnosti za nezavest in smrt, v $t = 15$ s pa pade tudi pod mejo, ki povzroča glavobol in vrtoglavico. Do konca simulacije koncentracija CO pade skoraj na nič (slika 53). Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da je z vidika prisotnosti CO v celotni simulaciji življenjsko nevarnih 10 s, med $t = 5$ s in $t = 15$ s. Podatki o simptomih so povzeti iz preglednice 1.

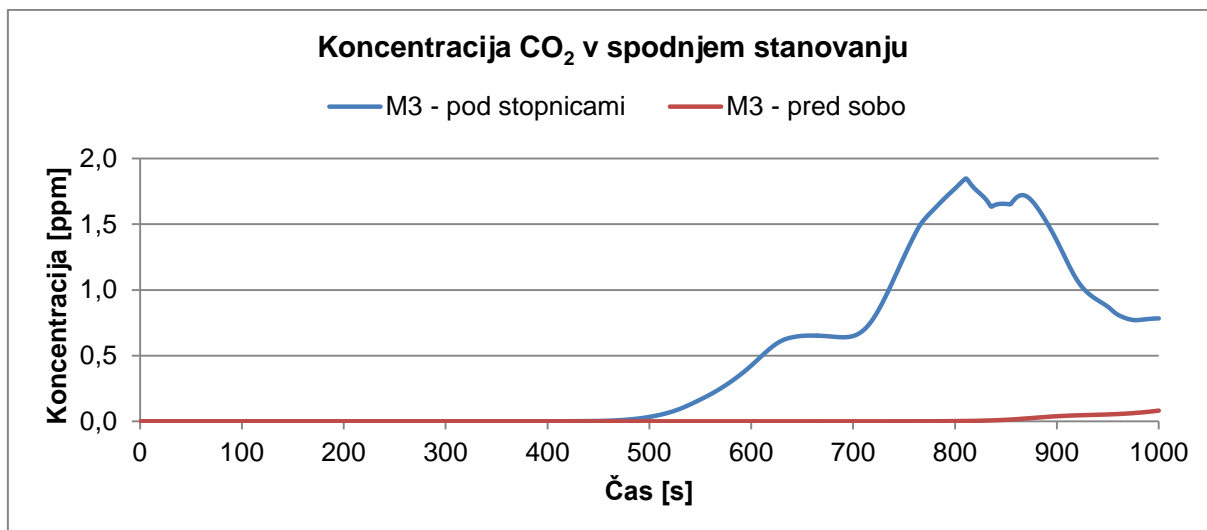


Slika 53: koncentracija CO v lakirnici (B7)

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

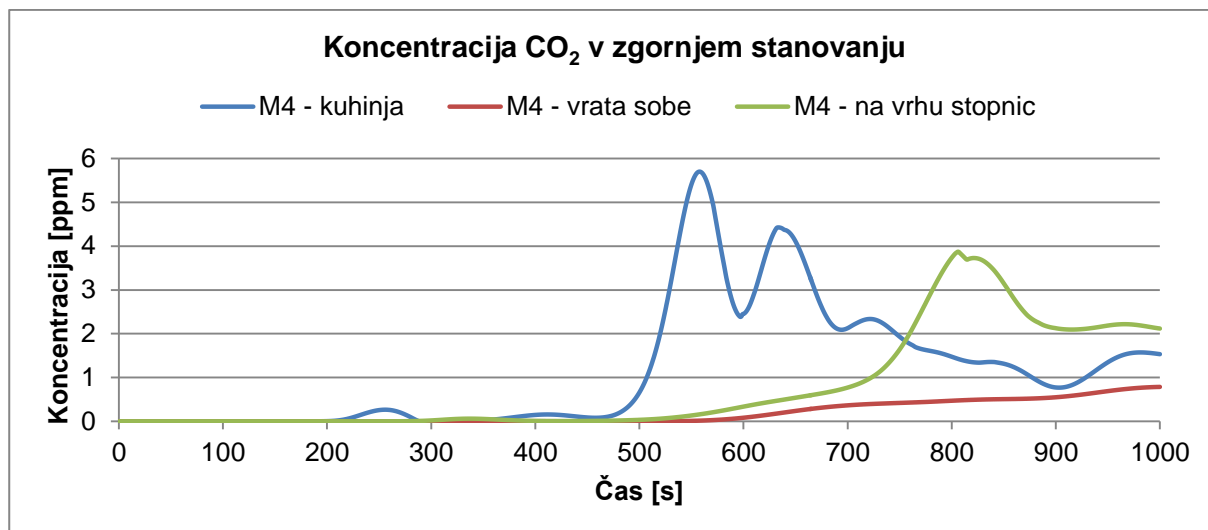
Merilec D na stolu za sejno mizo v pisarni zazna ogljikov dioksid v času $t = 7$ s. Koncentracija na začetku, zaradi burnega začetka požara in posledičnega vpliva z balkona pred pisarno, hitro narašča. Kmalu po 100 s od začetka požara pa vrednosti začnejo padati. Padanje traja do približno $t = 350$ s, nato pa vrednosti spet naraščajo vse do konca simulacije, kar je posledica vpihavanja CO₂ v lakirnico. Pri tem gre znatna količina plina skozi okno lakirnice in nato vstopi v pisarno. Merilec C na pisarniškem stolu v kotu pisarne zazna plin v $t = 19$ s. Na začetku na tem merilnem mestu koncentracija narašča in tako kot pri merilcu D kmalu po 100 s od začetka požara upade. Padanje prav tako traja do približno $t = 350$ s, nato pa sledi naraščanje kot posledica vpihavanja CO₂ v lakirnico. Maksimalna koncentracija je izmerjena v $t = 989$ s in znaša 194 ppm. Na tem merilnem mestu je maksimalna koncentracija malenkost večja kot na merilnem mestu D, kar je posledica pozicije merilca C v kotu pisarne.

CO₂, ki ga merilne naprave zaznajo v spodnjem stanovanju, je tam deloma prisoten zaradi šibkega gorenja okna lakirnice, deloma pa zaradi vpihavanja CO₂ v lakirnico. Merilec pod stopnicami zazna ogljikov dioksid v času $t = 113$ s. Koncentracija začne na tem merilnem mestu vidno naraščati šele po 500 s od začetka požara (slika 54). Naraščanje traja do $t = 811$ s, ko je dosežena maksimalna koncentracija 2 ppm, takoj za tem pa začne padati in pada vse do konca simulacije. Zanimivo je, da na prisotnost CO₂ v hodniku vpliva predvsem dotok plina po stopnicah iz zgornjega stanovanja. Prav zaradi tega je na merilnem mestu pod stopnicami tako izrazit maksimum, takoj za tem pa sledi padec vrednosti. Ko plin iz zgornjega stanovanja potuje proti spodnjemu, se oblak plina skoncentrira ravno na mestu merilca pod stopnicami, kar povzroči dokaj veliko maksimalno koncentracijo. Takoj za tem se oblak prerazporedi po hodniku, zaradi česar pade koncentracija plina na merilnem mestu. Merilec na merilnem mestu pred sobo zazna plin v $t = 269$ s. Koncentracija na tem merilnem mestu je zanemarljiva (reda 10^{-30} ppm) vse do $t = 800$ s. Toliko časa je namreč potrebnega, da plin iz zgornjega stanovanja pripotuje na to merilno mesto. Nato sledi naraščanje, tako da je maksimalna vrednost izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša $8,1 \times 10^{-2}$ ppm.



Slika 54: koncentracija CO₂ v spodnjem stanovanju (B7)

Prav tako kot v spodnjem stanovanju je tudi v zgornjem stanovanju CO₂ deloma prisoten zaradi šibkega gorenja okna lakirnice, deloma pa zaradi vpihavanja CO₂ v lakirnico z namenom gašenja. Prvi, v t = 28 s, zazna ogljikov dioksid merilec v kuhinji, kar je logično, saj je izmed vseh treh merilcev (slika 55) ta nameščen najbližje oknu. Nato plin v t = 58 s zazna merilec na vrhu stopnic in kot zadnji v t = 92 s še merilec na vratih sobe. Na merilnem mestu v kuhinji začne koncentracija vidno naraščati šele v t = 450 s. Naraščanje traja vse do t = 558 s, ko je izmerjena maksimalna vrednost 6 ppm. Nato sledi padanje koncentracije CO₂, ki traja vse do konca. Podobno situacijo lahko opazimo na merilnem mestu na vrhu stopnic. Vrednosti začnejo vidno naraščati v t = 500 s in naraščajo vse do t = 806 s, ko je izmerjena maksimalna koncentracija 4 ppm. Nato začnejo vrednosti padati in padajo vse do konca simulacije. Ta pojav je posledica glavnine plinskega oblaka, ki skozi balkonsko okno vstopi v zgornje stanovanje, potuje ob steni v levi kot kuhinje, nato pa se od tam odbije v smeri merilca M4 – kuhinja in M4 – na vrhu stopnic. Ko oblak prečka lokacijo merilca, je izmerjena koncentracija na merilcu velika, ko pa se premakne naprej, vrednosti padejo. Oblak merilnega mesta na vratih sobe ne prečka, zato je situacija tam malo drugačna. Merilec zazna plin v t = 92 s, vendar do vidnega naraščanje ne pride vse do t = 560. Nato sledi naraščanje koncentracije, ki traja vse do konca, ko je izmerjena maksimalna vrednost 1 ppm.

Slika 55: koncentracija CO₂ v zgornjem stanovanju (B7)

Z gašenjem se je situacija v lakirnici izboljšala, vendar še vedno ni sprejemljiva. Maksimalna temperatura v lakirnici na merilnem mestu B (slika 20) je kljub gašenju 574 °C, dosežena pa je že v $t = 7$ s. Velika je tudi koncentracija ogljikovega monoksida. Maksimalna izmerjena vrednost znaša 35.833 ppm, poleg tega je za človekovo zdravje oziroma življenje nevaren celoten čas med peto in petnajsto sekundo, saj so takrat presežene mejne koncentracije, pri katerih je lahko za človeka usodnih že nekaj vdihov. Po $t = 15$ s koncentracija CO ne ogroža življenja, vendar je zaradi gašenja s CO₂ v prostoru velika koncentracija le-tega. Vstopanje v lakirnico bi bilo torej v trenutku usodno za vsakogar brez ustrezne opreme, tudi po 1000 s od začetka požara. Ker je gorenje lakov preprečeno, lahko predvidevamo, da se drugi strupeni plini (npr. dušikove spojine) ne proizvajajo več. Iz izvedene analize simulacije je jasno, da v lakirnici poliuretanskih lakov ne bi smelo biti, saj predstavljajo preveliko nevarnost v primeru požara. Poleg tega bi bilo bolje, da v prostoru ne bi bilo skladiščenega preveč lakiranega lesa in bi bila okna lakirnice fiksno zaprta, tako da v primeru požara ta ne bi imel dovolj kisika in bi ugasnil sam od sebe. Ker so v stavbi predvideni alarmi, ki bi se vključili, ko bi se sprožil sistem za gašenje, lahko rečemo, da varnost preostalih oseb v objektu ne bi bila ogrožena. Ko bi osebe zaslišale alarm, bi za evakuacijo rabile največ 5 minut. Največje koncentracije CO₂ v pisarni in stanovanjskem delu so izmerjene v drugi polovici simulacije, ko bi bile že vse osebe zagotovo zunaj. Maksimalna koncentracija CO₂ v stanovanjskem delu je 6 ppm.

9 PRIMERJAVA VARIANT

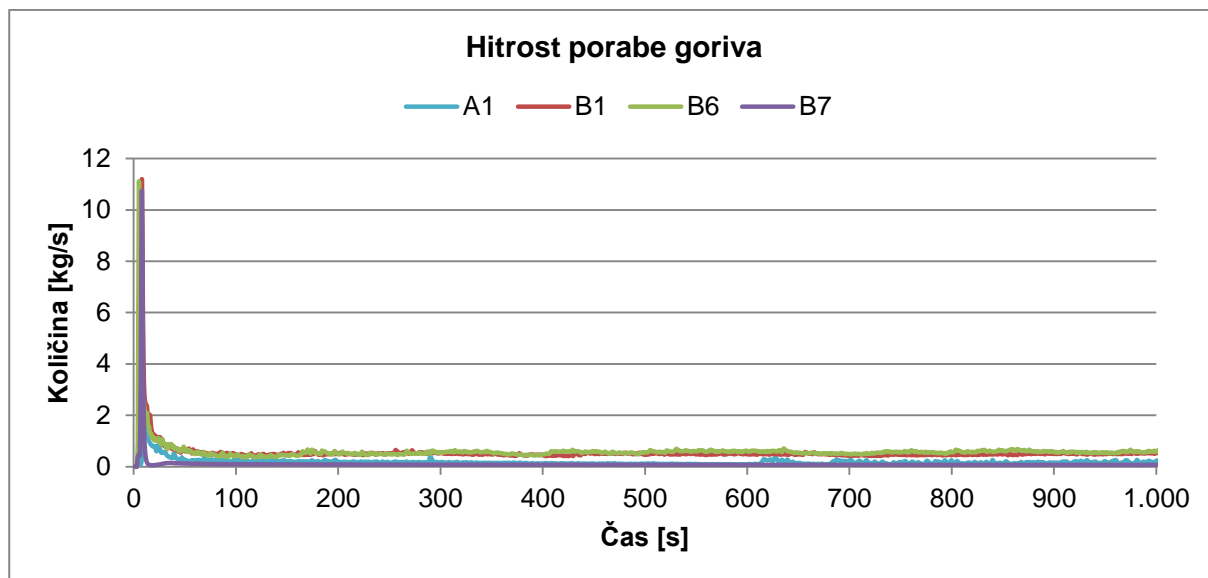
V tem poglavju sem se osredotočila na primerjave med posameznimi variantami, in sicer glede na:

- razvoj požara,
- situacijo v lakirnici,
- situacijo v pisarni,
- situacijo v spodnjem stanovanju in
- situacijo v zgornjem stanovanju.

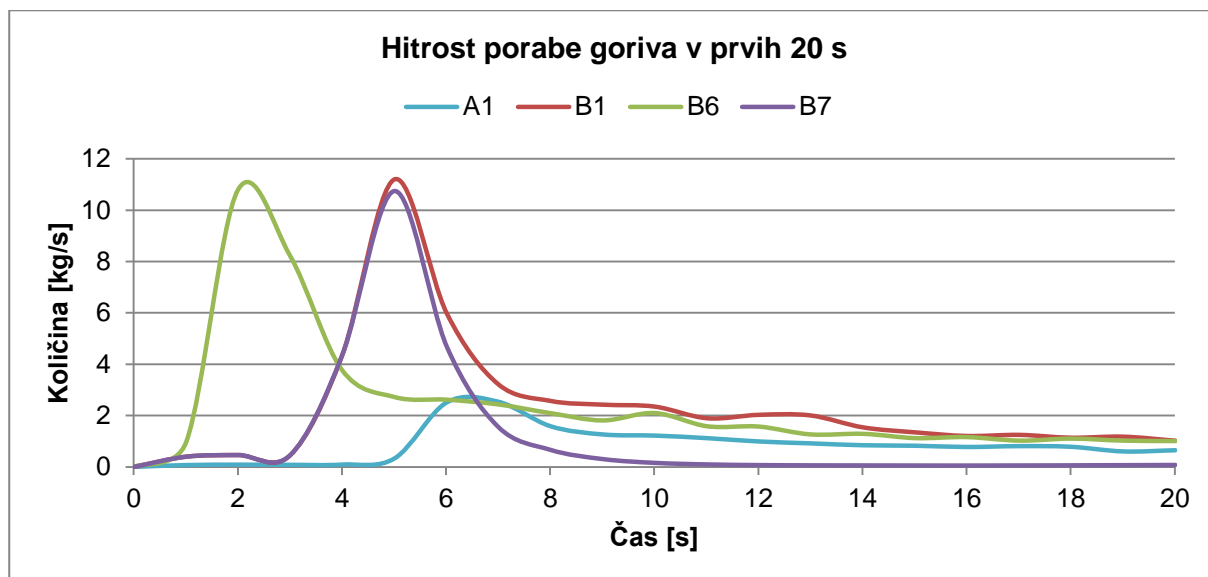
9.1 Razvoj požara

V variantah B2, B3, B4 in B5 je razvoj požara enak kot v varianti B1, zato omenjene variante v nadaljevanju niso posebej omenjene. Pri vseh štirih variantah, ki jih primerjamo (slika 56), je hitrost porabe goriva na začetku velika, nato pa se zmanjša in taka tudi ostane do konca simulacije. Največja poraba goriva je pri varianti B1, in sicer 11,2 kg/s, najmanjša pa pri varianti A1 (2,5 kg/s). Pri variantah B6 in B7 je poraba goriva okoli 10,8 kg/s. Čeprav ima varianta B1 največjo porabo goriva, se »flash-over« ne zgodi najprej pri tej varianti, temveč pri B6 (slika 57), in sicer že kmalu po prvi sekundi od nastanka požara. Malo pred četrto sekundo do omenjenega pojava pride tudi pri B1 in B7, okoli pete sekunde pa še pri A1. S slike 57 je videti, da ima B7 zelo podobno hitrost porabe goriva kot B1. Pri B7 se v času $t = 4$ s vključi sistem za gašenje, zato je maksimalna poraba goriva manjša od tiste pri varianti B1. Takoj ko je dosežena maksimalna vrednost porabljenega goriva, začne vrednost strmo padati, vendar zaradi gorenja okenskega okvirja (slika 52) nikoli ne pade na nič, temveč je vse do konca simulacije približno 0,07 kg/s. Pri B1 je povprečna poraba goriva od $t = 100$ s naprej 0,49 kg/s, pri B6 pa 0,55 kg/s. Večja povprečna vrednost pri B6 je posledica vpliva vetra, saj veter v lakirnico prinaša več kisika, kar posledično pripomore k burnejšemu gorenju in večji porabi goriva. Na sliki 58 je pri varianti A1 opaziti manjšanje porabe goriva do $t = 600$ s, nato pa se poraba poveča in je taka vse do konca. Razlog za povečano porabo goriva je začetek gorenja lakiranih omar, ki so označene na sliki 22.

