

Napredna numerička simulacija ponašanja drvenih elemenata u požaru

Perković, Nikola

Professional thesis / Završni specijalistički

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:519674>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Nikola Perković

NAPREDNA NUMERIČKA SIMULACIJA PONAŠANJA DRVENIH ELEMENTA U POŽARU

SPECIJALISTIČKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Davor Skejić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb
Faculty of Civil Engineering

Nikola Perković

**ADVANCED NUMERICAL
SIMULATION OF THE BEHAVIOUR OF
TIMBER MEMBERS IN FIRE**

SPECIALIST THESIS

Supervisor:

Full prof. Davor Skejić, Ph.D. MSc. CE

Zagreb, 2024.

IZJAVA O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj specijalistički rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.



dr.sc.Nikola Perković, mag.ing.aedif.

Požar predstavlja ozbiljan izazov za sigurnost i integritet građevinskih konstrukcija, a posebno drvenih konstrukcija koje su izložene visokim temperaturama i intenzivnom toplotnom zračenju. Međutim, drvo neće bitno promijeniti mehanička svojstva dok gori. Razlog tome je što se nedugo nakon požara na površini drva stvara ugljeni sloj koji sprječava razvoj topline prema unutrašnjosti elementa. Međutim, zapaljivost drveta je jedan od glavnih razloga zašto regulativa strogo ograničava drvo kao građevinski materijal, posebno za gradnju višekatnih zgrada. Stoga, glavni preduvjet za uporabu drva u građevinama je osigurati adekvatnu požarnu otpornost, koristeći pasivne i aktivne mjere zaštite od požara. U ovom radu provedena je numerička simulacija utjecaja požarnog opterećenja na drvene elemente (CLT), kao sastavne dijelove nosivih konstrukcija. Pregledom stanja područja, uočava se nedostatak istraživanja u području numeričkih (MKE i CFD) simulacija drvenih konstrukcija izloženih požarnom opterećenju. U ovom radu istražen je utjecaj geometrijskih i materijalnih karakteristika CLT-a, te protupožarnih zaštitnih sustava na širenje požara, brzinu pougljenja, i u konačnici, požarnu otpornost drvenih elemenata. U Republici Hrvatskoj ne postoje zahtjevi zaštite od požara koji se odnose posebno na drvene konstrukcije - svi zahtjevi postavljaju se prema skupini građevina definiranoj u pravilniku o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara. Rezultat takvog pristupa je predimenzioniranje konstrukcijskih elemenata i vrlo često nepotrebna ili nedovoljno argumentirana protupožarna zaštita nosivih drvenih konstrukcija, koja zahtijeva velika financijska ulaganja. U cilju izbjegavanja nepotrebnih troškova, kod projektiranja drvenih građevina mogu se primijeniti proračunske metode i/ili modeli koji se temelje na novijim dostignućima u području požarne otpornosti što je i praktični doprinos ovog rada.

Ključne riječi: drvo, lamelirano, CLT, požar, MKE, CFD.

Fire represents a serious challenge for the safety and integrity of building structures, especially timber structures exposed to high temperatures and intense heat radiation. However, timber does not significantly change its mechanical properties during a fire. The reason for this is that a carbon layer forms on the surface of the wood shortly after a fire, which prevents heat from developing into the interior of the element. However, the combustibility of timber is one of the main reasons why regulations strictly limit timber as a building material, especially for the construction of multi-storey buildings. Therefore, the most important requirement for the use of timber in buildings is to ensure adequate fire resistance, through passive and active fire protection measures. In this work, a numerical simulation of the effects of fire loads on CLT as an integral component of load-bearing structures, is carried out. An overview of the state of the research in this field shows that there is a lack of research in the field of numerical (FEM and CFD) simulations of timber structures exposed to fire loads. In this work, the influence of the geometric and material properties of CLT and fire protection systems on the spread of fire, the charring rate, and ultimately, the fire resistance of timber elements is investigated. In the Republic of Croatia, there are no fire safety requirements that apply specifically to timber structures - all requirements are based on the structure group defined in the Regulation on Fire Resistance and other requirements that buildings must meet in the event of a fire. The result of such an approach is over dimensioning of building components and very often unnecessary or insufficiently argued fire protection of load-bearing timber structures, which requires high financial investments. In order to avoid unnecessary costs, calculation methods and/or models based on the latest achievements in the field of fire resistance can be used in the design of timber structures, which is also the practical contribution of this work.

Keywords: timber, laminated, CLT, fire, MKE, CFD.

IZJAVA O IZVORNOSTI.....	III
SAŽETAK.....	IV
ABSTRACT.....	V
SADRŽAJ.....	VI
LISTA SIMBOLA.....	VIII
IZRAZI I DEFINICIJE.....	XIII
Poglavlje 1. UVOD.....	1
1.1 Motivacija za istraživanje.....	1
1.2 Opći ciljevi rada.....	5
1.3 Organizacija specijalističkog rada.....	6
Poglavlje 2. PREGLED STANJA PODRUČJA.....	7
2.1 Uvod.....	7
2.2 Ponašanje drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima.....	12
2.2.1 Uvod.....	12
2.2.2 Odvajanje lamela i delaminacija.....	14
2.2.3 Istraživanje utjecaja različitih vrsta ljepila na delaminaciju.....	17
2.2.4 Istraživanje pougljenja i nosivosti CLT elementa u požaru.....	19
2.2.5 Istraživanje samogašenja CLT-a.....	22
2.2.6 Požarni odjeljci većih dimenzija otvorenog tipa.....	27
2.3 Zaštita drvenih konstrukcija u požaru.....	29
2.4 Metoda konačnih elemenata (MKE) u drvenim konstrukcijama.....	35
2.5 Modeli računalne dinamike fluida (CFD).....	41
2.5.1 Smjernice za pravilnu upotrebu CFD-modela.....	42
2.6 Proračun drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima.....	51
2.6.1 Uvod.....	51
2.6.2 Tehnička regulativa – Hrvatski propisi koji reguliraju zaštitu od požara za građevine.....	53
2.6.3 EN 1995-1-2.....	55
2.6.4 Osvrt na proračun CLT-a prema nacrtu novog EC5, prEN 1995-1-2:2025.....	61

Poglavlje 3. STUDIJA SLUČAJA.....	66
3.1 Tehnički opis građevine.....	66
3.1.1 Pristup	71
3.1.2 Konstrukcija objekta	71
3.2 CFD analiza – računalna dinamika fluida	76
3.2.1 Generiranje 3D modela.....	77
3.2.2 Generiranje numeričke mreže	78
3.2.3 Ulazni podaci i simulacija.....	79
3.2.4 Reakcije	82
3.2.5 Požarni scenariji.....	82
3.2.6 Konfiguracija mjernih uređaja	85
3.2.7 Rezultati CFD simulacije.....	87
3.2.8 Validacija modela izgaranja CLT-a.....	110
3.3 MKE - Požarna otpornost i dokaz nosivosti drvene konstrukcije prema EC5	115
3.3.1 Analiza opterećenja.....	115
3.3.2 Proces numeričke simulacije.....	130
3.3.3 Rezultati (požarna otpornost).....	133
Poglavlje 4. DISKUSIJA	145
4.1 CFD analiza	146
4.2 Primjena za praktičnijih (jednostavnijih) programskih paketa – OZone.	148
4.3 Metoda konačnih elemenata (MKE).....	149
4.4 Parametarska analiza	152
Poglavlje 5. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJE ISTRAŽIVANJE	157
5.1 CFD analiza	157
5.2 Metoda konačnih elemenata (MKE).....	159
5.3 Preporuke za daljnja istraživanja	160
LITERATURA.....	162

A	površina poprečnog presjeka
$A1, A2$	negorivi materijal
A_d	proračunska vrijednost neizravnih učinaka toplinskog djelovanja
b	širina poprečnog presjeka
c	specifični toplinski kapacitet
D_1	progib u sredini grede kod požarnog ispitivanja
d_0	debljina nultog sloja čvrstoće
$d_{char,0}$	dubina pougljenja za uzorak izložen požaru s jedne strane
$d_{char,n}$	nominalna dubina pougljenja
d_{ef}	efektivna dubina pougljenja
$E_{c,0}$	modul elastičnosti paralelno s vlakancima
$E_{c,90}$	modul elastičnosti okomito na vlakanca
$E_{m,g}$	globalni modul elastičnosti u savijanju
$E_{t,0}$	modul elastičnosti u vlaku paralelno s vlakancima
$E_{t,90}$	modul elastičnosti u vlaku okomito na vlakanca
$E_{0,05}$	5-percentilni modul elastičnosti
E_d	proračunska vrijednost odgovarajuće sile ili momenta za proračun uz uobičajenu temperaturu za osnovnu kombinaciju djelovanja
$E_{d,fi}$	proračunski učinak djelovanja u požarnoj situaciji
E_{mean}	srednja vrijednost modula elastičnosti
F_d	proračunska sila
F	sila
$F_{M,Ed}$	proračunska sila od projektnog momenta savijanja
F_c	tlačna sila
$F_{c,90}$	tlačna sila okomito na vlakanca
$F_{c,90,max}$	maksimalna tlačna sila okomito na vlakanca
$F_{c,90,max,est}$	procijenjena sila okomito na vlakanca
F_{max}	maksimalna sila
$F_{max,est}$	procijenjena maksimalna sila
$F_{t,90}$	vlačna sila okomito na vlakanca

G	modul posmika
$G_{k,j}$	karakteristična vrijednost stalnog djelovanja
G_{mean}	srednja vrijednost modula posmika
S	statički moment površine
$f_{c,0}$	tlačna čvrstoća paralelno s vlakancima
$f_{c,90}$	tlačna čvrstoća okomito na vlakanca
f_m	čvrstoća na savijanje
$\overline{f_m}$	srednja vrijednost čvrstoće na savijanje
f_k	karakteristična čvrstoća
$f_{t,0}$	vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima
$f_{t,90}$	vlačna čvrstoća okomito na vlakanca
$f_{v,k}$	posmična čvrstoća, karakteristična vrijednost
f_v	posmična čvrstoća
h	visina poprečnog presjeka u ispitivanju savijanjem, ili veća dimenzija poprečnog presjeka, ili visina uzorka kod ispitivanja okomito na vlakanca i posmika
I	moment tromosti presjeka
I_i	moment tromosti pojedinog dijela
$I_{y,ef}$	efektivni moment tromosti poprečnog presjeka uzorka
K, k	koeficijenti ili koeficijent toplinske vodljivosti
k_ρ	koeficijent gustoće
k_0	koeficijent
k_2	koeficijent zaštite za fazu 2
k_3	koeficijent (post-protection) za fazu 3
k_4	koeficijent konsolidacije za fazu 4
k_{fi}	koeficijent modifikacije za čvrstoću ili krutost u požarnoj situaciji
k_h	koeficijent debljine panela
k_{mod}	koeficijent modifikacije
$k_{mod,E,fi}$	koeficijent modifikacije za modul elastičnosti u požarnoj situaciji
$k_{mod,fi}$	koeficijent modifikacije u požarnoj situaciji
$k_{mod,fm,fi}$	koeficijent modifikacije savojne čvrstoće u požarnoj situaciji
k_n	koeficijent pretvorbe

k_{Θ}	temperaturno ovisan koeficijent redukcije za lokalnu čvrstoću i krutost
l	raspon
l_{ef}	efektivna duljina
l_p	raspon panela
l_1	duljina mjernog instrumenta za određivanje modula elastičnosti ili modula smicanja
m	masa
N	uzdužna sila
p	opseg poprečnog presjeka izloženog požaru
$R_{d,t,fi}$	odgovarajuća proračunska otpornost u požarnoj situaciji
S_y	statički moment površine dijela uzorka iznad ravnine za koju se računa posmično naprezanje
s_y	standardna devijacija
$Q_{k,1}$	karakteristična vrijednost vodećeg promjenjivog djelovanja
$Q_{k,1}$	karakteristična vrijednost pratećih promjenjivih djelovanja
V	volumen
V_S	posmična sila
t	vrijeme izloženosti požaru
t_a	vrijeme konsolidacije
t_{ch}	početak pougljenja zaštićenih elemenata od požara (odgoda početka pougljenja zbog protupožarne zaštite)
$t_{d,5}$	vrijeme požarne otpornosti nezaštićenih elemenata
t_f	vrijeme otkazivanja protupožarne zaštite
t_{fi}	vrijeme požarne otpornosti
t_{ins}	vrijeme povećanja temperature na neizloženoj strani elementa
$t_{p,min}$	minimalna debljina panela
t_R	vrijeme požarne otpornosti vezano za nosivost
t_{req}	potrebno vrijeme požarne otpornosti
t_0	vremenski period konstantne brzine pougljenja
t_1	vrijeme početka faze 1
t_2	vrijeme početka faze 2
t_3	vrijeme početka faze 3

u_x	pomak u x smjeru
u_y	pomak u y smjeru
u_z	pomak u z smjeru
ρ_k	karakteristična gustoća
ρ_m	srednja vrijednost gustoće
$\sigma_{c,0,d}$	proračunska naprezanje paralelno s vlakancima
$\sigma_{m,y,d}$	projektno naprezanje od savijanja oko y osi
$\sigma_{m,z,d}$	projektno naprezanje od savijanja oko z osi
$\sigma_{t,0,d}$	projektno vlačno naprezanje paralelno s vlakancima
$\sigma_{t,90,d}$	projektno vlačno naprezanje okomito na vlakanca
σ_N	naprezanje od uzdužne sile
τ_d	proračunska posmična čvrstoća
W	moment otpora
β_0	osnovna brzina pougljenja
β_n	nominalna brzina pougljenja
$\beta_{n,Faza2}$	nominalna brzina pougljenja za fazu 2
$\beta_{n,Faza3}$	nominalna brzina pougljenja za fazu 3
γ_M	parcijalni koeficijent za materijal
$\gamma_{M,fi}$	parcijalni koeficijent za drvo u požaru
$\gamma_{Q,1}$	parcijalni koeficijent za vodeće promjenjivo opterećenje
γ_i	koeficijent klizanja
λ	toplinska vodljivost
w	deformacija ili progib
ω	sadržaj vlage
χ, η	koeficijenti oblika
Θ	temperatura
$\psi_{1,1}$	koeficijent kombinacije za karakterističnu kombinaciju za promjenjivo opterećenje
$\psi_{2,1}$	koeficijent kombinacije za nazovi-stalnu kombinaciju za promjenjivo opterećenje
ψ_{fi}	koeficijent kombinacije za karakterističnu kombinaciju za promjenjivo opterećenje u požarnoj situaciji

Akronimi

<i>ASET</i>	available safe egress time
<i>CLT</i>	cross laminated timber
<i>CFD</i>	computational fluid dynamics
<i>DWD</i>	ploča od drvenih vlakana
<i>EC</i>	eurocode
<i>EPI</i>	emulsion polymer isocyanate
<i>ESP</i>	ploča od iverice
<i>EWP</i>	engineered wood products
<i>FDS</i>	fire dynamic simulation
<i>FEM</i>	finite element modeling
<i>GL</i>	glue-laminated
<i>HRR</i>	heat release rate
<i>HRRPUA</i>	heat release rate per unit area
<i>HRRPUA</i>	heat release rate per unit volume
<i>LVL</i>	laminated veneer lumber
<i>MF</i>	melamine formaldehyde
<i>MKE</i>	metoda konačnih elemenata
<i>OSB</i>	oriented strand board
<i>PBD</i>	Performance based design
<i>PRF</i>	phenol–resorcinol–formaldehyde
<i>PU</i>	poliuretansko (ljepilo)
<i>RH</i>	relative humidity
<i>RSET</i>	required safe egress time
<i>SIP</i>	structural insulated panels
<i>SFPE</i>	society of fire protection engineers
<i>TCC</i>	timber concrete composite
<i>VD</i>	vertikalna deformacija

Otpornost na požar

Sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara.

Požarno opterećenje

Količina toplinske energije koja se može razviti u nekom prostoru, nastaje sagorijevanjem sadržaja građevine (pokretno opterećenje) i dijelova konstrukcije i elemenata građevine (stalno opterećenje), a razlikuje se ukupno požarno opterećenje (MJ) i specifično požarno opterećenje (MJ/m²)

Požarni odjeljak

Dio građevine koji je odijeljen od ostalih dijelova građevine pregradnom konstrukcijom i elementima određene otpornosti na požar.

Integritet linije ljepila u požaru

Sposobnost linije ljepila da osigura prijanjanje između slojeva u požarnoj situaciji.

Linije pougljenja

Granica između sloja pougljenog sloja i preostalog poprečnog presjeka, za koju se pretpostavlja da je jednaka položaju izoterme od 300 °C.

Dubina pougljenog sloja

Udaljenost od inicijalne površine drvenog elementa do linije pougljenja.

Faza pougljenja

Početna nezaštićena, zaštićena, post-zaštićena ili konsolidirana faza u okviru europskog modela pougljenja, definirana kao vremensko razdoblje.

Efektivni poprečni presjek

Poprečni presjek izvornog drvenog elementa reduciran za dubinu pougljenja i nulti sloj čvrstoće.

Nominalna dubina pougljenja

Dubina pougljenja uzimajući u obzir nominalne projektirane brzine pougljenja za sve relevantne faze pougljenja.

Nominalna brzina pougljenja

Brzina pougljenja unutar jedne faze pougljenja uzimajući u obzir učinke dimenzija, pukotina, spojeva itd. prema europskom modelu pougljenja.

Preostali poprečni presjek

Poprečni presjek inicijalnog drvenog elementa reduciran dubinom pougljenja na požaru izloženoj strani.

Početak pougljenja

Vrijeme početka izlaganja požaru za početno nezaštićene strane drvenih elemenata, odnosno vrijeme kada površinska temperatura za početno zaštićene strane drvenih elemenata dosegne 300 °C.

Sloj nulte čvrstoće

Dimenzija reduciranog poprečnog presjeka uzimajući u obzir smanjenje krutosti ili čvrstoće drvenog elementa kada je izložen požaru.

1.1 Motivacija za istraživanje

Tijekom posljednjeg desetljeća, projektiranje i izgradnja građevina od masovne drvene građe korištenjem križno lameliranog drva (CLT) i lijepljenog lameliranog drva (GLT) značajno su se povećali na globalnoj razini. Vodeći razlozi prednosti su drvene gradnje s niskim udjelom ugljika u globalnoj borbi protiv klimatskih promjena i globalnog zatopljenja [1]. Skladištenje ugljika u šumi događa se kroz nakupljanje biomase u drveću tijekom fotosinteze. Na kraju ciklusa drvo ispušta pohranjeni ugljik u atmosferu raspadanjem ili izgaranjem. Koristeći drvo pri izgradnji konstrukcija (i recikliranjem u namještaj, ploče ili ostalo, nakon što se zgrada sruši) može se maksimizirati učinak pohrane ugljika [2]. Količina ispuštenog ugljikova dioksida smanjila bi se za 25 % kada bi se u Europi gradilo samo 10 % drvenih kuća [3]. Da bi ugljik bio uskladišten, drvo se mora održavati i te se mora spriječiti izgaranje drva. Truljenje i požari sve su češći i glavna su posljedica globalnog zatopljenja pa je vidljiva važnost drveta u očuvanju našeg planeta [4]. Nadalje, gradnja drvom zadovoljava arhitektonske težnje, i u konačnici može rezultirati smanjenim troškovima i većom brzinom gradnje, u usporedbi s standardnim, uobičajeno nezapaljivim materijalima i oblicima gradnje. Kako bi se drvo razumno primjenjivalo u graditeljstvu bitno je razumijevanje ponašanja drva u požaru, a ono se zasniva na poznavanju fenomena požara, svojstava i prirodne otpornosti drva na požar, poznavanju mehanizma sagorijevanja, kemijskih i fizičkih procesa pri požaru i povoljnom učinku aktivnih i pasivnih mjera zaštite od požara.

Posljedice požara ovise o materijalu od kojega je građevina izgrađena i o njejoj namjeni. Manje će posljedice biti ako požar zahvati negorivi materijal u odnosu na gorivi. Razlog znatnih posljedica prilikom požara su dva glavna produkta djelovanja požara; visoke temperature i velike količine dima. Visoke temperature utjecat će na samu konstrukciju tj. na njezinu nosivost i sigurnost, dok će dim utjecati na ljude smanjujući im vidljivost pronalaska izlaza i otežavajući im disanje. Za građevinu se može reći da je otporna na požar ako je sposobna kroz određeno vrijeme ispunjavati zahtijevanu nosivost (R) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara. Nadalje, svaki materijal/proizvod doprinosi razvoju požara uslijed vlastite razgradnje do koje dolazi izgaranjem tog materija određenim ispitnim uvjetima (reakcija na požar). Za negorive materijale glavni su parametri: gubitak mase i porast temperature, dok su glavni parametri zapaljivih materijala: lakoća paljenja, širenje plamena, ispuštanje, dim i brzina otpuštanja topline. Drvo kao materijal i paneli na osnovi drva svrstavaju se u kategoriju D [5]. Ukoliko je drvo zaštićeno premazima koji usporavaju širenje

požara, može biti svrstano u klasu B, no ne može se postići klasifikacija drvenog elementa kao negorivog, odnosno klase A1 ili A2. Reakcija na požar građevnog proizvoda može se u unutarnjem prostoru građevine smanjiti za jedan stupanj u slučaju kada će u građevini biti ugrađen sustav za automatsko gašenje požara [6].

Postojeće metode projektiranja zaštite od požara uglavnom se temelje na dinamici požara u požarnim odjeljcima. Ipak, drvo izloženo požaru mijenja dinamiku požara. Razumijevanje dinamike požara u požarnom odjeljku je neophodno kako bi se omogućilo projektiranje konstrukcijskih drvenih elemenata u požaru. U odjeljku s direktno izloženom drvenom građom, povećana je brzina otpuštanja topline (HRR).

U eri u kojoj održivi materijali kao što je drvo sve više prevladavaju u projektiranju i gradnji zgrada, ključno je razumjeti i točno modelirati ponašanje materijala u požaru. Jedan od izazova s kojima se inženjeri suočavaju je mogućnost predviđanja napredovanja požara u prostoriji s izloženim drvenim površinama. Stoga se ovaj specijalistički rad usredotočuje na korištenje računalne dinamike fluida (CFD), posebno programskog paketa Fire Dynamics Simulator (FDS) [7] tj. Pyrosim [8], za modeliranje požara u objektu koji uključuju izložene površine križno lameliranog drva (CLT). Postojeća istraživanja koja se odnose na korištenje CFD softvera za modeliranje požara koji uključuju izložene drvene površine su ograničena. Osim toga, točnost rezultata iz ovih studija uvelike varira. Međutim, interes za ovo područje istraživanja raste zbog njegovog potencijala u omogućavanju sigurnih, ekonomski održivih i estetski ugodnih građevinskih rješenja. Ovdje je predstavljeno istraživanje s ciljem doprinosa ovom području u nastajanju i pružanja uvida u postojeće znanje, metodologiju modeliranja i analizu rezultata. FDS [7] je korišten za modeliranje požara u izvedenom objektu od CLT-a.

Prilikom projektiranja drvenih konstrukcija u požaru, EN1995-1-2:2004 [9] daje osnovne smjernice i metode proračuna (reduciranog poprečnog presjeka i reducirane čvrstoće i krutosti), koji su utemeljene ispitivanjem koristeći standardnu požarnu krivulju. Požarna otpornost CLT elemenata obično se određuje prema danim metodama proračuna ili eksperimentalnim ispitivanjem. Evaluacija rezultata ispitivanja popraćena je nesigurnošću u pogledu svojstava materijala, koje je, međutim, neophodno znati da bi se rezultati ispitivanja mogli usporediti s metodom reduciranog presjeka prema EN 1995-1-2 [9]. Schmidt [10] je u svojim ispitivanjima pokazao ograničenja ovih metoda. Prvenstveno se to odnosi na vrijeme početka pougljenja, brzinu sagorijevanja i sloj nulte čvrstoće/krutosti. Razlika dubine pougljenja dobivenih modelom i požarnim ispitivanjem povećava se s povećanjem vremena izloženosti požaru. EN 1995-1-2 [9] propisuje dubinu sloja nulte čvrstoće od 7 milimetara za

GLT grede. Osnovne informacije i ograničenja u određivanju sloja nulte čvrstoće dobro su saželi Schmid i sur. [11,12]

Kamenicka i sur. ukazuju na razlike između pojednostavljenih i naprednih metoda te daju usporedbu rezultata [13]. Pogodno je koristiti modeliranje u MKE-programskim paketima gdje je moguće uzeti u obzir promjenu toplinskih i mehaničkih svojstava materijala s porastom temperature u vremenu. U slučaju analitičkih metoda potrebno je primijeniti parametre koji ovise o vremenu izloženosti požaru [14,15]. Prema najnovijim studijama, brzina sagorijevanja drva u prirodnom požaru može biti veća u odnosu na onu pri standardnoj požarnoj krivulji. Zbog svega navedenog, trenutno je u izradi novi Eurocode 5 (EN 1995-1-2:2025) [16] koji se odnosi na proračun drvenih konstrukcija u požaru. Glavni dodaci i poboljšanja odnose se na pravila dimenzioniranja CLT elemenata, kompozitnih sustava drvo-beton, drvenih okvirnih sustava, spojeva i detalja uključujući ljepila, zaštitu i konačno simplifikaciju i harmonizaciju metoda proračuna.

S obzirom na sve navedeno, opcije su ispitati drvene elemente prema europskim standardima ili projektirati koristeći nedavno razvijene metode proračuna. Ostman i suradnici [5] istražili su stanje područja vezano za dimenzioniranje CLT-a na požar u Europi.

Uvidom u trenutno stanje područja koje se bavi problematikom ponašanja GLT i CLT elementa u požaru, može se zaključiti da se ponašanje ovih elemenata prilikom sagorijevanja može uvelike razlikovati od ponašanja piljenje drvene građe [14]. Razlog leži u slojevitoj lijepljenoj strukturi i spojevima između lamela što može dovesti do lokalnog povećanja pougljenja [17]. Frangicom i sur. [18] pokazali su da na sagorijevanje CLT ploče ne utječe orijentacija slojeva. Nadalje, utvrđeno je kako se javlja efekt delaminacije kod CLT elemenata. Delaminacija označava odvajanje jedne ili više lamela zbog otkazivanja ljepila dodirnoj plohi između ljepila i lijepljenog elementa. Utjecajem vrste ljepila na delaminaciju bavio se Menis [19], Friquin i sur. [20], Klippel i sur. [21]. Ako su lamele CLT ploče lijepljene PUR ljepilom, otpadanje pougljenje lamele događa se prilično često. Frangi i sur. ističu da na ovu pojavu [22] utječe položaj panela (vertikalni ili horizontalni), debljina pojedinih slojeva i svojstva ljepila pri povišenim temperaturama. Do delaminacije uobičajeno dolazi kada na spoju dviju lamela bude dosegnuta temperatura od 300 °C, koja odgovara temperaturi pougljenja, međutim, dugo vrijeme predgrijavanja može prouzročiti rizik otkazivanja na liniji ljepila, što bi moglo dovesti do kolapsa prije nego što započne pougljivanje [23]. Ovdje se krije razlog, nakon početka prirodnog gašenja požara, može ponovno doći do njegovog ponovnog intenziviranja [24]. Kako požar nastavlja trajati sve dok gorivi materijal postoji, a drvo gori, ne može se sa sigurnošću reći hoće li sav materijal izgorjeti. Ispitivanjima je utvrđeno kako na vrhuncu stope gubitka

mase plamtenje doprinosi čak 60 % ukupnom gubitku mase, dok oksidacija ugljena doprinosi između 9 % i 12 % [25]. Provedena su dva niza eksperimenata kako bi se istražio model samogašenja i kvantificirali uvjeti pod kojima se ono može dogoditi [26]. U istom ispitivanju pokazano je kako se delaminacija može izbjeći izvođenjem deblje prve lamele, no istražena je i druga mogućnost. Naime, korištenjem odgovarajuće vrste ljepila prilikom proizvodnje CLT elemenata, tj. tijekom lijepljenja slojeva lamela, može se spriječiti proces delaminacije, čime bi se izbjeglo ponovno intenziviranje požara, a ostvarila bi se mogućnost samogašenja.

Paralelno sa eksperimentalnim ispitivanjem, razvijaju se i napredne metode proračuna. Thi i sur. [27] izradili su numerički model za prijenos topline u drvenim konstrukcijama gdje su analizirali tri načina prijenosa topline koja se događaju u požaru: provođenje, konvekcija i zračenje. Nadalje, Okoni i sur. [28] su numeričkom analizom pokazali da s ispravno unesenim svojstvima materijala, termalno - mehaničko ponašanje drvenih konstrukcija može se analizirati pomoću ANSYS programskog paketa, bez potrebe za izvođenjem eksperimentalnih ispitivanja u većem ili manjem mjerilu. Naime, u ANSYS programskom paketu, moguće je simultano provoditi termalno-mehaničku analizu [29] i tako predvidjeti ponašanje drvenih elemenata u požaru.

Uvidom u stanje područja jasno je da postoji i nedostatak ispitivanja vezanih za zaštitu drvenih konstrukcija u požaru, bilo da se radi o uporabi odgovarajućih sredstava za impregnaciju ili površinsku zaštitu drva ili o primjena materijala i elemenata za oblaganje i izoliranje drva od utjecaja požara. Ručni ili automatski uređaji za gašenje požara koriste se za suzbijanje požara u prostorijama u početnim fazama [30]. U posljednje vrijeme sve češće se koriste protupožarne ploče ili drvene obloge koje formiraju zaštitne membrane. Najčešće se koriste ploče na bazi cementno-silikatnih veziva, vermikulitne ploče na bazi tekućeg stakla, negorive ploče od bazaltnih vlakana i ploče kamene vune [30]. U posljednje vrijeme razvija se zaštita raznim sredstvima i materijalima za zaštitu od požara. U literaturi je dan je pregled elemenata na čijoj su bazi napravljeni do sada korišteni usporivači požara te su dane njihove glavne karakteristike [30].

1.2 Opći ciljevi rada

Kao što je već napomenuto u uvodnom dijelu, dugi niz godina se koriste standardizirane temperaturno-vremenske krivulje za opis realnog požara. Rezultat toga je predimenzioniranje konstrukcijskih elemenata i vrlo često nepotrebna ili nedovoljno argumentirana protupožarna zaštita nosivih drvenih konstrukcija, koje zahtijeva velika financijska ulaganja i održavanje.