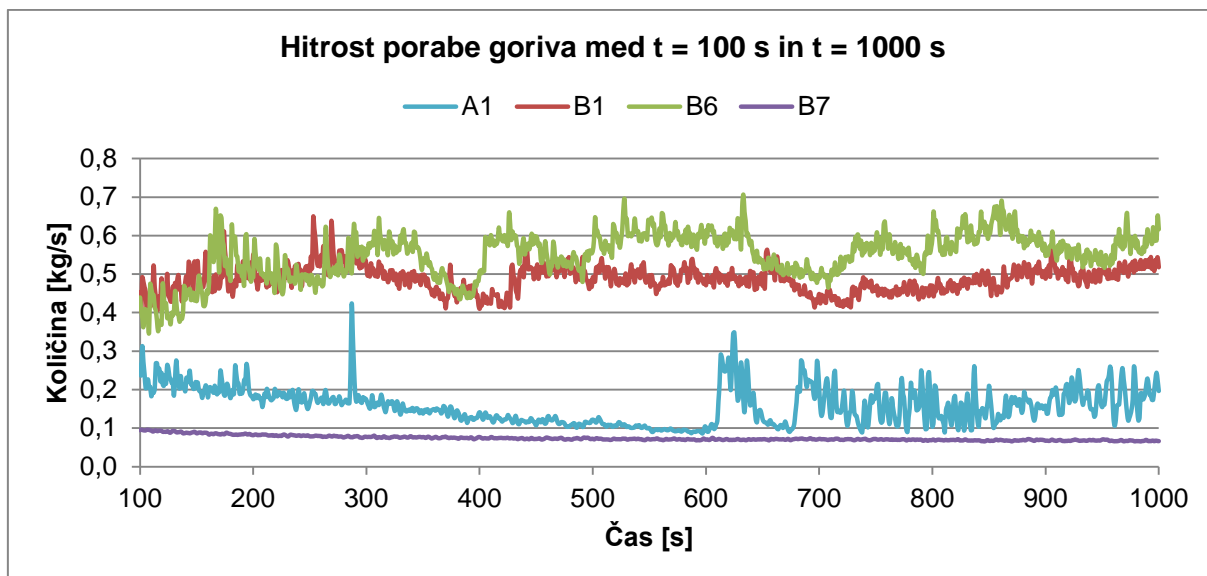
Maksimalna sproščena toplota je izmerjena pri varianti B1, in sicer 59.369 kW, sledi varianta B6 s 53.702 kW in nato B7 z 52.679 kW. Najmanjša sproščena toplota je pri A1, in sicer 21.702 kW.



Slika 56: hitrost porabe goriva



Slika 57: hitrost porabe goriva v prvih 20 s



Slika 58: hitrost porabe goriva med $t = 100$ s in $t = 1000$ s

Najbolj neugoden je razvoj požara pri varianti B6. Pri varianti B1 (in B2, B3, B4 ter B5) so sicer dosežene večje maksimalne vrednosti porabe goriva, vendar je razvoj pri B6 hitrejši za slabi 2 s. Pri vseh analiziranih variantah je razvoj požara na začetku zelo buren, kar je posledica poliuretanskega laka, ki je razlit po tleh lakirnice (slika 22 in slika 28). Zaradi omenjenega laka oziroma njegove vnetljivosti se požar izredno hitro razširi po celotnem prostoru. Učinki gašenja v varianti B7 niso najbolj optimalni, saj je maksimalna poraba goriva zelo podobna tisti v varianti B1, kjer gašenja ni. Zanimivo je tudi dejstvo, da je maksimalna poraba goriva v varianti A1 več kot 4-krat manjša od tiste v B1.

9.2 Lakirnica

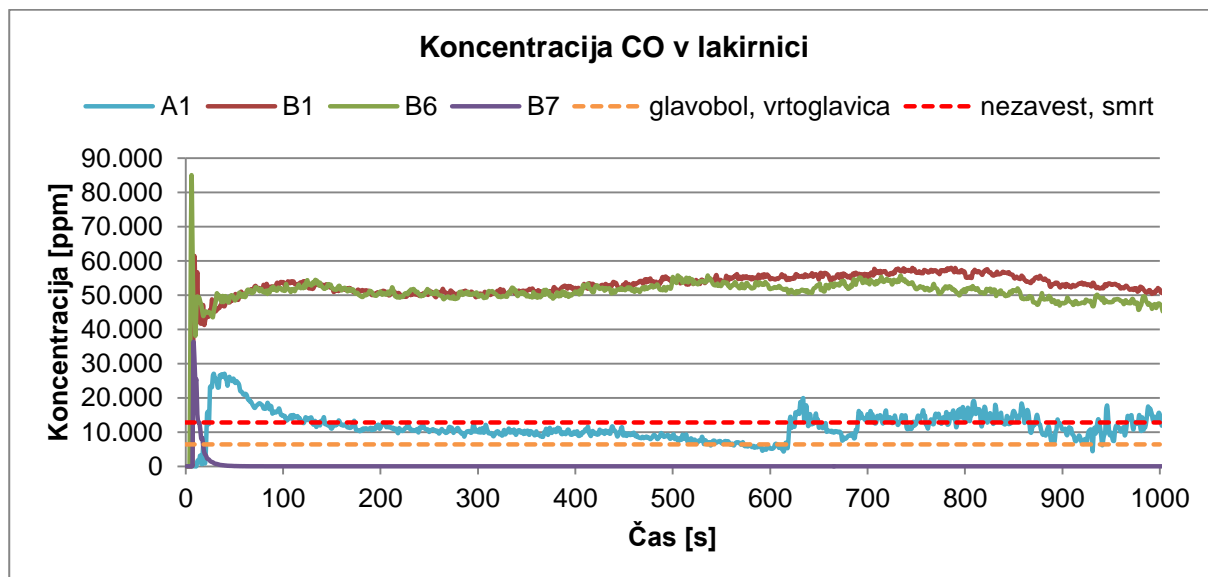
Vse primerjave v lakirnici so za merilno mesto B (slika 20). Pri variantah B2, B3, B4 in B5 so rezultati oziroma meritve enake kot pri varianti B1, zato te variante v nadaljevanju niso posebej omenjene.

Najhitreje začne temperatura naraščati pri varianti B6, najpočasneje pa pri A1. Pri A1 in B1 je potek naraščanja in padanja temperature zelo podoben. Pri A1 je maksimalna temperatura $744\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosežena v $t = 15$ s, pri B1 pa je maksimalna temperatura $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosežena v $t = 7$ s. Po začetnem skoku temperatura pade. Pri varianti A1 je povprečna temperatura od $t = 100$ s dalje $328\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri B1 pa $291\text{ }^{\circ}\text{C}$. Razlog za večjo povprečno temperaturo pri A1 je enakomernejše gorenje. Pri B6 je razvoj temperature podoben, le da je maksimalna temperatura $895\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosežena že v $t = 4$ s. Povprečna temperatura od 100 s dalje je $311\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri varianti B7 je maksimalna temperatura prav tako kot pri B1 dosežena v času $t = 7$ s, vendar je nižja, saj znaša $574\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takoj po izmerjeni maksimalni temperaturi začne ta padati. V času $t = 17$ s je temperatura že pod $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, v približno 100 s od nastanka požara pa pade na $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

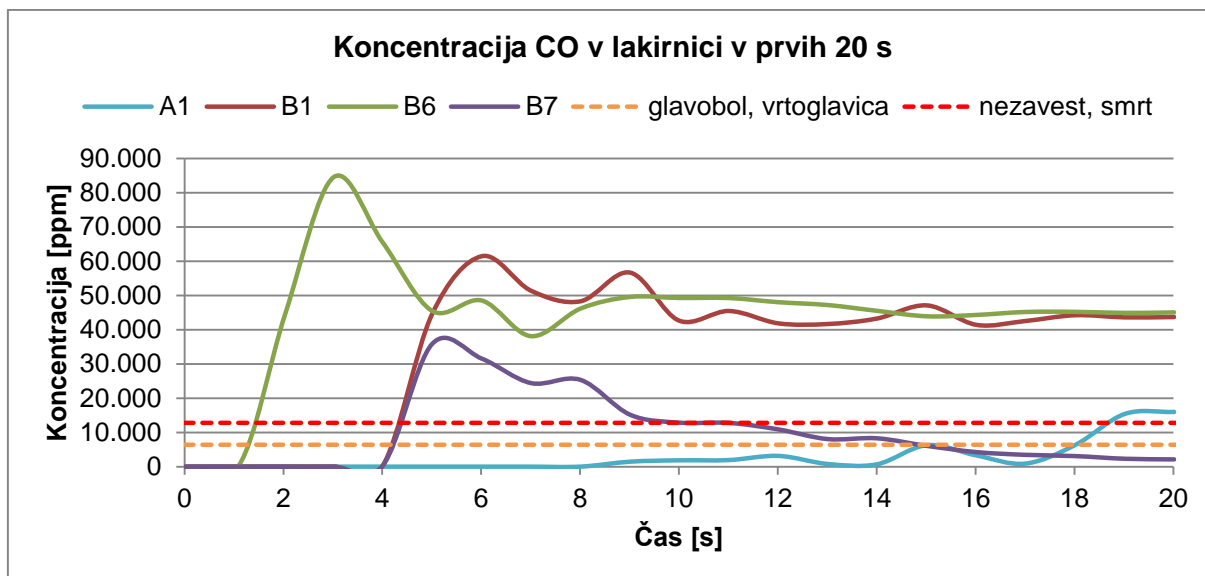
Vidljivost se začne najhitreje zmanjševati pri varianti B6, in sicer že v prvi sekundi. V četrti sekundi se začne zmanjševati pri B1 in B7, v šesti sekundi pa še pri A1. Najmanjša vidljivost $0,38$ m je izmerjena pri B6. Najmanjša vidljivost pri B1 je $0,39$ m, pri A1 pa $0,50$ m. Pri varianti B7 je najslabša izmerjena vidljivost $1,04$ m, in sicer v $t = 7$ s. Takoj za tem pa se

vidljivost začne izboljševati zaradi pozitivnih učinkov gašenja. V $t = 34$ s je pri tej varianti v lakirnici že izmerjena normalna vidljivost 30 m.

Koncentracija CO najhitreje naraste pri varianti B6, saj je maksimalna vrednost dosežena že v $t = 3$ s (slika 60). Poleg tega je v primerjavi z drugimi variantami koncentracija največja in znaša 84.578 ppm. Maksimalna koncentracija ogljikovega monoksida pri B1 je izmerjena v $t = 6$ s in znaša 61.485 ppm. Pri varianti A1 je maksimum dosežen veliko pozneje. Maksimalna vrednost 27.046 ppm je izmerjena v $t = 26$ s. Pri B7 znaša maksimalna izmerjena koncentracija 35.833 ppm, izmerjena pa je v $t = 5$ s. Najhitreje je koncentracija, pri kateri že nekaj vdihov povzroči nezavest in smrt, dosežena v B6, in sicer v $t = 2$ s. V B1 in B7 je ta koncentracija dosežena v $t = 5$ s, v A1 pa v $t = 19$ s. Pri variantah B1 in B6 je koncentracija CO krepko nad omenjeno kritično mejo vse do konca simulacije (slika 59). V varianti A1 se koncentracija plina celoten čas simulacije giba ravno ob kritični meji. Okoli $t = 600$ s koncentracija celo pade pod mejo glavobola in vrtoglavice, nato pa vrednosti spet narastejo nad kritično mejo, kar je posledica gorenja lakiranih omar v lakirnici (slika 22). V varianti B7 se koncentracija po $t = 5$ s zaradi gašenja hitro zmanjšuje. V času $t = 12$ s je izmerjena koncentracija ogljikovega monoksida že pod mejo nezavesti in smrti, v času $t = 15$ s pa tudi pod mejo glavobola in vrtoglavice. Mejne vrednosti za simptome so povzete iz preglednice 1.



Slika 59: koncentracija CO v lakirnici



Slika 60: koncentracija CO v lakirnici v prvih 20 s

Z vidika temperature je najbolj neugodna varianta B6, saj je pri tej varianti izmerjena najvišja temperatura, poleg tega pa je, v primerjavi z drugimi variantami, maksimalna temperatura dosežena najhitreje. Najmanjša maksimalna temperatura je izmerjena v B7 (574 °C). Zaskrbljujoče je dejstvo, da je tako visoka temperatura dosežena kljub gašenju. V vseh variantah obstaja nevarnost širjenja požara v sosednjo pisarno in na podstrešje nad lakirnico, zaradi konvekcije, kondukcije in radiacije. Zaradi tega bi bila potrebna izvedba ustreznih požarnih sektorjev in uporaba požarno varnih materialov. Z vidika vidljivosti je prav tako najbolj neugodna varianta B6, saj se vidljivost v tej varianti zmanjša najhitreje. Z vidika koncentracije CO v lakirnici je spet najbolj neugodna varianta B6. Pri tej varianti je najhitreje presežena meja, pri kateri že nekaj vdihov povzroči nezavest in smrt. Poleg tega je, v primerjavi z drugimi variantami, v B6 izmerjena tudi največja koncentracija CO. Z vidika CO je še najugodnejša varianta A1, saj je tam meja za nezavest in smrt dosežena pozneje ($t = 19$ s). Iz ugotovljenega lahko sklepamo, da je z vidika preostalih strupenih produktov gorenja, ki lahko nastanejo pri zgorevanju poliuretanskega laka (npr. dušikovih spojin), najbolj neugodna varianta B6. Prav tako je neugodna tudi varianta B1 (in B2, B3, B4 ter B5), medtem ko predvidevamo, da je koncentracija strupenih produktov gorenja v A1 manjša, v B7 pa neznatna, saj je bilo preprečeno gorenje laka.

V splošnem se za najbolj negodno varianto izkaže B6. Če bi bila ob začetku požara v lakirnici prisotna oseba, bi ta v A1 za evakuacijo imela na voljo približno 6 s. V tem času je vidljivost še dobra, temperatura pod 50 °C, koncentracija CO pa pod mejo za glavobol in vrtoglavico. V variantah B1 in B7 bi bilo časa za evakuacijo 3 s, v B6 pa 1 s. Če bi oseba (npr. član reševalne/gasilske ekipe) v lakirnico hotela vstopiti po 100 s od začetka požara, so neugodne vse variante z izjemo B7. V vseh teh variantah je temperatura v lakirnici previsoka, da bi oseba lahko preživela, ne glede na opremo. Z ustrežno opremo bi bilo po 100 s mogoče vstopiti le pri varianti B7, saj je temperatura okoli 20 °C, dobra je tudi vidljivost. Kljub temu, da je v tej varianti koncentracija CO majhna oziroma ne predstavlja nevarnosti, bi bilo nevarno vstopiti v lakirnico brez ustrezne opreme zaradi velike koncentracije CO₂, ki je posledica gašenja z vpihavanjem.