Razlozi nezastupljenosti računalnih simulacija požara prilikom dimenzioniranja konstrukcijskih elemenata su višestruki:

- Velika početna ulaganja u računalne programe
- Nedostatak znanja u radu s računalnim programima
- Nezainteresiranost investitora za nove metode proračuna
- Nedostatak pravilnika za projektiranje s ovim metodama proračuna

Slijedom navedenog postavljaju se specifični ciljevi rada :

- Definirati karakteristične požarne scenarije mjerodavne za ocjenu nosivosti drvene konstrukcije (CLT-a)
- Napraviti CFD simulaciju karakterističnih požarnih scenarija
- Očitati HRR, temperature plinova, vidljivost
- Očitati maksimalne temperature na drvenoj konstrukciji
- Procijeniti točnost simulacija i adekvatnost u praktičnoj primjeni
- Analizirati utjecaj temperature na stabilnost drvene konstrukcije
- Procijeniti nosivost i otpornost drvenih konstrukcija za različite slučajeve – EC5
- Komentirati i analizirati trenutno važeće propise

1.3 Organizacija specijalističkog rada

Kako bi struktura specijalističkog rada bila jasnija, ovo poglavlje daje kratak opis tema obuhvaćenih u svakom Poglavlju:

- U Poglavlje 1 opisana je motivacija za istraživanje i te ciljevi specijalističkog rada.
- U Poglavlju 2 dan je pregled stanja područja vezano za ponašanje drvenih konstrukcija (CLT-a) u požaru. Nadalje, raspravlja se o osnovnoj teoriji proračuna (požarne) otpornosti drvenih konstrukcija, te korištenju modela računalne dinamike fluida u požarnim odjeljcima za izloženim drvenim površinama. Shodno tome, prikazani su osnovni sustavi zaštite drvenih konstrukcija od požara. Na kraju, predstavljeni su benefiti numeričke analize (MKE), i trenutno razvijeni proračunski modeli, te smjernice za pravilnu upotrebu CFD modela.
- U Poglavlju 3 predstavljena je studija slučaja – objekt izgrađen od CLT elemenata. Nakon tehničkog opisa građevine pristupilo se CFD analizi razvoja požara unutar objekta (izložene i zaštićene drvene površine), te diskusiji rezultata (HRR, razvoj temperature i dima). U konačnici, provedena je MKE analiza te proračun požarne otpornosti CLT elemenata prema EC5, za izložene i zaštićene drvene elemente.
- Poglavlje 4 sadrži raspravu o rezultatima simulacija iz prethodnih poglavlja.
- Konačno, u Poglavlju 5 dani su glavni zaključci i preporuke za buduća istraživanja.

Poglavlje 2.**PREGLED STANJA PODRUČJA****2.1 Uvod**

Požar je svako nekontrolirano gorenje koje uzrokuje i materijalne štete i/ili ljudske žrtve, a primjer jedne građevine prilikom požara dan je na slici 2.1.1. Uzroci su raznoliki, no mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine, a to su namjerno i nenamjerno uzrokovani požari. Namjerno uzrokovani požari posljedica su vandalizma, kojim se najčešće vidno želi naštetiti nekoj građevini, no mogući su i ostali, za mnoge nepoznati i neshvatljivi razlozi. S druge su strane nenamjerni požari koji mogu biti uzrokovani ljudskom nepažnjom, neispravnim instalacijama i slično.



Slika 2.1.1 Zgrada prilikom požara [31]

Posljedice požara ovise o materijalu od kojega je građevina konstruirana i o njenoj namjeni. Manje će posljedice biti ako požar zahvati neki negorivi materijal u odnosu na gorivi. Također, unutar većine industrijskih postrojenja nalazi se vrlo malo gorivih predmeta i manji je broj ljudi u odnosu na, primjerice, uredske prostore u kojima je se nalazi znatan broj ljudi za koje je potrebno osigurati radna mjesta i sav uredski pribor, čime se gomila količina gorivih predmeta, ali i broj osoba čiji bi životi mogli biti ugroženi izbijanjem požara.

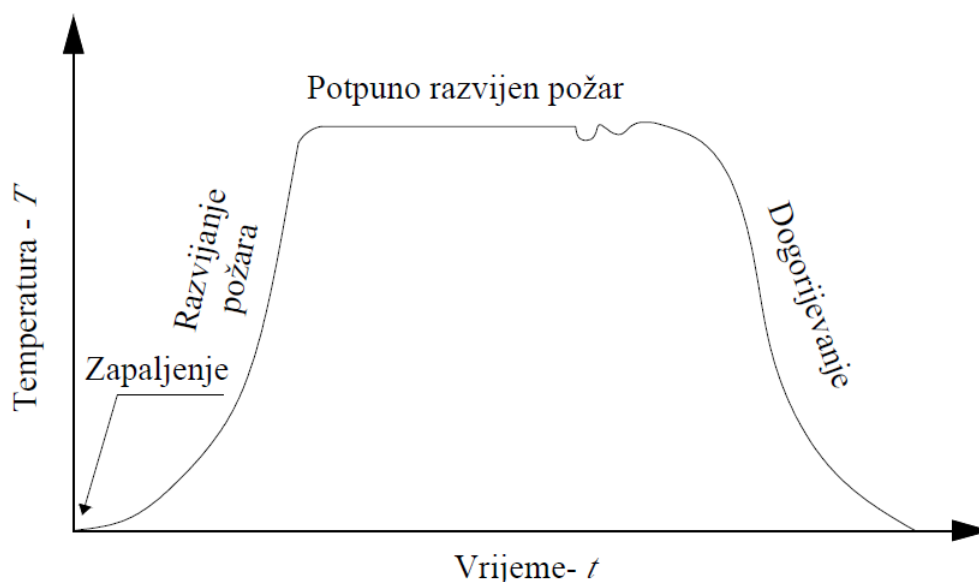
Razlog znatnih posljedica prilikom požara dva su glavna produkta djelovanja požara, a to su visoke temperature i velike količine dima. Visoke temperature utječu na samu konstrukciju, tj. na njezinu nosivost i sigurnost, dok dim utječe na ljude smanjujući im vidljivost pronalaska izlaza i otežavajući im disanje (Slika 2.1.2). Time dim postaje najvećim krivcem za stradavanjem velikog broja ljudi u požarima.



Slika 2.1.2 Gusti dim koji nastaje prilikom požara [32]

Da bi uopće došlo do razvoja požara, potreban je goriva tvar, kisik i dovoljna količina topline koja uzrokuje zapaljenje. Kada požar nastane, prolazi kroz specifične faze prikazane na slici 2.1.3. Požar započinje zapaljenjem, a daljnji tijek ovisi o gorivom materijalu i njegovoj količini. U fazi zapaljenja bitno je započeti evakuaciju svih osoba iz prostora, no velik problem stvara dim koji smanjuje vidljivost. Većina ljudi ni ne pokušava izaći, ako nema osiguranu dovoljnu vidljivost, iako je vjerojatnost da će ih prilikom izlaska zahvatiti požar jako mala. U ovoj je fazi važno i pokušati ugasiti požar jer se još nije razvio pa je taj postupak znatno jednostavniji, odnosno može biti postignut polijevanjem izvora zapaljena vodom, ili korištenjem aparata za gašenje požara, koji su dostupni u svakoj građevini, na za njih predviđenim mjestima. Nakon zapaljenja slijedi faza razvoja požara. Tada se naglo povećava temperatura i količina topline u prostoru te požar zahvaća sve veći dio prostorije. Temperatura u ovoj fazi još nije dosegla svoj maksimum. Nakon desetak minuta dolazi do dosezanja maksimalne temperature i faze potpuno razvijenog požara. Tada je požar zahvatio sav gorivi materijal i, ovisno o njegovoj količini, može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana [33]. Kada

izgori većina zapaljivog materijala i nakon što temperatura u prostoriji padne na 80 % od maksimalne razvijene prilikom požara, nastupa faza gašenja [30].



Slika 2.1.3 Faze razvoja požara

Među sedam osnovnih zahtjeva za građevinu, prema *Zakonu o gradnji* [34], nalazi se zahtjev sigurnosti u slučaju požara. Da bi građevine ispunile ovaj zahtjev, one moraju biti projektirane i izgrađene tako da u slučaju izbijanja požara:

- nosivost građevine može biti zajamčena tijekom određenog razdoblja
- nastanak i širenje požara i dima unutar građevine je ograničeno
- širenje je požara na okolne građevine ograničeno
- korisnici mogu napustiti građevinu ili na drugi način biti spašeni
- sigurnost je spasilačkog tima uzeta u obzir.

Za građevinu se može reći da je otporna na požar ako je sposobna kroz određeno vrijeme ispunjavati zahtijevanu nosivost (R) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara.

Prema *Pravilniku o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara* [35] unutar određenog vremena konstrukcija i elementi moraju očuvati nosivost i druga svojstva pri požaru, čime se iskazuje otpornost konstrukcije i elemenata na požar. Vrijeme otpornosti na požar izražava se u minutama koje se označavaju brojevima 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 i 360.

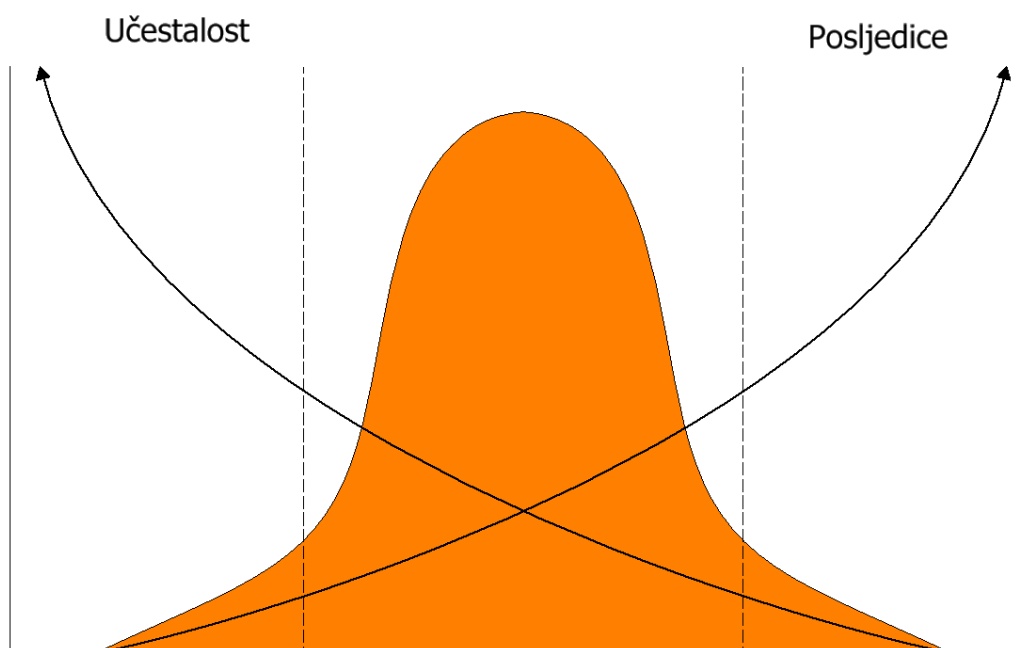
Isto tako, svaki materijal/proizvod doprinosi razvoju požara uslijed vlastite razgradnje do koje dolazi izgaranjem tog materija u određenim ispitnim uvjetima. Taj se doprinos prema normi HRN EN 13501-1:2010 [36] naziva reakcija na požar. Unutar nje razrađena je klasifikacija, s jedne strane na negorive materijale, a s druge na gorive materijale. Negorivi materijali ne mogu se zapaliti, gorjeti, podržati gorenje ili otpustiti zapaljive plinove kada su izloženi požaru ili toplini. Takvi građevinski materijali razreda su izloženosti na požar A1 i A2. Gorivi građevinski materijali mogu se zapaliti, gorjeti, podržati gorenje ili osloboditi gorive plinove te su svrstani u razrede reakcije na požar B, C, D, E i F. Dodatna razredba materijala obuhvaća razredbu u obliku proizvodnje dima (s1-s3), a vezana je i uz gorivo otkapavanja materijala u slučaju požara (d0-d2) [35].

Drvo kao materijal i paneli na osnovi drva svrstavaju se u kategoriju D. Ukoliko je drvo zaštićeno protupožarnom zaštitom koja usporava širenje požara, može biti svrstano u klasu B, no ne može se postići klasifikacija drvenog elementa kao negorivog, odnosno klase A1 ili A2. U tablici 2.1.1 dan je pregled klasifikacije reakcije na požar za razne proizvode koji se mogu koristiti kao stropne i podne obloge [5]. Reakcija na požar građevnog proizvoda može biti u unutarnjem prostoru građevine smanjena za jedan stupanj u slučaju kada je u građevini ugrađen sustav za automatsko gašenje požara [35].

Tablica 2.1.1 Pregled europske klasifikacije reakcije na požar građevnih proizvoda korištenih za zidne i stropne obloge

Klasifikacija reakcije na požar	Dodatna razredba vezana uz: proizvodnju dima gorivo otkapivanja materijala		Tipični proizvodi
A1	-	-	Kamen i beton
A2	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	Gipskartonske ploče i mineralna vuna
B	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	Gipskartonske ploče i drvo koje je zaštićeno usporivačima požara
C	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	Obloge na gipskartonskim pločama
D	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	Drvo i paneli na osnovi drva
E	-	- ili d2	Neki sintetički polimeri
F	-	-	Ne zadovoljavaju klasu E

Drvene konstrukcije igraju ulogu (uglavnom) u posljedicama požara, ali ne i u učestalosti. Broj požara u drvenim zgradama ne razlikuje se od broja požara u objektima izgrađenim od drugih materijala.



Slika 2.1.4 Ovisnost učestalosti i posljedica kod požara u drvenim konstrukcijama

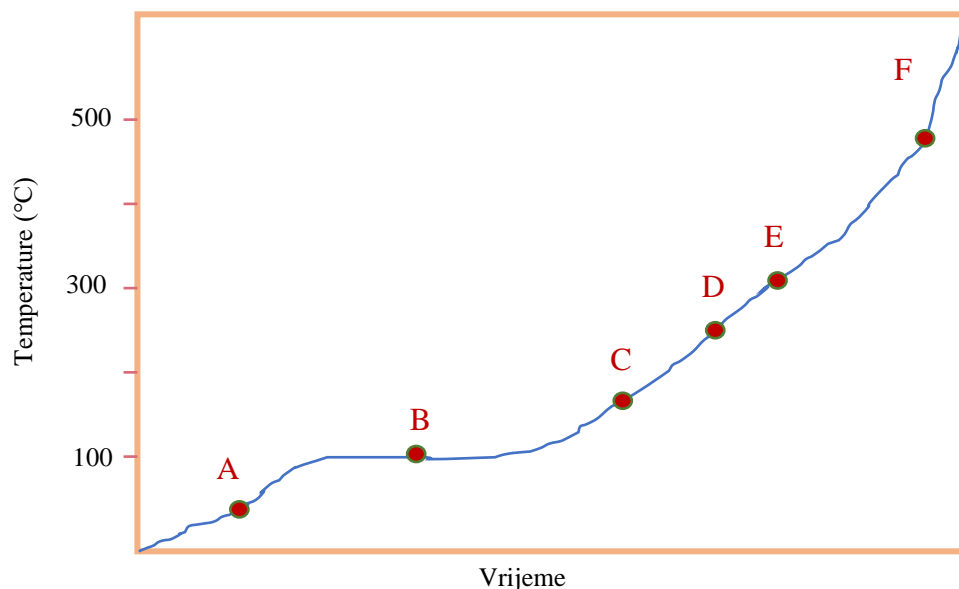
U odnosu na ostale građevinske materijale, posljedice mogu biti povećane zbog tri čimbenika:

- Drvo doprinosi požarnom opterećenju (pa su požari potencijalno jači)
- Prilikom požara, nezaštićene površine drvenih elemenata mogu degradirati, čak i u fazi prije rasplamsavanja (jer oštećenja počinju na nižoj temperaturi)
- Detalji veze su slabe točke (uglavnom slabije nego za ostale građevinske materijale)

2.2 Ponašanje drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima

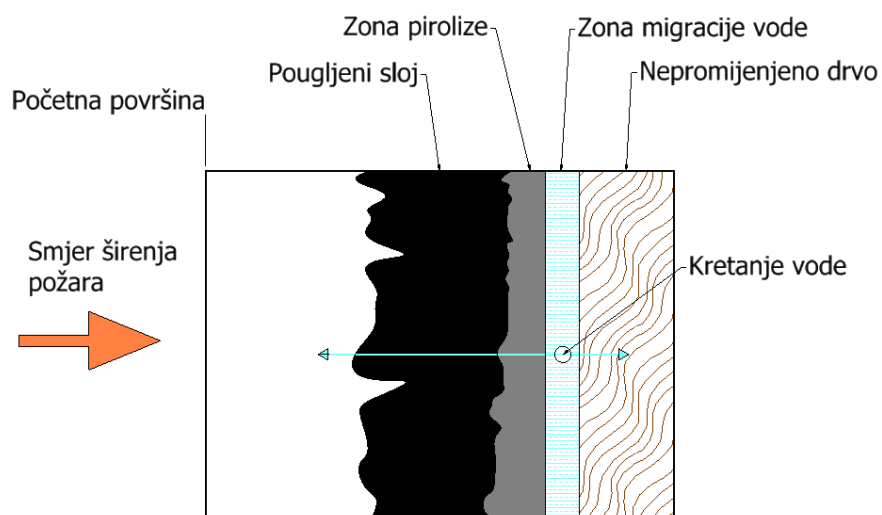
2.2.1 Uvod

Karakteristične faze i fenomeni koji se događaju kada je drvo izloženo požaru mogu se vidjeti na slici 2.2.1.



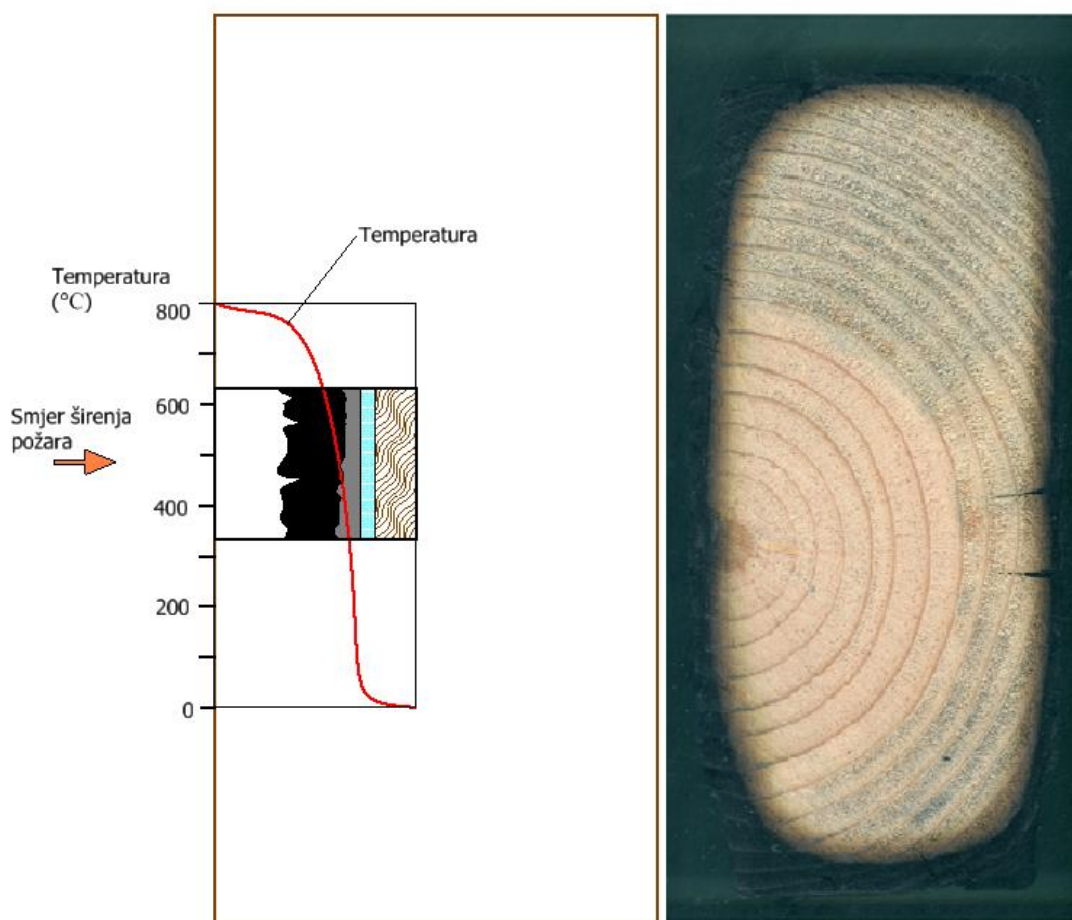
Slika 2.2.1 Karakteristične faze ponašanje drvenih konstrukcija u požaru

Temperature ispod 100 °C (točka A na slici 2.2.1), ali iznad sobne temperature uzrokuju sušenje drva i malo smanjenje čvrstoće i krutosti. Na 100 °C (točka B) voda počinje isparavati i prateći put najmanjeg otpora izlazi iz drveta. Temperatura u drvu ne raste dok sva voda ne ispari, što predstavlja horizontalni dio krivulje na slici 2.2.1. Između 150 i 200 °C (točka C) formiraju se plinovi koji se sastoje od približno 70 % ugljičnog dioksida (CO₂), koji je nezapaljiv, i 30 % ugljičnog monoksida (CO), koji je zapaljiv. Na 200 °C (točka D) nastaje više plinova i smanjuje se udio CO₂. Kada se ovi plinovi zapale, površinska temperatura se brzo povećava, te se nastavlja sagorijevanje drva. Kada se dosegne temperatura od 300 °C (točka E), drvo gubi većinu svojih svojstava (materijalne karakteristike). Za temperature iznad 500 °C (točka F) proizvodnja plina je uvelike smanjena, a proizvodnja drvenog ugljena se povećava što objašnjava izgled drveta (ugljen) nakon požara. Na slici 2.2.2 prikazani su karakteristični slojevi i ponašanje drva u požarnim uvjetima.



Slika 2.2.2 Karakteristični slojevi drva pri požarnom opterećenju

Pougljeni sloj koji ima presudnu ulogu i sprječavanju širenja topline prema unutrašnjosti materijala. Na slici 2.2.3 prikazan je temperaturni profil koji u trenutku stvaranja pougljenog sloja ostaje nepromijenjen u vremenu. Nakon otpadanja pougljenog sloja, temperatura ponovno naglo raste.



Slika 2.2.3 Razvoj temperature prema unutrašnjosti presjeka

2.2.2 Odvajanje lamela i delaminacija

Važan korak u proizvodnji elemenata od lijepljeno lameliranog drveta (GLT i CLT) je slaganje i lijepljenje prethodno obrađenih lamela. Razmak između lamela potrebno je svesti na najmanju moguću mjeru kako bi se ispunili zahtjevi fizike građevine (vatrootpornost, zrakopropusnost i zvučna izolacija), estetike i tehnike spajanja ploča. Razdvajanjem lamela na dijelove i njihovim ponovnim spajanjem smanjuje se mogućnost nesavršenosti jer se smanjuje varijanca [37]. Kako bi se postiglo (ponovno) spajanje, tehnologija lijepljenja naširoko se koristi za drvene proizvode (EWP) [38].

Međutim, u mnogim tehničkim propisima, uključujući EN 16351 [39], dopušten je najveći razmak do 6 mm. U slučaju izrade CLT elementa bez razmaka, neki proizvođači prvo izrađuju pojedinačne slojeve CLT elementa lijepljenjem bočnih rubova lamela, nakon čega se tako izrađeni slojevi lijepe u konačni proizvod. Međutim, doprinos nanošenja ljepila na bočnim stranama lamela je upitan i u načelu se preporuča zanemarivanje ili u najboljem slučaju ograničenje samo na unutarnje slojeve elemenata.

Potrebno je analizirati ponašanje konstrukcije u ambijentnim uvjetima, ali i u uvjetima povišenih temperatura. Protupožarna sigurnost uvelike pridonosi cjelokupnom osjećaju sigurnosti, a ključni je parametar pri izboru građevinskog materijala. Mehaničko i požarno opterećenje, uz geometrijska i materijalna svojstva drvenih konstrukcija, imaju odlučujuću ulogu u teoretskom istraživanju požarne otpornosti drvenih elemenata. Čvrstoća drva određena je mnogim čimbenicima, kao što su sadržaj vlage, gustoća, nagib vlakana i prirodne nesavršenosti. Ponašanje EWP-a ovisi o kvaliteti ljepila i kvaliteti spoja s drvetom. U pravilu će u normalnim okolnostima brže doći do otkazivanja drveta nego samog ljepila [40]. U nosivim konstrukcijama, ljepila prenose velika statička i dinamička mehanička opterećenja. Prilikom požarnog opterećenja kojima bi lijepljeno lamelirano drvo moglo biti izloženo, u kombinaciji s drugim vanjskim opterećenjima, pitanje koje se postavlja odnosi se na reakciju ljepila u takvim uvjetima, odnosno utjecaj povišenih temperatura na ljepilo. Poznato je da dolazi do redukcije čvrstoće s porastom temperature [41].

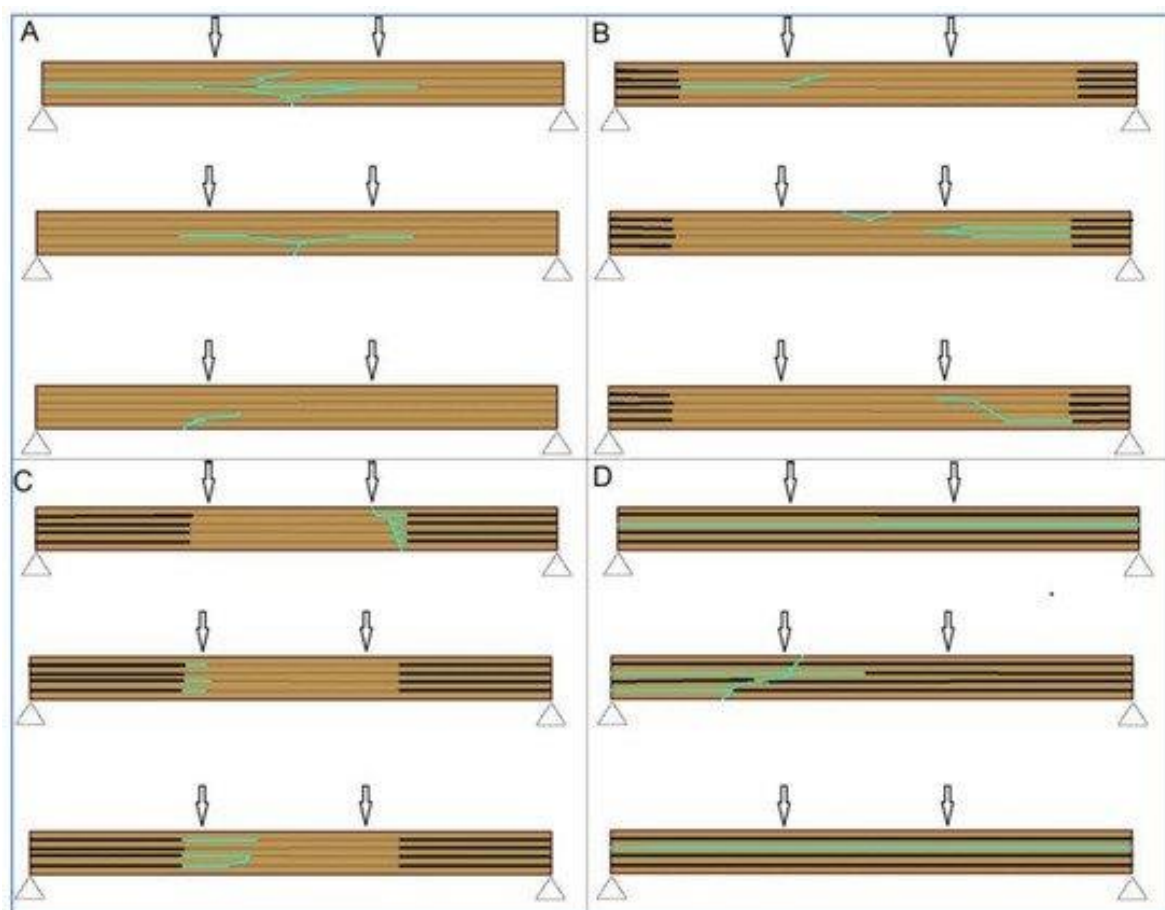
Do odvajanja lamela dolazi kada ljepilo prestane prijanjati na drveni materijal [42]. Ako se to dogodi u slučaju požara, zajedno s opadanjem pougljenog sloja, osigurava se nova količina goriva, produžujući fazu raspadanja drva i odgađajući samogašenje [41]. Do odvajanja lamela dolazi ako su fizičke, kemijske ili mehaničke sile koje drže vezu na okupu, prekinute. Posebno zanimljiva pojava koja negativno utječe na ponašanje drva u slučaju požara je da prilikom delaminacije dolazi do otpadanja zaštitnog pougljenog sloja i drvo ponovno postaje

nezaštićeno. Drugim riječima, sloj samoizolacije je eliminiran. Uvidom u trenutno stanje područja vezano za ponašanje GLT i CLT elemenata u slučaju požara, može se zaključiti da se ponašanje lijepljeno lameliranih elemenata tijekom gorenja može uvelike razlikovati od ponašanja elemenata od punog drva [43]. Razlog leži u slojevitoj lijepljenoj strukturi i spojevima između slojeva, što može dovesti do lokalnog povećanja pougljenjivanja [17].

Postoji opća pretpostavka da na odvajanje lamela i brzinu pougljenja utječe ljepilo. Ako pougljeni sloj otpadne na liniji lijepljenja, konzervativni kriterij mogao bi biti da se otkazivanje dešava pri temperaturi od 300 °C jer se ne očekuje postojanje ugljenog sloja pri nižim temperaturama.

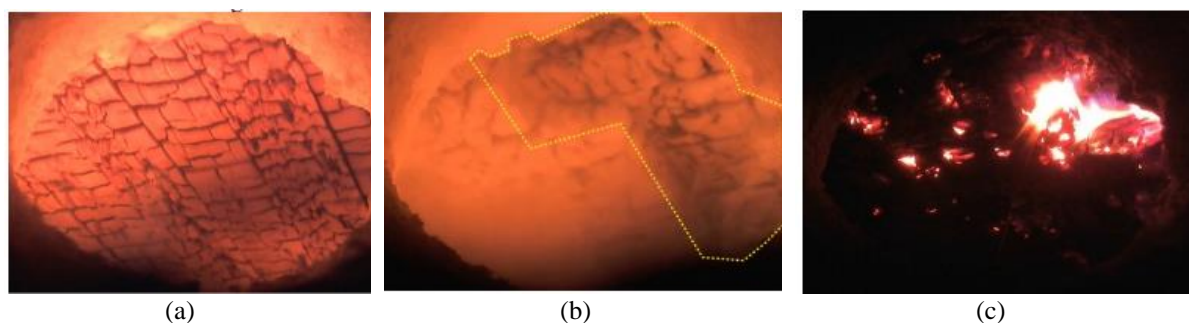
Sljedeći fenomen, koji je povezan s prethodnim, ali ga ipak treba razlikovati, jest delaminacija. Delaminacija je pojava u lameliranom materijalu, često kompozitu, koja dovodi do odvajanja konstituirajućih slojeva. Postoji nekoliko vrsta i manifestacija ove pojave, kao što je otkazivanje strukture ljepila, ili odvajanje ljepila od materijala koji se lijepi. U posljednjem slučaju, odvajanje lamele je ono što dovodi do delaminacije, što pomaže u ilustriranju razlike između odvajanja i delaminacije. Odvajanje je pojava kada dva materijala prestanu prijanjati jedan za drugi. Delaminacija je pojava kada se lamelirani materijal odvoji, izazvano lošom obradom tijekom proizvodnje, utjecaja prilikom uporabe ili na neki drugi način [42].

Na slici 2.2.4 prikazani su mogući načini otkazivanja, gdje plave linije predstavljaju linije otkazivanja, crne linije predstavljaju delaminaciju, a smeđe linije predstavljaju linije ljepila.



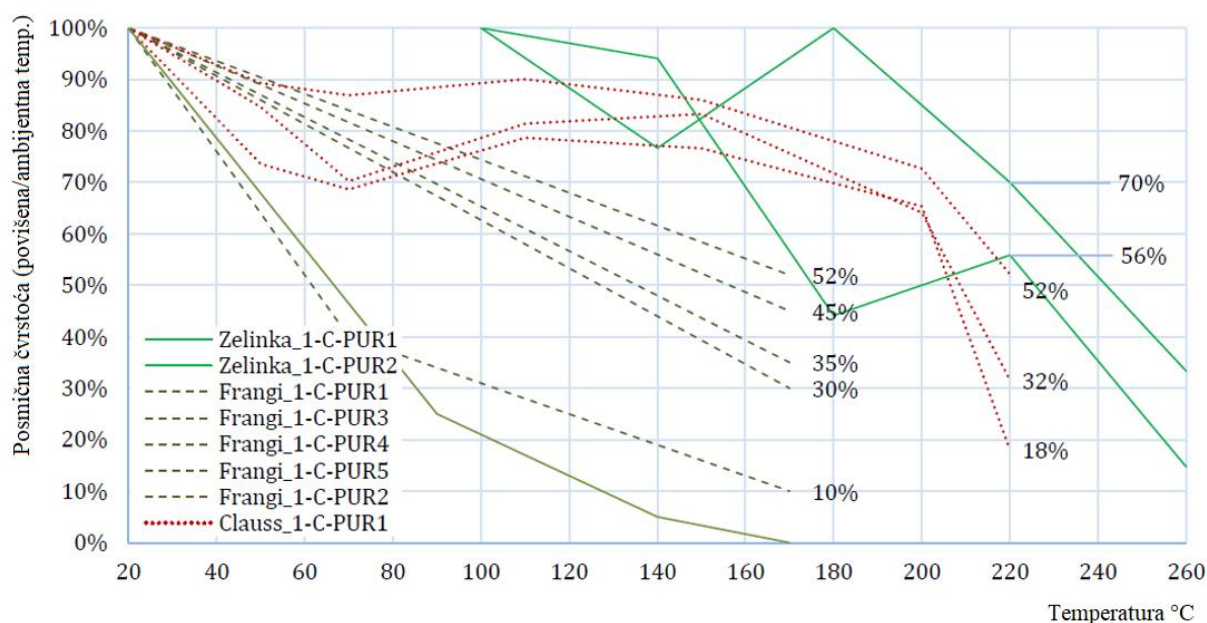
Slika 2.2.4 Mogući načini otkazivanja GL drvenih elemenata u požarnim uvjetima : (A) otkazivanje bez pojave delaminacije; (B) pojava delaminacije u okolini ležajeva; (C) djelomično razvijena delaminacija; (D) pojava delaminacije duž cijele grede

Vrsta i kvaliteta ljepila igraju važnu ulogu u sprječavanju ovih pojava, posebice tijekom požarnog opterećenja. Do delaminacije obično dolazi kada se na spoju dviju lamela postigne temperatura od 300 °C, što odgovara temperaturi pougljenja. EN 1995-1-2 [9] definira izoterme od 300 °C kao granicu između sloja pougljenog materijala i preostalog poprečnog presjeka. Ujedno, 300 °C je temperatura na kojoj drvo gubi svoja mehanička svojstva, stoga je istraživanje izoterme od 300 °C važno za definiranje preostale nosivosti drvenih elemenata nakon požara.



Slika 2.2.5 Delaminacija – PUR ljepilo: (a) inicijalna faza; (b) prva delaminacija; (c) druga delaminacija [44]

Ponašanje PUR ljepila ovisi o kemijskom sastavu, kao što je prikazano na slici 2.2.6. Zelinka i sur. [40] pokazali su da su rezultati ispitivanja ponašanja različitih vrsta ljepila u požaru raspršeni, nema trenda u opadanju čvrstoće, sve do 220 °C kada se uočava značajna redukcija čvrstoće ljepila.



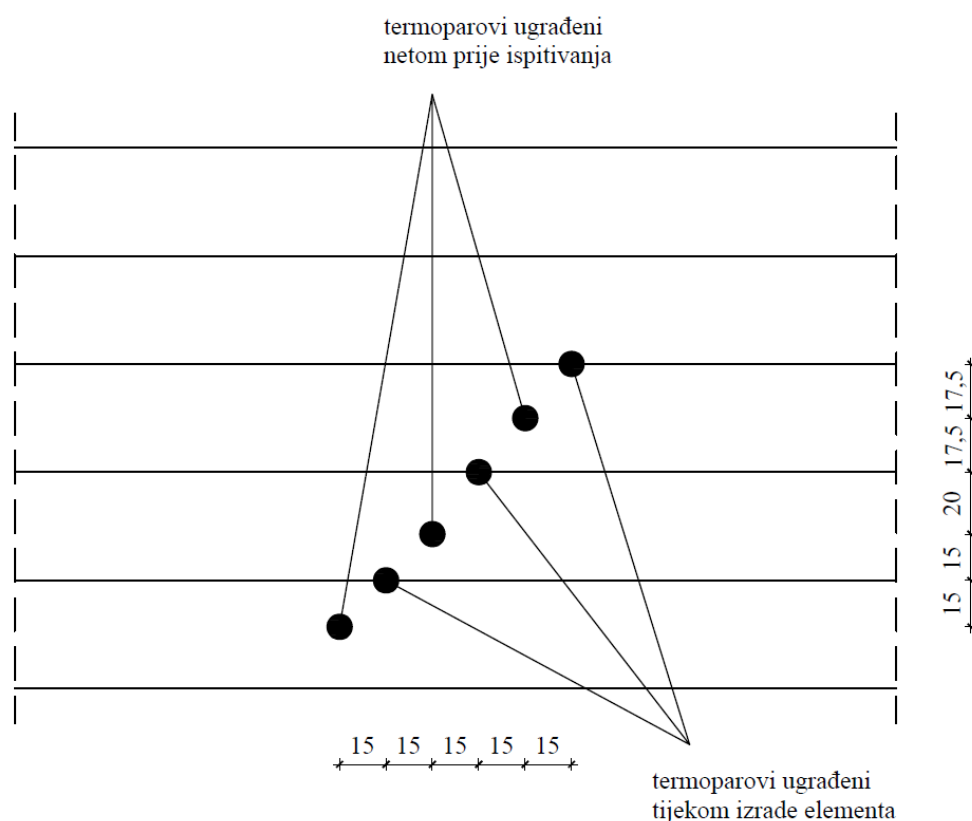
Slika 2.2.6 Smanjenje posmične čvrstoće pri povišenim temperaturama za poliuretanska ljepila [45–48]

2.2.3 Istraživanje utjecaja različitih vrsta ljepila na delaminaciju

U prethodno prikazanom ispitivanju [26] pokazano je kako se delaminacija može izbjeći izvođenjem deblje prve lamele, no istražena je i druga mogućnost. Naime, korištenjem odgovarajuće vrste ljepila prilikom proizvodnje CLT elemenata, tj. tijekom lijepljenja slojeva lamela, može se spriječiti proces delaminacije, čime bi se izbjeglo ponovno intenziviranje požara, a ostvarila bi se mogućnost samogašenja [24].

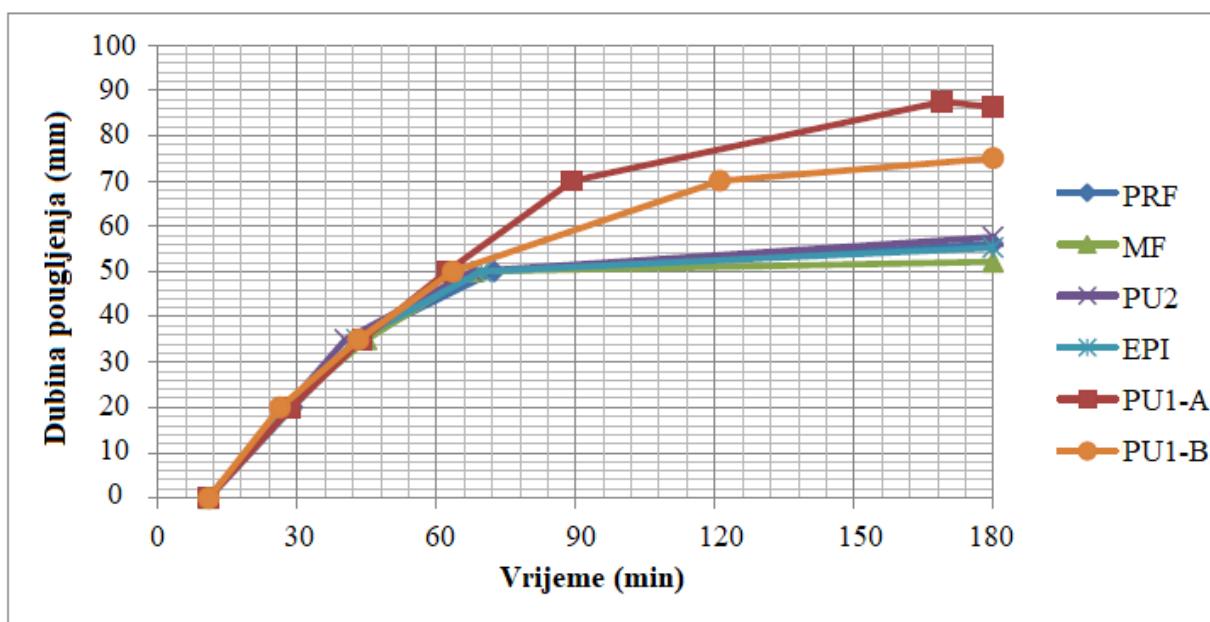
U ispitivanju je korišteno 5 vrsta ljepila: dva jednokomponentna poliuretanska ljepila (PU1 i PU2), melamin-formaldehidno ljepilo (MF), emulzijski polimer izocijanat (EPI) te resorcinol ljepilo (PRF). Uzorci s PU1 ljepilom komercijalne su proizvodnje, dok su uzorci s ostale četiri vrste ljepila napravljeni za potrebe ispitivanja. Sa svakim su ljepilom izrađena i ispitana dva uzorka.

Kako bi se mogla točno odrediti temperatura pri kojoj nastupa delaminacija, termoparovi su postavljeni unutar svake lamele te na dodirnoj plohi dviju lamela (Slika 2.2.7). Kako je prethodno ovom ispitivanju bilo provedeno ispitivanje jedne od ovih pet vrsta uzoraka u požarnom odjeljku pune veličine, ovi su uzorci ispitani u peći srednje veličine kako bi se uvidjelo dobivaju li se slični rezultati s obje metode.



Slika 2.2.7 Položaji i razmaci termoparova

Kada je na spoju dviju lamela bio očit nagli porast temperature, vidljiva je pojava delaminacije. Temperatura naglo poraste jer termoelement nakon delaminacije biva direktno izložen požaru. Tako na uzorcima lijepljenim s PRF, MF i PU2 ljepilima nije uočena delaminacija ni porastom temperature, niti otpadanjem lamele. Na uzorcima lijepljenim s EPI ljepilom nije na prikazu temperature uočen skok koji bi ukazivao na otpadanje lamele, no na snimci se moglo vidjeti kako je veći dio lamele otpao nakon 90 minuta izloženosti. Razlog je tome što je otpadanje lamele nastupilo 40 – 60 minuta nakon što je pougljeni sloj dosegao spojnicu lamela. Naime, kritična temperatura delaminacije izmjerena u termoparovima u zoni ljepila bila je između 200 °C i 400 °C, što pokazuje kako delaminacija uglavnom nastupa kada je temperatura blizu temperature pougljenja od 300 °C. Dakle, kod uzorka s EPI ljepilom otpadanje lamele nastupilo je kada je pougljeni sloj već značajno premašio spojnicu lamela pa stoga nije očit nagli porast temperature kada je lamela otpala. Kod uzorka s PU1 ljepilom najprije je otpala prva lamela tijekom faze potpuno razvijenog požara, 45 – 65 min nakon početka požara, dok je u jednom od uzoraka otpala i druga lamela nakon 140 minuta izloženosti. Istraživanje [24] je pokazalo debljinu pougljenja za svaki od uzoraka (Slika 2.2.8), pri čemu je jasno kako su uzorci s PU1 ljepilom najviše pougljenili, upravo zbog pojave delaminacije.



Slika 2.2.8 Dubina pougljenja uzoraka s različitim vrstama ljepila [24]

2.2.4 Istraživanje pougljenja i nosivosti CLT elementa u požaru

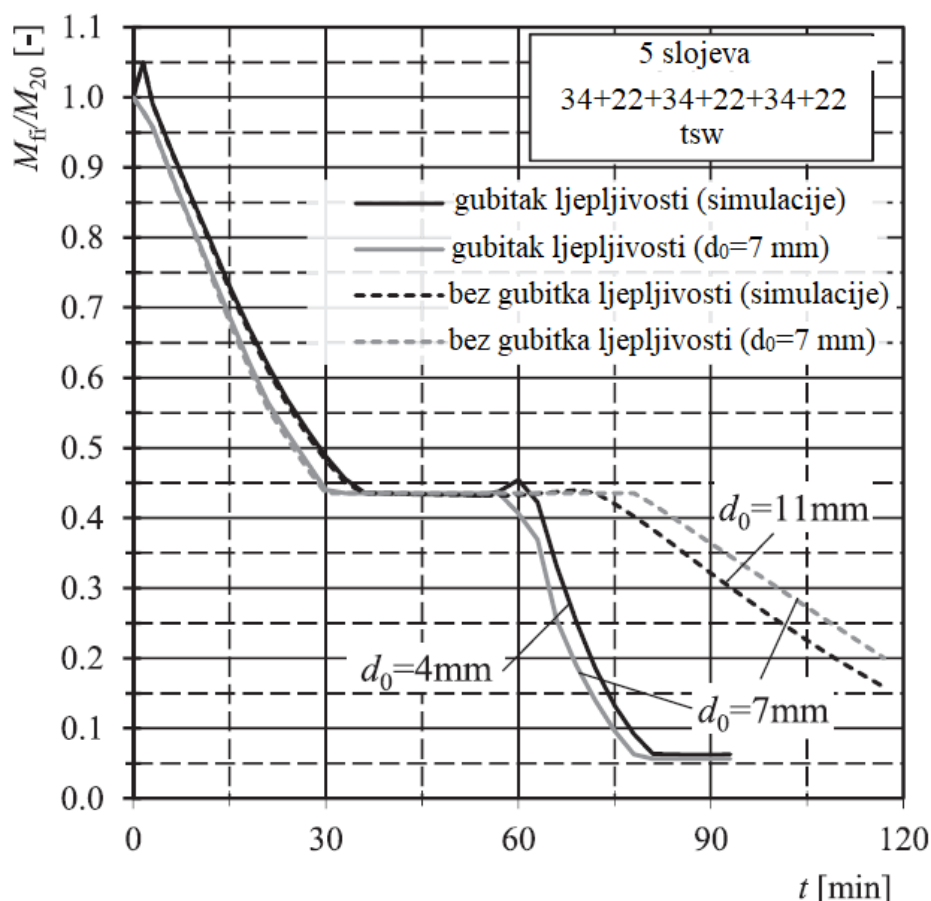
U istraživanju [5] CLT element bio je izložen standardnom požaru 60 – 130 minuta, a vrijeme između završetka testa i gašenja požara bilo je 90 sekundi. Nakon toga uklonjen je pougljeni sloj te su mjerene reducirane dimenzije poprečnog presjeka kako bi se utvrdila debljina pougljenog sloja. Ta je debljina podijeljena s vremenom izloženosti elementa požaru, kako bi se dobila brzina sagorijevanja. Rezultati mjerenja mogu se vidjeti u tablici 2.2.1. Može se vidjeti da je standardna devijacija brzine sagorijevanja najviše 9%, dok je najveća razlika srednje i maksimalne vrijednosti debljine pougljenja za test 02 čak 39.6 mm.

Tablica 2.2.1 Prikaz rezultata ispitivanja brzine sagorijevanja i debljine pougljenog sloja

Test	Vrijeme (min)	Vrijednost brzine sagorijevanja (mm/min)			Standardna devijacija	Debljina pougljenja (mm)			Broj točaka
		Max	Min	Srednja		Max	Min	Srednja	
01	60	0.98	0.58	0.77	0.09	58.8	34.8	46.2	206
02	120	0.98	0.46	0.65	0.09	117.6	55.2	78.0	206
03	120	1.08	0.88	1.0	0.04	129.6	105.6	120.0	206

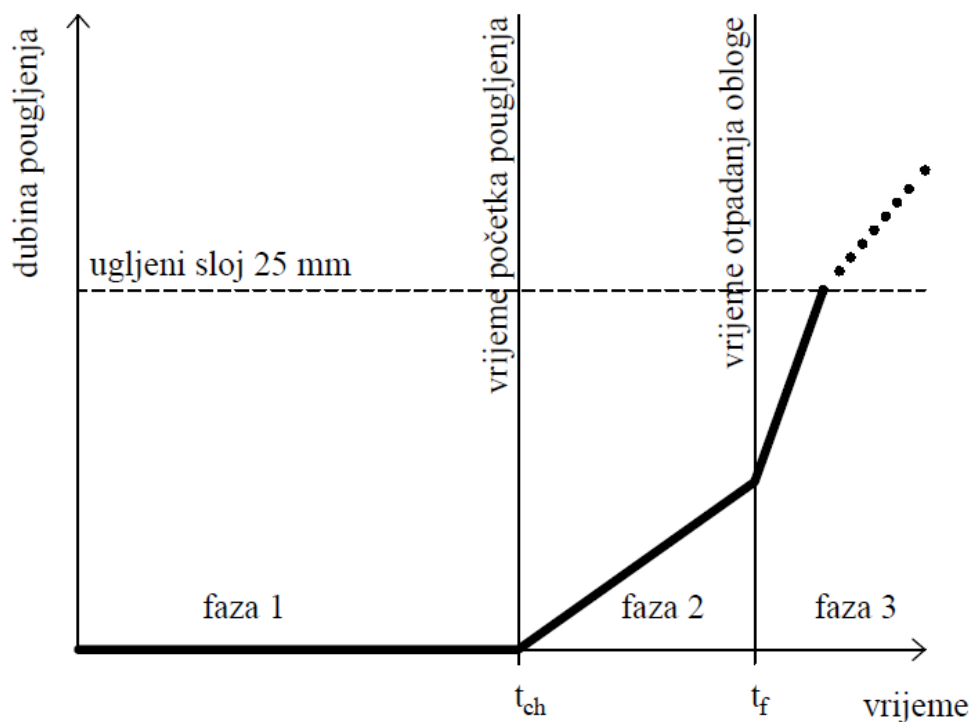
Na slici 2.2.9 je relativni kapacitet momenta savijanja M_{fi}/M_{20° crnom isprekidanom linijom. Simulacija je rezultirala da je sloj nulte čvrstoće 11 mm za CLT ploče, dok se prema EN 1995-1-2:2004 [9] uzima da je d_0 jednak 7 mm, što prikazano sivom isprekidanom linijom. Razlika između ovih dviju krivulja je precjenjivanje požarne otpornosti za otprilike 10 minuta. Krivulje prikazane punim linijama predstavljaju relativni kapacitet momenta savijanja

M_{fi}/M_{20° u slučaju otpadanja pougljene lamele. Uzimanje vrijednosti d_0 jednake 7 mm je konzervativno, jer bi odgovarajuća vrijednost za stvarni temperaturni profil bila 4 mm. Međutim, kako otpadanje pougljene lamele ne može biti zajamčeno, snižavanje vrijednost debljine sloja nulte čvrstoće tamo gdje se ne pojavljuje otpadanje te lamele nije preporučljivo.



Slika 2.2.9 Prikaz odnosa nosivost - vrijeme za petoslojni CLT element izložen požaru sa i bez otpadanja pougljenje lamele (gubitka ljepljivosti) [5]

Ako se CLT element zaštiti oblogama bit će spriječeno pougljenje na početku požara. Vidljivo je (Slika 2.2.10) da faza 2 ne nastupa odmah, nego nakon vremenskog odmaka označenog kao vrijeme početka pougljenja t_{ch} . Nakon što je dosegnuto vrijeme t_f , nastupa otpadanje obloge. Kada obloga otpadne, znatno je veći prirast brzine sagorijevanja (puna linija), nego u slučaju inicijalno nezaštićenog elementa (točkasta linija), što je vidljivo u fazi 3. Vremena pougljenja t_{ch} i otpadanja obloga t_f su stoga vrlo važna kao parametri za požarnu otpornost CLT-a. Ona ovise o debljini, gustoći i tipu zaštitnih materijala.



Slika 2.2.10 Faze zaštite drvenog elementa iza obloge

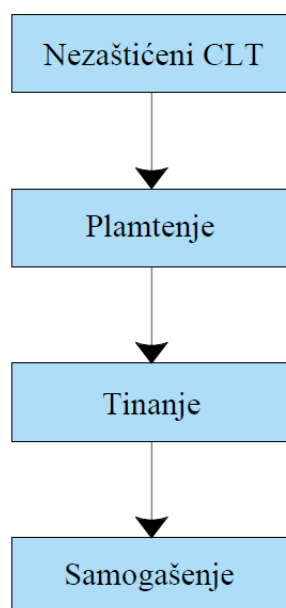
U novoj verziji EC-a početak pougljenja računat će se kao suma vremena zaštite primijenjenih obloga $t_{ch} = \sum t_{prot,i}$ gdje je ta suma zbroj vremena zaštite i -tih slojeva obloge i ovisi o debljini i gustoći materijala. Utjecaj prethodnog i pratećeg sloja uzet je u obzir koeficijentima položaja.

Ako se koristi jedan sloj gipsanih ploča tipa A, odnosno ploča koje nisu vatrootporne, pretpostavlja se da ne postoji zaštitna faza. To znači da se početak vremena pougljenja smatra jednakim vremenu otpadanja ploče. Međutim, primjenom više slojeva gipsanih ploča tipa A postoji jasno vrijeme između početka pougljenja i vremena otpadanja. Za izbjegavanje pougljenja mogu se koristiti ploče tipa K. Primjenjuju se najviše na nosivim strukturama, a definirane su za 10-, 30- ili 60-minutnu zaštitu [5].

2.2.5 Istraživanje samogašenja CLT-a

Za visoke se drvene konstrukcije kao materijal najčešće se odabire CLT pa se nameće pitanje požarne otpornosti zbog njegove zapaljivosti, dok arhitekti i investitori zahtijevaju što veću izloženost drvenih površina. Naime, temeljno je načelo požarne otpornosti da konstrukcija mora podnijeti izgaranje svega što može gorjeti unutar nje. Kako požar nastavlja trajati sve dok gorivi materijal postoji, a CLT gori, ne može sa sigurnošću biti rečeno hoće li sav CLT izgorjeti. Ako konstrukcija i dalje gori, ne može se očekivati da nosivost bude zadržana ili da bude pružena prihvatljiva funkcija razdvajanja, rezultat čega je otkazivanje i urušavanje konstrukcije. Stoga je glavno pitanje hoće li, kada sav gorivi materijal unutar konstrukcije nestane, CLT nastaviti gorjeti ili će se požar postepeno ugasiti?

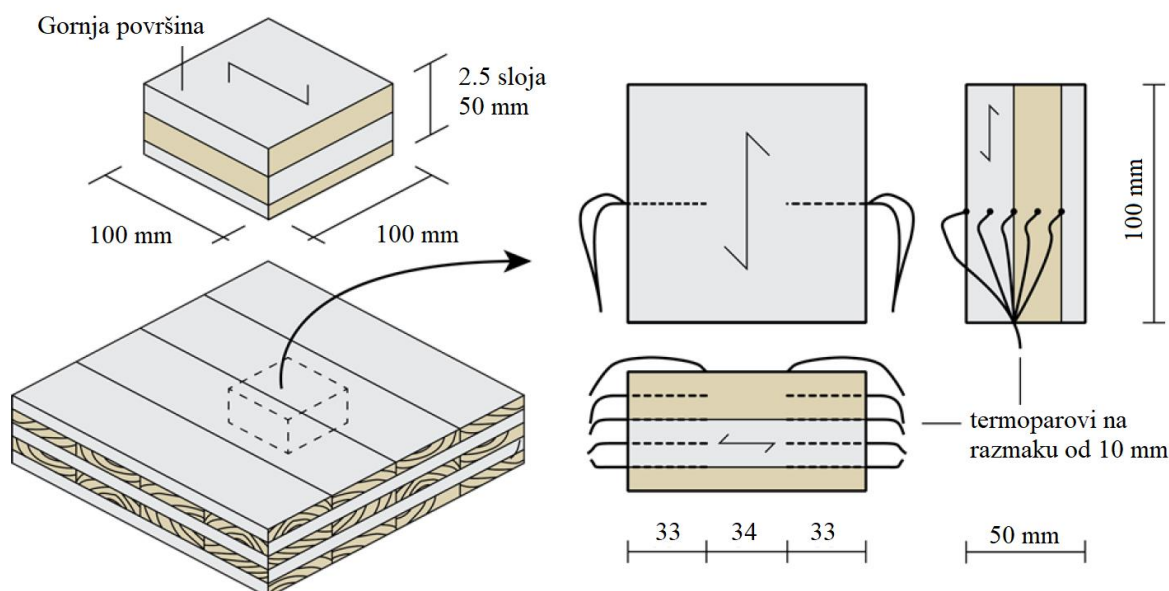
Samogašenje je pojam koji predstavlja postepeni prestanak gorenja CLT-a za čije je postizanje potrebno nekoliko koraka (Slika 2.2.11). Pod utjecajem "početnog" požara uslijed izgaranja sadržaja odjeljka, očekuje se sudjelovanje izložene CLT konstrukcije u izgaranju. Gašenje požara započinje nakon što se sadržaj odjeljaka većim dijelom potroši, što rezultira smanjenjem doprinosa CLT-a požaru, potičući njegovu transformaciju iz plamtenja u tinjajuće izgaranje. Nakon toga se CLT može transformirati iz tinjanja u samogasivo stanje. Ispitivanjima je utvrđeno kako na vrhuncu stope gubitka mase plamtenje doprinosi čak 60 % ukupnom gubitku mase, dok oksidacija pougljena doprinosi između 9 % i 12 % [49]. Provedena su dva niza eksperimenata kako bi se istražio model samogašenja i kvantificirali uvjeti pod kojima se ono može dogoditi [26].



Slika 2.2.11 Proces samogašenja CLT-a

2.2.5.1 Prvi niz eksperimenata

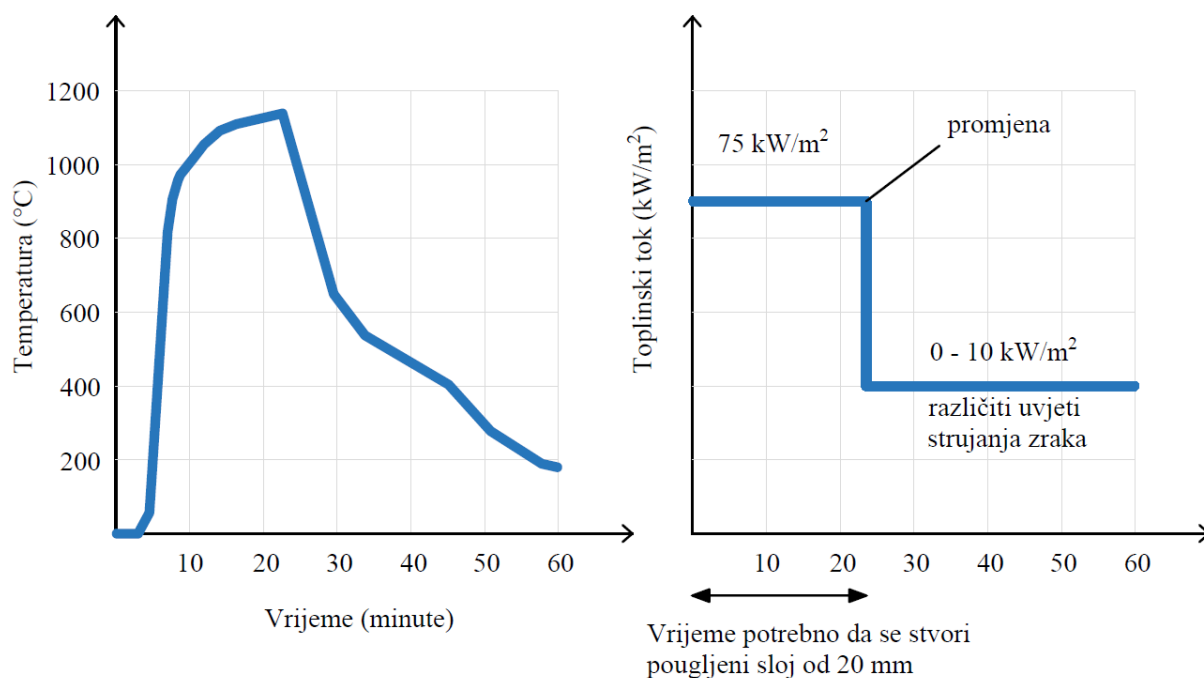
U prvom nizu eksperimenata [26] promatrali su se uvjeti toplinskog toka i protoka zraka kojima uzorak mora biti izložen kako bi došao u samogaseće stanje, ali bez mogućnosti delaminacije. Korišteni su mali uzorci veličine 100 mm × 100 mm × 50 mm koji su zapravo dio CLT ploče debljine 100 mm (Slika 2.2.12). Te su ploče izrađene od pet križno uslojenih lamela smreke, debljine 20 mm, razreda C24, zalijepljene poliuretanskim ljepilom. Na svakom su uzorku postavljeni termoelementi kako bi temperatura mogla biti očitana na udaljenostima 10, 20, 30 i 40 mm od gornje površine. Na taj se način određivala brzina sagorijevanja i razmatrana je mogućnost samogašenja.



Slika 2.2.12 Uzorci za prvi niz eksperimenata samogašenja CLT-a [26]

Ovakvi su uzorci bili izloženi toplinskom toku u dva koraka koji simuliraju stvarne uvjete izloženosti CLT-a pri požaru (Slika 2.2.13). Prvi toplinski tok od 75 kW/m² predstavlja potpuno razvijen požar. Zadržavan je na istoj razini sve dok pougljeni sloj ne dosegne debljinu od 20 mm, tj. kada termoelementi na toj dubini očitaju temperaturu približnu 300 °C. Nakon toga je uzorak izložen drugom, ovaj puta promjenjivom toplinskom toku između 0 i 10 kW/m², a u nekim slučajevima i dodatnom protoku zraka. Nagli skok u toplinskom toku predstavlja izgaranje cijelog sadržaja odjeljka, pri čemu preostaje samo zračenje svih vrućih predmeta unutar njega. Očekivano je da samogašenje započinje kada toplinski tok padne ispod određene granice. Smatralo se da je uzorak postigao samogašenje kada se izoterma od 300 °C ne bi više širila kroz uzorak i kada bi temperature bile ispod 200 °C te prilikom prestanka gubitka mase

uzorka, a da je uzorak izgorio kada bi termoelementi na dubini od 40 mm pokazivali temperaturu od 300 °C te onda kada bi uzorak konstantno gubio masu.



Slika 2.2.13 Pristup prvom nizu eksperimenata

Tijekom početne izloženosti toplinskom toku od 75 kW/m² uzorci počinju plamtjeti u roku od 10 sekundi. Temperature brzo rastu, no u dubljim slojevima razvoj temperature je sporiji, čime je dokazana pretpostavka da se drvo ponaša kao izolator topline. Nakon 5 minuta već je stvoren dovoljno debeo pougljeni sloj koji je stabilizirao početni strmi pravac gubitka mase i razvoja topline. Nakon 20-ak minuta temperature su na dubini od 20 mm prekoračile vrijednost od 300 °C pa se uzorak prebacio na izloženost drugom toplinskom toku, vrijednosti između 0 i 10 kW/m². Nakon minute uzorak prestaje plamtjeti i počinje tinjati. Granični toplinski tok pri kojemu se postiže samogašenje je od 5 do 6 kW/m². Ako bi uzorak pri toplinskom toku od 6 kW/m² bio izložen dodatnom protoku zraka od 0.5 m/s brže bi došlo do samogašenja, no dodatni protok zraka od 1.0 m/s doveo bi do intenzivnijeg tinjanja i izgaranja. Dakle, pri toplinskom toku manjem od 6 kW/m² i protoku zraka ograničenom na 0.5 m/s uzorak postiže samogašenje.