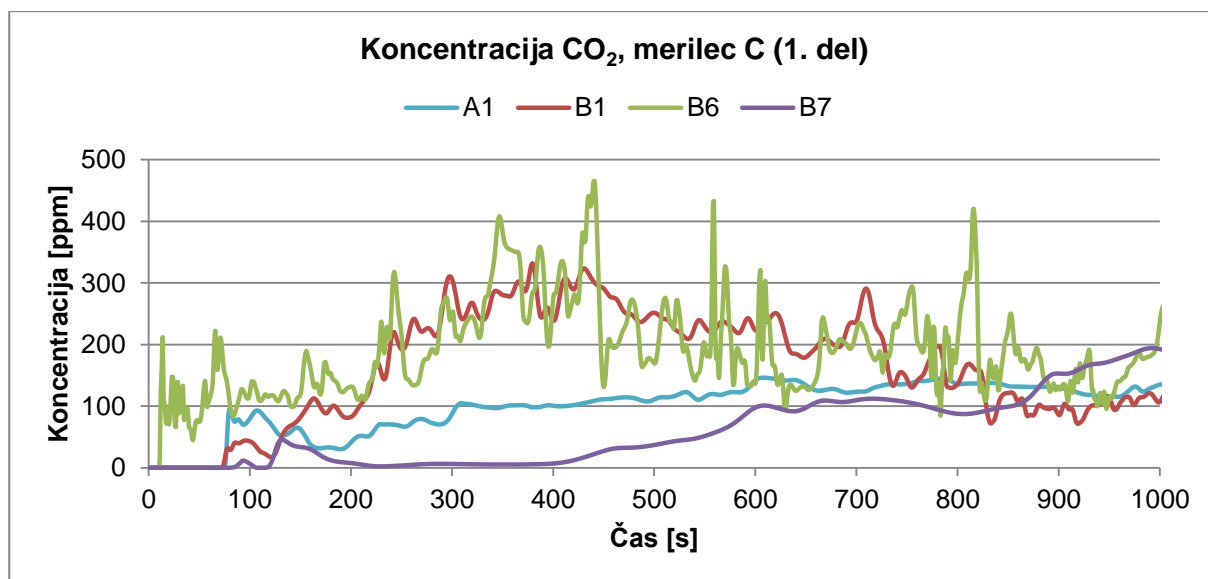
9.3 Pisarna

9.3.1 Merilec C (pisarniški stol v kotu pisarne)

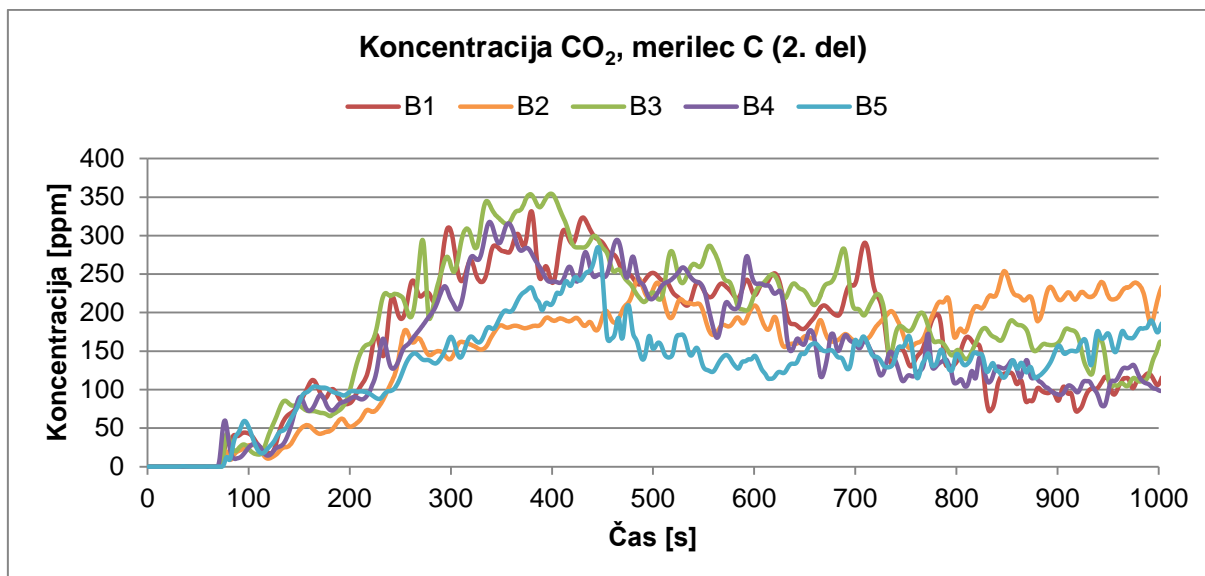
V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Merilec C najprej zazna ogljikov dioksid v varianti B6, in sicer v $t = 2$ s, ko koncentracija hipoma naraste. V času $t = 17$ s plin zaznajo merilci v variantah B1, B2, B3, B4 in B5, 2 s pozneje pa še v B7. V varianti A1 merilci zaznajo CO₂ v $t = 21$ s. Pri variantah, kjer je poraba goriva večja (tj. B1, B2, B3, B4, B5 in B6), je opaziti naraščanje koncentracije plina do približno $t = 400$ s, nato pa sledi počasno padanje izmerjenih vrednosti. Razlog za ta pojav je prav velika poraba goriva oz. buren razvoj požara, zaradi česar na merilno mesto C hkrati pripotuje večja količina plina. Zaradi pozicije merilca (v kotu prostora) se plini tam naberejo oz. nekaj časa zadržujejo, preden se prerazporedijo po prostoru. Na sliki 61 je vidno, da izmerjene vrednosti v B6 veliko bolj variirajo kot v drugih variantah, kar je posledica vpliva vetra oz. večjega mešanja zračnih in plinskih tokov. V varianti A1 je razvoj požara veliko manj buren, zato tudi koncentracija CO₂ narašča veliko počasneje in enakomerneje. Zanimivo je dejstvo, da je v $t = 438$ s, ko je v B6 izmerjena maksimalna koncentracija 465 ppm, v B1 ta koncentracija 300 ppm, v A1 pa samo 109 ppm. V varianti B7 je opaziti začetno naraščanje koncentracije, ki je posledica začetnega burnega razvoja požara. Že kmalu pa vrednosti začnejo padati in so tja do $t = 400$ s zanemarljive, kar je posledica gašenja požara v lakirnici. Po $t = 400$ s koncentracija spet narašča, saj del ogljikovega dioksida, ki ga vpihavamo v lakirnico, prinese v pisarno.

S slike 62 je razvidno, da so izmerjene koncentracije CO₂ v variantah B1, B3 in B4 praktično enake. Opaziti je le malenkost večje vrednosti zadnjih 200 s v varianti B3, ker so zaprta vrata med pisarno in dnevno sobo, zaradi česar se plini ne prerazporedijo v stanovanjski del. Večje razlike pa so pri variantah B2 in B5, ki jima je skupno, da se zrak in plini ne morejo pretakati skozi objekt zaradi zaprtosti stopnišča oziroma oken v zgornjem stanovanju. V obeh primerih ne doteka plin iz zgornjega stanovanja, zato se plin iz pisarne v večji meri prerazporedi po stanovanjskem delu in je v pisarni izmerjen manjši maksimum.



Slika 61: koncentracija CO₂, merilec C (1. del)



Slika 62: koncentracija CO₂, merilec C (2. del)

Z vidika merilnega mesta C je najbolj neugodna varianta B6, saj je pri tej varianti ogljikov dioksid zaznan najbolj zgodaj, poleg tega pa je v tej varianti izmerjena tudi njegova največja koncentracija. Predvidevamo lahko, da je enako tudi s preostalimi strupenimi produkti gorenja oziroma da morebitne dušikove spojine do merilnega mesta C najhitreje pripotujejo v varianti B6 in da jih je v tej varianti tudi največ. Naj ugodnejša je varianta A1, saj koncentracija narašča najpočasneje. Maksimalna izmerjena koncentracija v A1 je več kot 3-krat manjša od maksimalne izmerjene koncentracije v B6. Podobno razmerje lahko predvidevamo tudi za morebitne strupene produkte gorenja poliuretanskega laka.

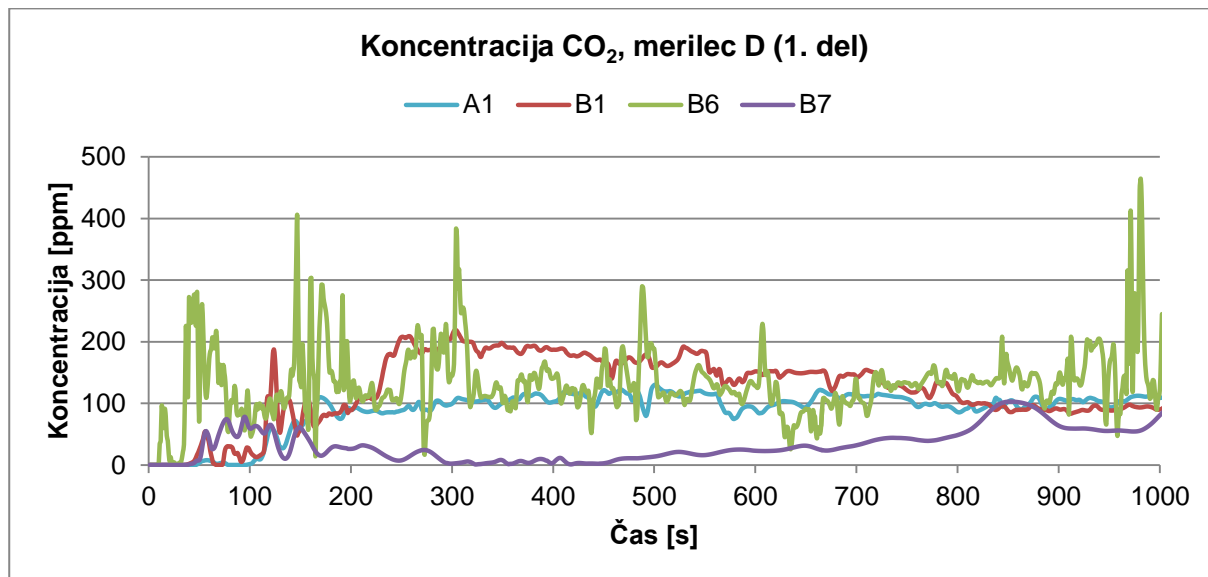
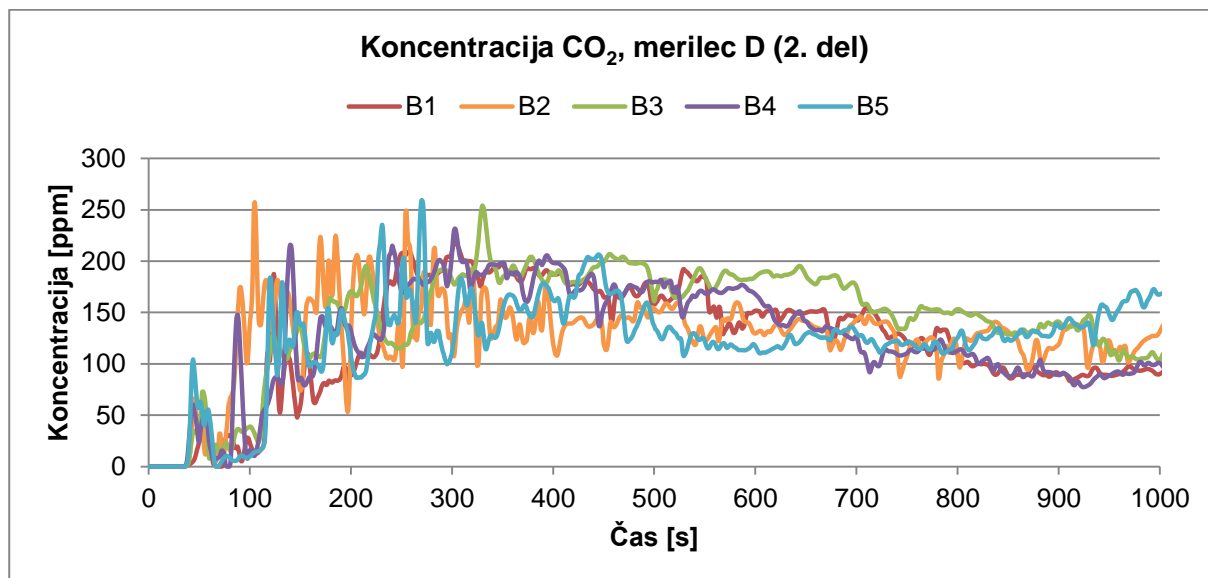
9.3.2 Merilec D (stol za sejno mizo v pisarni)

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Na merilnem mestu D, na stolu pri oknu, je ogljikov dioksid najprej zaznan v varianti B6, in sicer že v $t = 1$ s. V drugih variantah B je plin zaznan v času $t = 7$ s, v varianti A1 pa v $t = 9$ s. V varianti B6 je koncentracija dokaj konstantna, z izjemo nekaj vmesnih skokov, ki so posledica vpliva vetra oziroma večjega mešanja zračnih in plinskih tokov. Maksimalna izmerjena koncentracija je 465 ppm, povprečna pa 133 ppm. Dokaj konstantna koncentracija je tudi v varianti A1. Za razliko od B6 je povprečna vrednost nekoliko manjša, kot posledica gorenja nelakiranega lesa (slika 22). S slike 63 je razvidno, da v varianti B1 koncentracija tja do $t = 300$ s narašča, kar je posledica kratkotrajnega kopičenja plinskega oblaka ob vstopu skozi okno. Pozneje se plin razporedi in na koncu simulacije je izmerjena približno enaka koncentracija kot v varianti A1. V varianti B7 je spet opaziti začetno naraščanje koncentracije CO₂, ki je posledica burnega začetnega razvoja požara, nato pa se koncentracija zaradi gašenja požara zmanjša. Približno v $t = 400$ s začne koncentracija spet naraščati zaradi vpihovanja CO₂ v lakirnico oziroma zato, ker del vpihanega plina iz lakirnice pripotuje v pisarno.

S slike 64 je prav tako razvidno, da so dobljene koncentracije ogljikovega dioksida v variantah B1, B3 in B4 praktično enake. Pri varianti B3 je opaziti le nekoliko večje vrednosti proti koncu simulacije, kar je posledica dejstva, da se zaradi zaprtih vrat med pisarno in

dnevno sobo plin ne more prerazporediti v stanovanjski del in ga zato več ostane v pisarni. Pri variantah B2 in B5 je spet opazna bolj konstantna linija, razlog pa je isti kot pri merilni napravi C. Pri varianti B5 je od približno $t = 800$ s dalje mogoče opaziti naraščanje koncentracije plina. Do naraščanja pride zaradi zaprtega stopnišča med spodnjim in zgornjim stanovanjem oziroma zato, ker se plin zaradi zaprtega stopnišča vrača nazaj v pisarno. Omenjeni pojav sem podrobneje opisala pri analizi variante B5.

Slika 63: koncentracija CO₂, merilec D (1. del)Slika 64: koncentracija CO₂, merilec D (2. del)

Z vidika merilca D je najbolj neugodna varianta B6, saj je v tej varianti CO₂ zaznan najbolj zgodaj, poleg tega pa je, v primerjavi z drugimi variantami, v B6 izmerjena njegova največja koncentracija. Predvidevamo lahko, da je v tej varianti prisotnih tudi največ morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka (npr. dušikovih spojin) in da so, v primerjavi z drugimi variantami, prisotne najbolj zgodaj. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B7, saj ima najmanjšo maksimalno in povprečno vrednost. Maksimalna

koncentracija CO₂ v B7 je 2-krat manjša kot maksimalna koncentracija v B1 in več kot 4-krat manjša od maksimalne koncentracije v B6.

9.3.3 Pisarna – povzetek

Z vidika celotne pisarne je nedvomno najbolj neugodna varianta B6, saj je v tej varianti CO₂ v povprečju zaznan 11 s prej kot v drugih variantah, maksimalna izmerjena koncentracija pa je skoraj 2-krat večja kot v preostalih variantah. Bolj je neugodna pozicija merilca C, saj je ta nameščen v kotu prostora in se tam produkti gorenja zadržujejo v večji meri. Merilec D je na bolj pretočnem mestu, produkti gorenja njegovo lokacijo prečkajo, vendar se tam ne zadržujejo, zato so tudi izmerjene koncentracije v povprečju manjše. V splošnem se je varianta A1, to je varianta brez lakiranega lesa, izkazala za veliko bolj ugodno kot vse druge lakirane variante, razen B7 (gašenje). Varianta z gašenjem se je izkazala za najugodnejšo, saj omogoča varno evakuacijo in majhne vrednosti koncentracije CO₂. Poleg tega predvidevamo, da v tej varianti skoraj ni prisotnih strupenih produktov gorenja (npr. dušikovih spojin), saj je bilo gorenje poliuretanskega laka prekinjeno prej kot v 30 s.

9.4 Spodnje stanovanje

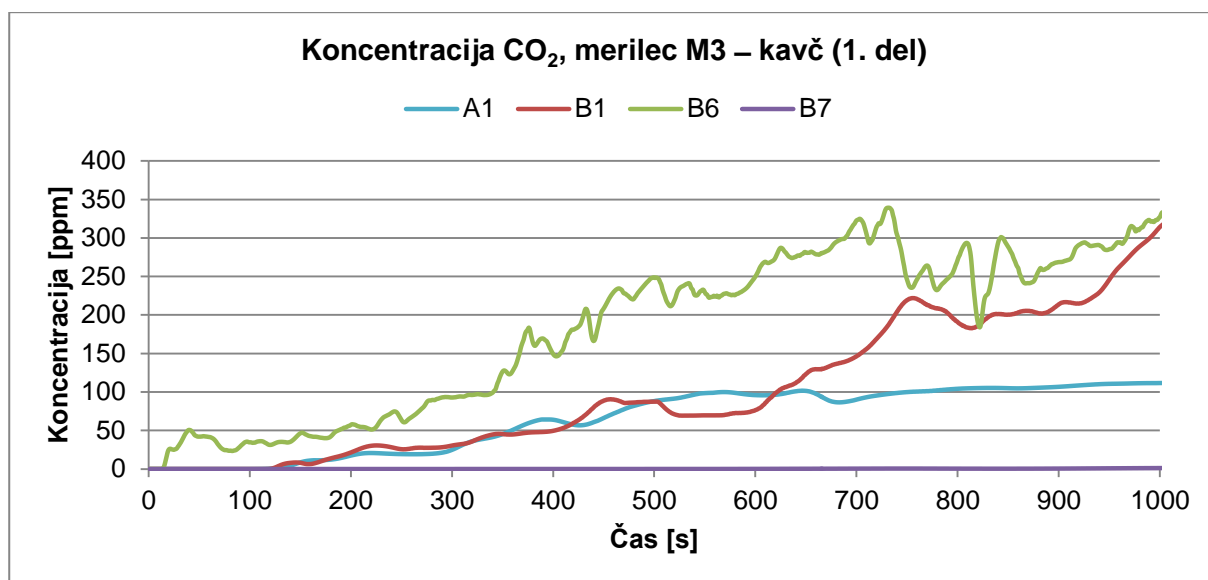
9.4.1 Merilec M3 – kavč

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

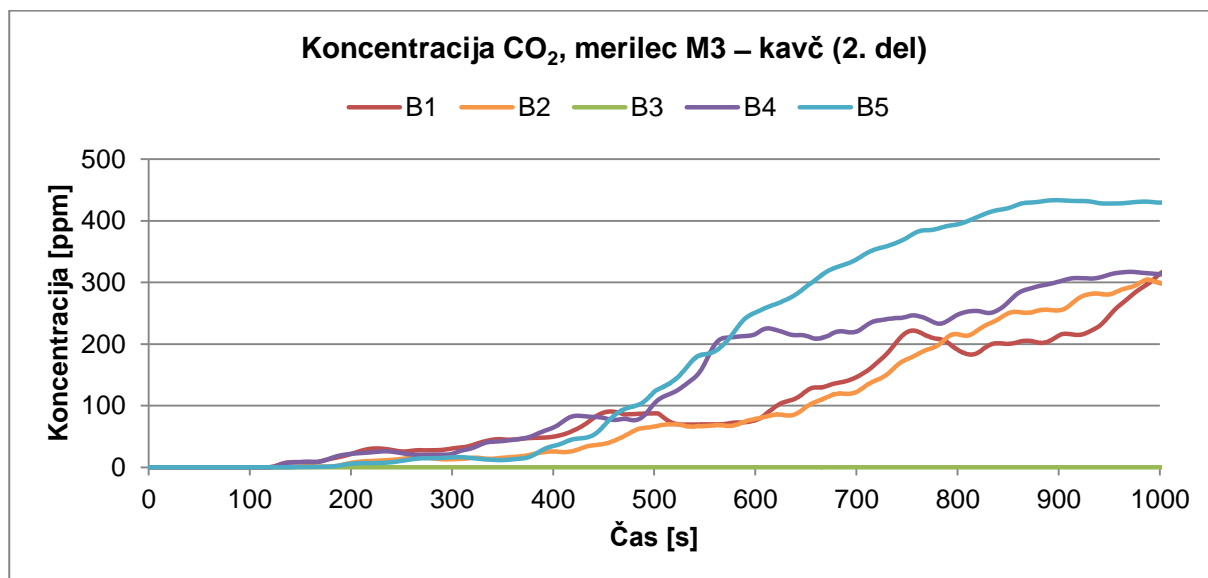
Na merilnem mestu M3 – kavč je ogljikov dioksid najprej zaznan v varianti B6, in sicer v t = 2 s. V času t = 22 s je CO₂ zaznan v B5, v t = 29 s v variantah B1 in B4, v t = 34 s v varianti B2, v t = 36 s v A1, v t = 40 s v B7 in v t = 319 s v varianti B3. Na sliki 65 je opaziti precej neenakomerno linijo pri varianti B6, ki je posledica vpliva vetra oziroma večjega mešanja plinskih in zračnih tokov. V varianti B1 koncentracija plina narašča podobno kot v B6, le da je linija enakomernejša. Opaziti je samo dva večja skoka pri t = 450 s in t = 750 s, ki sta posledica prehajanja plina v spalnice in preko stopnišča v zgornje stanovanje. Ko oblak plina vstopi v spalnico oziroma preko stopnišča v zgornje stanovanje, na mestu merilne naprave nastane primanjkljaj in posledično so v tistem trenutku izmerjene vrednosti manjše. Isti pojav je opazen tudi pri varianti A1, vendar sta skoka precej manjša, saj je pri tej varianti naraščanje koncentracije ogljikovega dioksida veliko počasnejše. Koncentracija CO₂, ki zaradi gašenja s tem plinom v varianti B7 pripotuje na merilno mesto M3 – kavč, je v primerjavi z drugimi variantami zelo majhna. V B7 je maksimalna koncentracija CO₂ izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša 1 ppm.