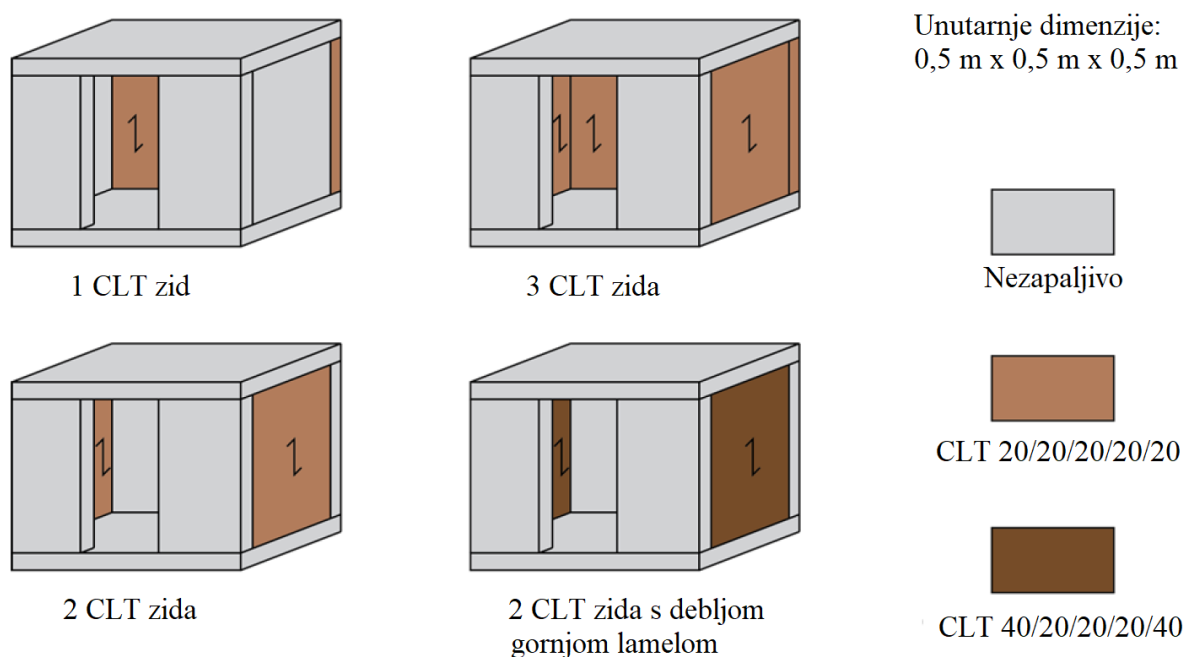
Kako su termoelementi postavljeni na četiri različite dubine u uzorku, u tablici 2.2.2 prikazane su brzine sagorijevanja na različitim dubinama u prvoj i u drugoj fazi eksperimenta. Kako bi se dobila brzina sagorijevanja i na dubinama od 30 mm i 40 mm, ti uzorci nisu prebačeni na niži toplinski tok [26].

Tablica 2.2.2 Vrijednosti brzine sagorijevanja na različitim dubinama uzorka od površine izložene požaru

Iznos toplinskog toka (kW/m ²)		Dodatni protok zraka u drugoj fazi (m/s)	Dubina (mm)			
Prva faza	Druga faza		10	20	30	40
75	75	-	1.67	0.78	0.7	0.67
75	10	-	1.67	0.78	0.20	0.28
75	8	-	1.67	0.78	0.16	0.21
75	6	-	1.67	0.78	0.15	-
75	0 - 10	1.0	1.67	0.78	0.48	0.56

2.2.5.2 Drugi niz eksperimenata

U drugom nizu eksperimenata istražen je model samogašenja, uključujući utjecaj delaminacije, odnosno otpadanja pougljenog sloja. Uzorci su bili oblika malih odjeljaka dimenzija 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m s otvorom širine 0.18 m po cijeloj visini. Pod, strop i prednja strana bili su izrađeni od nezapaljive ploče debljine 20 mm, dok su stražnji i bočni zidovi bili izrađeni ili od CLT elemenata ili od nezapaljivih ploča (Slika 2.2.14).

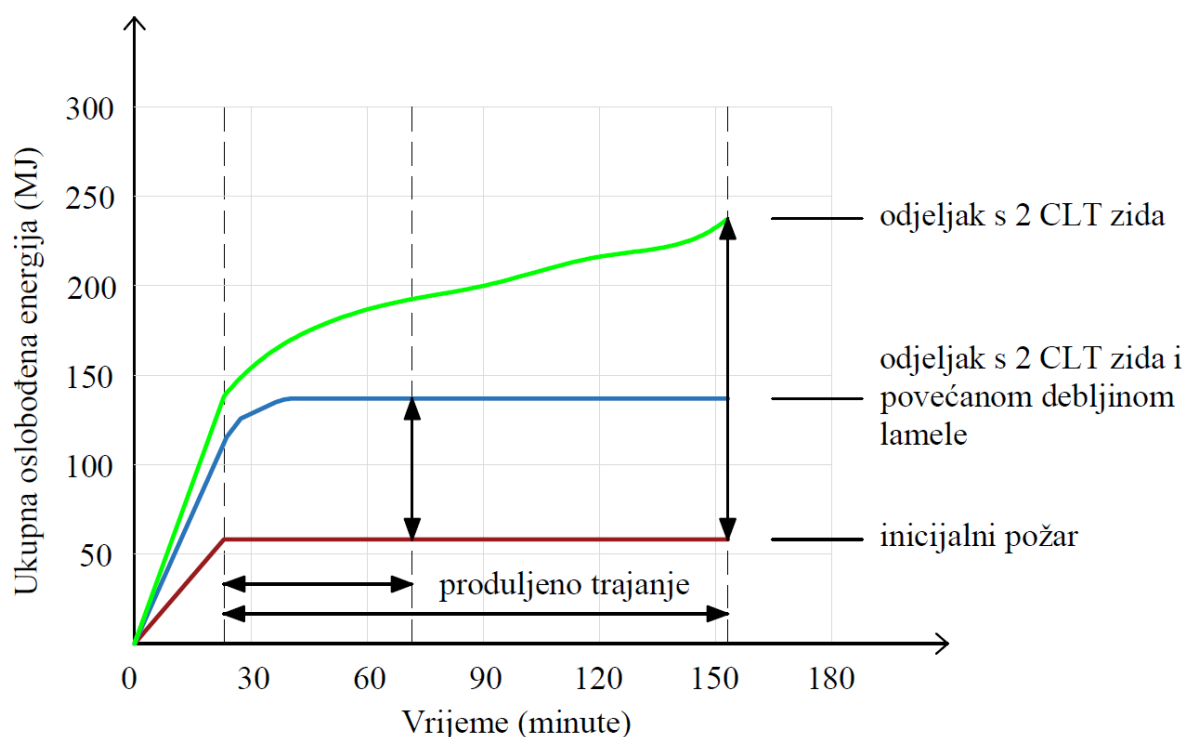


Slika 2.2.14 Uzorci za drugi niz eksperimenata samogašenosti CLT-a [26]

Odjeljak je bio izložen početnom požaru sve dok uzorci ne bi pougljenili do stupnja koji se očekuje u stvarnom požaru, što iznosi 20 mm, nakon čega je požar zaustavljen. To predstavlja iscrpljenje početnog požarnog opterećenja. Očekivalo se da će CLT neko kraće vrijeme tinjati te se onda ugasi. Ako bi otpala lamela, CLT element bi ponovno počeo plamtjeti, a nastavio bi tinjati, ako je toplinski tok bio dovoljno visok. Zato su izrađeni odjeljci s različitim brojem CLT zidnih elemenata jer svaki takav element, nakon iščezavanja početnog požara i dalje zrači

toplinu, koja može biti dovoljno velika da uzrokuje nastavak tinjanja. Pomoću termoelemenata očitavala se temperatura na raznim dubinama, kako bi se moglo odrediti u koje vrijeme zaustaviti početni požar te odrediti je li se uzorak ugasio ili izgorio, kao u prvom nizu eksperimenata.

Za lamele debljine 20 mm, odjeljci s dva ili tri CLT zida nisu postigli samogašenje zbog ponovnog plamtenja izazvanog otpadanjem lamele, dok se u odjeljku s jednim CLT zidom postiglo samogašenje. Kada su bili postavljeni zidovi s gornjom lamelom debljine 40 mm, otpadanje lamele nije se dogodilo te je postignuto samogašenje. U ovom radu [26] pokazan je doprinos CLT elementa ukupno oslobođenoj energiji u požarnom odjeljku te trajanju požara (Slika 2.2.15). Vidljivo je da je doprinos značajan, a dodatno se povećava otpadanjem lamele.

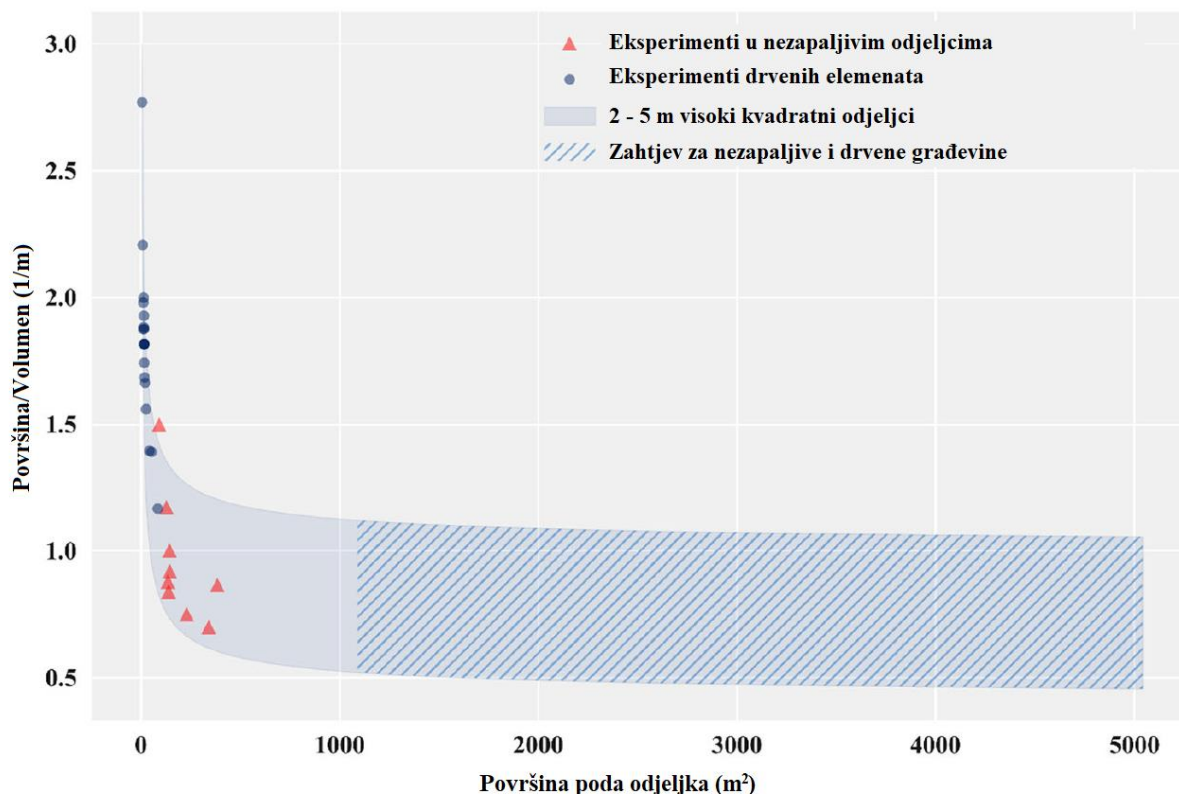


Slika 2.2.15 Razlika ukupno oslobođene energije

Prosječna brzina sagorijevanja za prvih 20 mm elementa bila je 0.76 mm/min, što je veće od brzine pougljenja od 0.65 mm/min propisane u EN1995-1-2 [9]. To se pripisuje relativno intenzivnom početnom požaru izazvanom u odjeljcima u usporedbi sa standardnim požarom. U onim odjeljcima u kojima nije postignuto samogašenje brzina izgaranja prosječno je iznosila 0.77 mm/min, što je ponovno veće u odnosu na vrijednost u normi, no pripisuje se povećanju pougljenja zbog delaminacije [26].

2.2.6 Požarni odjeljci većih dimenzija otvorenog tipa

Današnja ispitivanja u požarnim odjeljcima za drvene elemente ograničena su veličinom. Većina odjeljaka odgovara dimenzijama prosječne hotelske sobe, dok su sve veći zahtjevi za velikim otvorenim prostorima s izloženim drvenim elementima, primjerice uredski prostori. Rackauskaite i sur. [50] u svom istraživanju pokazali su (Slika 2.2.16) nesklad između danas dostupnih ispitivanja u požarnim odjeljcima te visokih zgrada koje se projektiraju.



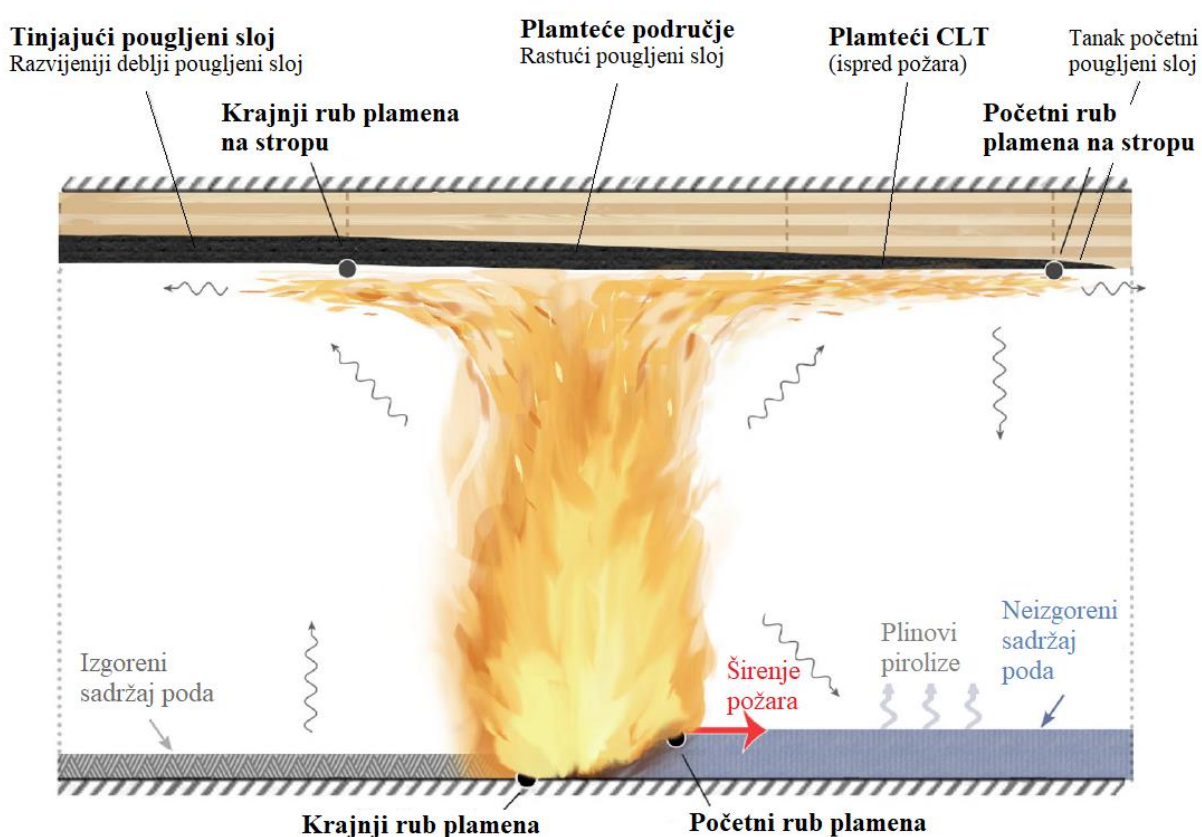
Slika 2.2.16 Usporedba odnosa površina/volumen drvenih i nezapaljivih odjeljaka, unutar kojih su provedena dosadašnja ispitivanja, s trenutnim zahtjevima za visoke građevine od negorivih materijala i drveta [50]

Ova slika predstavlja porast omjera površine odjeljka i volumena s povećanjem površine poda odjeljka. Što je veći omjer, to je veća vjerojatnost da će se „flashover“ razviti unutar zatvorenog prostora zbog povećanog zračenja zidova. Otvoreni prostori (1000 – 4000 m²) za trenutno predlagane drvene zgrade su od 10 do 55 puta veći od drvenih odjeljaka za koje postoje rezultati ispitivanja. Očekuje se da je za njih dinamika požara kompleksnija i drugačija u odnosu na ove manje odjeljke.

U velikim otvorenim odjeljcima promatrani su požari koji „putuju“, odnosno gore lokalizirano te se zatim šire duž odjeljka. U prošlom desetljeću razvile su se metodologije za uzimanje u obzir ovakvih požara i sada su prihvaćene za projektiranje, ali nijedna ne uzima u obzir odjeljke s izloženim drvenim elementima. Oni kao takvi doprinose gorivom materijalu i

povećavaju oslobađanje topline u odjeljku, što značajno utječe na sam tijek požara. Uz to, dodatan učinak ima i delaminacija te ponašanje drveta prilikom gašenja i tinjanja. Zato se nijedna od tih razvijenih metodologija ne može primijeniti na drvene konstrukcije te su potrebna dodatna istraživanja.

Dan je primjer (Slika 2.2.17) jednog takvog „putujućeg“ požara. Svaka metodologija koja uključuje konstrukciju s izloženim drvenim stropom morala bi uzimati u obzir širenje požara duž stropa. Također bi se trebala uzeti u obzir razlika položaja početnih i krajnjih rubova plamena na stropu u odnosu na one na podu. Uz to postoji mogućnost da se drvo zapali i ispred fronte plamena na podu [50].



Slika 2.2.17 Prikaz „putujućeg“ požara u odjeljku otvorenog koncepta s izloženim drvenim stropom [50]

2.3 Zaštita drvenih konstrukcija u požaru

Prilikom požara se na drvenim elementima stvara pougljeni sloj, koji je prirodna zaštita od požara, pa bi određena razina vatrootpornosti mogla biti postignuta primjenom elemenata većeg poprečnog presjeka, prema proračunu iskoristivosti nosivosti ili uporabivosti. Međutim, ovakav način požarne zaštite nije uvijek prikladan. Stoga su razvijene mjere zaštite od požara koje se mogu podijeliti u aktivne i pasivne. Aktivne mjere zaštite od požara uključuju opremu i instalacije čije je djelovanje povremeno, odnosno aktiviraju se nakon što se požar detektira. Jedan od primjera su ručni ili automatski uređaji za gašenje požara koji se koriste za suzbijanje požara u prostorijama u početnim fazama [30]. Kategoriji sustava aktivne zaštite od požara pripada sprinkler sustav (Slika 2.3.1) kojim se, prema tablici 2.1.1, može za jednu klasu povećati reakcija na požar.



Slika 2.3.1 Sustav sprinklera kao aktivna zaštita od požara [51]

S druge je strane pasivna zaštita od požara za koju se podrazumijeva kontinuirano i nepromijenjeno djelovanje tijekom uporabe samog objekta. Između ostalog, u sustav pasivne zaštite spadaju razne obloge i premazi. Jedan je način impregnacija drva usporivačima požara ili premazivanje požarno otpornim premazima. Iako brojni premazi omogućuju značajnu zaštitu drva od požara, osjetljivi su na mehanička oštećenja pa su proučavani brojni pristupi potpune impregnacije drva s usporivačima požara. Izazov razvoja prikladnog usporivača požara leži u brojnim zahtjevima njegovih svojstava. Mora biti trajan, odnosno ne smije doći do pogoršanja izdržljivosti ili mehaničkih svojstava, ne smije biti toksičan i doprinositi stvaranju dima te mora biti otporan na ispiranje pri korištenju na vanjskim ploham. Neke vrste usporivača požara sprječavaju izgaranje na način da oslobađaju inertni plin koji razgrađuje prethodno zapaljivu

smjesu plina, odnosno smanjuje se koncentracija kisika u zoni dodira s drvom, koji je potreban za izgaranje. S druge su strane oni usporivači požara koji potiču stvaranje pougljenog sloja, koji je zapravo prirodan način zaštite drva od požara jer smanjuje prodor kisika i topline u unutrašnjost, odnosno u područje netaknutog drveta. U tablici 2.3.1 dan je pregled elemenata na čijoj su bazi napravljeni do sada korišteni usporivači požara te su dane njihove glavne karakteristike [52].

Tablica 2.3.1 Pregled elemenata na čijoj su bazi napravljeni usporivači požara te njihove glavne karakteristike

Baza usporivača požara	Karakteristike
Bor	Stvaranje zaštitnog sloja koji smanjuje prijenos topline, kisika i zapaljivih plinova Ispuštanje vode kristalizacije Štetnost za reproduktivni sustav
Halogeni elementi	Najčešće brom i klor Reduciraju toplinu Smanjuju širenje plamena Moguće bromiranje drva čime se povećava otpornost na ispiranje Štetnost zbog akumulacije elemenata u tijelu i okolini
Dušik	Razrjeđuje zapaljivi plin čime smanjuje koncentraciju kisika i reducira izgaranje Snižava temperaturu
Kombinacija dušika i fosfora	Ubrzavanje pougljenja čime se stvara zaštitni sloj Djelotvornost fosfornog spoja proporcionalna kiselosti, no veća kiselost reducira mehaničku stabilnost Učinkovitost organskih kemikalija fosfora
Hidroksidi i karbonati	Najčešće magnezij i aluminij Njihova endotermna razgradnja hladi drvo čime usporava proces izgaranja Oslobađanje CO ₂ ili vode čime se razrjeđuju zapaljivi plinovi Stvaranje zaštitnog sloja od ostataka oksida U kombinaciji sa silanima smanjeno ispiranje kalijevog karbonata
Silikati	Usporavanje požara punjenjem lumena nezapaljivim materijalom Prodiranjem u materijal stvaraju zaštitni sloj u slučaju povišenih temperatura

Još jedna podjela usporivača požara je na organske i na topive u vodi. Organski topive impregnacije prodiru duboko u drvo, čime se postiže najbolji učinak. Usprkos tome, velik im je nedostatak što se sastoje od otapala koja su lako zapaljiva pa se koriste samo u proizvodnim pogonima. Uz to imaju nisku ekološku prihvatljivost jer mogu biti štetni za zdravlje pa se ne primjenjuju u stambenim prostorima. S druge su strane vodotopive impregnacije koje se najčešće koriste za stambene prostore jer se brzo suše, nemaju miris i ne štete zdravlju. Njihov je nedostatak što prodiru samo u površinski sloj drva i štite površinski te nemaju svoj učinak ako je konstrukcija u čestom kontaktu s vlagom [53]. Kada su izloženi velikoj vlazi, usporivači požara počnu migrirati iz unutrašnjosti drva prema njegovoj površini i u konačnici mogu u

potpunosti ispariti. Ovaj učinak najviše dolazi do izražaja na vanjskim ploham na kojima je obnovu ove vrste zaštite potrebno činiti svakih desetak godina [5]. Kako bi se spriječilo isparavanje usporivača požara pri povećanoj vlazi, preporuča se korištenje vodootpornih premaza kao dodatnog završnog sloja. Drugi je način povećanja otpornosti na vlagu dodavanje organskih i organoelementarnih tvari niske viskoznosti i vodoodbojnih svojstava u impregnacijske smjese [30].

Nedavna istraživanja pokazuju kako je kombinacija fosfora i dušika najprimjerenija za usporivače požara. Novim tehnologijama moguć je razvoj tretmana atmosferskom plazmom, odnosno impregnacije plazmom. Sljedeći prirodni pristup drvu kao materijalu, usporivači požara na bio bazi mogu biti održiva opcija u budućnosti [52]. Razvoj prikladnih usporivača požara važan je jer omogućuje prelazak u dvije stepenice veću klasu reakcije na požar prema tablici 2.1.1, a omogućuje i veliku estetsku prednost ostavljanjem drvenih ploha izloženima (Slika 2.3.2).



Slika 2.3.2 Primjena usporivača požara [54]

Druga je pak mogućnost korištenje protupožarnih ploča ili drvenih obloga koje formiraju zaštitne membrane. Zaštita koju pružaju negorivi paneli ovisi o nekoliko međusobno povezanih svojstava: toplinskoj izolaciji, sposobnosti ploče da se ne raspadne ili ne otpadne nakon dehidracije, otpornosti na skupljanje, sposobnosti osnovnog materijala da se odupire otklanjanju s površine izložene požaru tijekom ekstremne izloženosti. Zaštitno vrijeme je korišteno da se uzme u obzir i doprinos materijala funkciji razdvajanja. Otpadanje ploče obloge

ovisi o položaju i duljini pričvrstnih sredstava i termalnoj degradaciji same ploče. Sidrena duljina pričvršćivača u nepougljeno drvo može biti jednostavno izračunata korištenjem dubine pougljenja. Granična duljina sidrenja u nepougljeno drvo je 10 mm i pretpostavlja se da kao takva osigurava da ploča ne otpadne za zahtijevano vrijeme požarne zaštite [5]. Dodatno je za povećanje izolacijskog učinka moguće umetanje i izolirajućeg sloja od kamene, mineralne ili staklene vune [55]. Povećanjem broja slojeva ili debljine obloge povećava se požarna otpornost drvene konstrukcije. Najčešće su korištene ploče na bazi cementno-silikatnih veziva, vermikulitne ploče na bazi tekućeg stakla, negorive ploče od bazaltnih vlakana i ploče kamene vune [30].

Primjer je kalcij-silikatna ploča tvrtke PROMAT (Slika 2.3.3) dostupna u debljinama od 12 mm do 30 mm, koja se prema tablici 1 svrstava u klasu A1, odnosno u požaru se ponaša kao negorivi materijal.



Slika 2.3.3 PROMAT protupožarna ploča CLT

CLT (eng. Cross Laminated Timber) je kruti pločasti sustav sastavljen od uglavnom neparnog broja slojeva (3, 5 ili 7) (Slika 2.3.4). Svaki se sloj sastoji od lamela položenih jedna do druge, dok su lamele svakog sloja međusobno okomite, odnosno pod kutom od 90° . Ovakva mu struktura omogućuje veliku krutost i nosivost u ravnini i okomito na ravninu elementa zbog čega se sve više primjenjuje u gradnji drvenih konstrukcija. Uz to mu je velika prednost i jednostavnost uporabe [56].

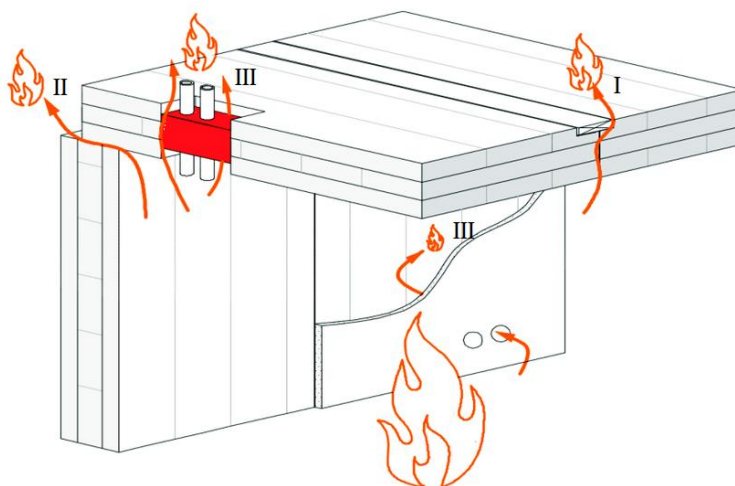


Slika 2.3.4 Križno lijepljeno lamelirano drvo (CLT) [57]

Uporabom CLT elemenata postižu se vrlo dobre funkcije razdvajanja i nosivosti što su dva vrlo bitna svojstva prilikom požara. Prema klasifikaciji reakcije na požar, danoj u tablici 2.1.1, CLT sustav može biti klasificiran kao D-s2,d0, dok je vrijeme otpornosti na požar uobičajeno 120 minuta.

Kako bi bila postignuta što bolja funkcija razdvajanja, odnosno kako bi širenje požara unutar građevine te na okolne objekte bilo spriječeno, potrebno je prilikom projektiranja obratiti pozornost na detalje spojeva elemenata. Za građevine od CLT-a mogu se identificirati tri načina širenja plamena [5], a to su (Slika 2.3.5):

- I. spojevi u i između elemenata,
- II. spojevi u kutnim i drugim priključcima građevine te
- III. spojevi zbog servisnih instalacija i prodora.



Slika 2.3.5 Putevi širenja plamena za građevine koje koriste CLT elemente [5]

Ponašanje CLT-a i GLT-a prilikom sagorijevanja može biti znatno drugačije od ponašanja piljene građe. Razlog leži u slojevitoj lijepljenoj strukturi i spojevima između dasaka što može dovesti do lokalnog povećanja pougljenja koje je kod ovakvog pločastog elementa zanemarivo pa je vrlo pogodan za ispitivanje varijabilnosti pougljenja. Pougljenje može biti mjereno nakon požarnog testa pri čemu treba paziti da vrijeme između prestanka i gašenja požara bude svedeno na minimum, kako bi se reduciralo pougljenje u nekontroliranim uvjetima. Drugi je način određivanje brzine izgaranja mjerenjem temperature pomoću termoelemenata. Ovdje je pozornost važno posvetiti broju i rasporedu žica za mjerenje. Kako je drvo slabo provodljiv materijal, a mjerenja se rade s provodljivim metalnim sensorima, ti senzori moraju biti orijentirani paralelno s izotermama kako ne bi došlo do odstupanja prilikom mjerenja [5].

2.4 Metoda konačnih elemenata (MKE) u drvenim konstrukcijama

U posljednje vrijeme, povećan je broj ispitivanja drvenih elemenata u požaru u velikom i malom mjerilu, ali numerički modeli izrađeni su samo za mali broj testiranih elemenata. Paralelno sa eksperimentalnim ispitivanjem, razvijaju se i napredne metode proračuna. Uvidom u stanje područja vidljivo je da je numeričko modeliranje provedeno s nekolicinom komercijalnih softverskih paketa, ali upute i izvješća nisu opsežna i detaljna. Općenito, izračunate deformacije, vrijeme otkazivanja i modovi loma prilično su se slagali s eksperimentima, ali neki specifični fenomeni poput klizanja između lamela ili delaminacije elemenata još uvijek nisu istraženi. Sve to upućuje da područje numeričkog modeliranja drvenih elemenata u požaru i dalje nudi brojne mogućnosti za daljnji razvoj. U uputstvima COST akcije FP1404 [58] dani su postupci numeričkog modeliranja TCC konstrukcije s različitim komercijalnim programskim paketima; ANSYS, SAFIR, COMP - WOOD i ABAQUS. Uz to, na kraju svakog odjeljka dan je kratki sažetak koji uključuje preporuke, smjernice i uobičajene pogreške za numeričko modeliranje odgovarajućim programskim paketom, kako bi se omogućila lakša uporaba za istraživače, studente i inženjere. Što se tiče SAFIR-a, posebnu pažnju treba obratiti na veličinu mreže konačnih elemenata u termalnoj analizi koji uvelike utječu na rezultate proračuna, dok se simulacija u COMP-WOOD programskog paketa treba temeljiti na detaljnom fizičkom opisu svi konstitutivnih elemenata. Nadalje, toplinska svojstva drva mogu se uzeti u skladu sa EC standardima [9], dok se za drvo pri vlačnom i tlačnom naprezanju preporuča uporaba bi-linearnog modela [59]. U Abaqusu pak treba uzeti u obzir termo-mehaničke rubne uvjete i opterećenja, kako bi se pravilno procijenile očekivana nosivost datog sustava. Ključnu ulogu predstavlja uporaba kohezivnih kontakata, u cilju što vjernije reprodukcije mehanizama loma. Jedan u glavnih problema je simulacija ponašanja ljepila pri povišenim temperaturama. Također je važno napomenuti da su proračuni za raspodjelu temperature iza pougljenog sloja, pokazali nižu temperaturu od temperature izračunate pomoću jednadžbe prijenosa topline.

Werther i sur. dali su pregled stanja područja [60] vezano za modeliranje drva u požaru sa različitim programskim paketima. Usporedba je napravljena između Ansys-a, Abaqus-a i Safira gdje je proučavan je utjecaj veličine mreže konačnih elemenata, vremenskog koraka i dvaju pristupa modeliranju utjecaja vlage na točnost modela. U SAFIRU je napravljena analiza konstrukcija pod ambijentalnim i povišenim temperaturama, a toplinske i mehaničke karakteristike materijala su već dostupne, no moguća je i samostalna izmjena. ANSYS rješava strukturalne probleme, dinamiku fluida, akustične, termodinamičke i elektro-magnetne

probleme te njihovu kombinaciju, a za toplinsku i strukturalnu analizu unose se materijalne karakteristike i uvjete prijenosa topline, opterećenja, geometriju, veličinu mreže konačnih elemenata, svojstva elementa i algoritme rješenja. Potrebno je vrlo iscrpno razumijevanje pozadine softwera i sistema koji se modelira. ABAQUS-u se može provesti jednostavna analiza prijenosa topline, a da se ne zahtijeva posebno specificiranje mnogih fizikalnih pojava poput izgaranja i pougljenja drva. Fenomeni poput migracije vlage, stvaranja ugljena, skupljanja i pucanja pougljenog sloja predstavljaju se prilagodbom efektivnih vrijednosti umjesto korištenjem stvarnih izmjerenih svojstava materijala koji bi zahtijevali komplicirane algoritme – velik napor za unos podataka. Utjecaj temperature na ponašanje uzorka implementiran je u alate programskih paketa definiranjem materijala preko njegovih termofizičkih parametara koji upravljaju postupkom provođenja topline. U sva tri programska paketa termalne karakteristike implementirane su dvjema odvojenim postupcima koji su različito razmatrali uključivanje početnog sadržaja vlage. Češći pristup je pomoću toplinske vodljivosti, specifične topline i gustoće s implicitnim razmatranjem sadržaja vlage od 12 % u funkciji gustoće kao topline isparavanja. Specifični toplinski kapacitet definira se kao količina topline koja je potrebna jediničnoj masi tvari za promjenu temperature od 1 °C, a jedinica je (kJ/kgK). U slučaju drva postoji maksimum u zabilježenim vrijednostima specifične topline, najčešće uzetog između 99 °C i 120 °C. Na taj način uzima se u obzir latentna toplina isparavanje vode iz drveta. Alternativno se sadržaj vlage može eksplicitno smatrati kao latentna toplina ili entalpija za sadržaj vlage koji je odredio korisnik. U ANSYS-u i ABAQUS-u unose se karakteristike materijala ručno, dok se u SAFIR-u ova značajka automatski implementira. Pokazalo se da povećanjem veličine mreže konačnih elemenata dolazi do odstupanja u rezultatima u različitim programskim paketima. Odstupanje je najizraženije za raspon temperatura od 100 do 500 °C i više na malim dubinama, u usporedbi s dubljim područjima unutar presjeka. Povećanje veličine mreže konačnih elemenata (1 mm do 6 mm) rezultiralo višim temperaturama za ANSYS i nižim temperaturama za ABAQUS u temperaturnom rasponu 100 - 150 °C. To pokazuje da različite tehnike rješavanja prisutne u svakom programu utječu na rezultate simulacije. Međutim, sve temperature su prihvatljiva aproksimacija stvarnih rezultata požarnih ispitivanja. Utjecaj veličine vremenskog koraka je također analiziran. Kada je porast temperature velik, potrebni su manji koraci za osiguranje konvergencije. Daljnje istraživanje pokazalo je da se vremenski koraci do 480 s mogu koristiti bez značajnog gubitka u točnosti. Neznatne razlike bile su najzastupljenije u ranoj fazi izloženosti požaru, gdje je porast temperature bio brz. Konačno, izbor programskog paketa može utjecati na izračun brzine pougljenja, ovisno o željenom vremenu otpornosti na požar. Pri numeričkoj simulaciji protoka

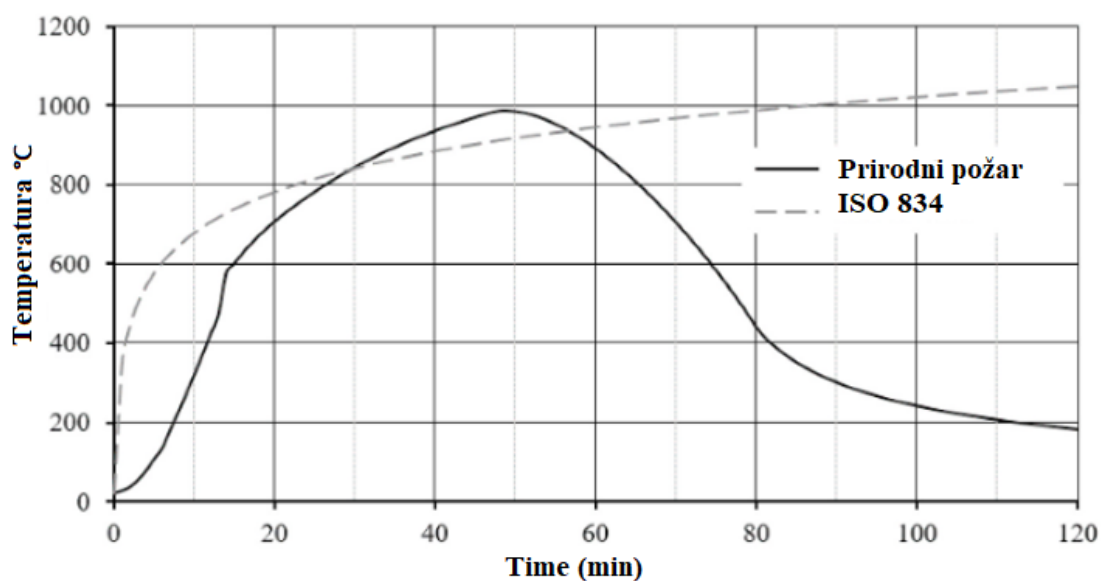
topline (1D) s veličinom mreže 6 mm i pristupom k - ρ - c pokazuje da ANSYS daje rezultate o dubini ugljena od 21 mm pri 30-minutnoj izloženosti požaru, dok ABAQUS pokazuje dubinu pougljenja od 24 mm. Nakon 60 minuta dubine pougljenja razlikuju se za oko 1 mm. Ovo odstupanje nestaje s malim veličinama mreža i povećanjem protoka topline.

Prilikom istraživanja drvenih kompozitnih sustava pri požaru [61], vidljivo je da iako sustavi rebrastih ili sandučastih ploča s oblogom podnose veća opterećenja, zbog redukcije veličine elemenata, imaju lošije ponašanje u požaru. Proračun metodom efektivnog poprečnog presjeka prema EC5 [9] dao je dobre rezultate u usporedbi s ispitivanjem. Ipak, numeričko modeliranje je poželjno za kompleksnije probleme jer su ispitivanja skupa i zahtijevaju puno rada. U studiji je napravljeno modeliranje u ABAQUS-u postepeno nadograđujući model od 1D do 3D sustava, a za potvrdu su korišteni ANSYS i SAFIR. Prvo je provedena termalna analiza da se dobije temperaturni profil, a zatim analiza naprezanja koristeći temperaturni profil kao ulazni podatak u strukturalni model. Ovo je moguće jer su naprezanja u drvu ovisna o temperaturnom profilu, no obrat ne vrijedi; temperaturni profil neovisan je o naprezanjima pa se može izvesti kao zaseban korak. Prilikom modeliranja uzete su u obzir fizikalne i kemijske promjene koje nastaju prilikom izgaranja drva, poput kretanja vlage, pougljenja i skupljanja. Te efektivne vrijednosti također obuhvaćaju mnoge učinke drugog reda i omogućile su pojednostavljeno modeliranje prijenosa topline kroz drvo, a daju dobru aproksimaciju stvarnog ponašanja drva. Drvo se u vlaku ponaša krto, a u tlaku pokazuje elasto-plastično ponašanje. Utvrđeno je da se u ovoj fazi modeliranja predviđanje požarne otpornosti dobro poklapa s eksperimentalnim rezultatima.

Ponašanje tradicionalnog spoja lastinim repom u požaru proučavali su Regueira i sur., gdje su pokazali da pri požaru drveni elementi doživljavaju termalnu degradaciju koja transformira materijal [62]. U numeričkoj analizi, termalne karakteristike materijala preuzete su iz Annexa B, EC5 [9]. Mreža konačnih elemenata definirana je u obliku kvadratnih elemenata, s 8 čvorova i jednim stupnjem slobode (temperaturnim). Veličina konačnog elementa varirala je od 8 mm u središtu tijela do 2 mm u zonama klina i utora, gdje je primijenjeno automatsko prilagođavanje mreže, dok su kontakti između greda definirani su kao lijepljeni. Toplinska djelovanja zadana su kao toplinski tok koji je zbroj konvekcije i radijacije. Za strukturalni model uzeto je u obzir ovisnost modula elastičnosti i čvrstoće o temperaturi, dok Poisson-ov koeficijent, modul posmika i koeficijent trenja ne ovise o temperaturi. Zanimljiv zaključak je da se rezultati dobiveni toplinskim modelom vrlo malo mijenjaju ako se mijenja metodologija mreže, međutim razlikuju se prilično ako se promijeni formulacija kontakata.

Modeliranje ponašanja CLT-a u požaru koristeći ABAQUS moguće je koristeći vremenski i prostorno ovisan toplinski tok za 2D i 3D probleme [63]. Uz to, korištenje potprograma *Umatht* za definiranje termalne konstitutivne jednačbe zahtjeva sljedeće varijable; unutarnja toplinska energija po jedinici mase „ U “, varijacija „ U “ s obzirom na temperaturu, varijacija „ U “ s obzirom na prostorne gradijente temperature, vektor toplinskog toka $q=-f.n$, varijacija „ f “ s obzirom na temperaturu. Ovako izrađen model pokazuje dobro poklapanje razvoja temperatura i pougljenog sloja s eksperimentalnim ispitivanjem.

U svojoj studiji [64] Szasz i sur. su analizirali ponašanje spojeva u drvenim elementima pri požarnom opterećenju. U analizi su korištena dva različita požarna opterećenja (Slika 2.4.1), prirodna krivulja požara kreirana programskim paketom „Ozone“ i standardna krivulja požara (ISO 834). U zadnjoj fazi modificirani su ulazni parametri i definiran je njihov utjecaj na rezultate. Na temelju analize procijenjen je učinak primijenjene krivulje požara na dimenzije drvenog elementa. Simulacije su pokazale da je prirodna krivulja požara koja je kreirana u skladu sa stvarnim parametrima i nižim temperaturama u ranim fazama požara, rezultirala većom otpornošću gdje je gotovo udvostručilo izračunate dobivene prema EC5 [9]. Standardi dopuštaju upotrebu ovih vrsta krivulja, a rezultati su pokazali da postoje slučajevi kada to može biti učinkovitiji način za projektiranje drvenih konstrukcija u požaru. To možda nije uvijek slučaj, jer se požarna opterećenja razlikuju ovisno o konstrukciji i samoj uporabi, ali ovo istraživanje pokazuje primjer takvog slučaja, kako bi se povećala svijest među inženjerima. Iako su simulacije s krivuljom požara ISO 834 nužne prilikom usporedbe ili optimizacije proračuna, upotreba specifičnih krivulja požara može biti nužna u nekim slučajevima kada je smanjenje težine ili troškova presudno.



Slika 2.4.1 Prirodna i ISO 834 požarna krivulja

U svom istraživanju [65] Abu i sur. opisuju analize koje provode na sekvencijalnom modelu kompozitnog drvenog poda izloženog požaru. Za drvo su definirana odgovarajuća toplinska svojstva, koja su određena eksperimentalnim rezultatima. Utvrđeno je da se numeričkim modeliranjem dobro predvidjelo deformiranje sustava, ali model je bio konzervativan pri predviđanju vremena otkazivanja. Zaključeno je da modifikacije materijalnih karakteristika u ulaznim podacima, poput smanjenja vlačne čvrstoće pri povišenim temperaturama, imaju značajan utjecaj na rezultate modeliranja.

Objavljeni su neki vrlo detaljni radovi u vezi s požarnim ispitivanjem i modeliranjem drvenih spojeva pomoću kapaciteta super-računala [66], gdje su predložene nove formule za predviđanje požarne otpornosti [67]. Novi cilj istraživača postao je korištenje umjetne inteligencije (AI) za procjenu otpornosti na požar [68]

U svom radu [69], Racher i sur. su izradili trodimenzionalni model konačnih elemenata koji je razvijen za analizu ponašanja spojeva trnovima u drvenim konstrukcijama. Ovaj pristup modeliranja proveden je u programskom paketu „Marc“, koristeći kvadratnu mrežu konačnih elemenata s 20 čvorova. Ovaj vrsta elementa odabrana je nakon provjere različitih tipova konačnih elemenata s različitom gustoćom mreže konačnih elemenata. Na ovaj način ostvarena je ravnoteža između učinkovitosti (vrijeme proračuna) i preciznosti rješenja. Opisan je 3D mehanički i termalno-fizikalni model. U mehaničkom modelu razmatra se plastičnost materijala, koristeći Von Misesov kriterij za čelik i Hill-ov kriterij za drvo. Nakon toga vrši se termalna i mehanička validacija predloženog modela u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima u normalnim i požarnim situacijama. Dakle, veza drvo-drvo i čelik-drvo ostvaruje se trnovima promjera 12 do 20 mm, uzimajući u obzir vlačno opterećenje paralelno sa vlakancima. Parametarska analiza, temeljena na numeričkom modelu, radi se u cilju procjene utjecaja debljine drvenog elementa na smanjenje nosivosti spojeva. Zaključeno je da su razlike između izmjerenog i predviđenog vremena otkazivanja, manje od 10 %. Rezultati termalne analize također se podudaraju sa mjerenim podacima pomoću termoelemenata, posebno za spojeve drvo-drvo. Ova studija se može koristiti kao osnova za daljnji teorijski razvoj kako bi se opravdale pojednostavljene metode koje će inženjeri koristiti u praksi.

Slično istraživanje [70] proveli su Erchinger i sur. gdje su na temelju opsežne eksperimentalne i numeričke analize, predstavili model za izračun požarne otpornosti višereznih spojeva drvo-čelik prilikom vlačnog naprezanja. Model je u analogiji s metodom reduciranog poprečnog presjeka prema EN 1995-1-2 [9]. Predloženi proračunski model uzima u obzir različitu geometriju veze i utjecaj čeličnih elemenata na raspodjelu temperature u presjeku. Numerička analiza provedena je u ANSYS-u. Transfer vlage u drvu je zanemaren. U

termalnoj analizi, pougljenje drva (tj. smanjenje presjeka) uzimalo se u obzir postupnom promjenom toplinskih svojstava drva s porastom temperature. Opsežna numerička analiza pokazala je da čelične ploče s prorezima i čelični trnovi utječu na sagorijevanje drvnih dijelova i raspodjelu temperature u preostalom presjeku.

Performanse i ponašanje laganog drveta izloženog požaru istražio je Twomey [71]. Lagana drvena konstrukcija jedan je od najčešćih oblika stambene gradnje u SAD-u. Nezaštićeni lagani konstrukcijski elementi od drva su izuzetno osjetljivi na visoke temperature. U razvoju ovog modela, metoda konačnih elemenata i modeli konačnih razlika korišteni su za istraživanje pojave ugljenog sloja u požaru. Modeli konačnih razlika istraženi su kao alternativa modelima konačnih elemenata jer formulacije konačnih razlika nisu zahtijevale posebne programe. Numerička analiza provedena je u ANSYS-u. Nakon validacije oba numerička pristupa za izračunavanje dubine pougljenog sloja prilikom izloženosti ASTM E-119 krivulji, modeli MKE i MKR korišteni su za istraživanje performansi drvenih elemenata prilikom izloženosti prirodnom požaru. Utjecaj krivulje normalnog požara postaje sve očitiji kada se uspoređuje vrijeme otkazivanja (ASTM E-1119) za drvene grede i stupove. To ukazuje na osjetljivost modela sa porastom temperature u vremenu i ističe važnost preciznog definiranja intenziteta i trajanja izloženosti požaru za analizu mehaničkih karakteristika u požarnim uvjetima. U konačnici, izloženost požaru i početni uvjeti opterećenja odigrali su ključnu ulogu u predviđanju vremena otkazivanja laganih drvenih elemenata.

Provedeno je numeričko istraživanje [72] s ciljem utvrđivanja preostalog presjeka, čvrstoće i krutosti „I“ drvenih greda podvrgnutih ISO 834 standardnoj požarnoj krivulji. Parametri modela uzeti su iz EN 1995-1-2 [9] za I-nosače prilikom savijanja gdje je vlačna pojasnica na požaru izloženoj strani. Pretpostavljalo se da su I-grede integrirane u podne sklopove koji se sastoje od greda, obloge od gipsanih ploča ili ploča na bazi drveta, šupljine potpuno ispunjene s izolacijom od stijena ili staklenih vlakana tipa „batt“ i podnom oblogom. Prijenos topline i strukturalna analiza su provedene kako bi se proučio utjecaj obloga na brzinu pougljenja i smanjenje čvrstoće drvenih I-nosača. Numerička analiza provedena je u SAFIRU-u. Može se zaključiti da za podne sklopove ispunjene staklenom vunom, model je konzervativan za razdoblje nakon kolapsa obloge; iz ispitivanja je vidljivo da postoji znatan vremenski period do kolapsa podnog sustava čak i nakon što se obloga odvojila od sklopa. U tom će pogledu potrebno je poboljšati model, predvidjeti i opisati ponašanje i degradaciju zaštitnog sustava.

Kada je drvena greda da izložena požaru sa tri ili četiri strane, pojavljuje se efekt pojačanog pougljenja [73]. Zahvaljujući utjecaju dvodimenzionalnog prijenosa topline, požarna ispitivanja i proračuni prijenosa topline pokazuju da pougljenje drva na bočnoj strani

pravokutnih presjeka drva može biti znatno veće od pougljenja na široj strani. Za drvene elemente nezaštićene tijekom izloženosti požaru, pokazano je da je odnos između vremena i poguljenja na bočnoj strani nelinearan. Da bi se uzelo u obzir pojačano ugljenje na bočnoj strani drvenih elemenata uveden je faktor presjeka k_s . Proračunom je pokazano da na otpornost na savijanje drvenog elementa, dvodimenzionalni prijenos topline beznačajno utječe, stoga se koeficijent k_s može zanemariti, što uvelike olakšava proračun. Kako bi se utvrdio utjecaj dvodimenzionalnog prijenosa topline na povećano pougljenje na bočnoj strani, provedene su brojne simulacije prijenosa topline pomoću programskog paketa SAFIR. U numeričkoj analizi, pougljenje drva (tj. smanjenje presjeka) uzeto je u obzir postupnim mijenjanjem gustoće, toplinske vodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta drva s porastom temperature. Iako je dubina pougljenja povećana za 20 % u proračunu, u konačnici tu nije imalo velikog značaja na otpornost grede na savijanje.

Pregledom stanja područja, uočava se nedostatak numeričkog istraživanja prošupljenih drvenih elemenata. U ovom radu istražen je utjecaj prošupljenja, negorive ispune u šuplinama, te protupožarnih zaštitnih sustava na brzinu pougljenja, i u konačnici, na požarnu otpornost prošupljenih drvenih elemenata.

2.5 Modeli računalne dinamike fluida (CFD)

Počeci razvoja ove metode, koja se naziva još i „modelima polja“ (engl. Field models), datiraju 70-ih godina dvadesetog stoljeća na Imperial College u Londonu. Primjena računalne simulacije u proučavanju fizikalnih procesa vezanih za fluide je poprimila značajne razmjere u posljednjih 10-20 godina, prvenstveno zbog eksponencijalnog rasta računalnih resursa koji su preduvjet za provođenje složenih računalnih simulacija iz područja mehanike fluida. Modeli računalne dinamike fluida, odnosno CFD modeli područje interesa, tzv. „domenu“ dijele na niz sub-volumena na koje se primjenjuju temeljni fizikalni zakoni očuvanja:

- zakon očuvanja mase
- zakon očuvanja količine gibanja
- zakon očuvanja energije

i pripadajuće termodinamičke i konstitutivne relacije koje pobliže opisuju specifičnost promatranog fluida (npr. jednačba idealnog plina, Fourierov zakon toplinske provodljivosti, Newtonov zakon viskoznosti, Fickov zakon difuzije i dr.). Matematički model koji opisuje strujanje nestlačivog fluida se svodi na zatvoreni skup nelinearnih parcijalnih diferencijalnih

jednadžbi (Navier-Stokes-ove diferencijalne jednadžbe) i konstitutivnih relacija koje uz početne i rubne uvjete opisuju konkretni fizikalni problem [6]. Međutim, problem strujanja fluida se ne rješava analitički jer u općem slučaju nije moguće dobiti rješenje koje zadovoljava N-S diferencijalne jednadžbe u cijeloj promatranoj domeni. Iz tog razloga se kompleksne diferencijalne jednadžbe svode pomoću prikladne diskretizacije na linearne algebarske jednadžbe s čvornim nepoznicama koje čine ravninsku (2D) ili prostornu (3D) numeričku mrežu (Slika 4). Čvorovi mreže predstavljaju referentno svojstvo fluida u određenom kontrolnom volumenu. Korištenje numeričke mreže sa većim brojem kontrolnih volumena daje točnije rezultate modeliranja. S druge strane, veći broj kontrolnih volumena traži i velike računalne resurse i znatno produljuje vrijeme simulacije. Iz tog razloga numeričke mreže u pravilu nisu ravnomjerno strukturirane na cijelom području domene, već se koriste tzv. nestrukturirane numeričke mreže. Za njih je karakteristično da se u području interesa i očekivane povećane dinamike razvoja požara i dima mogu izvesti gušće, sa znatno većom rezolucijom, odnosno povećanim brojem kontrolnih volumena. Za našu simulaciju u drvenoj konstrukciji područje interesa su lokacija požara, točke drvene konstrukcije izložene požaru, otvori za odimljavanje itd.

Neki od najčešće korištenih CFD modela koji se primjenjuju u požarnom inženjerstvu su slijedećih komercijalnih naziva: FLUENT, PHOENICS, SMARTFIRE, SOFIE, FDS i dr. Neki od navedenih računalnih alata su posebno pogodni za primjenu u analizi problema iz područja požarnog inženjerstva, kao npr. FDS, SMARTFIRE i SOFIE, dok su neki pogodni za opću primjenu u analizi mehanike fluida uz uspješnu primjenu i u požarnom inženjerstvu, kao npr. FLUENT. Uvijek se preporuča koristiti komercijalno provjerene CFD modele koji su validirani na velikom broju praktičnih primjena. Modeli računalne dinamike fluida nalaze svoju primjenu u brojnim studijama koje se bave razvojem požara i dima i njihovim posljedicama na različite aspekte požarnog djelovanja u građevinama. Neki od spomenutih aspekata su razvoj dimnih plinova u zatvorenim prostorima, učinkovitost sustava prirodnog ili mehaničkog odimljavanja, otpornost nosive konstrukcije na požarno opterećenje, vrijeme evakuacije ljudi iz građevine. U ovom radu koristit će se PyroSim [8] koji je grafičko sučelje za FDS [7].

2.5.1 Smjernice za pravilnu upotrebu CFD-modela

Smjernice [74] predstavljaju različite metode, scenarije požara analizirati i projektne vrijednosti korištene za različite ciljeve vezano za zaštitu od požara. Ciljevi zaštite od požara predstavljeni u smjernicama odnose se na načine izlaza do sigurnog mjesta (ASET-RSET

analiza), zaštitu od širenja vatre i dima unutar zgrade, te zaštitu od širenja požara između susjednih objekata [75]. Glavni koraci su:

- utvrditi potrebu za verifikacijom,
- izvršiti provjeru i osigurati zadovoljavajuću razinu zaštite od požara,
- kontrolirati verifikaciju,
- dokumentirati procesa rada

Međutim, smjernice ne daju nikakve upute o tome kako izvršiti analizu, te postoje ograničene informacije o tome kako osigurati kvalitetnu verifikaciju modela.

U smjernicama, analiza požarnih scenarija koristi se za analizu izlaza iz zgrade na sigurno mjesto. Pristup se temelji na usporedbi raspoloživog vremena sigurnog izlaza (ASET) s potrebnim vremenom sigurnog izlaza (RSET). Proces projektiranja za ASET-analizu temelji se na unaprijed definiranim scenarijima požara gdje se uzimaju u obzir parametri kao što su vrsta stanara i dostupni tehnički sustavi (na primjer sustavi sprinklera). Propisani scenariji odabrani su tako da predstavljaju vjerojatni najgori mogući scenarij, te nekoliko drugih scenarija. Smjernice određuju tri potrebna scenarija požara koji su općenito primjenjivi na većinu ASET analiza. Ovi su scenariji odabrani tako da predstavljaju razumno požarno opterećenje na osnovu kojeg se daju mjere zaštite.

Požarni scenarij 1 karakterizira jak požar s brzim razvojem, velikom požarnom snagom i velikom proizvodnjom nusproizvoda - vjerojatno najgori slučaj. Pretpostavlja se da instalirani sustavi zaštite funkcioniraju kako je predviđeno i njihov utjecaj može biti uključen u projektirani požar. Također, širenje požara je odabrano kao "konzervativno" (vidi Tablica 2.5.1 i Tablica 2.5.2). U slučaju da je snaga požara 5.0 MW ili manja, prilikom aktiviranja automatskog sustava za gašenje požara, oslobađanje topline se održava konstantno 1 minutu, zatim se smanjuje na 1/3 tijekom sljedeće minute, a zatim se održava konstantno na ovoj razini. U slučaju da je snaga požara pri aktiviranju sprinklera veća od 5.0 MW, oslobađanje topline treba održavati konstantnim nakon aktiviranja sprinklera.

U slučaju da zgrada nije opremljena potpunim automatskim protupožarnim i evakuacijskim alarmom, analiza treba uključiti požarni scenarij 2. Ovaj scenarij uključuje požar u području u kojem obično nema ljudi, ali koji je u blizini područja u kojem se nalazi veliki broj ljudi.

Požarni scenarij 3 karakterizira napredovanje požara za koji se očekuje da će imati manji učinak na mjere zaštite od požara. S druge strane, u ovom scenariju pojedinačni tehnički sustavi (kao što su sprinkler ili sustavi za kontrolu dima) ne funkcioniraju kako je predviđeno. U ovom

scenariju, napredovanje požara mora biti odabrano "nekonzervativno" (Tablica 2.5.1 i Tablica 2.5.2).

Tablica 2.5.1. Brzina rasta, HRR i toplina izgaranja u ranoj fazi požara za različite namjene

Požarni scenarij	Namjena	Brzina rasta požara (kW/s ²)	HRR (MW)	Toplina izgaranja (MJ/kg)
1 & 2	Uredi, škole	0.012 Srednje brz	5.0	16
	Stanovi, hoteli i zdravstvene ustanove	0.047 Brzi	5.0	20
	Dvorane	0.047 Brzi	10.0	20
3	Ostala namjena	0.047 Brzi	2	20

Tablica 2.5.2. Projektirana vrijednost za nusproizvode u ranoj fazi požara

Požarni scenarij	Proizvodnja čađe (g/g)	CO proizvodnja (g/g)	CO ₂ proizvodnja (g/g)
1 & 2	0.1	0.1	2.5
3	0.06	0.06	2.5

Projektne vrijednosti za pojedine scenarije požara prema stopi rasta, maksimalnom oslobađanju topline i toplini izgaranja ne bi trebale biti manje od onoga što je definirano u tablicama. Stopu oslobađanja topline treba izračunati prema dobro poznatom t^2 požara s definiranim α -vrijednostima. U smjernicama također postoje proračunske vrijednosti definirane za nusproizvode u ranoj fazi požara. Prinos čađe, proizvodnja CO i CO₂ ovisi o scenariju požara koji se analizira. Vrijednosti u tablicama definirane za scenarij 3 mogu se koristiti i za scenarij 1 i 2 u slučaju da u zgradi nema automatskog sustava za gašenje požara.

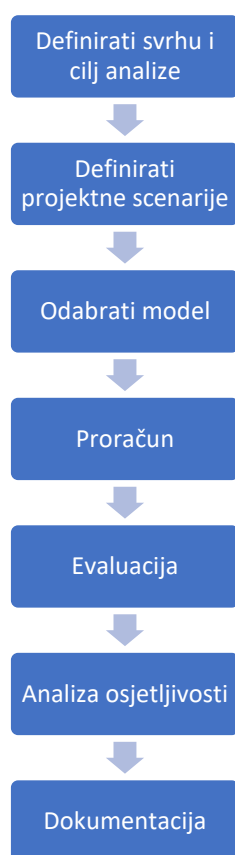
Većina inženjera za sigurnost od požara koji rade na projektiranju zgrada koriste CFD-model Fire Dynamic Simulation (FDS) [76] kada izvode naprednu ASET-analizu. U smjernicama se može pronaći opis predloženog procesa rada te različitih čimbenika koji se tiču karakteristika požara. Nadalje, dane su smjernice koje se odnose na verifikaciju i validaciju modela, upravljanje kontrolom dima, kako postupati s ulaznim i izlaznim podacima i koju analizu osjetljivosti provesti kako bi se osigurali pouzdani rezultati. Međutim, ne daju se praktični savjeti za korištenje FDS-a ili kako izvršiti određene naredbe u programskim paketima

kao što je Pyrosim [8]. Ali postoje i druge smjernice razvijene u Švedskoj i Danskoj [77] koje daju više praktičnih savjeta za tu vrstu problema.

2.5.1.1 Proces rada

Proces je razvijen kako bi pomogao identificirati problem, definirati svrhu i cilj analize, odabrati odgovarajuću metodu proračuna i osigurati pouzdane rezultate s dovoljnom kvalitetom. Predloženi proces je u određenoj mjeri inspiriran SFPE inženjerskim vodičem za zaštitu od požara [78].

Proces rada sastoji se od osam uzastopnih koraka i paralelnog procesa koji se odnosi na osiguranje kvalitete unutar različitih koraka (Slika 2.5.1)



Slika 2.5.1 Radni proces

Svrha i cilj analize moraju uvijek biti definirani. Svrha i cilj trebaju jasno odgovoriti na pitanje zašto se analiza provodi i koji se ciljevi žele postići. Svrha definiranja scenarija požara je prenijeti ciljeve u model koji se može analizirati. Kako bi se identificirale različite kritične pozicije nastanka požara, preporučuje se provesti početnu analizu rizika.