S slike 66 je razvidno, da je koncentracija ogljikovega dioksida v B3 v primerjavi z drugimi variantami zelo majhna. Zaradi zaprtih ločevalnih vrat med industrijskim in stanovanjskim delom ves plin na to merilno mesto prispe preko stopnic iz zgornjega stanovanja. To pojasni tudi, zakaj merilec M3 – kavč najpozneje zazna plin prav v tej varianti. Maksimalna koncentracija CO₂ je izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša $2,7 \times 10^{-14}$ ppm. V varianti B2 je naraščanje koncentracije zelo podobno kot v B1, le da je linija enakomernejša, saj zaradi zaprtih oken v zgornjem stanovanju ne doteka plin od zgoraj. Pri variantah B4 in B5 je naraščanje koncentracije med t = 500 s in približno t = 560 s hitrejše kot v B1. To hitrejše naraščanje je posledica manjšega volumna, po katerem se plin lahko širi. Obema variantama je namreč skupno, da so vrata v spalnice, kabinet, kuhinjo in kopalnico zaprta, zato se plin ne prerazporedi v te prostore, temveč ga več ostane na lokaciji merilne naprave M3 – kavč. Približno od t = 560 s dalje koncentracija v B5 narašča bolj strmo kot v B4, kar je

posledica zaprtega stopnišča med zgornjim in spodnjim stanovanjem. Posledično ves plin ostane v spodnjem stanovanju. Opaziti je tudi, da od približno $t = 850$ s dalje koncentracija v tej varianti ne narašča več, temveč so vrednosti konstantne. Do tega pojava pride, ker se hodnik in nato tudi dnevna soba po celotni višini napolnita z maksimalno koncentracijo CO_2 , to je s koncentracijo, ki je enaka koncentraciji plina, ki doteka v hodnik spodnjega stanovanja. Ta pojav je podrobneje opisan v analizi variante B5 in predstavljen v preglednici 16.



Slika 65: koncentracija CO_2 , merilec M3 – kavč (1. del)



Slika 66: koncentracija CO_2 , merilec M3 – kavč (2. del)

Z vidika merilne naprave M3 – kavč je najbolj neugodna varianta B5, saj je v primerjavi z drugimi variantami maksimalna izmerjena koncentracija CO_2 daleč največja. V tej varianti dobimo maksimalne vrednosti za to merilno mesto pri tem tipu požara. Večje vrednosti bi lahko dobili samo, če bi imeli večji požar, ki bi proizvajal še večje količine ogljikovega dioksida. Predvidevamo lahko, da bi bila na merilnem mestu M3 – kavč največja

koncentracija morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka (npr. dušikovih spojin) prisotna prav v tej varianti. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B3, to je varianta z zaprtimi vrati med stanovanjskim in industrijskim delom. Maksimalna izmerjena koncentracija CO₂ v varianti B3 je kar 1,6 x 10¹⁶-krat manjša od maksimalne koncentracije v varianti B5. Predvidevamo lahko tudi, da bi bilo na lokaciji M3 – kavč najmanj strupenih produktov gorenja, ki lahko nastanejo pri gorenju poliuretanskega laka, prisotnih prav v varianti B3. Pri tej varianti se je jasno pokazal izreden pomen ločevalnih vrat.

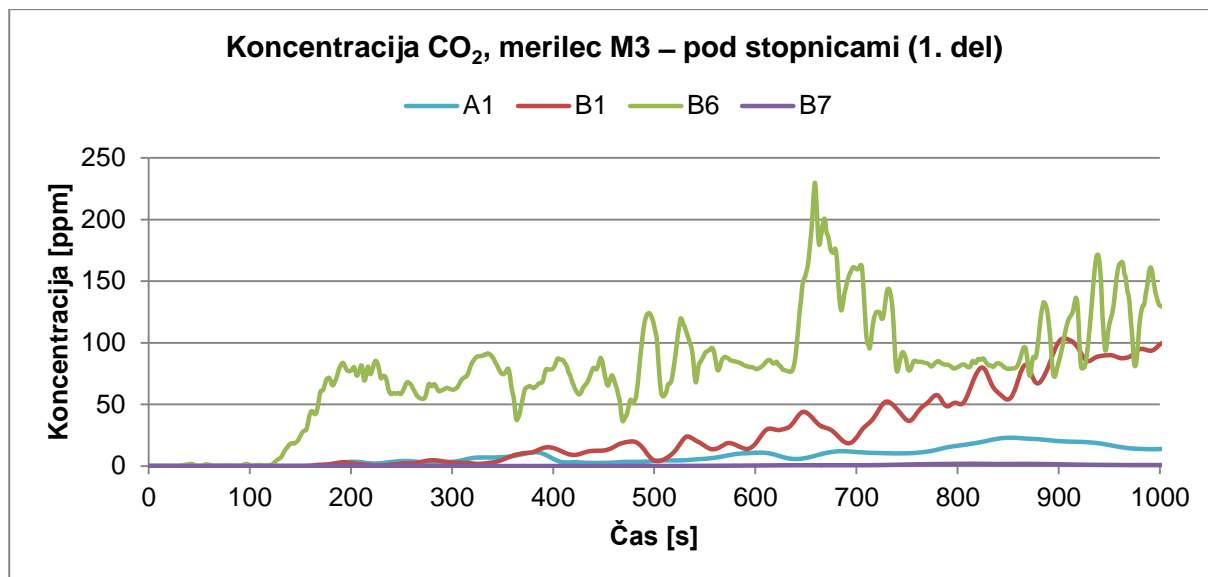
9.4.2 Merilec M3 – pod stopnicami

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

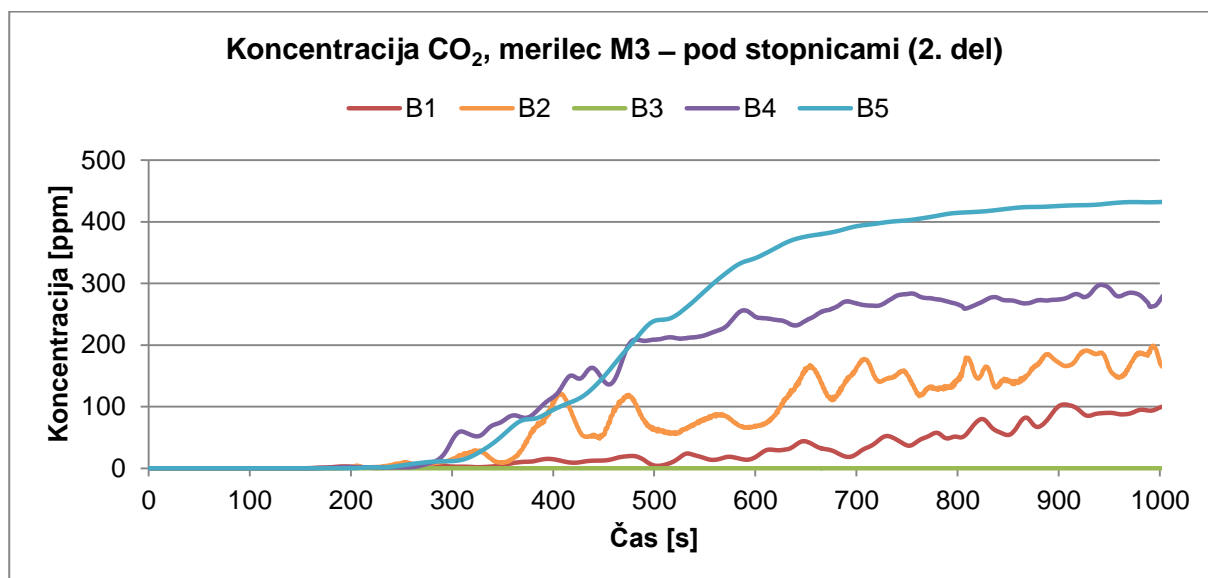
Na merilnem mestu M3 – pod stopnicami je ogljikov dioksid najprej zaznan v varianti B6, in sicer v t = 4 s. V t = 67 s je CO₂ zaznan v varianti B4, v t = 68 s v varianti B1, v t = 72 s v varianti A1, v t = 90 s v varianti B3, v t = 109 s v B5, v t = 111 s v B2 in v t = 113 s še v varianti B7. Očitno je, da na to merilno mesto plin prej pripotuje preko stopnišča iz zgornjega stanovanja kot pa preko pisarne in dnevne sobe spodnjega stanovanja. Na sliki 67 je vidno, da koncentracija ogljikovega dioksida v B6 na začetku hitro naraste, za tem pa je trend naraščanja zelo počasen. Opaziti je velika nihanja v izmerjenih vrednostih, ki so posledica vpliva vetra. Za razliko od B6 je naraščanje koncentracije v varianti B1 bolj konstantno. Proti koncu simulacije je v obeh variantah izmerjena približno enaka koncentracija plina. V varianti A1 je razvoj požara veliko počasnejši in manj buren, zato je tudi izmerjena koncentracija CO₂ na tem merilnem mestu v primerjavi z varianto B1 veliko manjša. V varianti B7 do večjega naraščanja pride okoli t = 500 s, vendar so izmerjene vrednosti v primerjavi z drugimi variantami zelo majhne. To naraščanje je posledica gašenja v lakirnici s CO₂ oziroma dejstva, da del vpihanega CO₂ iz lakirnice preko pisarne in dnevne sobe pripotuje na hodnik. Pri vseh variantah je dobljena linija precej nazobčana. Na spodnji sliki (slika 67) tega ni videti pri A1 in B7, zaradi veliko manjših vrednosti oziroma razreda velikosti, v primerjavi z B1 in B6. Linija je nazobčana zaradi neenakomernega prehajanja plina preko stopnišča v zgornje stanovanje.

V varianti B3 je na merilnem mestu M3 – pod stopnicami opaziti najmanjšo koncentracijo ogljikovega dioksida, kar je posledica dejstva, da lahko plin do te lokacije pride le preko stopnišča oziroma iz zgornjega stanovanja. Maksimalna izmerjena koncentracija znaša 5,0 x 10⁻³ ppm in je precej manjša od tiste v varianti B1. S slike 68 je razvidno, da je v varianti B2 izmerjena večja koncentracija plina kot v varianti B1. Ker so v B2 zaprta vsa okna v zgornjem stanovanju oziroma ne doteka plin iz zgornjega stanovanja, bi pričakovali manjše izmerjene vrednosti kot v B1. Do tega pojava pride, ker se v varianti B2 plin dalj časa zadržuje pod stropom stopnišča in počasneje prehaja v zgornje stanovanje. Merilec M3 – pod stopnicami je nameščen ravno na lokaciji, kjer se plin zadržuje. Pričakovano je največja koncentracija CO₂ izmerjena v varianti B5, to je varianti z zaprtim stopniščem. Maksimalna koncentracija v tej varianti je izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša 432 ppm. Tudi na tem merilnem mestu je opaziti, da je v varianti B5 proti koncu simulacije dosežena največja možna koncentracija plina. Pojav je podrobneje opisan v analizi variante B5 in primerjavi variant na merilnem mestu M3 – kavč. Do približno t = 470 s je v varianti B4 izmerjena koncentracija približno enaka kot v B5, nato pa v B4 vrednosti naraščajo počasneje, saj se precejšen delež plina preko stopnišča transportira v zgornje stanovanje, medtem ko se v B5 zaradi zaprtega stopnišča ne more. Pri variantah B1, B2, B3 in B4 linija izmerjenih vrednosti niha. Kot že omenjeno, do nihanja pride zaradi neenakomernega prehajanja plina preko

stopnišča v zgornje stanovanje. Da je to res tako, dokazuje varianta B5, to je varianta z zaprtim stopniščem, pri kateri do nihanja ne pride.



Slika 67: koncentracija CO₂, merilec M3 – pod stopnicami (1. del)



Slika 68: koncentracija CO₂, merilec M3 – pod stopnicami (2. del)

Z vidika merilne naprave M3 – pod stopnicami je najbolj neugodna varianta B5, saj je v tej varianti izmerjena največja možna koncentracija CO₂. Kot že omenjeno, bi večjo koncentracijo lahko izmerili le pri večjem, močnejšem požaru. Enako ugotovitev lahko predpostavimo tudi za strupene produkte gorenja, ki lahko nastanejo pri gorenju poliuretanskega laka. Z vidika tega merilnega mesta je za zgodnjo evakuacijo najugodnejša varianta B7, saj v tej varianti plin do merilnega mesta prispe najpozneje. V splošnem pa so najmanjše vrednosti izmerjene v varianti B3, to je varianti z zaprtimi ločevalnimi vrati med industrijskim in stanovanjskim delom. Maksimalna izmerjena koncentracija CO₂ je v B3 87.000-krat manjša kot tista v B5. Predvidevamo lahko, da bi bila z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka najugodnejša varianta B7, to je varianta z

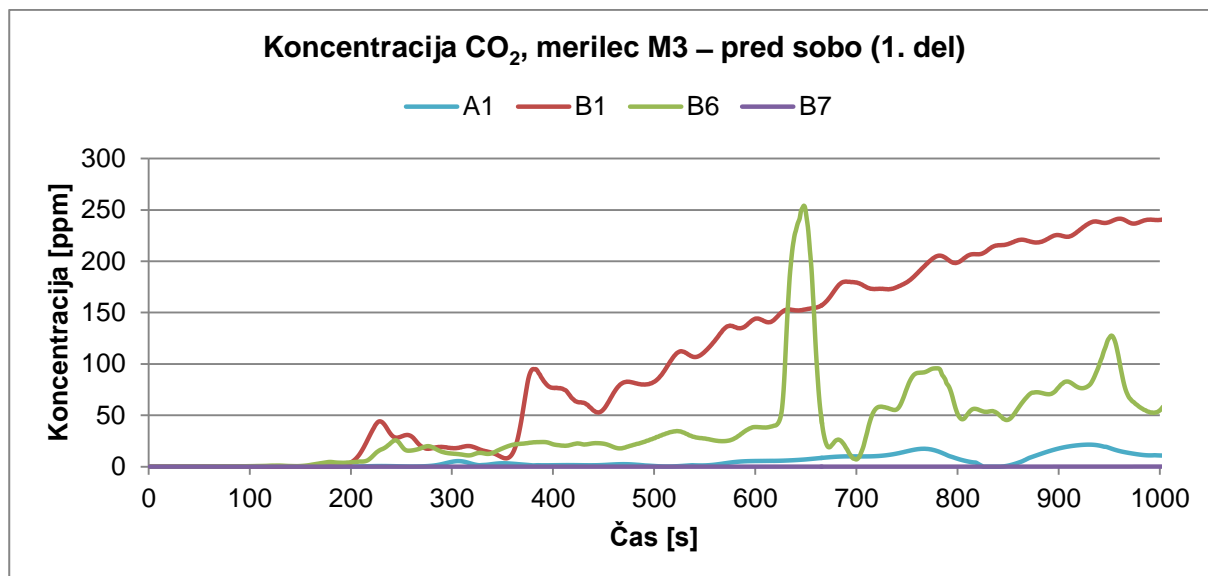
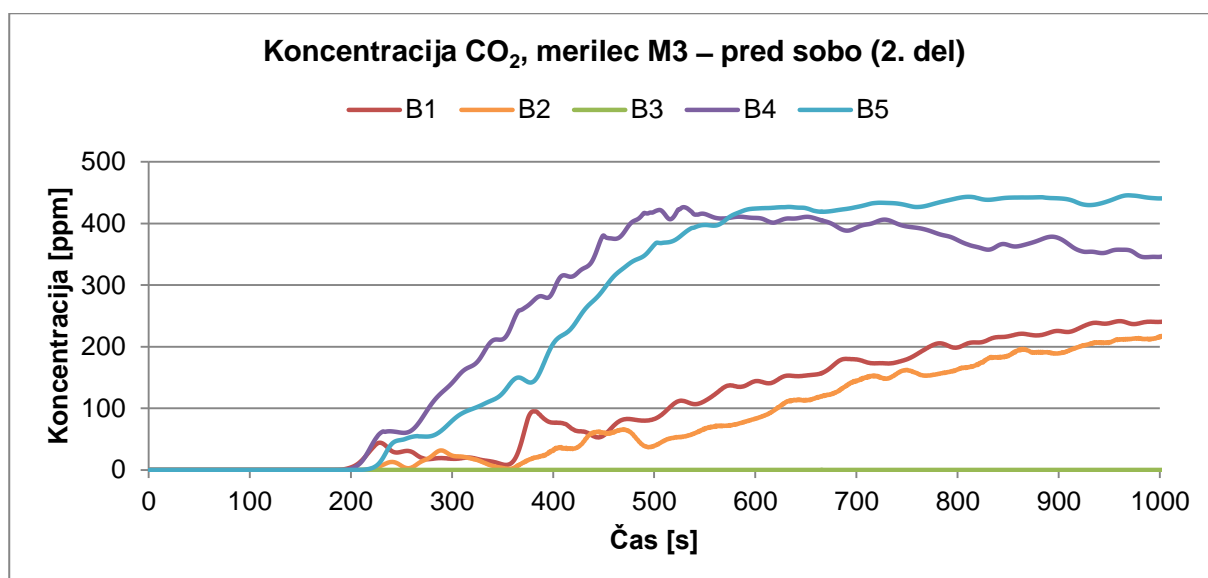
gašenjem. Pri tej varianti je gorenje poliuretanskega laka onemogočeno, zato se tudi ne bi proizvajali strupeni produkti, kot na primer dušikove spojine.