Kako bi se ispunila svrha i cilj, potrebno je odabrati odgovarajući računalni model. Općenito, izbor računalnog modela trebao bi se temeljiti na složenosti zgrade i cilju analize. Važno je da su ograničenja odabranog računalnog modela dobro poznata kako bi se osiguralo

da su proračuni točni i da se ima na umu da će potreba za računalnom snagom rasti sa željenom razinom točnosti rezultata. Također je važno osigurati da je odabrani model dovoljno validiran i verificiran. Tijekom proračuna, fokus je na korištenju razumnih pretpostavki i ulaznih parametara. Važno je da sve pretpostavke i ulazni podaci moraju biti dokumentirani i sljedivi, kako bi se osigurala transparentnost analize i dostupnost pretpostavki i ulaznih podataka za analizu osjetljivosti.

Svrha evaluacije je odlučiti jesu li rezultati proračuna uvjerljivi, te usporediti rezultate s utvrđenim ciljevima i kriterijima prihvatljivosti. Ako kriteriji prihvatljivosti nisu zadovoljeni, mora se definirati i analizirati novi prijedlog mjera za zaštitu od požara.

Analiza osjetljivosti procjenjuje koliko svaki parametar ima utjecaj na ishod rezultata proračuna. Ako se rezultati analize ne mijenjaju značajno, pretpostavlja se da varijablu nije potrebno dalje istraživati. Preporučuje se kontrola sljedećih parametara u analizi osjetljivosti;

- Položaj požara,
- veličina mreže,
- vremena aktivacije za različite aktivne sustave (tj. sustave sprinklera ili sustave za kontrolu dima),
- površine koje se koriste za upravljanje kontrolom dima,
- djelovanje vjetra.

Dokumentacija je važna za olakšavanje kontrole, osiguranja kvalitete i sljedivosti. Kao minimum, preporučuje se uključivanje sljedećih elemenata u dokumentaciju:

- Inicijalna analiza rizika za definiranje kritičnih položaja požara i drugih važnih aspekata
- Preduvjeti i pretpostavke na kojima se temelji analiza
- Opis metoda i modela
- Rezultate proračuna u mjeri u kojoj se proces može pratiti,
- Sva odstupanja od preporuka i pravila, ukoliko postoje.

Tijekom analize preporučuje se osiguranje kvalitete unutar različitih koraka radnog procesa. Prije početka simulacije, snažno se preporučuje da se kontroliraju važni parametri kako bi se osiguralo da su definirani ispravno. Parametri koji se preporučuju za kontrolu su između ostalog; računalna domena, geometrija modela, karakteristike požara, površine i materijal te aktivni sustavi. Tijekom evaluacije rezultata također je važno osigurati da su izlazni podaci unutar razumnih razina i da je kvaliteta dovoljno dobra za daljnju analizu. Preporuča se

kontrolirati HRR i brzinu rasta požara, toplinu izgaranja, temperaturu, maseni protok i brzinu na granicama mreže, te otvora u modelu.

2.5.1.2 Tehničke upute

Preporučeni projektirani požari mogu se modelirati na različite načine. U ASET-analizi uobičajeno je da je vidljivost (dim) parametar koji prvi uzrokuje kritična stanja. Stoga je važno simulirati točnu količinu oslobođenog dima. Stopa otpuštanja topline treba pravilno rasti i doseći točan maksimalan iznos HRR-a. Plamen bi trebao biti turbulentni difuzijski plamen, pokretan uzgonom. Nadalje, važno je da računalna domena ima dovoljno finu rezoluciju mreže da razluči plamen, koji je pokretač širenja dima. Svi ovi čimbenici utječu na proizvodnju čađe i time na sigurno vrijeme izlaska.

Kemijsku reakciju koja kontrolira proces izgaranja u FDS-u, korisnik definira kao odnos između dušika, kisika, vodika i ugljika u gorivu. FDS može izračunati toplinu izgaranja pomoću potrošnje kisika u reakciji. Vrijednost topline izgaranja također može biti specificirana od strane korisnika. Toplina izgaranja utjecat će na brzinu gubitka mase samog goriva, a time i na količinu čađe koja se proizvodi. Korisnik treba težiti korištenju kemijskog sastava goriva koji odgovara vrijednosti topline izgaranja (Tablica 2.5.1). Tablica 2.5.3 predlaže dva različita sastava goriva koja se mogu koristiti u tu svrhu. Gorivo s toplinom izgaranja od 20 MJ/kg sastoji se od 40 masenih postotaka poliuretana i 60 masenih postotaka celuloze. Gorivo s toplinom izgaranja od 16 MJ/kg sastoji se samo od celuloze.

Tablica 2.5.3 Sastav goriva

Namjena	Uredi, škole	Stanovi, hoteli, zdravstvene ustanove i zbornice
Toplina izgaranja (MJ/kg) - smjernice	16	20
Sastav	C	4.56
	H	6.56
	O	2.34
	N	0
Toplina izgaranja (MJ/kg) - na osnovu parametara iznad	17	19.8

Površina izvora požara mora biti u pravom omjeru s postotkom razvijene topline. Visoki HRR generiran na maloj površini uzrokovat će da se požar pokreće zamahom umjesto uzgonom. Oblik plamena bit će sličan mlaznom plamenu. Mlazni plamen je strukturiraniji od uzgonskog plamena, koji se obično javlja kod požara u zgradama.

Ako je površina izvora požara velika, s niskim HRR-om, plamen će se raspasti na manje, odvojene plamenove. Ovo neće predstavljati "pravi" požar. Cox i Kumar [78] definiraju da

bezdimenzijski HRR, Q^* , treba biti u rasponu od 0.3 do 2.5 za prirodne požare u zgradama. Koristeći ovaj raspon, zajedno s preporučenim projektiranim požarima u smjernicama, može se izračunati raspon primjenjivih površina za požar. Uz poznati promjer površine požara, također se može izračunati HRR po jedinici površine (HRRPUA). Vrijednosti unutar primjenjivog raspona prikazuje Tablica 2.5.4.

U ranoj fazi požara, kada je toplinsko zračenje iz sloja dima na površinu goriva nisko, horizontalno orijentirana goriva će razviti HRRPUA u nižem području vrijednosti (Tablica 2.1.1). Na primjer, puno drvo će otprilike imati HRRPUA od 100 kW/m^2 , PMMA 750 kW/m^2 , a madrac od poliuretana 910 kW/m^2 . Neka tekuća goriva mogu imati veći HRRPUA, npr. Heptan s 3300 kW/m^2 . Za dani HRR, uvlačenje zraka u plamen požara ovisit će o površini požara. Veća površina uzrokovat će veće uvlačenje što će rezultirati većim protokom mase oblaka, te nižim temperaturama.

Požar s velikom površinom stoga je konzervativniji prilikom modeliranja širenja dima. Preporuča se da se HRRPUA odabere tako da približno odgovara minimalnim vrijednostima Q^* (Tablica 2.1.1), npr. 800 kW/m^2 za visoko požarno opterećenje u uredu.

Tablica 2.5.4 Primjenjivi raspon veličine požara i HRRPUA

Scenarij	Namjena	HRR (MW)	Q^* (-)		Veličina požara (m^2)		HRRPUA (kW/m^2)	
			Min	Max	Max	Min	Min	Max
Visoko požarno opterećenje scenarij 1	Uredi, škole	5	0.3	2.5	6.9	1.3	725	3952
	Stanovi, hoteli, zdravstvene ustanove i zbornice	5			6.9	1.3	725	3952
	Kongresne dvorane	10			12	2.2	832	4539
Robusni požar scenarij 3	Sve ostale namjene	2			3.3	0.6	603	3290

2.5.1.3 Mreža

Korištenje fine mreže je važno iz nekoliko aspekata. FDS User's Guide [76] navodi da je, koliko je dobro razlučeno polje protoka plamena, dano bezdimenzionalnim brojem $D^*/\delta x$, koji bi trebao biti u rasponu od 10-20 u blizini požara i da pri velikim visinama prostorija ($D^*/H < 0,5$), $D^*/\delta x$ treba biti najmanje 15.

Tablica 2.5.5 prikazuje odnos između preporučenih scenarija požara i ćelija mreže te ilustrira kako se ti rasponi vrijednosti mogu primijeniti na preporučene projektirane požare u smjernicama.

Tablica 2.5.5 Odnos između preporučenih scenarija požara i veličine ćelije mreže

Scenarij	Namjena	HRR (MW)	D*	Veličina ćelije mreže (m)		Maksimalna veličina ćelije mreže pri velikim visinama prostorije (m)
				Min	Max	
Visoko požarno opterećenje scenarij 1	Uredi, škole	5	1.8	0.09	0.18	0.12
	Stanovi, hoteli, zdravstvene ustanove i zbornice	5	1.8	0.09	0.18	0.12
	Kongresne dvorane	10	2.4	0.12	0.24	0.16
Robusni požar scenarij 3	Sve ostale namjene	2	1.3	0.06	0.13	0.08

Požari kontrolirani sprinklerima općenito imaju nizak HRR. Budući da D* ovisi o HRR-u, zahtjevi za finim ćelijama bili bi vrlo visoki. Npr. požar kontroliran sprinklerom od 700 kW trebao bi imati mrežne ćelije od 4-8 cm kako bi ispunio kriterije $D^*/\delta x$. Ovo predstavlja praktičan problem jer bi to postavilo vrlo visoke zahtjeve za kapacitet proračuna (brzina procesora, RAM itd.). Stoga je preporuka korištenje veličine mrežne ćelije scenarija 3 kako bi se zadovoljilo razumno vrijeme simulacije, ali i osigurali pouzdani rezultati.

Korištenje preporučenih veličina ćelija mreže u je važno radi ispravnog simuliranja plamena. Međutim, u praksi se ne daju nikakve preporuke za veličinu volumena koju bi mreža trebala pokriti. Podrazumijeva se je da bi sam požar trebao biti u domeni finije mreže. Međutim, granice mreže ne bi se trebale spajati tamo gdje se očekuju visoki gradijenti brzine. Stoga, nema dodatnih preporuka za veličinu mreže za požar. U odjeljcima s većom visinom generirat će se velika, i vjerojatno nerazumna, količina mrežnih ćelija. Za područja izvan požara preporučuje se da ćelije mreže budu unutar višekratnika od 2 ili 3 preporučene vrijednosti (Tablica 2.5.5).

Tablica 2.5.6 ilustrira različite primjere kako se preporučeni požarni scenariji mogu modelirati u FDS-u. Požari kontrolirani sprinklerima nisu uključeni u primjere jer HRR pri aktiviranju sprinklera ovisi o specifičnim parametrima scenarija kao što su RTI vrijednost, visina prostorije, razmak glave sprinklera, temperatura aktivacije itd. Za požarni scenarij 3 prikazan je samo brzo-rastući požar.

Prilikom izrade primjera, fokus je bio na ispunjavanju primjenjivog odnosa između HRR i opsega požara (Q^*). Veličina izvora požara ovisi o odabranoj veličini ćelije mreže.

Duljina stranice izvora požara također bi trebala biti pokrivena neparnim brojem mrežnih ćelija. Veličina ćelija mreže je odabrana kako bi se ispunili zahtjevi za prostorijske s velikom visinom prostorijske.

Tablica 2.5.6 Primjeri parametara za modeliranje požara

Scenarij	Namjena	HRR (MW)	Brzina rasta požara (kW/s ²)	Veličina ćelije mreže (m)	Duljina stranice izvora požara (m)	HRRPU A (kW/m ²)
Visoko požarno opterećenje scenarij 1	Uredi, škole	5	0.012	0.1	2.5	800
	Stanovi, hoteli, zdravstvene ustanove i zbornice	5	0.047	0.1	2.5	800
	Kongresne dvorane	10	0.047	0.125	3.375	878
Robusni požar scenarij 3	Sve ostale namjene	2	0.047	0.075	1.725	672

Nadalje, preporučeno je da se model zračenja u FDS-u ne koristi za procjenu intenziteta zračenja. Takva bi uporaba zahtijevala brojne analize osjetljivosti na veličinu ćelije mreže. Ipak, preporuka je da model zračenja ostane aktivan kako bi se energetska ravnoteža točnije riješila. Budući da preporučeni scenariji požara imaju prilično visok prinos čađe, preporučuje se zadržati zadanu vrijednost u FDS-u za `RADIATIVE_FRACTION` (tj. 0.35).

Potrebno je specificirati svojstva materijala okolnih površina što je moguće bliže stvarnim materijalima u zgradi. Ali u nekim projektima (posebno rano u procesu projektiranja), građevinske komponente su nepoznate. U tim slučajevima treba koristiti `ADIABATSKE` ili `INERTNE` granice. Inertno znači da se granica održava na određenoj temperaturi (zadano 20 °C). Gubici topline iz sloja dima, do granica domene, bit će veliki kada se koristi ovaj tip granice. Adijabatsko pak znači da nema gubitaka topline prema granicama domene.

Također se preporučuje da korisnik kontrolira i dokumentira da HRR u FDS simulaciji koincidira sa željenim dizajnom HRR-a. Masene protoke i brzine treba pregledati (npr. otvora) kako bi se provjerilo jesu li postignute razumne vrijednosti.

Kako bi se potvrdilo da su rezultati neovisni o mreži, može se provesti analiza osjetljivosti mreže. No, ako se koriste preporučene vrijednosti veličina ćelija rešetke prikazane u ovom radu, pretpostavka je da nije potrebna daljnja analiza. Međutim, analiza osjetljivosti može biti prikladna ako se ćelije mreže koje se koriste za okolinu, veće od 3x veličine mreže korištene za područje oko izvora požara.

2.6 Proračun drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima

2.6.1 Uvod

Ograničavajući parametar u projektiranju i realizaciji stambenih zgrada s nosivim i protupožarnim drvenim konstrukcijama je njihova zapaljivost. Iako su metode ispitivanja požara za klasifikaciju pojedinačnih građevinskih proizvoda usklađene u EU, pojedine države članice odgovorne su za građevinske propise koji pokrivaju cjelokupnu građevinsku strukturu - uključujući zahtjeve zaštite od požara. Svaka država određuje svoju razinu zaštite od požara i uporabu građevinskih proizvoda koji se razlikuju prema zapaljivosti građevne cjeline, funkciji građevine i visini požara. Današnje vrijeme u Europskoj uniji donosi harmonizaciju ocjenjivanja standarda u svakoj europskoj zemlji i pokušava napraviti jedan koncept ocjenjivanja svojstava zapaljivosti [79]. Kategorija s najstrožim zahtjevima za sigurnost zgrada od požara u Hrvatskoj uključuje zgrade sa zapaljivom konstrukcijskom jedinicom - drvene zgrade, te ostale zgrade s velikom koncentracijom ljudi, velikim požarnim opterećenjem i visokom visinom požara. Zahtjevi za sigurnost od požara drvenih stambenih zgrada izravno ovise o broju njihovih katova i zapaljivosti strukturne jedinice zgrade. Definicija konstruktivne cjeline građevine ovisi o zapaljivosti nosivih elemenata građevine, zapaljivosti i načinu ugradnje izolacijskih i obložnih materijala koji se ugrađuju u nosive konstrukcije. Prema zahtjevnosti zaštite od požara zgrade se dijele na podskupine ovisno o visini kote poda najviše etaže. Naknadno se utvrđuje zahtjev minimalne otpornosti na požar nosivih i protupožarnih elemenata, ovisno o ova dva parametra. Modeliranje i dinamička simulacija požara važan je alat u projektiranju i procjeni požarne sigurnosti zgrada. Računalni modeli se najčešće koriste u procjeni opasnosti od požara, predviđanju tijeka intenziteta toplinskog zračenja u vremenu ovisno o veličini i raspodjeli požarnog opterećenja, vremenu, dima i brzine izgaranja goriva. Izlazni podaci simulacije koriste se za detaljne analize projektiranja pasivne i aktivne zaštite od požara građevinskih konstrukcija, zaštite osoba tijekom evakuacije i intervencije prilikom gašenja požara. Za simulaciju požara u zgradama koriste se tri glavna numerička pristupa [80]. Najjednostavnije su simulacije s izradom analitičkog modela razvoja požara. Oni koriste samo osnovne odnose koji opisuju fizikalno-kemijske reakcije i procese koji se odvijaju tijekom izgaranja. Analitički modeli požara brzi su i jednostavni za korištenje. Njihova je točnost ograničena opisom okoline požara. Obično služe kao osnova za računalno modeliranje u zonskim i dinamičkim simulacijama. Zonski modeli su sveobuhvatniji pristup simulacijama požara [81]. Njihovo rješenje temelji se na pretpostavci da je požarni prostor sastavljen od dva plinovita sloja koji međusobno djeluju putem jednadžbi upravljanja. Njihova glavna prednost

je brzina proračuna, koja omogućuje izvođenje opsežnih parametarskih studija većih konstrukcija. Budući da ove simulacije uzimaju u obzir nekoliko fizičkih mehanizama koji nastaju uslijed požara, imaju veći potencijal za pružanje realističnijih rezultata od analitičkih modela [82]. Rezultati simulacija sa zonskim modelima često su povezani sa značajnim nesigurnostima. Najcjelovitiji pristup su dinamičke simulacije [83], koje numerički rješavaju 3D jednadžbe upravljanja za požarom upravljani protok u njihovom diferencijalnom obliku s različitim razinama složenosti. U njihovoj implementaciji najčešće se koriste programi JASMINE, SOFIE i FDS. Dinamičke simulacije zahtijevaju više napora za postavljanje граниčnih uvjeta modela i dulje vrijeme računanja. Dinamičke simulacije požara najbliže su stvarnom tijeku požara s optimalno odabranim parametrima okoline požarnog opterećenja, uključujući i izvor inicijacije požar [84,85]. U Republici Hrvatskoj je prihvaćena navedena europska regulativa uz nacionalne dodatke. Projektiranje drvenih konstrukcija na požarno opterećenje obrađeno je u normi HRN EN 1995-1-2. Posljednjih desetak godina svjedoci smo značajnih istraživanja u području „požarnog inženjerstva“ u svijetu i kod nas u Hrvatskoj, koja su rezultirala i novim saznanjima u ovom području. Bitne poruke ovih saznanja, koje su i preporuke EUROCODE-a, očituju se u sljedećem:

- Realno požarno opterećenje u velikim zatvorenim prostorima nije moguće definirati samo standardnom požarnom krivuljom ISO834, već je stvarnu snagu realnog požara u nekom prostoru potrebno provjeriti (izračunati) na temelju parametarskih krivulja temperatura-vrijeme.
- U analizi sigurnosti nosivih konstrukcija utjecaj realnog požarnog djelovanja – visoke temperature treba uzeti kao jedno od mogućih djelovanja na konstrukcije, te dokazivati dostatnu nosivost konstrukcije u određenom zahtijevanom vremenu (R30, R60, R90, ...). [15].

Slijedom ovih promišljanja, te usvojenih europskih normi izrađen je i ovaj rad kojem je cilj istražiti brzinu oslobađanja topline (požarnu snagu), razvoj temperature plina i požara u modelu drvene zgrade izrađene od protupožarnih CLT ploča. Nadalje, cilj ovog specijalističkog rada je provesti naprednu numeričku analizu djelovanja požara u cilju boljeg razumijevanja i predviđanja utjecaja požara na drvene elemente i drvenu konstrukciju u cjelini, te procijeniti utjecaj geometrijskih i svojstava materijala, te metoda zaštite drvenih elemenata od požara na ponašanje križno lameliranih drvenih (CLT) elemenata prilikom požara.

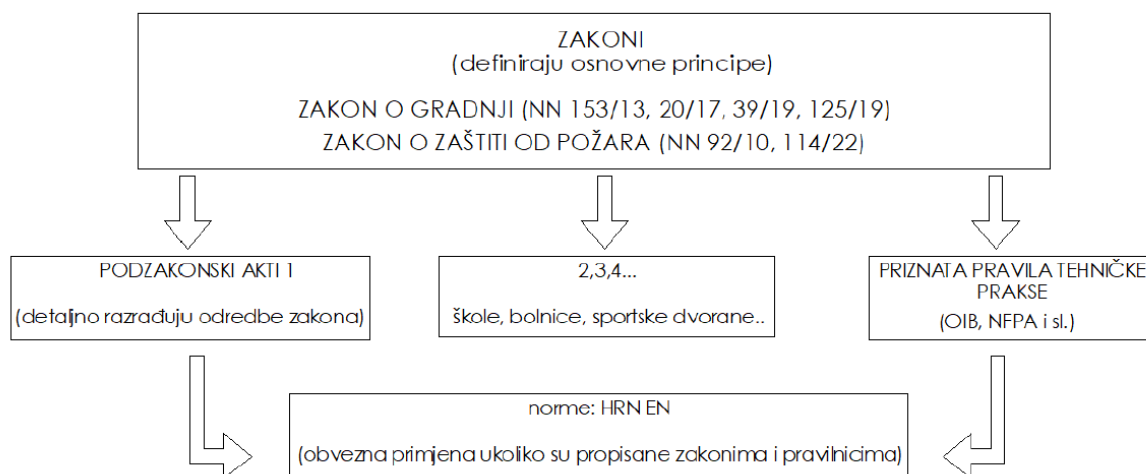
Bitno je napomenuti kako rezultati ovog rada ne impliciraju niti kritički sagledavaju izvedena tehnička rješenja zaštite od požara na spomenutoj građevini.

2.6.2 Tehnička regulativa – Hrvatski propisi koji reguliraju zaštitu od požara za građevine

Zaštita od požara u građevinama regulirana je različitim propisima i standardima kako bi se osigurala sigurnost ljudi, imovine i okoliša. Ovi propisi variraju od zemlje do zemlje, ali postoje opći principi koji se primjenjuju širom svijeta.

Projektiranje za izgradnju i rekonstrukciju građevina u području zaštite od požara hrvatskim propisima regulirano je Zakonom o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19), Zakonom o zaštiti od požara (NN 92/10, 114/22), Pravilnikom o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13, 87/15) [35] te raznim podzakonskim aktima, priznatim pravilima tehničke prakse i normi.

Regulativa u Republici Hrvatskoj, koja se odnosi na sigurnost u požaru dijeli se u tri razine kako prikazuje Slika 2.6.1



Slika 2.6.1 Shematski prikaz regulative u području zaštite od požara u Republici Hrvatskoj

2.6.2.1 Zakon o gradnji

U Zakonu o gradnji [86] propisani su i temeljni zahtjevi za građevinu definirane temeljnim dokumentom broj 2, a to su:

1. Mehanička otpornost i stabilnost
2. Sigurnost u slučaju požara
3. Higijena, zdravlje i okoliš
4. Sigurnost i pristupačnost tijekom uporabe
5. Zaštita od buke
6. Gospodarenje energijom i očuvanje topline
7. Održiva uporaba prirodnih izvora

2.6.2.2 Zakon o zaštiti od požara [87]

Zakonom o zaštiti od požara utvrđuje se opći sustav zaštite od požara koji podrazumijeva propisivanje, planiranje, ustrojavanje predmeta, provođenje mjera zaštite od požara, te osposobljavanje i ovlašćivanje za obavljanje poslova zaštite od požara s ciljem zaštite života, zdravlja i sigurnosti ljudi i životinja te sigurnosti materijalnih dobara, imovine, prirode i okoliša od požara. Zakonom o zaštiti od požara kao i svakim zakonom ne definiraju se detalji vezani za zaštitu od požara već opći principi vezani za isto koji se kasnije razrađuju podzakonskim aktima.

Razinu ispod zakona u Hrvatskoj regulativi predstavljaju pravilnici, tj. podzakonski akti koji detaljno razrađuju odredbe samih zakona.

Osnovni pravilnik za zaštitu od požara jest **Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13, 87/15)**, a koji sadrži detaljne smjernice i zahtjeve koji se odnose na različite aspekte zaštite od požara u građevinama. Evo nekih od ključnih aspekata koji se reguliraju ovim Pravilnikom:

- Podjela zgrada i građevina u podskupine prema zahtjevnosti zaštite od požara,
- Otpornost na požar konstrukcije i elemenata,
- Reakcije na požar građevnih proizvoda,
- Način sprječavanja širenja požara i/ili dima unutar građevine, raspodjele na požarne i dimne odjeljke,
- Način gradnje požarnih zidova i drugih konstrukcija na granici požarnih odjeljaka,
- Sprječavanje širenja požara preko otvora u konstrukcijama i elementima na granicama požarnih odjeljaka,
- Sprječavanje širenja požara na susjedne građevine,
- Svjetlo popusni elementi na granicama požarnih odjeljaka,
- Sustavi za odvodnju dima i topline te sustavi nadtlaka,
- Evakuacijski putevi,
- Zaštita spašavatelja.

Uz navedeni Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara u hrvatskoj regulativi postoje još brojni pravilnici koji reguliraju određene aspekte zaštite od požara kao što su:

- Pravilnik o uvjetima za vatrogasne pristupe [88],
- Pravilnik o vatrogasnim aparatima [89],

- Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara[90] ,
- Pravilnik o sustavima za dojavu požara[91]
- Pravilnik o zaštiti na radu za mjesta rada [92],
- Pravilnik o mjerama zaštite od požara kod građenja [93],
- Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu visokih objekata od požara [94],
- Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima [95], i sl.

Treću razinu čine europske norme koje su usvojene i priznate kao hrvatske, a ovisno o predmetu mogu sadržavati i nacionalni dodatak kao što to ima većina EUROCODE-ova. Norme se moraju primjenjivati isključivo ukoliko su propisane određenim pravilnikom, a u suprotnome se primjenjuju dobrovoljno. U Republici Hrvatskoj neki segmenti zaštite od požara poput zahtjeva za projektiranje ustanova kao što su bolnice, domovi za stare i nemoćne, škole, vrtići, fakulteti i sl. još uvijek nisu obuhvaćeni hrvatskom regulativom zaštite od požara stoga je navedeni Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara potrebno nadograditi modulima za zgrade gore navedenih namjena. Do donošenja hrvatskih propisa za zaštitu od požara za zgrade gore namjena primjenjuju se priznata pravila tehničke prakse kao što su austrijska smjernica OIB Richtline (Österreichisches Institut für Bautechnik) ili NFPA 101, Life Safety Code (National Fire Protection Association). Naime, strani propisi se primjenjuju samo u dijelovima mjere zaštite od požara koji nisu regulirani našim propisima, dok u dijelovima mjera zaštite od požara kojih reguliraju hrvatski propisi, obavezno se primjenjuju hrvatski propisi[96].

2.6.3 EN 1995-1-2

Prema EN 1995-1-2 [9] proračunom je potrebno dokazati da vrijedi:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (2.1)$$

gdje je:

$E_{d,fi}$ proračunski učinak djelovanja u požarnoj situaciji, određen u skladu s normom EN 1991-1-2 [9], uključujući učinke toplinskog širenja i deformiranja

$R_{d,t,fi}$ odgovarajuća proračunska otpornost u požarnoj situaciji.

Kako bi se odredio proračunski učinak djelovanja $E_{d,fi}$ koristi se sljedeći izraz:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (2.2)$$

gdje je:

- η_{fi} faktor smanjenja odgovarajuće sile ili momenta savijanja za razinu proračunskog opterećenja u požarnom stanju
- E_d proračunska vrijednost odgovarajuće sile ili momenta za proračun uz uobičajenu temperaturu za osnovnu kombinaciju djelovanja.

Kako bi se odredila proračunska vrijednost odgovarajuće sile ili momenta koristi se izvanredna proračunska situacija za koju EN 1990 [97] daje sljedeći izraz:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "A_d" + "(\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1}" \quad (2.3)$$

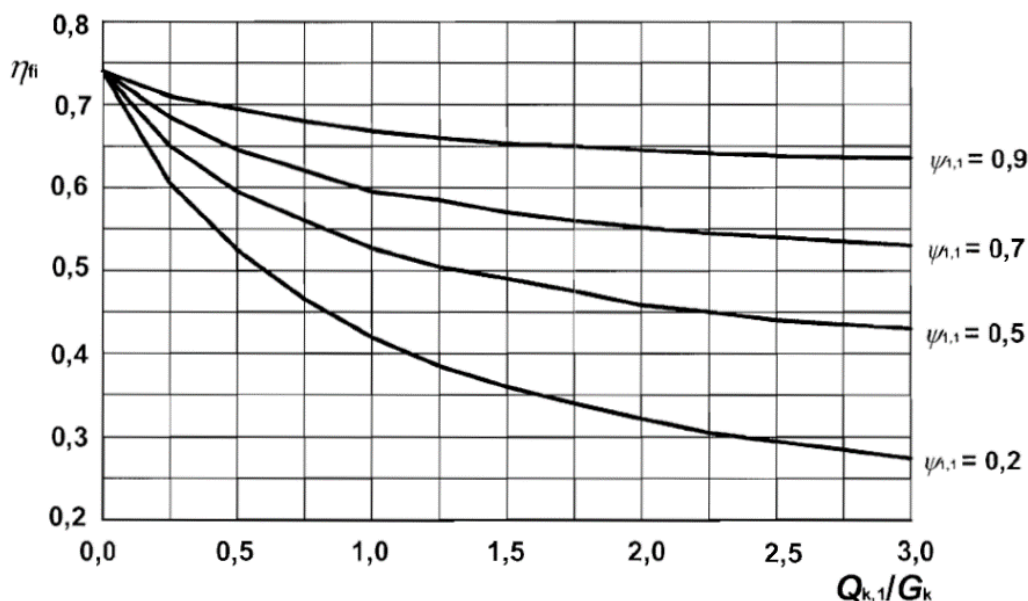
$$+ " \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

gdje je:

- E_d proračunska vrijednost učinka djelovanja
- $G_{k,j}$ karakteristična vrijednost stalnog djelovanja
- P reprezentativna vrijednost sile prednapinjanja
- A_d proračunska vrijednost izvanrednog djelovanja (u slučaju požara predstavlja proračunsku vrijednost neizravnih učinaka toplinskog djelovanja)
- $Q_{k,1}$ karakteristična vrijednost vodećeg promjenjivog djelovanja
- $Q_{k,i}$ karakteristična vrijednost pratećih promjenjivih djelovanja
- $\psi_{1,1}$ faktor kombinacije za učestalu vrijednost
- $\psi_{2,i}$ faktor kombinacije za nazovistalnu vrijednost.

U ovoj se kombinaciji prema EN 1990 [97] u slučaju požara kao izvanredno djelovanje ne uzima niti jedno drugo izvanredno djelovanje, već samo požar.

EN 1995-1-2 [9] daje izraze za proračun faktora smanjenja η_{fi} , no pojednostavljeno se može očitati iz dijagrama prikazanog na slici 2.6.2 u ovisnosti o omjeru glavnog promjenjivog opterećenja $Q_{k,1}$ i stalnog opterećenja G_k za različite vrijednosti faktora kombinacije $\psi_{1,1}$.



Slika 2.6.2 Promjena faktora smanjenja η_{fi} ovisno o omjeru opterećenja $Q_{k,1}/G_k$ [9]

2.6.3.1 Proračunske vrijednosti karakteristika materijala

Kako se učinci djelovanja smanjuju u požarnoj situaciji, tako se reduciraju vrijednosti materijalnih karakteristika, odnosno u požaru se prema EN 1995-1-2 [9] koriste sljedeći izrazi:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.4)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.5)$$

gdje je:

- $f_{d,fi}$ proračunska čvrstoća drva u požaru
- $S_{d,fi}$ proračunska vrijednost krutosti (modul elastičnosti ili modul posmika)
- f_{20} 20 % -tni fraktil čvrstoće pri normalnoj temperaturi
- S_{20} 20 % -tni fraktil krutosti (modul elastičnosti ili modul posmika)
- $k_{mod,fi}$ faktor modifikacije u požaru
- $\gamma_{M,fi}$ parcijalni faktor sigurnosti za drvo u požaru.