9.4.3 Merilec M3 – pred sobo

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Na merilnem mestu M3 – pred sobo je ogljikov dioksid najprej zaznan v varianti B6, in sicer v t = 8 s. V t = 88 s je plin zaznan v variantah A1 in B1, v t = 90 s v varianti B4, v t = 123 s v varianti B5, v t = 125 s v varianti B2, v t = 269 s v B7 in v t = 304 s nazadnje še v B3. Na sliki 69 je opaziti, da so v splošnem pri varianti B6 izmerjene manjše vrednosti kot pri varianti B1, z izjemo maksimuma pri t = 645 s, ki je posledica sunka vetra. Razlog za manjše izmerjene vrednosti koncentracije CO₂ je prav vpliv vetra, saj ta razpiha plin iz lokacije merilca, medtem ko se v drugih variantah, kjer vpliva vetra ni, plin nemoteno zbira. Lokacija merilca M3 – pred sobo je v primerjavi z lokacijo merilca M3 – pod stopnicami na zelo nepretočnem mestu. V varianti B6 vpliv vetra poskrbi za pretočnost na tej lokaciji in zato so izmerjene vrednosti v splošnem manjše kot v B1. Meritve v varianti A1, to je v varianti z nelakiranim lesom, so neprimerno manjše od tistih v B1, kjer je les lakiran s poliuretanskim lakom (slika 28). Maksimalna koncentracija v varianti A1 je kar 11-krat manjša od tiste v varianti B1. Zaradi gašenja požara v lakirnici na lokacijo merilca M3 – pred sobo prispe skoraj neznatna količina ogljikovega dioksida. Njegova količina začne hitreje naraščati šele po 800 s od začetka požara, kot posledica načina gašenja (vpihavanje CO₂ v lakirnico), vendar je koncentracija v primerjavi z drugimi variantami zanemarljiva. Maksimalna koncentracija je v tej varianti izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša $8,1 \times 10^{-2}$ ppm.

Kot je razvidno s slike 70, je v varianti B3, to je varianti z zaprtimi ločevalnimi vrati med industrijskim in stanovanjskim delom, koncentracija plina v primerjavi s preostalimi variantami skoraj zanemarljiva. Do malo večjega naraščanja pri tej varianti pride šele okoli 900 s od začetka požara, maksimalna koncentracija pa je izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša $8,4 \times 10^{-17}$ ppm. Pričakovano je koncentracija v varianti B2 skoraj enaka oziroma malo manjša od koncentracije v B1. Zanimivo je, da imata varianti B4 in B5 izmerjeno skoraj enako maksimalno koncentracijo (približno 440 ppm), do približno t = 500 s pa imata tudi zelo podoben trend naraščanja. V B4 začne nato koncentracija padati, ker se plin preusmeri po stopnicah navzgor v zgornje stanovanje, medtem ko se v B5 zaradi zaprtega stopnišča ne more. Tudi na tej lokaciji merilca je v B5 dosežena maksimalna možna koncentracija plina. Kot sem že omenila, se hodnik po celotni višini napolni z maksimalno možno koncentracijo CO₂. Večjo vrednost bi na hodniku lahko izmerili le v primeru močnejšega požara oziroma požara, ki bi proizvedel večjo količino ogljikovega dioksida.

Slika 69: koncentracija CO₂, merilec M3 – pred sobo (1. del)Slika 70: koncentracija CO₂, merilec M3 – pred sobo (2. del)

Z vidika merilnega mesta M3 – pred sobo je najbolj neugodna varianta B5, saj je pri tej varianti izmerjena največja koncentracija CO₂. Poleg tega je pri tej varianti takšna koncentracija plina izmerjena že kmalu po 500 s od začetka požara in se obdrži vse do konca simulacije. Ta varianta je neugodna tudi z vidika spalnic in kabineta v spodnjem stanovanju. Ker so vrata v omenjene prostore zaprta, bi bila oseba, ki bi iz katerega od teh prostorov vstopila na hodnik, v primerjavi z drugimi variantami izpostavljena največji koncentraciji CO₂. Predvidevamo lahko, da je v tej varianti največja tudi koncentracija preostalih strupenih produktov gorenja, ki bi lahko nastali pri gorenju poliuretanskega laka. Za precej ugodno varianto se je izkazala B3, kjer je maksimalna izmerjena koncentracija CO₂ kar $5,3 \times 10^{18}$ -krat manjša od tiste v B5. Z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka je najugodnejša varianta B7, saj je pri tej varianti gorenje laka ustavljeno in zato lahko predvidevamo, da je koncentracija morebitnih strupenih produktov skoraj neznatna.

9.4.4 Spodnje stanovanje – povzetek

Z vidika spodnjega stanovanja je najbolj neugodna varianta B5, saj je maksimalna koncentracija CO₂ v povprečju več kot 2-krat večja kot v drugih variantah. Ta varianta je neugodna, ker se zaradi zaprtega stopnišča produkti gorenja kopičijo v spodnjem stanovanju. Produkti gorenja po določenem času po celotni višini napolnijo vse prostore, v katere so odprta vrata. Ker so vrata v spalnice, kabinet, kuhinjo in kopalnico zaprta, se ta pojav najprej zgodi v hodniku, nato pa še v dnevni sobi. Posebej neugoden primer bi bil, če bi prebivalec spodnjega stanovanja spal v spalnici in bi relativno pozno zaznal, kaj se dogaja zunaj. Ko bi oseba iz spalnice vstopila na hodnik, bi bila v tej varianti tam v trenutku izpostavljena dokaj velikim koncentracijam produktov gorenja. Ta varianta je neugodna tudi z vidika reševalnih ekip. Te bi v objekt oziroma spodnje stanovanje najverjetneje vstopile po desetih ali celo petnajstih minutah od nastanka požara, ko je koncentracija že velika. Iste oziroma podobne ugotovitve lahko predvidevamo tudi za strupene produkte, ki bi lahko nastali pri gorenju poliuretanskega laka. Za zelo ugodno varianto se je izkazala B3, kjer je koncentracija CO₂ v povprečju 8,0 x 10¹⁷-krat manjša kot v drugih variantah. Predvidevamo lahko, da je veliko manjša tudi koncentracija morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka. V tej varianti se je pokazal izreden pomen ločevalnih vrat med industrijskim in stanovanjskim delom objekta. Zaradi zaprtih vrat produkti gorenja do spodnjega stanovanja pridejo z velikim zamikom, pa tudi njihova koncentracija je neprimerno manjša. Omenjena vrata bi bilo torej smiselno izvesti v skladu s predpisi. Poleg tega bi bilo obvezno namestiti sistem za samodejno zapiranje vrat.

9.5 Zgornje stanovanje

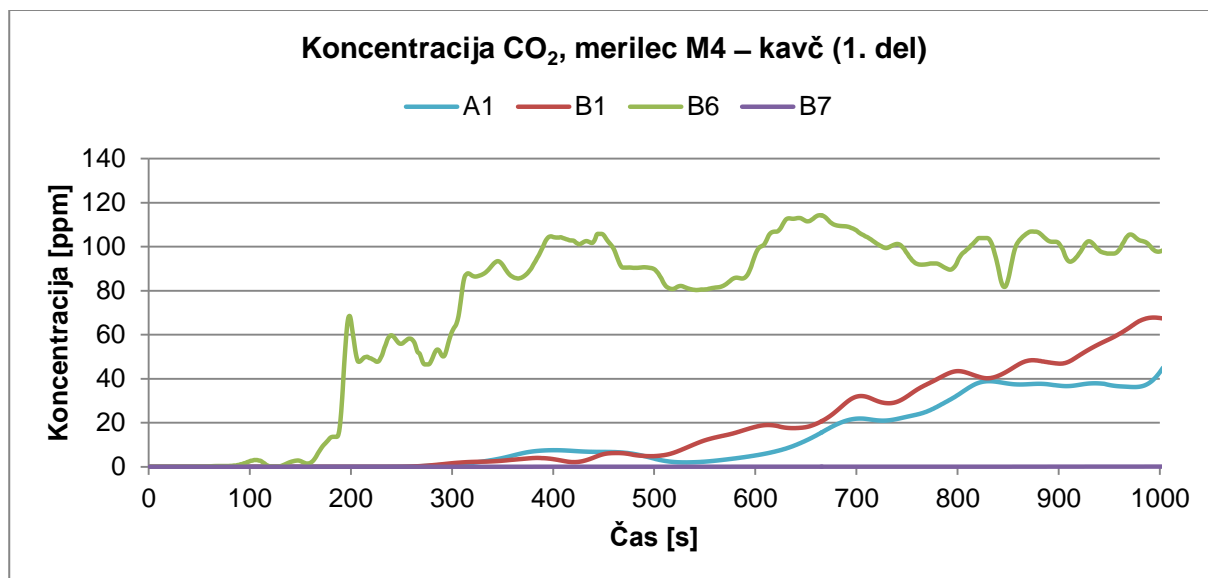
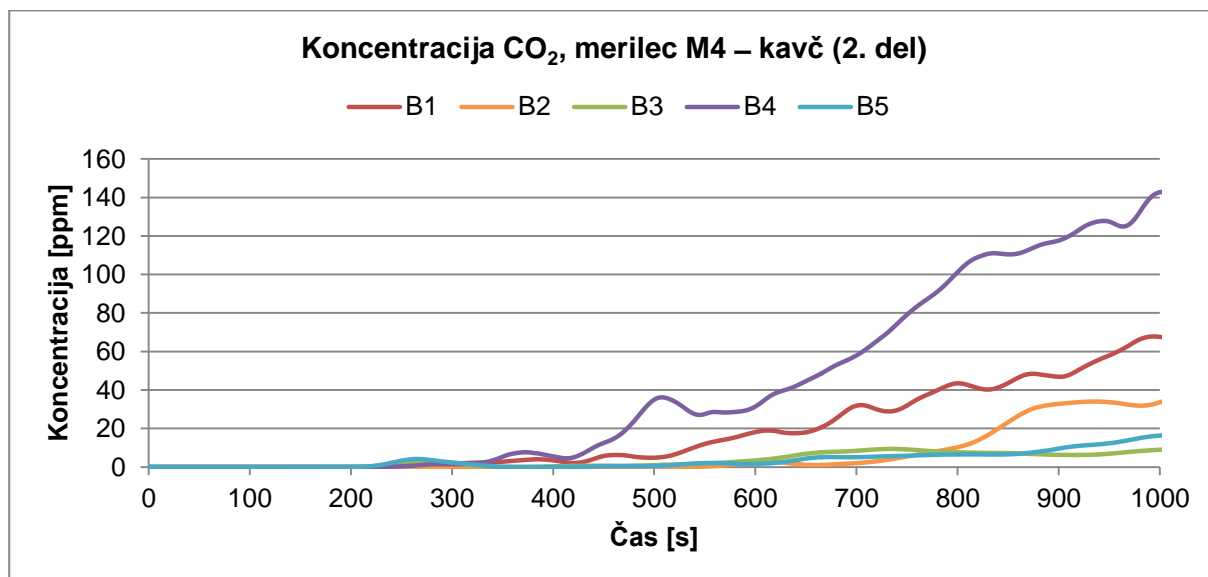
9.5.1 Merilec M4 – kavč

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Na merilnem mestu M4 – kavč je ogljikov dioksid najprej zaznan v varianti B6, in sicer v t = 3 s. V t = 11 s je plin zaznan v variantah B1, B3, B4 in B5. Sekundo pozneje, v t = 12 s, je CO₂ zaznan v varianti B7, nato v t = 14 s v varianti A1 in nazadnje v t = 189 s še v B2. V varianti B6, to je varianti z vplivom vetra, je spet opaziti neprimerno večjo koncentracijo plina in tudi hitrejše naraščanje. Kot je razvidno s slike 71, izmerjene vrednosti nihajo. Do tega pride zaradi gibanja zračnih in plinskih tokov, kot posledica vpliva vetra. Maksimalna koncentracija je izmerjena v t = 661 s in znaša 114 ppm. Koncentracija ogljikovega dioksida v varianti B1 narašča enakomerneje in dosega manjše vrednosti. Maksimalna izmerjena koncentracija, ki je v tej varianti izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša 68 ppm, je v B6 dosežena že v t = 198 s. Koncentracija plina v A1 je malenkost manjša kot v B1. V povprečju so izmerjene vrednosti v A1 približno 1,5-krat manjše kot v B1, kar je posledica gorenja nelakiranega lesa v A1 (slika 22) in lakiranega v B1 (slika 28). V primerjavi s preostalimi variantami je koncentracija plina v varianti z gašenjem (B7) skoraj zanemarljiva. Maksimalna koncentracija CO₂ je izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša 6,6 x 10⁻² ppm.

S slike 72 je razvidno, da so večje koncentracije kot v B1 izmerjene samo v varianti B4. Pri tej varianti so zaprta vrata v določene prostore spodnjega stanovanja, tako da ima plin manjši volumen, po katerem se lahko prerazporedi, in posledično ga več pripotuje po stopnicah v zgornje stanovanje. V povprečju je koncentracija več kot 2-krat večja kot v B1. Maksimalna koncentracija CO₂ v B4 znaša 143 ppm in je izmerjena povsem na koncu simulacije. V variantah B2, B3 in B5 je koncentracija manjša kot v B1. Varianti, pri katerih ne

doteka plin iz spodnjega stanovanja, to je B3 in B5, imata najmanjše izmerjene koncentracije. V povprečju so vrednosti 5-krat manjše kot v B1, kar pomeni, da večji del plina, ki je prisoten v zgornjem stanovanju, tja prispe iz spodnjega stanovanja in ne skozi okna zgornjega stanovanja. To trditev potrjujejo tudi meritve iz variante B2. Pri tej varianti so okna v zgornjem stanovanju zaprta, tako da je edini dotok plina iz spodnjega stanovanja. Plin sicer v zgornje stanovanje pripotuje najpozneje od vseh variant, vendar so vrednosti v povprečju skoraj 2-krat večje kot v variantah, kjer dovoda iz spodnjega stanovanja ni (B3 in B5).

Slika 71: koncentracija CO₂, merilec M4 – kavč (1. del)Slika 72: koncentracija CO₂, merilec M4 – kavč (2. del)

Z vidika merilnega mesta M4 – kavč je neugodna varianta B4. V tej varianti sta združena največji možen dotok plina iz spodnjega stanovanja in dotok skozi okna zgornjega stanovanja, zato je maksimalna izmerjena koncentracija, v primerjavi z drugimi variantami, največja. Neugodna je tudi varianta B6, saj zaradi vetra produkti gorenja na to merilno mesto