20 % -tne fraktile čvrstoće i krutosti proračunavaju se na sljedeći način:

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_k \quad (2.6)$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot S_k \quad (2.7)$$

gdje je:

- k_{fi} dan u tablici 2.6.1

Tablica 2.6.1 Vrijednosti faktora k_{fi}

	k_{fi}
Monolitno drvo	1,25
Lijepljeno lamelirano drvo	1,15
Paneli na osnovi drva	1,15
LVL	1,1

2.6.3.2 Metoda reduciranog poprečnog presjeka

Na početku, važno je objasniti pojam dubine pougljenja d_{char} (Slika 2.6.3). Naime, prilikom požara se na površinama drva izloženim požaru javlja pougljeni sloj koji zapravo štiti unutrašnjost drveta od prolaska topline. Njegova debljina jest udaljenost od vanjskog ruba elementa prije požara do unutarnjeg ruba zdravog, neizgorenog drveta, nakon požara. Dubina pougljenja ovisi o tome je li element izložen požaru s jedne ili s više strana. Ako je element jednostrano izložen požaru, dubina pougljenja računa se na sljedeći način:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (2.8)$$

gdje je:

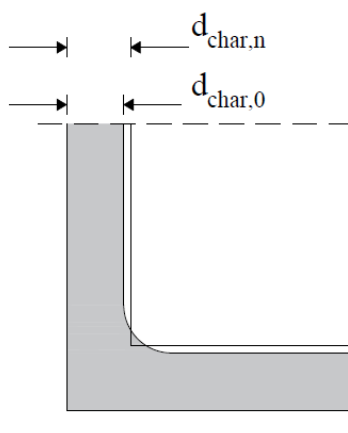
- $d_{char,0}$ dubina pougljenja za jednostrani požar
- β_0 brzina sagorijevanja/pougljenja za jednostrani požar
- t vrijeme izloženosti požaru.

Ako je element izložen požaru s više strana dubina pougljenja dodatno se povećava zbog učinka zaobljenja rubova i pukotina te se računa na sljedeći način:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (2.9)$$

gdje je:

- $d_{char,n}$ dubina pougljenja za višestrani požar
- β_n brzina sagorijevanja za višestrani požar koja uključuje učinak zaobljenja rubova i pukotine (vidi tablicu 2.6.2).



Slika 2.6.3 Debljina pougljenog sloja

EN 1995-1-2 [9] propisuje vrijednosti brzine sagorijevanja za najčešće korištene proizvode na bazi drva (vidi tablicu 2.6.2)

Tablica 2.6.2 Brzine sagorijevanja β_0 i β_n za drvo, LVL, drvene obloge i panele na bazi drva

	β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
a) Meko drvo i bukva		
Lijepljeno lamelirano drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
Puno drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.8
b) Tvrdo drvo		
Puno ili lijepljeno lamelirano tvrdo drvo s karakterističnom gustoćom od 290 kg/m^3	0.65	0.7
Puno ili lijepljeno lamelirano tvrdo drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0.50	0.55
c) LVL		
drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
d) Paneli		
Drveni paneli	0.9 ^a	-
Šperploča	1.0 ^a	-
Paneli na bazi drva koji nisu šperploče	0.9 ^a	-

^a Vrijednosti koje se primjenjuju za karakterističnu gustoću od 450 kg/m^3 i panele debljine 20 mm: za ostale vrijednosti pogledati EN1995-1-2, poglavlje 3.4.2(9) [9]

Dakle, poprečni presjek pri požaru određuje se redukcijom njegovih početnih dimenzija za efektivnu dubinu pougljenja d_{ef} (Slika 2.6.4) koja je dana sljedećim izrazom:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (2.10)$$

gdje je:

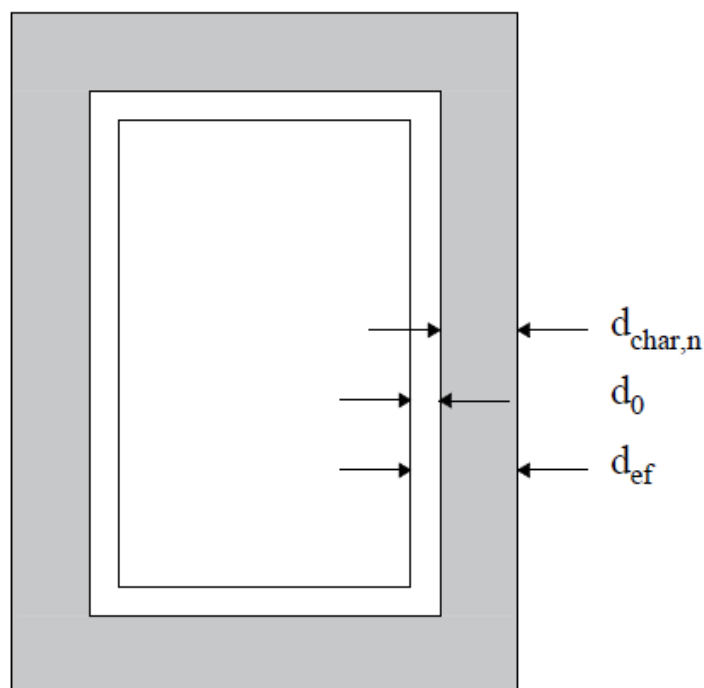
d_0 7 mm

k_0 faktor čije su vrijednosti dane u tablici 2.6.3.

Tablica 2.6.3 Vrijednost faktora k_0

	k_0
$t < 20$ minuta	$t/20$
$t > 20$ minuta	1,0

Na vrijednost $d_{char,n}$ dodaje se debljina $k_0 \cdot d_0$ jer se smatra da je unutar nje vrijednost čvrstoće i krutosti jednaka nuli, dok su u unutarnjem dijelu vrijednosti nereducirane.



Slika 2.6.4 Prikaz efektivne širine pougljenja d_{ef}

2.6.3.3 Metoda reducirane čvrstoće i krutosti

Ova se metoda najčešće primjenjuje za pravokutne poprečne presjeke mekog drva izložene požaru s tri ili četiri strane te kružne poprečne presjeke izložene požaru duž cijelog opsega. Koristi se faktor modifikacije za požar $k_{mod,fi}$ za kojeg su definirani izrazi posebno za savojnu, tlačnu i vlačnu čvrstoću.

2.6.4 Osvrt na proračun CLT-a prema nacrtu novog EC5, prEN 1995-1-2:2025.

Za plošne drvene elemente stopa pougljenja se računa ovisno o fazama, i to kako slijedi:

$$\begin{aligned}
 \text{Faza 1 i 4: } & \beta_n = k_g \cdot \beta_0 \\
 \text{Faza 2: } & \beta_n = k_2 \cdot k_g \cdot \beta_0 \\
 \text{Faza 3: } & \beta_n = k_3 \cdot k_g \cdot \beta_0
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

gdje:

fazu 1 i 4 prikazuju Slika 2.6.5 i Slika 2.6.7.

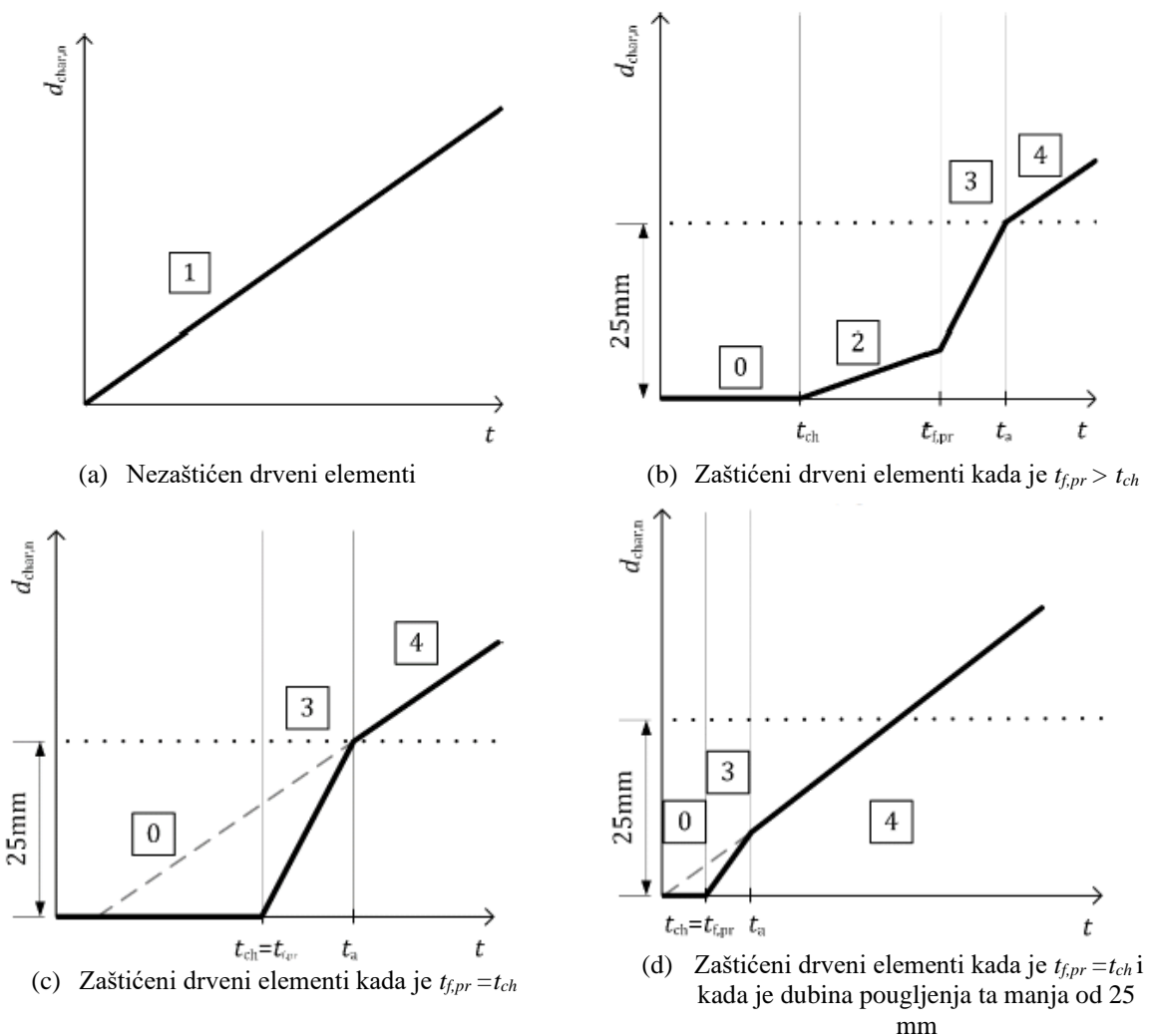
β_n stopa pougljenja u određenoj fazi

β_0 osnovna stopa pougljenja

k_g faktor koji uzima u obzir međuprostor

k_2 faktor zaštite za fazu 2

k_3 post-zaštitni faktor za fazu 3



Slika 2.6.5 Faze pougljena drvenih elemenata kada površina lijepljenja ostane cjelovita tijekom požara

gdje je:

- 1 – Normalna faza pougljenja (faza 1)
- 2 – Inkapsulirana faza (faza 0) je faza kada ne dolazi do pougljenja drvenog elementa iza sustava zaštite.
- 3 – Zaštićena faza pougljenja (faza 2) je faza u kojoj dolazi do pougljenja iza zaštite, dok je sustav još na mjestu.
- 4 – Post-zaštićena faza pougljenja (faza 3) je faza nakon otkazivanja zaštite, ali prije nego što se formira potpuno razvijen pougljeni sloj.
- 5 – Konsolidirana faza pougljenja (faza 4) je faza s potpuno razvijenim pougljenim slojem.

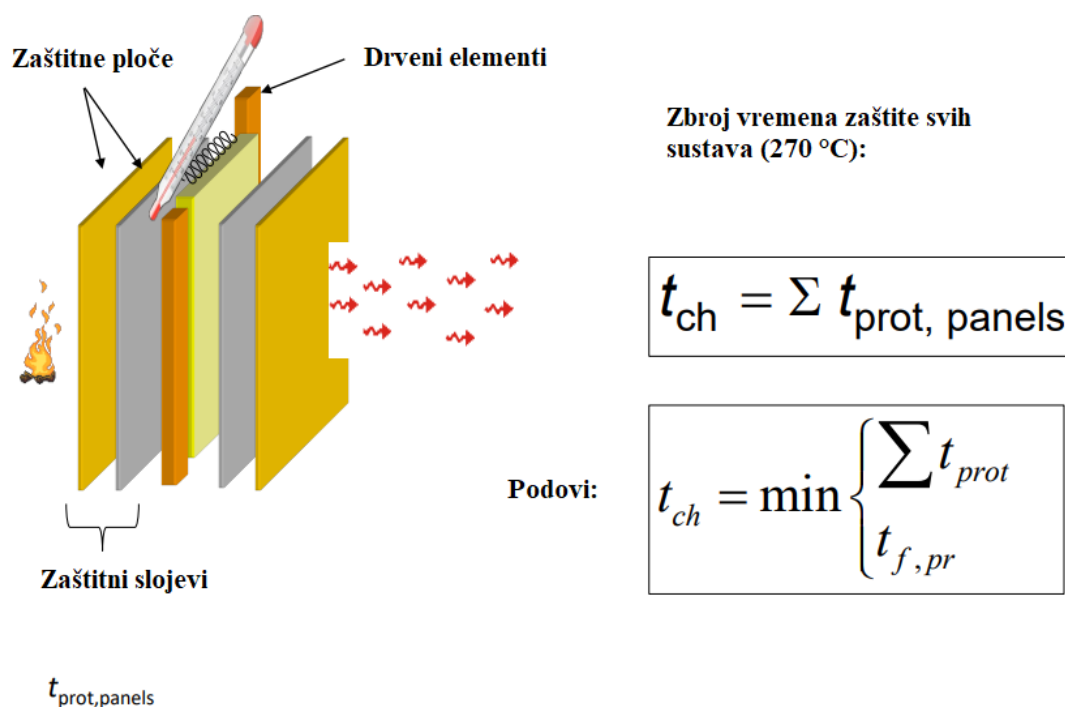
t – vrijeme

t_a - vrijeme konsolidacije

t_{ch} – početak pougljenja (Slika 2.6.6)

$t_{f,pr}$ – vrijeme otkazivanja zaštite (ovisi o debljini tipu panela)

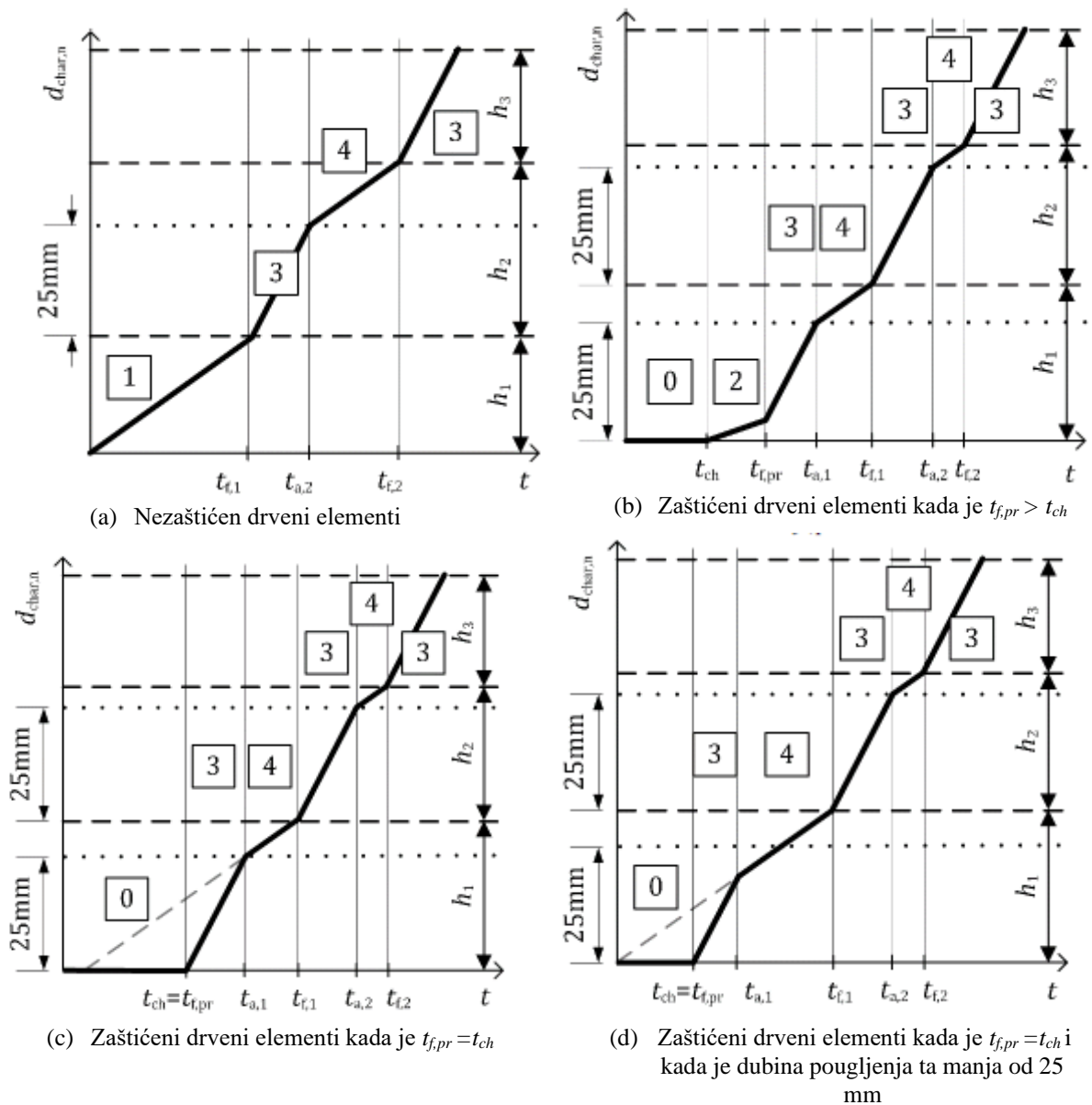
NAPOMENA 1: Na slici 5.1 (b) i (c), Faza 4 implicira da sloj pougljenila od 25 mm daje dovoljnu zaštitu za smanjenje stope pougljenja na vrijednost za inicijalno nezaštićene drvene elemente (1. faza).



Slika 2.6.6 Početak pougljenja

Slika 2.6.7 razmatra kombinaciju niza faza pougljenja za svaki sloj uzimajući u obzir individualne nominalne stope pougljenja. Faza 3 podrazumijeva da do pada pougljenog sloja dolazi kada dubina pougljenja dosegne liniju lijepljenja, što dovodi do povećane stope pougljenja za sljedeći sloj. Slika 2.6.7 (a), (b) i (c), faza 4 podrazumijevaju da sloj pougljenog

sloja od 25 mm daje dovoljno zaštite za smanjenje stope pougljenja kao i za inicijalno nezaštićene drvene elemente (Faza 1).



Slika 2.6.7 Faze pougljenja drvenih elemenata kada površina lijepljenja ne ostane cjelovita tijekom požara gdje su:

h_1, h_2 i h_3 – debljina lamela/slojeva.

Faktor k_g trebao bi se pretpostaviti kako slijedi:

$$k_g = \begin{cases} 1 & \text{za šupljine manje od 2mm} \rightarrow \text{jednodimenzionalno pougljenje} \\ 1.2 & \text{za šupljine između 2 i 5 mm} \rightarrow \text{jednodimenzionalno pougljenje} \\ 1.2 & \text{za šupljine veće od 5 mm} \rightarrow \text{dvodimenzionalno pougljenje} \end{cases} \quad (2.12)$$

Za elemente izrađene od CLT k_3 treba uzeti kako prikazuje Tablica 2.6.4.

Tablica 2.6.4 Post-zaštitni faktor k_3 za drvene elemente izrađene od CLT-a

Horizontalni	Vertikalni	
	Prvi sloj	Ostali slojevi
2	2	1.3

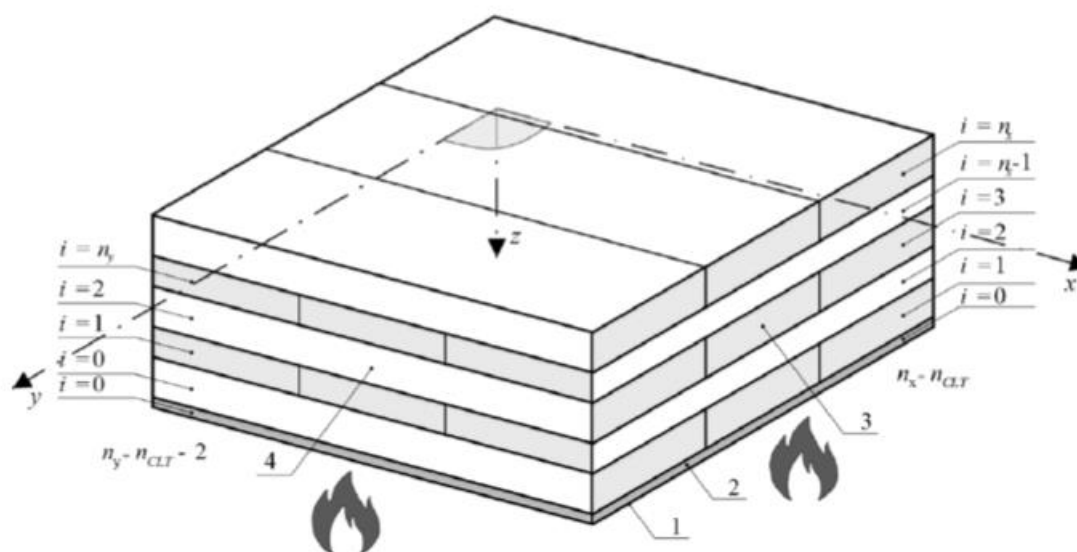
Za horizontalne ravne drvene elemente izrađene od CLT izložene požaru na s gornje strane, ne može doći do otpadanja pougljenih slojeva. Za plošne drvene elemente izrađene od CLT, kada se cjelovitost površine lijepljenja ne održava tijekom izloženosti požaru, preostali poprečni presjek treba biti izračunato kako prikazuje Slika 2.6.7.

Osim nije drugačije navedeno, dubina sloja nulte čvrstoće d_0 treba pretpostaviti kako slijedi:

$$d_0 = 8 + \frac{h}{55} \quad (2.13)$$

gdje je h debljina inicijalnog CLT plošnog elementa. Efektivni poprečni presjek CLT-a treba izračunati zasebno za svaki smjer (x i y).

Numeraciju slojeva CLT-a prikazuje Slika 2.6.8.



- 1- Izloženi sloj CLT-a
- 2- Zaštitni sustav, panel na izloženoj strani
- 3- Površina u x – smjeru
- 4- Površina u y - smjeru

Slika 2.6.8 Numeracija slojeva CLT-a u x i y smjeru, sa i bez zaštitnog sustava

Vrijednosti debljine sloja nulte čvrstoće d_0 za dimenzioniranja poda/stropa od CLT-a s rasponom u x-smjeru, izloženom požaru s jedne strane treba uzeti kako prikazuje Tablica 2.6.5.

Tablica 2.6.5 Vrijednosti debljine sloja nulte čvrstoće d_0 u mm, za podove izrađene od CLT-a za raspone u x - smjeru

Izloženost požaru	Podovi	
	Izloženi	Zaštićeni
Vlačna strana – prvi sloj	7 ^a	12 ^a
Vlačna strana – ostali slojevi	12 ^{ab}	
Tlačna strana – prvi sloj	10 ^c	16 ^c
Tlačna strana – ostali slojevi	16 ^{cd}	
^a Kada je izračunati d_{ef} unutar sloja u smjeru y, konačni d_{ef} treba povećati, da bi reducirali debljinu sljedećeg sloja u x-smjeru za najmanje 2 mm.		
^b Kada je izračunati d_{ef} unutar sloja u smjeru x, konačni d_{ef} treba biti barem toliki da reducira ovaj sloj za 2 mm.		
^c Kada je izračunati d_{ef} unutar sloja u smjeru y, konačni d_{ef} treba povećati, da bi reducirali debljinu sljedećeg sloja u x-smjeru za najmanje 4 mm.		
^d Kada je izračunati d_{ef} unutar sloja u smjeru x, konačni d_{ef} treba biti barem toliki da reducira ovaj sloj za 4 mm.		

Vrijednosti dubine sloja nulte čvrstoće d_0 za dimenzioniranje zidova od CLT opterećenih u x-smjeru i izložen požaru s jedne strane, treba uzeti kao što prikazuje Tablica 2.6.6.

Tablica 2.6.6 Vrijednosti debljine sloja nulte čvrstoće d_0 u mm, za zidove izrađene od CLT-a za raspone u x - smjeru

Pozicija linije pougljenja	Zidovi	
	Izloženi	Zaštićeni
U prvom sloju ($i=1$) na izloženoj strani	$d_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} 10 \\ \frac{4}{5} \cdot h_1 - 14 \end{array} \right.$	$d_0 = \frac{2}{5} \cdot h_1 + 8$
U ostalim slojevima i u y-smjeru	$d_0 = h_{res,i} + \left(8 + \frac{h}{10} \right) \cdot \left(1 - 0,9 \cdot \frac{h_{res,i}}{h_i} \right)$	
U ostalim slojevima i u x-smjeru	$d_0 = \left(8 + \frac{h}{10} \right) \cdot \left(0,1 + 0,9 \cdot \frac{h_{res,i}}{h_i} \right)$	
^a Kada je izračunati d_{ef} unutar sloja u smjeru y, konačni d_{ef} treba povećati, da bi reducirali debljinu sljedećeg sloja u x-smjeru za najmanje 4 mm.		
^b Kada je izračunati d_{ef} unutar sloja u smjeru x, konačni d_{ef} treba biti barem toliki da reducira ovaj sloj za 4 mm.		

gdje je:

d_0 – sloj nulte čvrstoće, u mm

h_1 – debljina prvoj sloja, u mm

h_i – debljina sloja i , u mm

$h_{res,i}$ – debljina neoštećenog sloja i , u mm

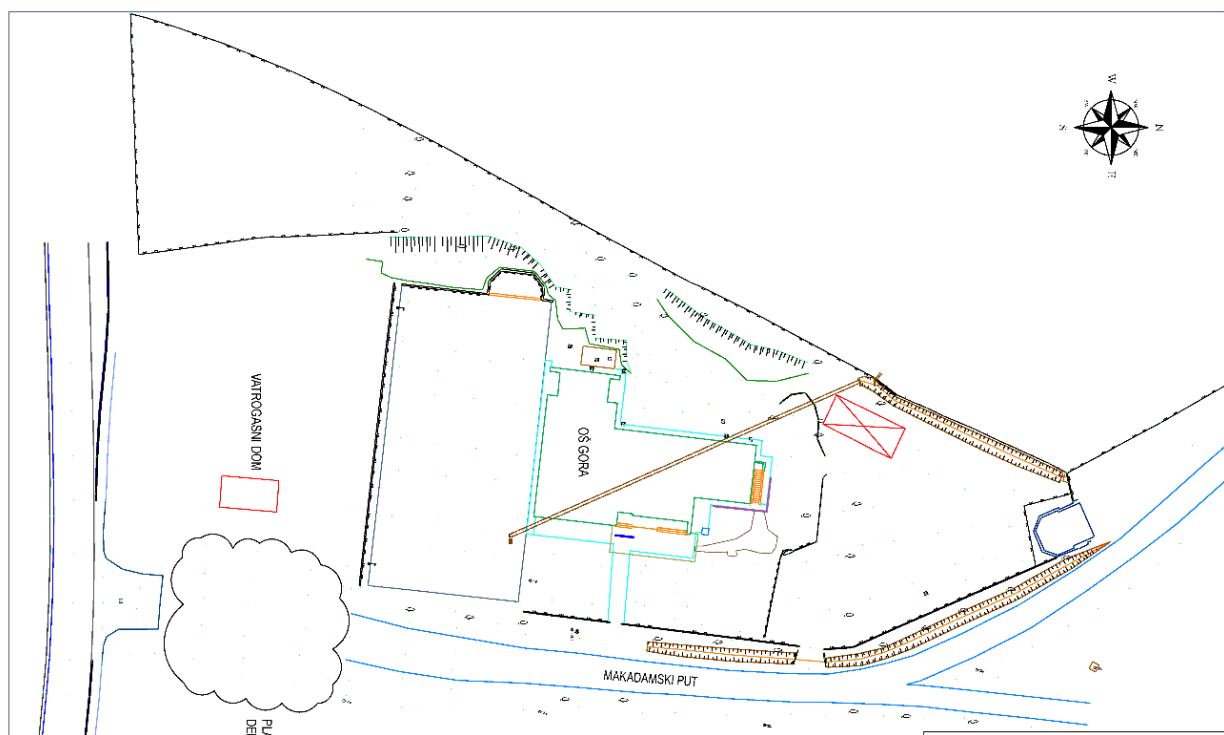
h – visina inicijalno poprečnog presjeka CLT-a, u mm.

Poglavlje 3.

STUDIJA SLUČAJA

3.1 Tehnički opis građevine

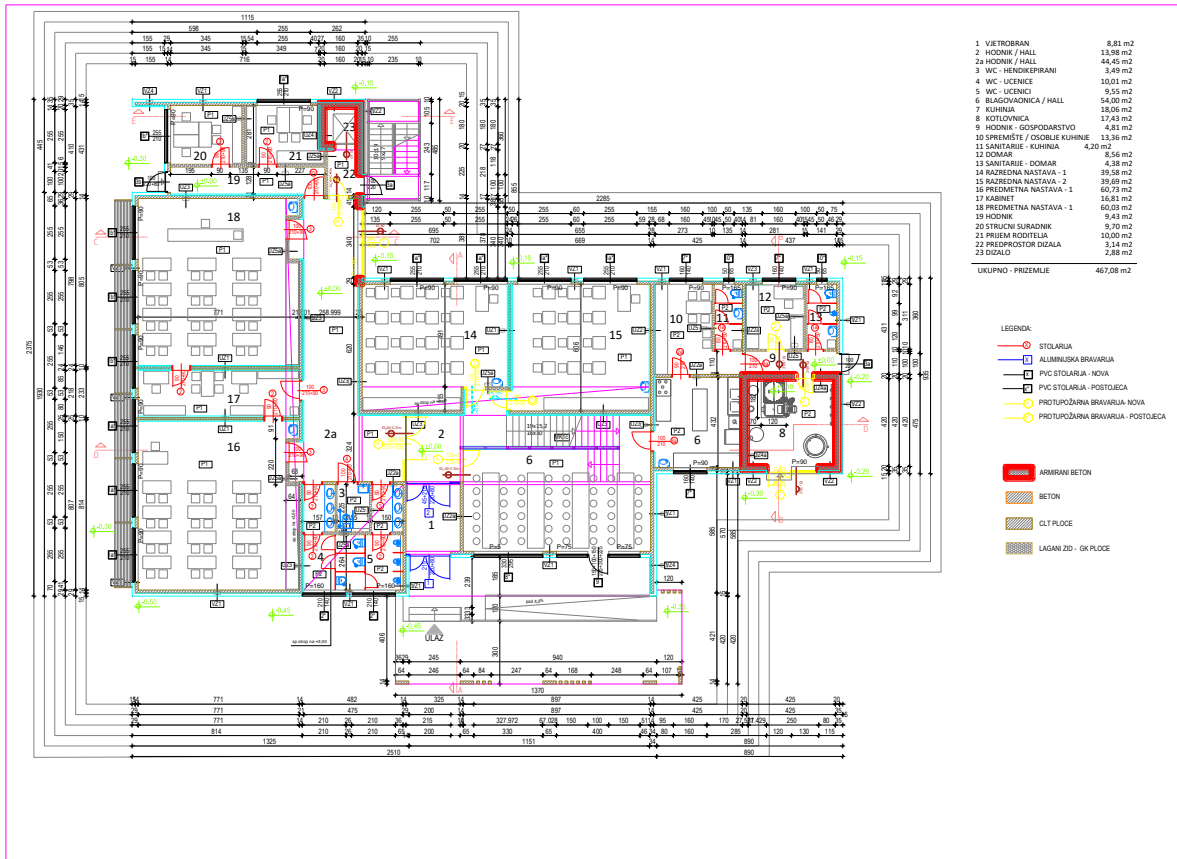
Predmetna građevina [98] je troetažna (PR+K+PO) zgrada smještena u sastavu građevne čestice u naselju Gora, u Gradu Petrinji, a ista je zgrada javne namjene, odnosno, služi kao osnovna škola (OŠ Ivan Goran Kovačić). Lokacija predmetne građevine nalazi se unutar Grada Petrinje, odnosno, naselja Gora i to na dijelu građevinske parcele k.č.br. 529/2, k.o. Gora, na adresi Gora 61A, 44 250 Petrinja (Slika 3.2.10). Građevinska parcela nepravilnog je oblika, orijentirana u smjeru sjever-jug (paralelno s pristupnom prometnicom) te smještena u ravnici s visinskom razlikom do 1.00 m. Ista zauzima površinu od cca 5289 m², pri čemu su maksimalne udaljenosti granica postojećih parcela cca 67.75 m po širini i cca 125.00 m po duljini parcele. Građevine u neposrednom okruženju su različite katnosti, građene u različitim periodima, ali s jasnim karakteristikama te su locirane unutar granica vlastitih parcela. Po namjeni su stambene, poslovne/javne ili industrijske građevine. U smislu oblikovanja zahvat obnove je projektiran na način da se nakon rušenja postojeće izvodi armiranobetonska/drvena konstrukcija s drvenom krovnom konstrukcijom čijom se razradom formira jednostavna, ali specifična kompozicija. Forma je i u oblikovanju i u materijalizaciji riješena tako da je vizualno jasno razgraničena.