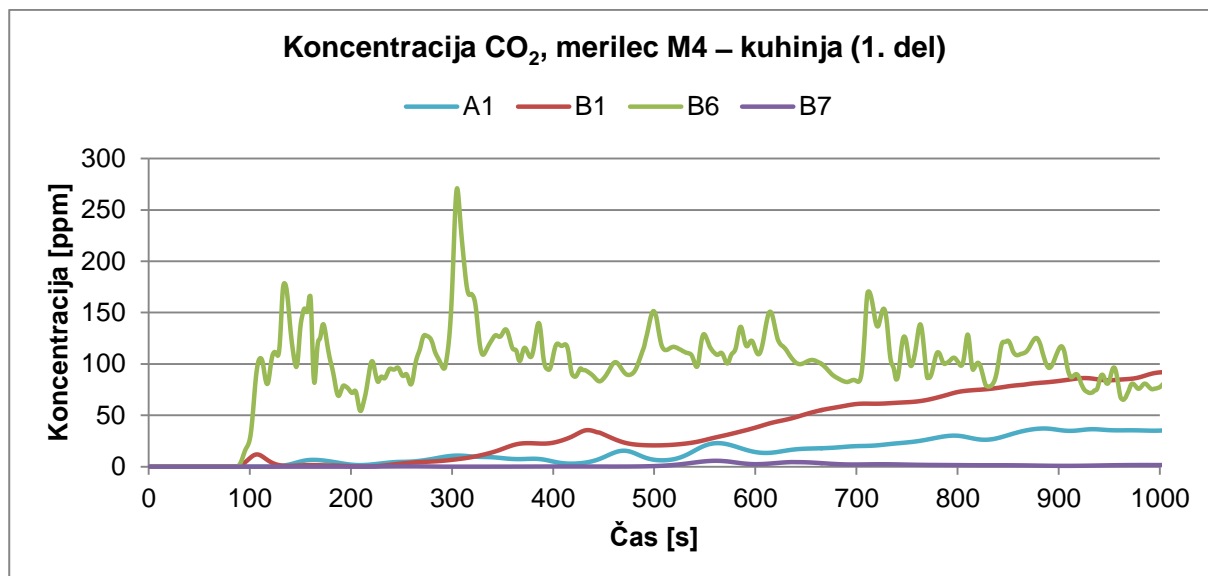
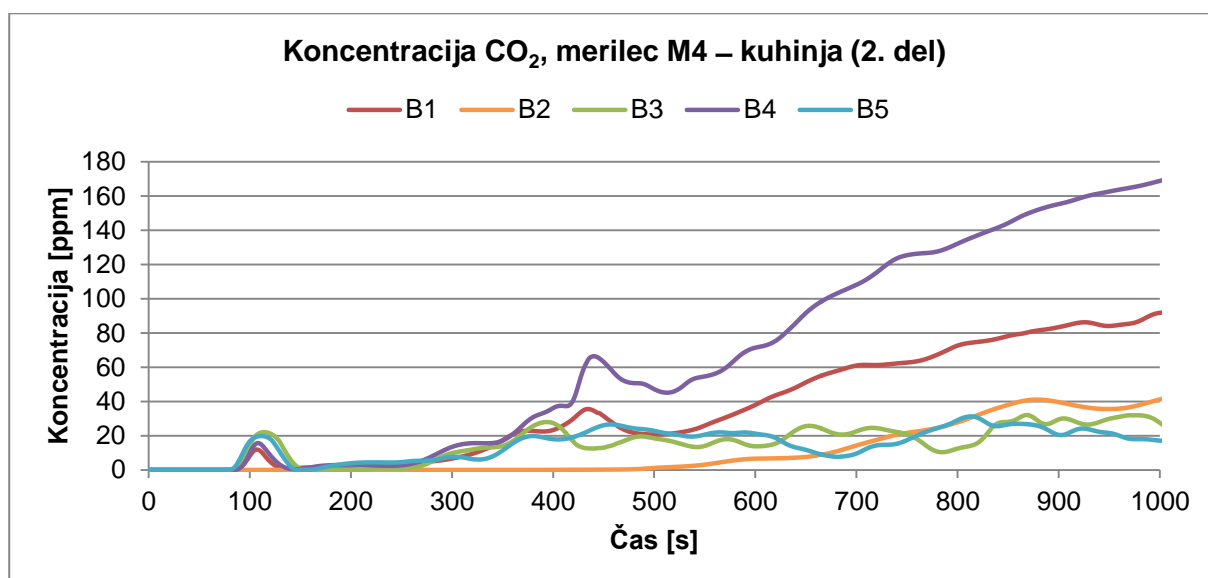
prispejo veliko hitreje. Kljub temu, da pri tej varianti ni izmerjena večja koncentracija CO₂ kot v B4, pa je povprečna izmerjena vrednost med celotno simulacijo skoraj 2-krat večja. Predvidevamo lahko, da bi bili ti dve varianti najbolj neugodni tudi z vidika strupenih produktov gorenja, ki lahko nastanejo pri gorenju poliuretanskega laka. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B7. Pri tej varianti na to merilno mesto prispe najmanjša koncentracija CO₂, poleg tega pa predvidevamo, da je zaradi preprečenega gorenja poliuretanskega laka morebitna prisotnost drugih strupenih produktov gorenja neznatna.

9.5.2 Merilec M4 – kuhinja

V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Na merilnem mestu M4 – kuhinja je ogljikov dioksid najprej zaznan v varianti B6 in sicer že v $t = 3$ s. Malo pozneje, v $t = 18$ s, je plin zaznan v varianti B4, v $t = 21$ s v varianti B3, v $t = 24$ s v variantah B1 in B5, v $t = 28$ s v B7, v $t = 33$ s v A1 in nazadnje v $t = 175$ s še v B2. S slike 73 je razvidno, da v varianti B6 koncentracija hitro naraste in da ima relativno velike izmerjene vrednosti. Od $t = 100$ s dalje znaša povprečna koncentracija kar 108 ppm, maksimalna izmerjena pa je 271 ppm. V varianti B1 koncentracija naraste počasneje in enakomerneje, ob koncu simulacije pa je dosežena približno enaka vrednost kot v B6. Dejstvo, da v varianti A1 v lakirnici ni lakiranega lesa, se pozna tudi na tem merilnem mestu, saj je povprečna izmerjena koncentracija CO₂ v varianti A1 kar 2,4-krat manjša kot v B1. V varianti B7 je na tem merilnem mestu izmerjena zelo majhna koncentracija plina. Ogljikov dioksid, ki prispe na to lokacijo, ni toliko posledica gorenja, temveč predvsem posledica gašenja s CO₂. Maksimalna koncentracija znaša 6 ppm in je izmerjena v $t = 558$ s.

S slike 74 je razvidno, da koncentracija CO₂ v prvih 400 s pri vseh prikazanih variantah narašča približno enako. Tudi na tem merilnem mestu v zgornjem stanovanju je v varianti B4 izmerjena večja koncentracija kot v B1. V povprečju so izmerjene vrednosti v B4 malo manj kot 2-krat večje kot v B1. Maksimalna izmerjena koncentracija znaša 169 ppm. Kot sem že omenila, v tej varianti zaradi zaprtih vrat v spodnjem stanovanju v zgornje stanovanje pripotuje večja koncentracija plina. Pri obeh variantah, kjer ne doteka plin iz spodnjega stanovanja, to je v B3 in B5, so izmerjene koncentracije CO₂ zelo podobne. V splošnem so izmerjene koncentracije v teh dveh variantah 2,4-krat manjše kot v varianti B1. Tudi na tem merilnem mestu se je pokazalo, da večji del plina pripotuje iz spodnjega stanovanja in ne skozi okna zgornjega stanovanja. V varianti B2 pride do naraščanja koncentracije veliko pozneje, vendar je koncentracija, izmerjena na koncu, večja kot v obeh variantah, kjer dotoka iz spodnjega stanovanja ni. Na sliki 74 je opaziti skok vrednosti pri približno $t = 100$ s. Ta skok je posledica začetnega oblaka plina, ki skozi okno vstopi v zgornje stanovanje. Pojav je bil podrobneje opisan v analizi posameznih variant in prikazan na sliki 39. Da je skok res posledica plina, ki vstopi skozi okno, dokazuje tudi dejstvo, da tega skoka ni v varianti B2, to je v varianti z zaprtimi okni in balkonskimi vrati.

Slika 73: koncentracija CO₂, merilec M4 – kuhinja (1. del)Slika 74: koncentracija CO₂, merilec M4 – kuhinja (2. del)

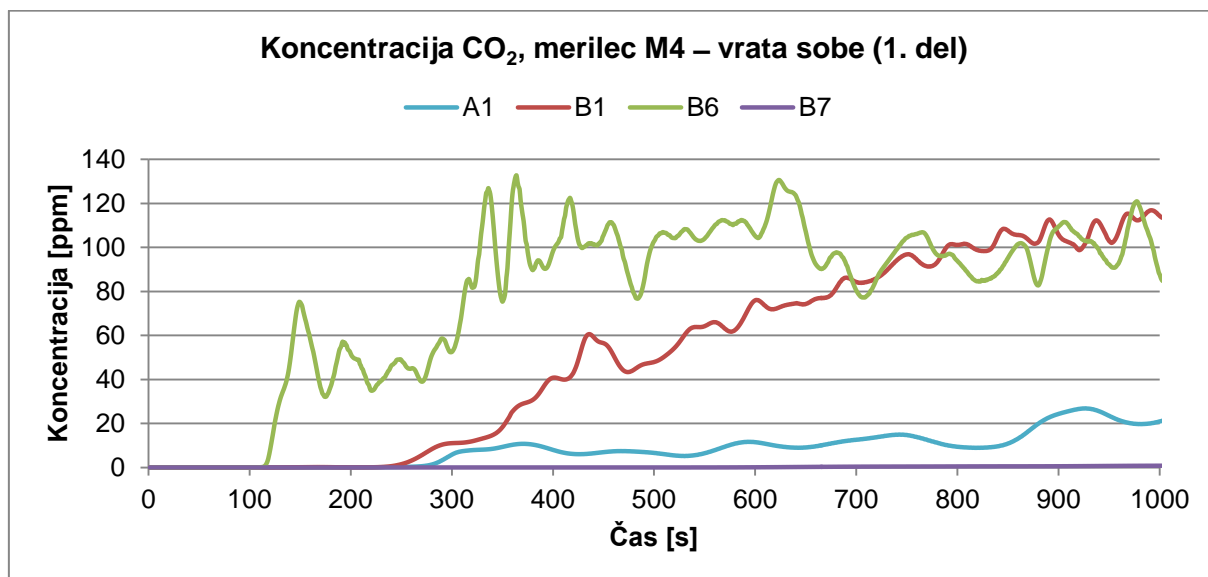
Z vidika merilnega mesta M4 – kuhinja se je za najbolj neugodno varianto izkazala B6. Pri tej varianti koncentracija ogljikovega dioksida naraste najhitreje. V primerjavi z drugimi variantami je v varianti B6 izmerjena tudi največja koncentracija. Povprečna izmerjena koncentracija CO₂ v varianti B6 je skoraj 3-krat večja od tiste v varianti B1, kjer vpliva vetra ni, preostale spremenljivke pa so enake. Predvidevamo lahko, da bi bila z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka prav tako najbolj neugodna varianta B6. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B7, to je varianta z gašenjem. Povprečna izmerjena koncentracija je namreč kar 31-krat manjša od tiste v B1, kjer gašenja ni. Poleg tega lahko predvidevamo, da je zaradi gašenja in posledično preprečitve nadaljnega nastajanja morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka njihova koncentracija na tem merilnem mestu skoraj neznatna.

9.5.3 Merilec M4 – vrata sobe

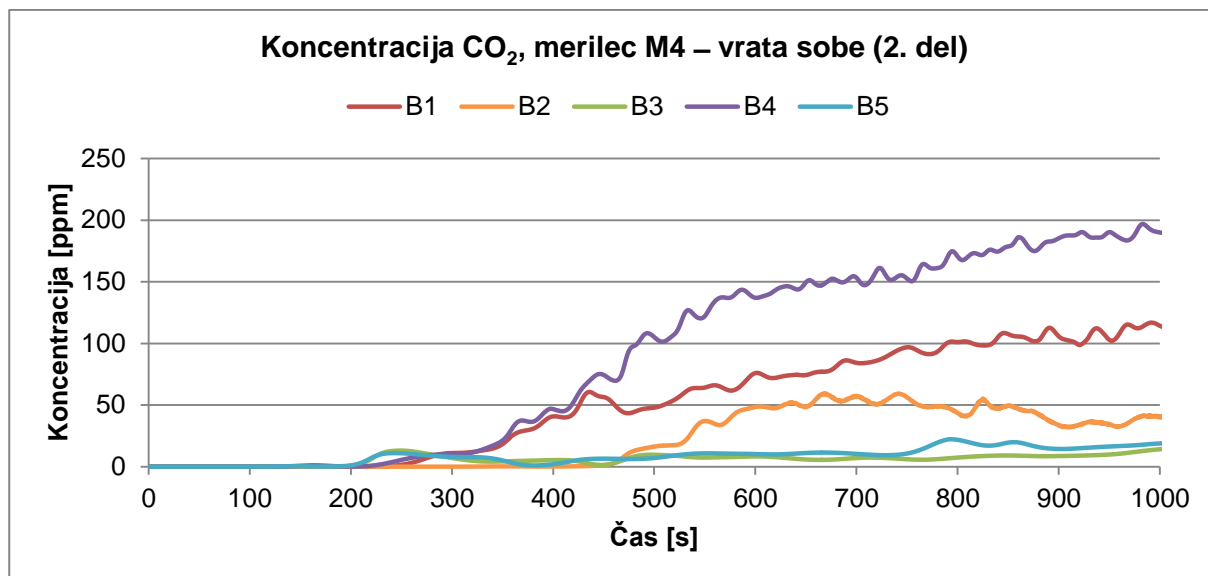
V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Na merilnem mestu M4 – vrata sobe je ogljikov dioksid spet najprej zaznan v varianti B6, in sicer v t = 5 s. Precej pozneje, v t = 51 s, je CO₂ zaznan v varianti B4, nato v t = 53 s v varianti B5, v t = 56 s v varianti B3, v t = 70 s v varianti B1, v t = 92 s v B7, v t = 100 s v A1 in nazadnje v t = 168 s še v B2. S slike 75 je spet razvidno hitro naraščanje koncentracije v B6. Od približno t = 100 s dalje so glede na druge variante vrednosti relativno velike. Povprečna koncentracija od t = 100 s dalje je 87 ppm. V varianti B1 je naraščanje koncentracije počasnejše in enakomernejše. Povsem na koncu simulacije je dosežena približno enaka koncentracija CO₂ kot v B6. Veliko manjše vrednosti od tistih v B1 dobimo v A1. V povprečju je koncentracija v A1 kar 6-krat manjša od tiste v B1. Iz tega lahko sklepamo, da v varianti B1, kjer imamo zaradi lakiranega lesa burnejši požar, velika večina produktov gorenja na to merilno mesto pripotuje iz spodnjega stanovanja. V varianti B7 je koncentracija CO₂ zaradi gašenja požara v primerjavi s preostalimi variantami skoraj zanemarljiva. Maksimalna koncentracija v B7 je na tem merilnem mestu izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša 0,8 ppm.

S slike 76 je razvidno, da imata v prvih 450 s varianti B1 in B4 skoraj enak trend naraščanja koncentracije CO₂. Pozneje so v B4 izmerjene večje koncentracije, saj zaradi zaprtih vrat v spodnjem stanovanju v zgornje stanovanje pripotuje večja količina produktov gorenja. V povprečju so izmerjene koncentracije v B4 skoraj 2-krat večje od tistih v B1. Maksimalna koncentracija v B4 je izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša 197 ppm. Obe varianti, ki nimata dotoka plina iz spodnjega stanovanja, imata v primerjavi z B1 7-krat manjše izmerjene koncentracije CO₂. Domnevo, da večino produktov gorenja v zgornje stanovanje pride iz spodnjega stanovanja, spet potrjujejo meritve iz variante B2. V varianti B2 je potrebnih približno 113 s več kot v B3 in B5, da plin prispe na lokacijo merilca. Kljub temu so v drugi polovici simulacije izmerjene koncentracije v varianti B2 večje kot v B3 in B5.



Slika 75: koncentracija CO₂, merilec M4 – vrata sobe (1. del)



Slika 76: koncentracija CO₂, merilec M4 – vrata sobe (2. del)

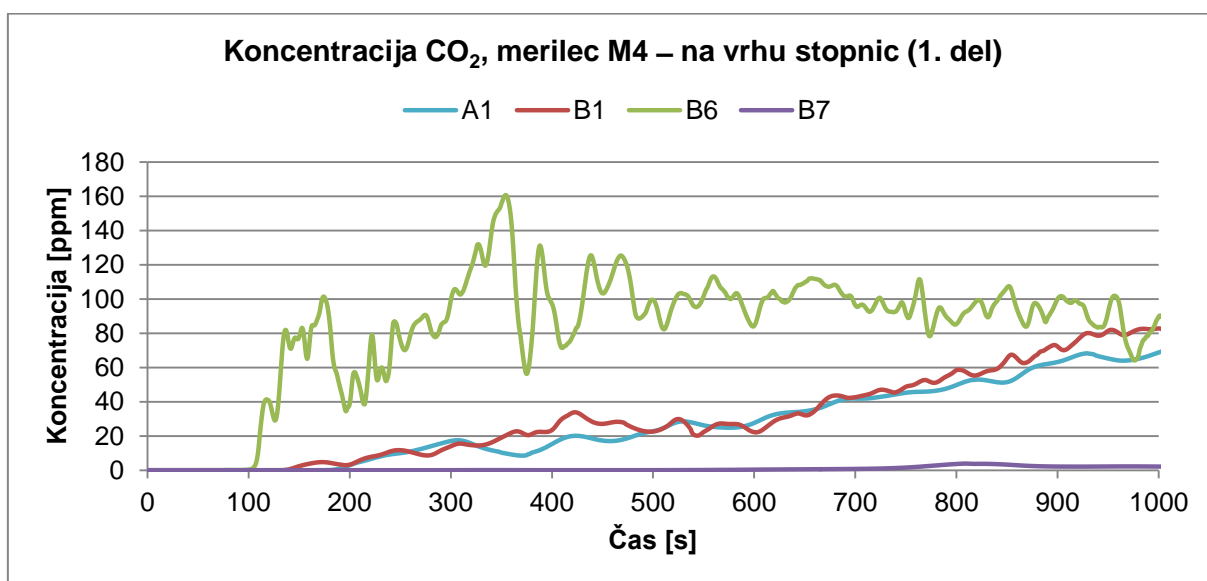
Z vidika merilnega mesta M4 – vrata sobe je najbolj neugodna varianta B4, to je varianta z zaprtimi vrati v prostore spodnjega stanovanja. V primerjavi z drugimi variantami je v B4 izmerjena največja koncentracija CO₂, ki je skoraj 2-krat večja od tiste v varianti B1. Povprečna izmerjena koncentracija je celo večja od tiste v varianti B6. Posebej velike vrednosti ta varianta dosega predvsem v drugi polovici simulacije. Da je za to merilno mesto najbolj neugodna prav varianta B4, je posledica položaja merilne naprave. Ta je namreč nameščena blizu vrha stopnišča, tako da produkti gorenja s stopnišča potujejo naravnost na njeno lokacijo. Predvidevamo lahko, da bi bila ta varianta najbolj neugodna tudi z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B7. Povprečna izmerjena koncentracija CO₂ v tej varianti je 280-krat manjša od povprečne izmerjene koncentracije v varianti B1. Poleg tega, da je v B7 koncentracija ogljikovega dioksida najmanjša, lahko predvidevamo, da je skoraj neznatna tudi količina morebitnih strupenih produktov gorenja laka, saj je njegovo gorenje preprečeno.

9.5.4 Merilec M4 – na vrhu stopnic

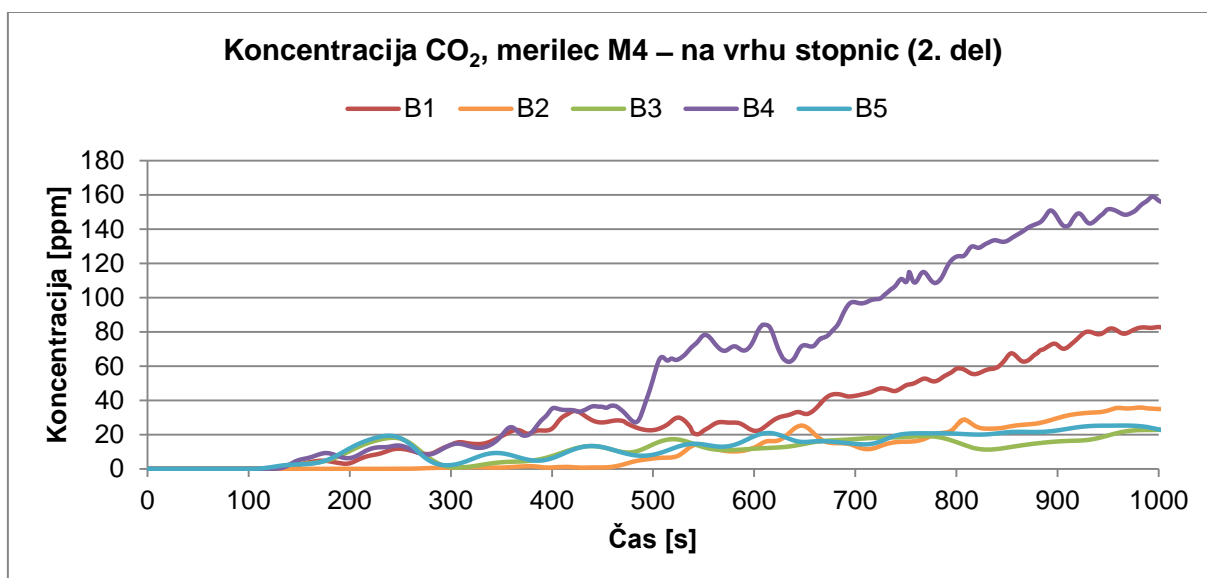
V dobljenih koncentracijah CO₂ ni vključen ambientalni CO₂ (330 ppm), saj ga program ne upošteva.

Na merilnem mestu M4 – na vrhu stopnic je ogljikov dioksid najprej zaznan v varianti B6, in sicer v $t = 6$ s. Precej pozneje, v $t = 43$ s, je plin zaznan v varianti B3, v $t = 50$ s v variantah B4 in B5, v $t = 58$ s v varianti B7, v $t = 74$ s v B1, v $t = 90$ s v A1 in nazadnje v $t = 129$ s še v B2. S slike 77 je spet razvidno, da koncentracija plina najhitreje narašča v B6. Vrednosti so v primerjavi z drugimi variantami dokaj velike, saj je povprečna koncentracija CO₂ od $t = 100$ s dalje 92 ppm. V variantah B1 in A1 je naraščanje počasnejše in enakomernejše. V B1 je opaziti malenkost večje vrednosti kot v A1, kar je posledica gorenja lakiranega lesa. Vrednosti se ne razlikujejo veliko, ker je merilec nameščen na takšni višini in lokaciji, kjer se plinski tokovi vrtinčijo in mešajo (slika 34 in preglednica 13), zato ne izmeri dejanskega maksimuma, temveč neko povprečje. Pojav je podrobneje opisan v analizi posameznih variant. V varianti B7 je, v primerjavi s preostalimi variantami, koncentracija skoraj zanemarljiva. Maksimalna izmerjena koncentracija znaša 4 ppm.

Na sliki 78 je spet opaziti približno enak trend naraščanja koncentracije ogljikovega dioksida v prvih 500 s simulacije pri variantah B1 in B4. Pozneje vrednosti v B4 narastejo, saj so v tej varianti zaprta vrata v prostore spodnjega stanovanja in posledično preko stopnic v zgornje stanovanje pripotuje večja koncentracija produktov gorenja. V povprečju je koncentracija v varianti B4 2-krat večja kot v varianti B1. Maksimalna koncentracija v B4 je izmerjena povsem na koncu simulacije in znaša 159 ppm. Varianti B3 in B5, ki nimata dotoka produktov gorenja iz spodnjega stanovanja, imata v povprečju 2,6-krat manjšo koncentracijo CO₂ kot B1. Majhna koncentracija je izmerjena tudi v varianti B2, vendar so vrednosti na koncu vseeno večje kot v variantah B3 in B5. Maksimalna koncentracija CO₂ v varianti B2 znaša 36 ppm, pri B3 in B5 pa je približno enaka in znaša 24 ppm.



Slika 77: koncentracija CO₂, merilec M4 – na vrhu stopnic (1. del)



Slika 78: koncentracija CO₂, merilec M4 – na vrhu stopnic (2. del)

Z vidika merilnega mesta M4 – na vrhu stopnic je najbolj neugodna varianta B6, in sicer zaradi hitrega širjenja produktov gorenja. Poleg tega je povprečna izmerjena koncentracija

CO₂ kar 2,7-krat večja od tiste v varianti B1, kjer vpliva vetra ni, preostale karakteristike simulacije pa so enake. Predvidevamo lahko, da bi se zaradi tako velikega vpliva vetra hitro širili tudi morebitni strupeni produkti gorenja, ki bi lahko nastali pri gorenju poliuretanskega laka, zato bi bila ta varianta neugodna tudi s tega vidika. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B7. V tej varianti je maksimalna izmerjena koncentracija CO₂ več kot 2-krat manjša od maksimalne koncentracije ogljikovega dioksida v B1. Ta varianta bi bila najugodnejša tudi z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka, saj je bilo z gašenjem onemogočeno gorenje laka in posledično tudi nastajanje morebitnih strupenih produktov.

9.5.5 Zgornje stanovanje – povzetek

Z vidika zgornjega stanovanja sta najbolj neugodni varianti B6 in B4. Pri obeh variantah so bile izmerjene koncentracije CO₂ v zgornjem stanovanju relativno velike. Maksimalna izmerjena koncentracija CO₂ se je gibala okoli 193 ppm. Pri B6 je posebej neugodno to, da koncentracija naraste že zelo zgodaj, kar precej skrajša čas varne evakuacije. Varianta B4 je manj neugodna v zgodnji fazi požara, vedno bolj neugodna pa postaja od t = 500 s dalje, ko začnejo vrednosti hitro naraščati. Ta varianta bi bila zato neugodna z vidika pozne evakuacije oziroma reševanja. Pri obeh variantah ni neugodno samo to, da so izmerjene dokaj velike koncentracije v zgornjem stanovanju, temveč tudi na evakuacijski poti. V primerjavi z drugimi variantami se pri B4 in B6 predvideva tudi največja ogroženost z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B7. V tej varianti, to je varianti z gašenjem, so bile izmerjene koncentracije CO₂ v povprečju skoraj 4-krat manjše od tistih v B1. Pokazal se je tudi izreden pomen ločevalnih vrat med industrijskim in stanovanjskim delom za zgornje stanovanje. V povprečju so bile v varianti B3 izmerjene koncentracije CO₂ skoraj 5-krat manjše od tistih v B1, kjer vrata niso bila zaprta. Z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja poliuretanskega laka je prav tako najugodnejša B7, saj je pri tej varianti z gašenjem onemogočeno gorenje laka in posledično nastajanje strupenih produktov.

10 ZAKLJUČEK

Požar je vsako nenadzorovano širjenje ognja v objektu in okolju. Za njegov nastanek so potrebne tri komponente: toplota, kisik in gorljiva snov. Če katero od teh treh komponent odstranimo, požar pogasimo. Glede na vrsto gorljive snovi se odločimo za način in sredstvo gašenja. Najpogosteje požar gasimo z vodo, ki pa včasih nepričakovano kemijsko reagira z gorljivo snovjo, pri čemer se lahko tvorijo strupeni produkti (npr. CO), zato ni vedno primerna za gašenje. Požar se širi s prevajanjem toplote (konvekcija, kondukcija, sevanje), prenosom mase (prehod gorečih predmetov) in pirolizo (termični razpad organskih materialov).

V večini primerov pri gorenju ni prisotna zadostna količina kisika. Takrat nastanejo vmesni produkti, ki so pogosto strupeni. Ko govorimo o produktih gorenja, najpogosteje omenjamo dim, ogljikov dioksid, dušljive in dražilne pline. Dim je potencialno nevaren, saj lahko prenaša strupene pline in tudi otežuje evakuacijo. Dušljivi plini so nevarni, ker povzročajo zmanjšanje vnosa kisika v tkivo, zaradi česar lahko pride do nezavesti ali celo smrti. Dražilni plini povzročajo onesposobitev, saj dražijo oči in zgornji dihalni sistem.

V letu 2013 so bili v Sloveniji najpogostejši požari v objektih, sledili pa so požari v naravi. Med požari v objektih so bili najpogostejši požari v stanovanjskih, nestanovanjskih in kompleksnih industrijskih objektih. Vzrok za požar so bile v 52 % primerov gradbene in tehnične pomanjkljivosti, kot na primer neustrezno stanje dimniških naprav, poškodba naprav oziroma kratek stik, neustrezno tehnično stanje prostorov in naprav itd.

Na področju požarne zakonodaje v Sloveniji velja Zakon o varstvu pred požarom (Ur. l. RS, št. 71/93), ki obsega osnovna načela požarne preventive. Poleg tega v vseh državah članicah EU velja Uredba (EU) št. 305/2011 (Ur. l. EU, št. 88), ki med drugim določa osnovne zahteve za gradbene objekte na področju varnosti pri požaru. Na podlagi Pravilnika o požarni varnosti v stavbah (Ur. l. RS, št. 31/04 s spr.) je nastala tudi tehnična smernica TSG-1-001:2010, ki natančneje opredeljuje osnovne zahteve, pogoje za projektiranje in razrede gradbenih proizvodov oziroma materialov, ki se smejo vgrajevati.

Požar v objektu lesnopredelovalne industrije sem simulirala s pomočjo programa Fire Dynamics Simulator (NIST, 2010). Zaradi velikosti in zahtevnosti modela bi bilo pisanje vhodne datoteke prezahtevno, zato sem modelirala z grafičnim vmesnikom Pyrosim (Thunderhead engineering, 2011), rezultate pa analizirala s programom Smokeview (NIST, 2010). Požar je mogoče simulirati še z drugimi programi, vendar so prej omenjeni programi brezplačni in dokaj preprosti za uporabo. Slabost programa FDS je le to, da tudi zmogljiv računalnik potrebuje veliko časa za izračun simulacije. Za izračun moje simulacije je bilo v povprečju potrebnih 36 ur.

Izvedla sem več variant, s katerimi sem poskušala ugotoviti, kako na dinamiko širjenja in koncentracije produktov gorenja vplivajo posamezni konstrukcijski elementi, prisotnost poliuretanskega laka, veter in gašenje s CO₂. Z analizo rezultatov sem prišla do zanimivih ugotovitev. V varianti A1, to je varianti brez lakiranega lesa, je maksimalna poraba goriva več kot 4-krat manjša od maksimalne porabe goriva v variantah, kjer je les lakiran (vse variante B). Zaradi manjše količine poliuretanskega laka, ki je v vseh variantah razlit po tleh lakirnice, je razvoj požara zelo hiter. V povprečju do požarnega preskoka pride že malo pred četrto sekundo od začetka požara. Z vidika lakirnice je najbolj neugodna varianta B6, to je varianta z vetrom. Pri tej varianti je časa za evakuacijo samo eno sekundo, nato pa koncentracija CO preseže mejo, pri kateri lahko že nekaj vdihov povzroči vrtoglavico in nezavest, po manj kot

treh minutah izpostavljenosti pa tudi smrt. Za najugodnejšo varianto se je izkazala varianta z gašenjem (B7), saj je z vidika prisotnosti CO nevaren samo čas med peto in petnajsto sekundo, poleg tega pa sta v $t = 20$ s doseženi zadovoljiva vidljivost in temperatura. Edina slabost te variante je velika prisotnost CO₂ v lakirnici, zaradi česar bi bilo lahko vstopanje brez ustrezne opreme usodno. Pri tem je zaskrbljujoče dejstvo, da je v lakirnici kljub gašenju dosežena visoka maksimalna temperatura (575 °C). Z vidika pisarne je prav tako najbolj neugodna varianta B6, saj je v tej varianti CO₂ v povprečju zaznan 11 s prej kot v drugih variantah, maksimalna koncentracija pa je skoraj 2-krat večja. Za najugodnejšo varianto se je spet izkazala B7, saj je pri tej varianti koncentracija CO₂ najmanjša in omogoča dovolj časa za varno evakuacijo. Z vidika spodnjega stanovanja je najbolj neugodna varianta B5, to je varianta z zaprtim stopniščem. Večina produktov gorenja v spodnje stanovanje prispe skozi pisarno in nato dnevno sobo, ker pa je stopnišče zaprto, se produkti gorenja začnejo kopičiti v hodniku in nato še v drugih prostorih spodnjega stanovanja. Pri tej varianti je maksimalna koncentracija CO₂ v povprečju več kot 2-krat večja kot v preostalih variantah. Za najugodnejšo varianto se je izkazala B3, to je varianta z zaprtimi vrati med industrijskim in stanovanjskim delom objekta. Zaradi zaprtih vrat je bila koncentracija CO₂ v spodnjem stanovanju v povprečju kar $8,0 \times 10^{17}$ -krat manjša kot v drugih variantah. Z vidika zgornjega stanovanja sta najbolj neugodni varianti B6 (veter) in B4 (zaprta vrata v prostore spodnjega stanovanja). Varianta B6 je neugodna z vidika zgodnje evakuacije, saj produkti gorenja v zgornje stanovanje prispejo izjemno hitro. V povprečju zaznajo merilci zgornjega stanovanja CO₂ že kmalu po štirih sekundah od začetka požara. Varianta B4 pa je neugodna z vidika poznejše evakuacije, saj začne po 500 s od začetka požara koncentracija CO₂ strmo naraščati. Za najugodnejšo varianto se je spet izkazala B7, to je varianta z gašenjem, saj so bile izmerjene koncentracije ogljikovega dioksida precej manjše kot v preostalih variantah. Tudi v zgornjem stanovanju se je pokazal ugoden vpliv ločevalnih vrat med stanovanjskim in industrijskim delom, saj je bila v varianti B3 koncentracija CO₂ v povprečju 5-krat manjša kot v B1, kjer omenjena vrata niso bila zaprta.

Medtem ko so koncentracije CO tako velike, da predstavljajo nevarnost za zdravje in življenje, so koncentracije CO₂ v pisarni in stanovanjskem delu premajhne, da bi ogrožale zdravje in življenje. Je pa prisotnost CO₂ pomemben pokazatelj, na podlagi katerega predvidevamo, da lahko pri gorenju nastajajo tudi drugi strupeni produkti, ki negativno vplivajo na zdravje zaposlenih in stanovalcev. V članku Kinsman in sod. (2001) je bila izpostavljena problematika pomanjkanja literature s področja gorenja kemikalij. Na ta problem sem med izdelavo diplomske naloge naletela tudi sama. Zaradi tega je bilo nemogoče določiti, kateri so produkti gorenja poliuretanskega laka in kakšna je njihova koncentracija. Ker gre za poliuretanski lak, bi lahko predpostavili, da lahko pri gorenju nastajajo dušikovi oksidi (NO_x), morda celo vodikov cianid (HCN). Z vidika morebitnih strupenih produktov gorenja tega laka je nedvomno najbolj neugodna varianta B6 (veter), saj se pri tej varianti produkti gorenja širijo najhitreje, pa tudi njihova koncentracija je velika. Najugodnejša je varianta B7, saj je pri tej varianti gorenje laka prekinjeno prej kot v 30 s. Zaradi tega lahko predvidevamo, da je koncentracija morebitnih strupenih produktov gorenja laka v pisarni in stanovanjskem delu objekta neznatna ali pa vsaj tako majhna, da ne vpliva na zdravje. Pri tem je treba poudariti, da pa ne moremo predvideti učinkov na zdravje pri istočasni izpostavljenosti več strupenim plinom (Kinsman in sod., 2001).

V splošnem na vseh merilnih mestih izstopa negativen vpliv vetra. Kot je bilo že ugotovljeno v članku o analizi produktov gorenja in njihovi nevarnosti za zdravje na plavajoči morski

postaji (Dadashzadeh in sod., 2013), veter v največji meri raznaša produkte gorenja v prostore. Poleg tega veter, ujet v prostore, povzroča mešanje zračnih in plinskih tokov. Pokazal se je tudi izreden pomen ločevalnih vrat med industrijskim in stanovanjskim delom objekta, zato bi bilo smiselno ta vrata izvesti kakovostno, tako da bi izpolnjevala zahteve zakonodaje. Poleg tega bi bilo obvezno namestiti sistem za samodejno zapiranje teh vrat. Zelo me je presenetil učinek žleba (preglednica 12), ki ga povzročita postavitve strehe industrijskega in tudi stanovanjskega dela objekta in zaradi katerega sploh pride do prisotnosti produktov gorenja v stanovanjskem delu. Zaskrbljujoče je dejstvo, da je v lakirnici kljub gašenju dosežena visoka temperatura. Zaradi tega bi bilo treba fiksno zapreti okna v tem prostoru, tako da ne bi dotekal kisik. Zaradi visokih temperatur v lakirnici in posledično nevarnosti širjenja požara s konvekcijo, kondukcijo in sevanjem v sosednjo pisarno in na podstrešje bi bila potrebna izvedba ustreznih požarnih sektorjev in uporaba požarno varnih materialov. Predlagala bi delitev na tri požarne sektorje: cona 1 (lakirnica, skladišče, prostor za počitek), cona 2 (pisarna), cona 3 (stanovanjski del objekta). Poleg tega bi k večji požarni varnosti veliko pripomogla primerna organizacija dela. Vse lake bi bilo treba skladiščiti v obstoječem shranjevalnem prostoru zunaj objekta in tam izvesti tudi vse potrebno mešanje s trdilci itd. V lakirnici bi se izdelki le lakirali, shranjevali pa v ločenem skladišču.

Poleg omenjenega problema s pomanjkanjem informacij na področju gorenja kemikalij sem imela težave tudi pri iskanju primerne objekta za simulacijo. Med lastniki zasebnih dejavnosti namreč prevladuje vsesplošen strah pred inšpekcijami in morebitnimi pomanjkljivostmi v dokumentaciji ali infrastrukturi. Ta strah sem srečevala na vsakem koraku. Potrkala sem na nešteta vrata zasebnikov, ki so bili sprva navdušeni nad sodelovanjem. Ko sem jim razložila, da bi v diplomski nalogi analizirala požar v njihovem objektu in produkte gorenja, ki pri tem nastanejo, me ni zavrnil nihče. Takoj ko sem omenila, da bi analizirala tudi strupene produkte gorenja, ki nastanejo pri gorenju lakov, smol in plastičnih mas, s katerimi delajo v njihovem objektu, pa se je situacija popolnoma obrnila. Na navdušene obraze izpred nekaj trenutkov sta se naselila zaskrbljenost in strah. Takoj za tem se je usul plaz tisoč in enega izgovora v stilu »ja, imamo tale lak, ampak ga nimamo« oziroma »imamo tole gorljivo plastično maso, ampak v diplomski lahko omeniš samo negorljive« in v tistem trenutku je bilo naše sodelovanje končano. Deloma sem jih celo razumela, saj vsak od njih trdo gara za svoj vsakdanji kruh, država pa jim ga s svojimi zahtevami, davki in globami neprestano jemlje. Prav zato sem prijaznemu gospodu, ki je edini privolil v sodelovanje, obljubila popolno anonimnost.

Zaradi vseh omenjenih problemov se je diplomsko delo izkazalo za trši oreh, kot sem pričakovala. Kljub temu se je požarna analiza izkazala za izjemno zanimivo področje. Pri izdelavi diplomske naloge sem pridobila precej znanja s področja značilnosti požara, produktov gorenja in materialov. Gre za dokaj raziskano področje, z izjemo področja gorenja kemikalij in produktov, ki pri tem nastanejo. Po podatkih Uprave RS za zaščito in reševanje (2014) je bilo v Sloveniji v letu 2013 v skoraj 40 % primerov vzrok za intervencijo požar, v dobrih 4 % primerov pa nesreče z nevarnimi snovmi. Prav zaradi tega bi bilo treba izvesti dodatne raziskave na področju gorenja nevarnih snovi, zlasti glede vplivov na zdravje pri istočasni izpostavljenosti več strupenim snovem, in o tem osveščati tudi javnost.

VIRI

UPORABLJENI VIRI

Bergant, K. 2014. Meteorologija, klimatologija. Sevanje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 32 f.

Chen, K., Mackie, J. C., Kennedy, E. M., Dlugogorski, B. Z. 2012. Determination of toxic products released in combustion of pesticides. Progress in Energy and Combustion Science. 38: 400 – 418.

Dadashzadeh, M., Khan, F., Abbassi, R., Hawboldt, K. 2013. Combustion products toxicity risk assessment in an offshore installation. Process Safety and Environmental Protection. PSEP-364: 1 – 9.

Dubravac, M. 2014. Gorenje v notranjem prostoru. GNPB. Ljubljana, Gasilska Zveza Slovenije (GZS): 12 f.

Fire Dynamics Simulator (Version 5): programska oprema. 2010. NIST.

Friedman, R. 2009. Principles of fire protection chemistry and physics. Third edition. Sudbury, Jones and Bartlett Publishers: 296 str.

Gradivo (delno) za pripravo na strokovni izpit iz varstva pred požarom. 2009. Ljubljana, Ministrstvo za obrambo, Uprava RS za zaščito in reševanje, Gasilska Zveza Slovenije (GZS): 125 str.

http://www.sos112.si/slo/tdocs/pozar_gradivo.pdf (Pridobljeno 3. 7. 2014.)

Kinsman, P., Maddison, T. E. 2001. Hazard assessment for fires in agrochemical warehouses. The role of combustion products. Trans IChemE. 79, B: 145 – 156.

Klasifikacija gorljivih snovi. 2013. Zavarovalnica Triglav.

<https://www.triglav.si/svetujemo/izbira-naprave-sredstav-za-gasenje-zacetnih-pozarov#/>

(Pridobljeno 23. 6. 2014.)

McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J. 2007. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide. National Institute of Standards and Technology (NIST): 206 f.

Obnašanje oseb ob požaru. 2013. Toming 1.

<http://www.toming1.si/obnasanje-oseb-ob-pozaru/> (Pridobljeno 3. 7. 2014.)

Okna. 2013. Satler okna in vrata.

www.okna-satler.si (Pridobljeno 25. 8. 2014.)

Paabo, M., Levin, B. C. 1987. A review of the literature on the gaseous products and toxicity generated from the pyrolysis and combustion of rigid polyurethane foams. Fire and Materials. 11: 1 – 29.

Perdan, R., Krainer, A. 2012. Računalniški program TEDI. Uporabniški priročnik. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente: 45 f.

Piroliza. 2011. EkoGrupa.

<http://www.ekogrupa.si/8/piroliza-%28lesna-biomasa%29/> (Pridobljeno 1. 7. 2014.)

Poročila požari. 2014. Uprava RS za zaščito in reševanje.

<http://spin.sos112.si/SPIN2/Javno/> (Pridobljeno 8. 7. 2014.)

Povezava med koncentracijo CO, časom izpostavljenosti in simptomi. 2014. Zbornica VZD.
<http://www.zbornica-vzd.si/> (Pridobljeno 25. 8. 2014.)

Pravilnik o požarni varnosti v stavbah. Uradni list RS, št. 31/04, 10/05, 83/05, 14/07 in 12/13.

Pyrosim2011: programska oprema. 2011. Thunderhead engineering.

Senica, S. 2011. Uporaba polivinilklorida v notranjem grajenem okolju in vpliv na zdravje uporabnikov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta, Oddelek za sanitarno inženirstvo (samozaložba S. Senica): 151 f.

Smokeview (Version 5). A tool for visualizing FDS data: programska oprema. 2010. NIST.

Stec, A., Hull, R. 2010. Fire toxicity. Boca Raton idr., CRC Press, Woodhead Publ.: 688 str.

Štraus, P., Žagar, B., Ahačič, M., Felkar, T., Jug, A., Kroflič, M., Remškar, D., Triler, B., Dolinar, J., Velikonja, P., Cestnik, T., Lipič, R., Huselja, A., Lipič, R., Oblak, J., Sever, M. 2014. Osnove gorenja in gašenja: aplikacija e-SAVE. Ljubljana, Zavod Vizija Varnosti.
<http://www.e-save.si/app/strani/gasilci/zacetek.html/> (Pridobljeno 23. 6. 2014.)

Tehnična smernica TSG-1-001:2010.

Tomazin, M. 2010. Požarna preventiva. Nadaljevalni tečaj za gasilca. Razvojno raziskovalna naloga. Ljubljana, Gasilska zveza Slovenije (GZS): 77 f.
<http://www.gasilec.net/datoteke/> (Pridobljeno 30. 6. 2014.)

Tomšič, M. 2010. Požar in nevarne snovi. Nadaljevalni tečaj za gasilca. Razvojno raziskovalna naloga. Ljubljana, Gasilska zveza Slovenije (GZS): 86 f.
<http://www.gasilec.net/datoteke/> (Pridobljeno 30. 6. 2014.)

Uredba EU št. 305/2011. Uradni list EU, št. 88.

Veter. 2010. Space.si.
<http://vreme.space.si/zgodovina.php/> (Pridobljeno 10. 6. 2014.)

Vrste gasilnikov glede na gasilo. 2009. Zavod Vizija Varnosti.
<http://www.vizijavarnosti.com/vsebina/2010/vrstegasilnikov.php/> (Pridobljeno 11. 9. 2014.)

Zakon o gradbenih proizvodih – ZGPro. Uradni list RS, št. 52/00, 110/02 - ZGO-1 in 82/13 - ZGPro-1.

Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu pred požarom – ZVPoz-D. Uradni list RS, št. 83/12.

Zakon o varstvu pred požarom – ZVPoz. Uradni list RS, št. 71/93.

DRUGI VIRI

Forney, G. 2007. User's Guide for Smokewiew Version 5 – a Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. National Institute of Standards and Technology (NIST), Fire Research Division: 132 f.

Pyrolysis. 2009.
<http://www.wtert.eu/default.asp?Menue=12&ShowDok=14/> (Pridobljeno 1. 7. 2014.)

Pyrolysis. 2014.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis/> (Pridobljeno 1. 7. 2014.)

PyroSim User Manual. 2011. Manhattan, Thunderhead engineering: 120 f.

Repše, N. 2012. Požar v knjižnici Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Repše): 106 f.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: VARNOSTNO SPRIČEVALO POLIURETANSKEGA LAKA

(Ta stran je namenoma prazna)

PRILOGA A: VARNOSTNO SPRIČEVALO POLIURETANSKEGA LAKA

VARNOSTNO SPRIČEVALO

1. PODATKI O IZDELKU IN DOBAVITELJU:

1.1. IME IZDELKA: POLIURETANSKI TEMELJNI LAK

Oznaka: TA 03, TA 15, TA 98, TA 48, TA 80, TM 80, TB 1136

Splošno ime izdelka: Lak na osnovi alkidne smole in organskih topil.

1.2. PODATKI O DOBAVITELJU:

Ime proizvajalca: ILVA POLIMERI S. P. A.

Naslov: VIA A. COSTA 2

20030 SENAGO

MILANO - ITALY

V nujnih primerih dobite dodatne informacije pri gospodu Guidu CINTI na telefon: 0039 2 990991

2. SESTAVA / PODATKI O SESTAVINAH:

Vsebuje	TLV	koncentracija v %	
EEC / CAS NR.	Oznaka	R - stavek	
METIL ETIL KETON 606002003 / 78 - 93 - 3	200,000 F XI	N.	<= 2,5 % R 11 R 36 / 37
2 - METOKSI 1 - METIL ETIL ACETAT 607195007 / 108 - 65 - 6	XI		<= 2,5 % R 10 R 36
TOLUEN 601021003 / 108 - 88 - 3	50,000 F XN	N.	10 - 25 % R 11 R 20
KSILEN 601022009 / 1330 - 20 - 7	100,000 XN	N.	25 - 50 % R 10 R 20 / 21 R 38
METANOL 60300100X / 67 - 56 - 1	200,000 F T	N.	<= 2,5 % R 11 R 23 / 25

3. NEVARNE LASTNOSTI:

Lahko vnetljivo

Zdravju škodljivo pri vdihavanju in v stiku s kožo.

Draži oči, dihalni sistem in kožo.

4. PRVA POMOČ:

Možni znaki prekomernega učinkovanja izdelka na organizem: omotičnost, slabost, bruhanje, oteženo dihanje, draženje kože in oči. Če se pojavijo ti znaki je nujno poiskati zdravniško pomoč in pokazati to spričevalo.

Pri prekomernem vdihavanju: vdihavati svež zrak, počivati, ne jesti in ne piti dokler ne minejo znaki.

Pri zaužitju: poškodovanec ne sme jesti, piti sme le vodo. Ne sme izsiljevati bruhanja.

Pri politju po koži in obleki: odstraniti moramo polito obleko. Dobro sprati kožo z vodo in milom. Pri čiščenju ne smemo uporabljati organskih topil in razredčil.

Pri politju po očeh: oči spiramo s čisto vodo najmanj 15 minut.

5. UKREPI OB POŽARU:

Preventivni ukrepi: odstraniti je potrebno vse možne vire požara: odprt plamen, prižgano cigareto, iskrenje orodja in naprav. Posodo z materialom je potrebno zapirati.

Za gašenje se uporablja: ogljikov dioksid (CO_2), lahka ali težka pena, prah in v omejenem obsegu tudi razpršena voda.

Pri gašenju priporočamo uporabo plinske maske in protipožarne zaščitne obleke. Gasiti moramo v smeri vetra. Negoreče posode moramo hladiti z razpršeno vodo, preprečiti moramo iztekanje materialov in jih prestaviti na varno mesto. Pri požaru moramo upoštevati tudi možnost, da nastanejo za organizem nevarni plinasti produkti in goste saje.

6. UKREPI OB NEZGODI:

Odstraniti moramo vse možne vire vžiga (plamen, prižgana cigareta, iskrenje....). Razlit izdelek zavezimo in zmešamo z zemljo, peskom ali z drugimi absorbenti za tekočine. Zmes varno odstranimo samo na organizirana odlagališča za posebne ali nevarne odpadke ali pa sežgemo v primerni sežigalnici. Preprečiti moramo izlitje v vodna zaječja, vodo, kleti, jame ali kanalizacijo; prav tako moramo preprečiti nabiranje hlapov v zaprtih prostorih.

7. RAVNANJE IN SKLADIŠČENJE:

Pri rokovanju z izdelkom je potrebno prostor dobro zračiti. Upoštevati je treba MDK za izdelek, veljavne predpise o emisiji nevarnih snovi v okolje in eksplozijski meji. Pri delu je treba zagotoviti izpolnjevanje predpisov iz varstva pri delu.

Original posode se mora tesno zapirati. Hraniti na mestih, ki so nedostopna otrokom in drugim neusposobljenim osebam. Med uporabo ne smemo ne jesti, piti in ne kaditi.

Originalno zaprto posodo skladiščimo v skladu s predpisi o skladiščenju vnetljivih in drugih nevarnih snoveh. Temperatura v prostoru kjer skladiščimo izdelek naj bo od $5 - 25^{\circ}\text{C}$. Embalaža mora biti označena z originalno nalepko dobavitelja. Ne skladiščite skupaj z živalsko krmo ali s hrano.

Priporočamo skladiščenje v zračnem in pokritem prostoru.

8. NADZOR NAD IZPOSTAVLJENOSTJO IN OSEBNA ZAŠČITA:

Zagotoviti je treba dobro ventilacijo na delovnem mestu.

Izbiri sredstev za osebno zaščito prilagodite tehnologiji uporabe izdelka. Priporočamo uporabo materialov, ki so odporni na organska topila in jih ne prepuščajo (guma, specialna plastika, anorganski materiali)

Pri enostavnih ročnih manipulacijah z izdelkom vedno uporabljajte zaščitne rokavice, pri brizganju pa uporabljajte tudi očala, ščitnik za obraz ali primerno zaščitno obleko. Pri delu v zaprtih, neventiliranih prostorih uporabljajte dihalni aparat ali ustrezno plinsko masko. V primeru, ko je možnost kontakta s kožo velika nosite posebno zaščitno obleko.

Uporabljajte samo neiskreče orodje in opremo. Zagotovite odvajanje statične elektrike.

9. FIZIKALNE IN KEMIČNE LASTNOSTI:

IZGLED:	tekočina
BARVA:	specifična za izdelek
VONJ:	specifičen za organska topila
pH:	//
VRELIŠČE:	78,50 °C
PLAMENIŠČE:	4,00 °C
SPODNJA EKSPLOZIJSKA MEJA:	5,4 vol. %
ZGORNJA EKSPLOZIJSKA MEJA:	7,6 vol. %
PARNI TLAK:	64,000
TOPNOST:	v topilih
SPECIFIČNA TEŽA:	0,972 kg / l ali (g / cm ³) pri 20 °C.

10. OBSTOJNOST IN REAKTIVNOST:

Izdelek je pri normalnih pogojih uporabe in skladiščenja stabilen in nereaktiven. Pri gorenju in razpadanju lahko nastajajo nevarni produkti; kot so: ogljikov monoksid, ogljikov dioksid in oksidirane dušikove spojine.

Izogibajte se močnih oksidantov, ker lahko pride do eksotermnih reakcij. Hraniti dobro zaprtega v originalni embalaži.

11. TOKSIKOLOŠKE INFORMACIJE:

MDK 50 (zaužitje) > 2000 mg / kg (vse komponente imajo toksičen vpliv, če je presežena MDK 50 mg / kg)

Kontakt z očmi: rahlo dražeč

12. OKOLJEVARSTVENE INFORMACIJE:

Biološka razgradnja izdelka v naravnem okolju je dolgotrajna. Zato je treba preprečiti izlitje v tla, vodo, vodna zaježja, kanalizacijo in biološke čistilne naprave.

Najprimernejši način razgradnje je kontroliran visokotemperaturni sežig ali odlaganje na posebnih deponijah.

13. PRIPOROČILA ZA VARNO ODSTRANJEVANJE ODPADNEGA PROIZVODA:

Odvečni in odpadni proizvod ter njegovo embalažo odstranjujte skladno s predpisi le na organizirano odlagališče ali jih varno in kontrolirano sežigajte v posebnih sežigalnicah.

14. TRANSPORTNE INFORMACIJE:

Prevoz po cesti in železnici (ADR / RID): razred: 3 No.: 5 b
MMM 3 – B. 42
Označevanje vozila – koda nevarnosti: 3.2 UN No.: 1263
znak nevarnosti: vnetljivo

15. ZAKONSKO DOLOČENE INFORMACIJE:

Izdelek je uvrščen in označen po predpisih.

LAHKO VNETLJIVO
ZDRAVJU ŠKODLJIVO

R – stavki:

Lahko vnetljivo.
Zdravju škodljivo pri vdihavanju in v stiku s kožo.
Draži oči, dihalni sistem in kožo

S – stavki:

Med uporabo ne jejte, pijte ali kadite
Hraniti ločeno od virov vžiga.
Uporabiti samo v dobro prezračevanih prostorih.

VSEBUJE:

KSILEN

16. DRUGE INFORMACIJE:

Navedeni podatki in priporočila temeljijo na uveljavljenih spoznanjih in pravilih stroke in na dolgoletnih izkušnjah proizvajalca o varnem ravnanju s temi materiali.

Pripravljeni so v skladu z nacionalnimi predpisi, s Smernicami Evropske Unije (EU) in z ustreznimi mednarodnimi konvencijami o transportu nevarnih snovi, ki so v veljavi.

Podatki v tem dokumentu se nanašajo le na varnostne zahteve v zvezi z izdelkom in ne pomenijo tehnične kakovosti.

16.1. Hlapne snovi: Nižje je zapisan brezdimenzijski faktor, ki ga pomnožimo z količino barve, ki jo rabimo in dobimo celotni – total V.O.C. ki znaša:
0,59 +/- 0,01

Junij 1999