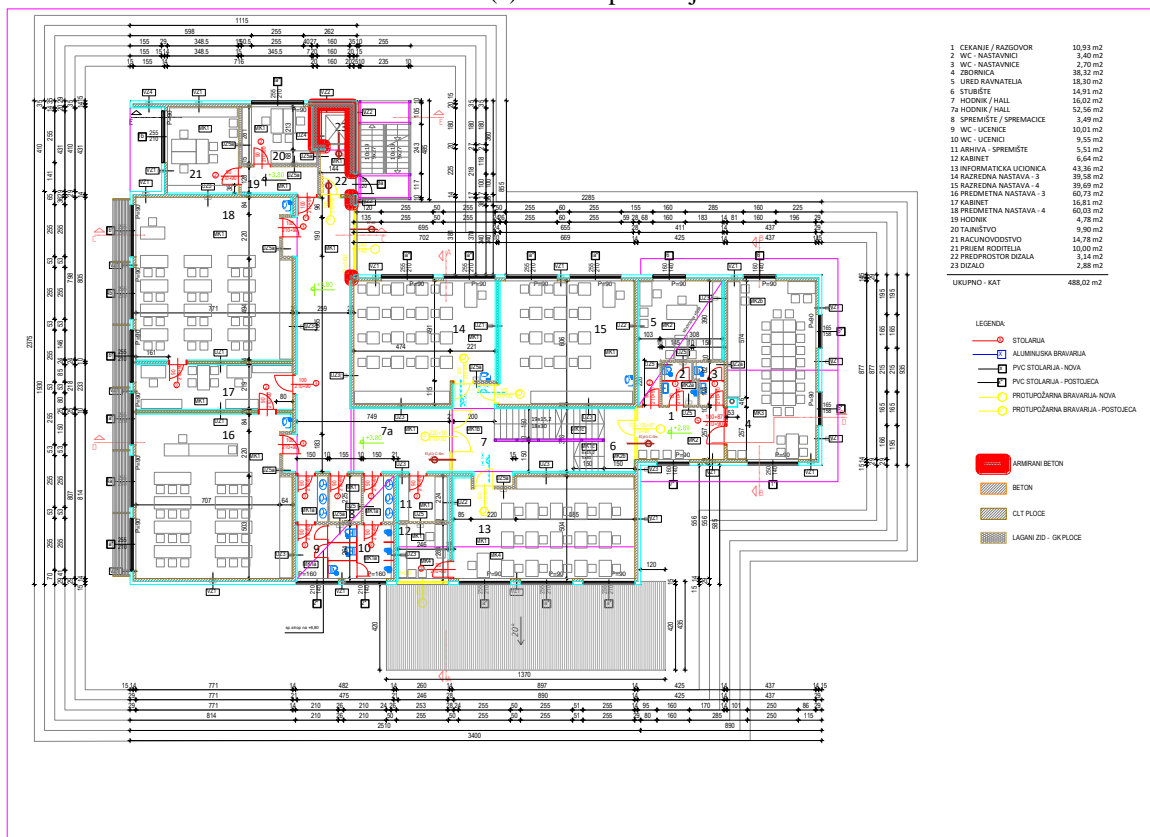
Slika 3.1.1 Situacija

Dio predmetne građevine koji odgovara "objektu A" je troetažan (PR+K+PK), a sve etaže oblikovane su na sličan način: s pravokutnim tlocrtom osnovnih dijelova, s ravnim

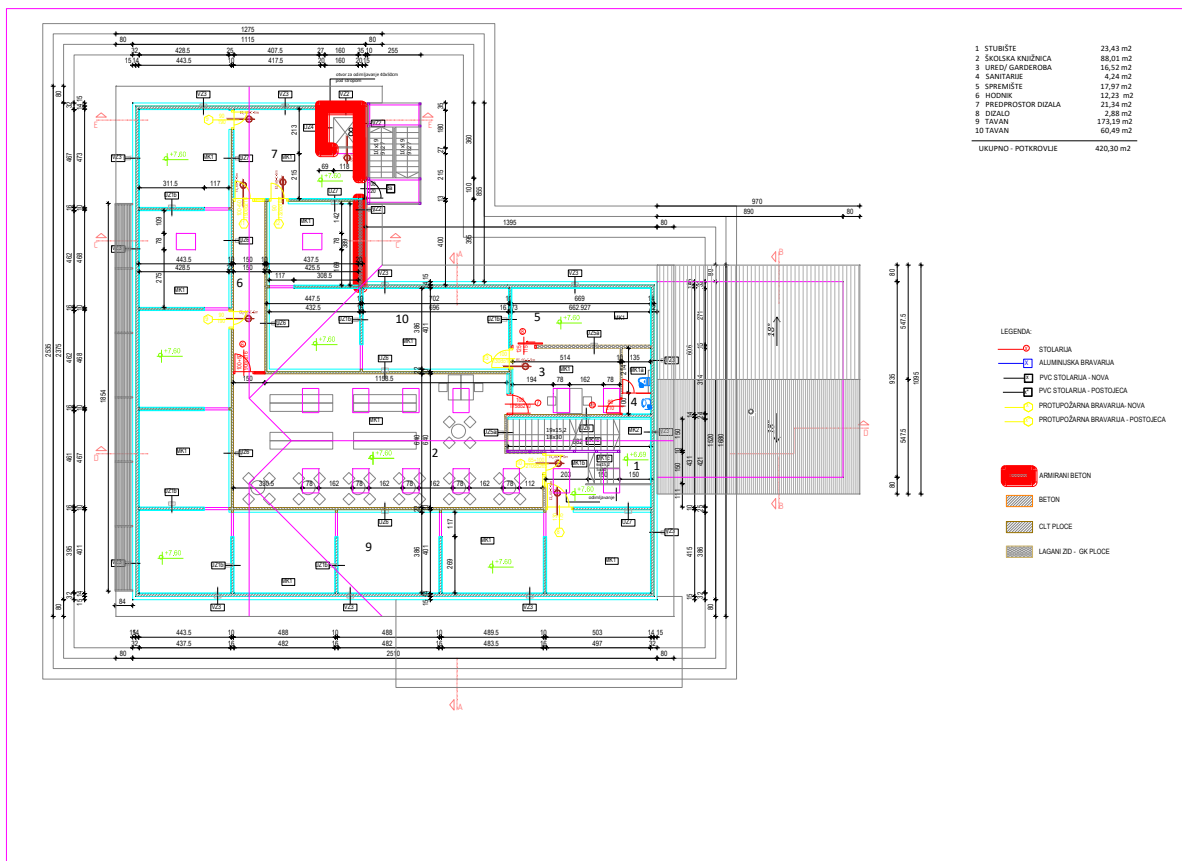
zidovima, pravokutnim otvorima te ravnim parapetnim zidovima. Prizemlje (Slika 3.1.2-a) je omeđeno fasadnim zidovima, unutar gabarita raspodijeljeno je međusobno ortogonalnim zidovima i u tlocrtu sadrži ulaze, okno dizala, unutarnje stubište, vanjsko (interventno) stubište i terasu s nadstrešnicom. Kat (Slika 3.1.2-b) je omeđen fasadnim zidovima, unutar gabarita raspodijeljen je međusobno ortogonalnim zidovima i u tlocrtu sadrži okno dizala, unutarnje stubište, i vanjsko (interventno) stubište. Potkrovlje (Slika 3.1.2-c) je omeđeno fasadnim zidovima, unutar gabarita raspodijeljeno je međusobno ortogonalnim zidovima i u tlocrtu sadrži okno dizala, unutarnje stubište, i vanjsko (interventno) stubište. Krov prizemlja (Slika 3.1.2-e) je jednostrešan, a krov potkrovlja građevine dijelom dvostrešan (s uvalama i grebenima u sjecištima), a dijelom ravan (iznad okna lifta) i u tlocrtu sadrži otvore, završetke odzračnih i ventilacijskih okana te završetke dimnjaka, a do istog se može pristupiti isključivo monatažnim stubištem (privremenim ljestvama). Lift je slobodnih tlocrtnih dimenzija 1.10 m širine i 1.40 m dubine. Unutarnje dvokrako stubište predmetne građevine širine je 1.50 m, kao i podest/međupodest stubišta. Vanjsko (Slika 3.1.2-f) dvokrako stubište predmetne građevine širine je 1.10 m, kao i podest/međupodest stubišta. Tlocrtno, "objekt A" je nepravilnog oblika (kombinacija pravokutnih tlocrta) i rasprostire se unutar pravokutnih gabarita (Slika 3.1.2-a). Ukupna širina konstrukcije predmetne građevine iznosi 27.95 m (sa strehama 28.75 m), a ukupna duljina 35.14 m (sa strehama 35.60 m). Krovište u prizemlju građevine (krov terase) definirano kao jednostrešno, nagiba 20° . Krovište u potkrovlju građevine (iznad okna lifta) definirano je kao ravno, nagiba 1° , odnosno, kao dvostrešno (s uvalama i grebenima u sjecištima), nagiba 20° nad jednim, 19° nad drugim te 18° nad trećim dijelom, apsolutne visine strehe 7.88 m, a sljemena 11.09 m od srednje uređene linije terena (Slika 3.1.2-e). U nastavku (Slika 3.1.2) su dani arhitektonski nacrti projektiranog stanja (preuzeto iz mape 01) [98].



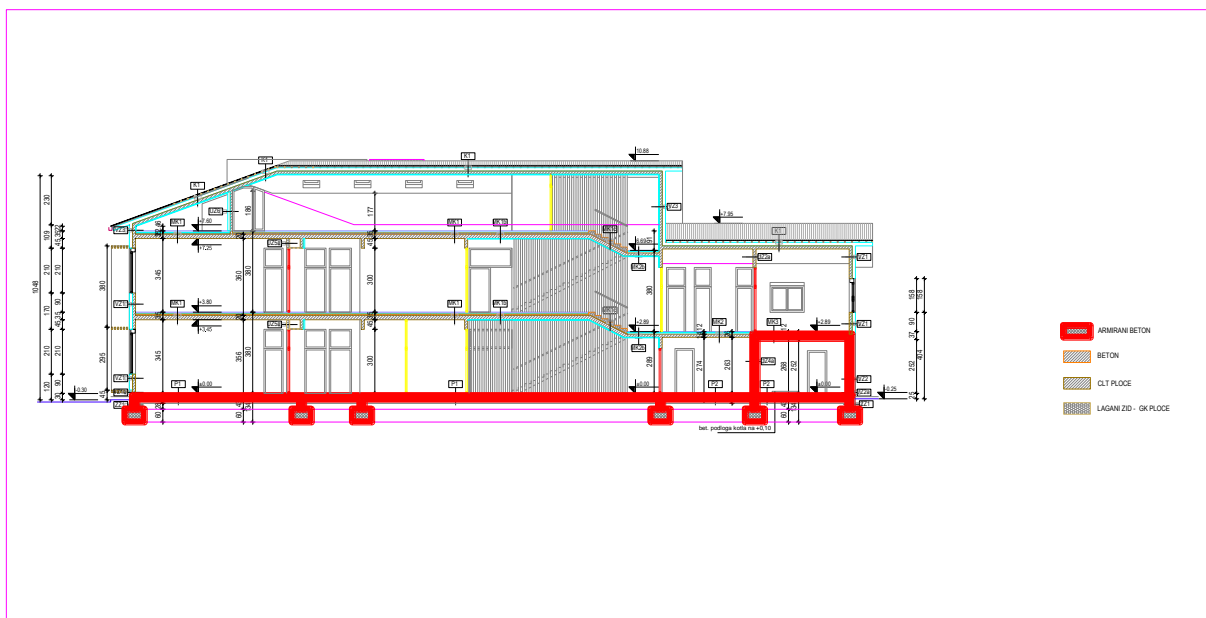
(a) Tlocrt prizemlja



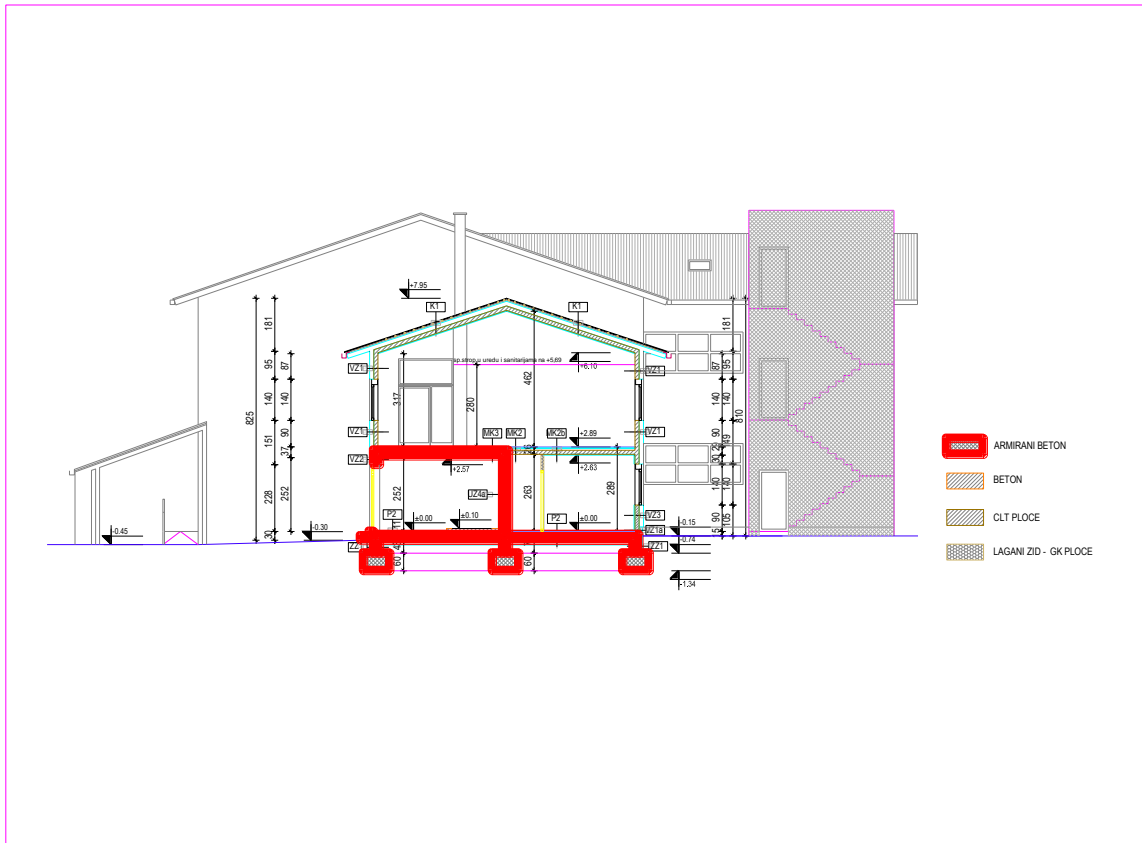
(b) Tlocrt kata



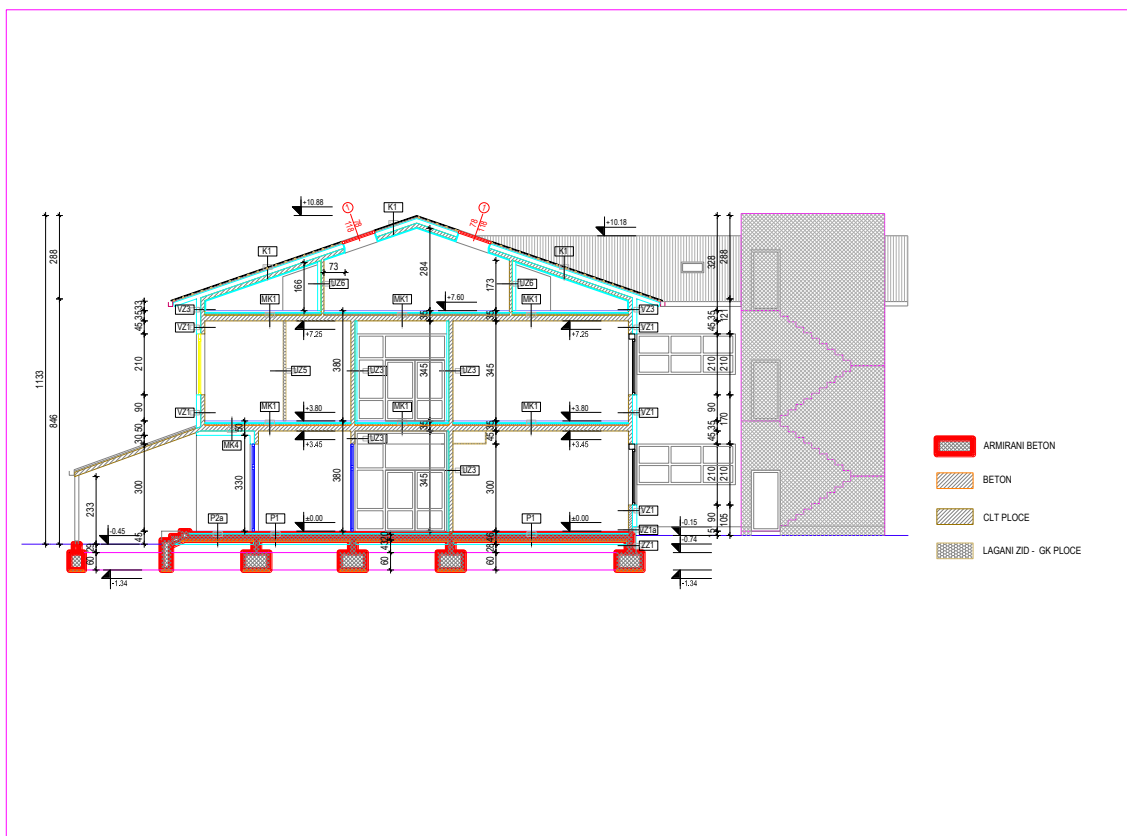
(c) Tlocrt potkrovlja



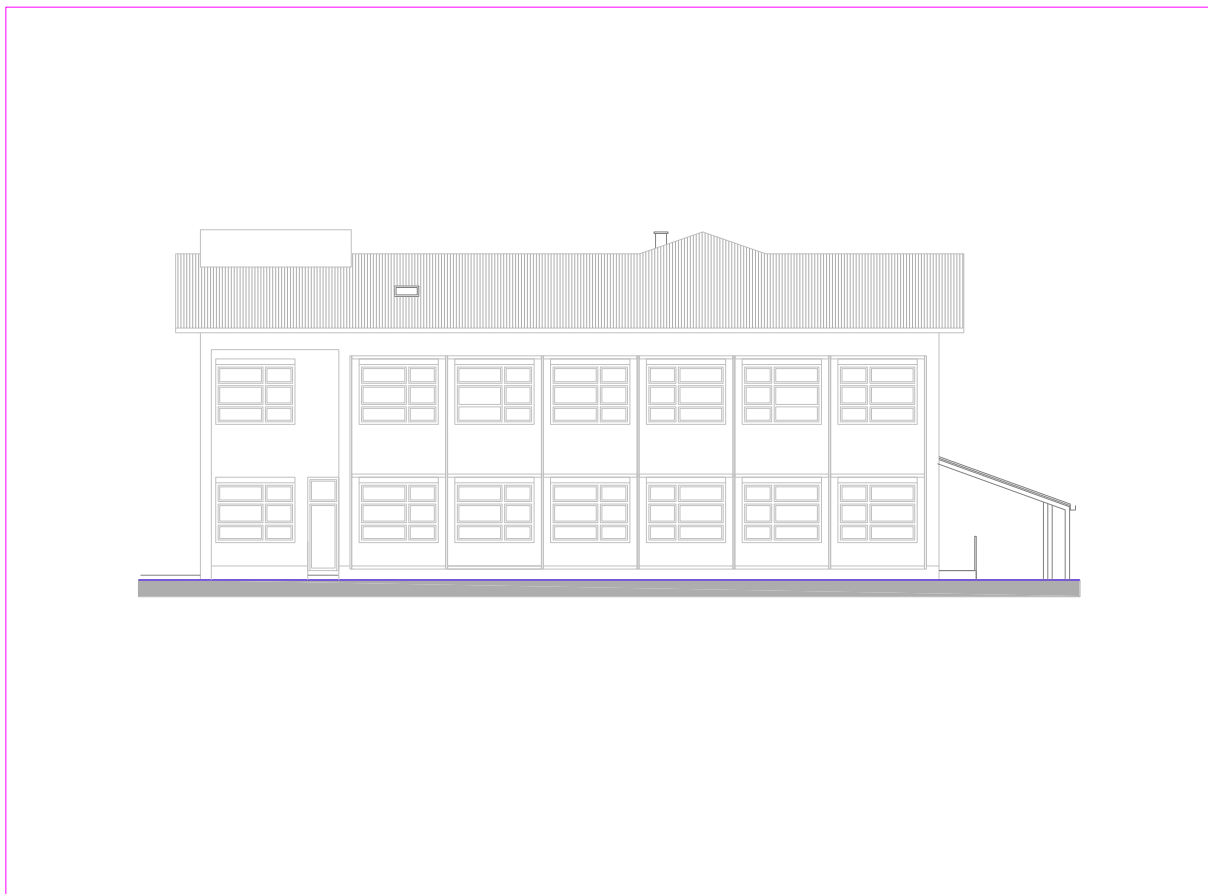
(d) Presjek D-D



(e) Presjek B-B



(f) Presjek A-A



(g) Južno pročelje

Slika 3.1.2 Arhitektonski nacrti projektiranog stanja [98]

Konstrukcija predmetne građevine definirana je relativno jednostavnim statičkim sustavom, odnosno, kao prostorna armiranobetonska/drvena konstrukcija s drvenom krovnom konstrukcijom, temeljena na plitkim armiranobetonskim temeljima.

3.1.1 Pristup

Kolni pristup predmetnoj građevini omogućen je s jedne (istočne) strane i to bez zapreka, pri čemu je dolazak stroja omogućen prometnicom minimalne širine 3.00 m. Prilikom gradnje konstrukcije predmetne građevine potrebno je zadržati postojeće stanje i slobodni profil prometnice.

3.1.2 Konstrukcija objekta

Projektom je definiran nadzemni dio predmetne građevine koji se izvodi u formi troetažne prostorne konstrukcije s dimenzijama i rasporedom nosivih elemenata prema planu pozicija. U zatvorenim tlocrtnim konturama, istu formiraju obodni te unutarnji zidovi (s pravokutnim otvorima) i okviri kojima se definiraju rasponi međukatne i krovne konstrukcije.

Međukatne, odnosno, krovna konstrukcija u zatvorenim tlocrtnim konturama u potpunosti se oslanjaju na grede i zidove. Ovakvom formom i dostatnom površinom u tlocrtu elemenata koji preuzimaju lateralna djelovanja, formira se dovoljno kruta konstrukcija koju karakterizira mala deformabilnost, a koja je bitna za normalno funkcioniranje građevine. Dimenzije svih elemenata predmetne konstrukcije određene su na temelju graničnog stanja nosivosti i graničnog stanja uporabivosti koje isti trebaju zadovoljiti.

Svi nosivi elementi u konstrukciji predmetne građevine povezni su tako da tvore nosivu cjelinu koja preuzima vertikalna i horizontalna opterećenja. Vertikalne nosive elemente čine AB zidovi, čelični i drveni stupovi te drveni (CLT) zidovi, dok horizontalne nosive elemente čine AB ploče, drvene (KVH, GL i CLT) grede te stropne povezane drvene (CLT) ploče, odnosno, spregnute beton-drvene (CLT-AB) ploče nosive u jednom smjeru, kao i povezane kose krovne drvene (CLT) kose ploče nosive u jednom smjeru. Nosivi konstrukcijski sustav projektiran je kao dvojni torzijski osjetljiv sustav. Horizontalna nosiva konstrukcija preuzima sva gravitacijska djelovanja, koja se preko vertikalne nosive konstrukcije prenose u temelje, a preko temelja u nosivo tlo. Dodatna funkcija horizontalne nosive konstrukcije je povezivanje vertikalnih nosivih elemenata na način da se osigura rad krovne i stropne plohe kao krutih dijafragmi prilikom lateralnih djelovanja, dok vertikalna nosiva konstrukcija ima i funkciju osigurati horizontalnu stabilnost konstrukcije te preuzeti horizontalna djelovanja.

Nakon izvedbe svih AB elemenata, na AB podnu ploču i AB stropnu ploču (sukladno dispozicijskom nacrtu), po obodu i unutar konstrukcije, ugrađuju se drveni (KVH) stupovi dimenzija poprečnog presjeka 14/14 cm, odnosno, drveni (GL) stupovi dimenzija poprečnog presjeka 14/64 cm, a zatim i drveni (CLT) zidovi debljine 14 cm s lamelama u 5 slojeva, odnosno, odnosno debljine 10 cm s lamelama u 3 sloja (vanjske lamele složene su vertikalno) te drveni (CLT) nadvoji dimenzija poprečnog presjeka 14/44 cm (vanjske lamele složene su paralelno) i drvene (GL) grede dimenzija poprečnog presjeka 14/82(120) cm. Na okvire prizemlja ugrađuju se međusobno povezane drvene (CLT) stropne ploče debljine 20 cm s lamelama u 5 slojeva (vanjske lamele složene su paralelno s većim rasponom), odnosno, međusobno povezane spregnute beton-drvene (CLT-AB) stropne ploče debljine 20+6 cm s lamelama u 5 slojeva (vanjske lamele složene su paralelno s većim rasponom) i tlačnom AB pločom debljine 6 cm, za koju je predviđeno da se izvodi najmanje sedam dana prije ugradnje ili in situ uz primjereno poduiranje ploče koja se spreže. Na stropne ploče prizemlja nadalje se ugrađuju zidovi i nadvoji te ploče sličnih karakteristika kao i oni u prizemlju. Na stropne ploče kata nadalje se ugrađuju zidovi i nadvoji sličnih karakteristika kao i oni u prizemlju. Na okvire potkrovlja ugrađuju se međusobno povezane drvene (CLT) krovne kose ploče debljine 14 cm

s lamelama u 5 slojeva (vanjske lamele složene su paralelno s rasponom), pri čemu se u osi uvala i hrptova iste oslanjaju jedna na drugu. Na okvire etaža ugrađuju se međusobno povezane drvene (CLT) ploče stubišta debljine 20 cm s lamelama u 5 slojeva (vanjske lamele složene su paralelno s većim rasponom). Popis građevinskih slojeva prikazuje Slika 3.2.12.

VZ1a - Vanjski zid CLT - sokl		ZZ1 - Zid u zemlji AB		UZ5 - Unutarnji pregradni zid GK	
- CLT	14,0 cm	- armirani beton	20,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm
- H.I.	0,8 cm	- H.I.	0,8 cm	- mineralna vuna	5,0 cm
- XPS	12,0 cm	- XPS	12,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm
- polimerna žbuka	0,3 cm	- cepasta folija	0,3 cm		
- žbuka na bazi akrilata	0,3 cm			UZ6 - Unutarnji nosivi zid CLT	
		UZ1a - Unutarnji nosivi zid CLT		- CLT	14,0 cm
VZ1 - Vanjski zid CLT		- CLT	10,0 cm	- mineralna vuna	10,0 cm
- CLT	14,0 cm	UZ1b - Unutarnji nosivi zid CLT		- 2 x GK ploce	2,5 cm
- mineralna vuna	15,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm	UZ7 - Unutarnji pregradni zid GK	
- polimerna žbuka	0,3 cm	- CLT	10,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm
- silikatna žbuka	0,3 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm	- CLT	14,0 cm
		UZ1 - Unutarnji nosivi zid CLT		- mineralna vuna	10,0 cm
VZ2a - Vanjski zid AB - sokl		- 2 x GK ploce	2,5 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm
- armirani beton	20,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm	MK1a - međukatna konstrukcija CLT	
- H.I.	0,8 cm	- mineralna vuna	6,0 cm	- ker. pločice	0,8 cm
- XPS	12,0 cm	- CLT	10,0 cm	- grad. ljepilo	0,2 cm
- polimerna žbuka	0,3 cm	- mineralna vuna	6,0 cm	- cem. estrih	4,0 cm
- žbuka na bazi akrilata	0,3 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm	- PE folija	0,15 cm
		UZ2a - Unutarnji nosivi zid CLT		- mineralna vuna	3,0 cm
VZ2 - Vanjski zid AB		- CLT	14,0 cm	- PE folija	0,15 cm
- armirani beton	14,0 cm	UZ2 - Unutarnji nosivi zid CLT		- lagani beton	6,0 cm
- mineralna vuna	15,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm	- CLT	20,0 cm
- polimerna žbuka	0,3 cm	- mineralna vuna	6,0 cm		
- silikatna žbuka	0,3 cm	- CLT	14,0 cm	MK1b - međukatna konstrukcija CLT	
		- mineralna vuna	6,0 cm	- lijevani PE sustav	0,6 cm
VZ3 - Vanjski zid CLT		- CLT	14,0 cm	- cem. estrih	6,0 cm
- 2 x GK ploce	2,5 cm	- mineralna vuna	6,0 cm	- PE folija	0,15 cm
- CLT	14,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm	- mineralna vuna	3,0 cm
- mineralna vuna	15,0 cm	UZ3 - Unutarnji nosivi zid CLT		- PE folija	0,15 cm
- polimerna žbuka	0,3 cm	- CLT	14,0 cm	- lagani beton	6,0 cm
- silikatna žbuka	0,3 cm	- mineralna vuna	6,0 cm	- CLT	20,0 cm
		- 2 x GK ploce	2,5 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm
VZ4 - Vanjski zid CLT		UZ4a - Unutarnji nosivi zid AB - kotlovnica		MK1c - međukatna konstrukcija CLT - stubište	
- silikatna žbuka	0,3 cm	- armirani beton	20,0 cm	- betonska stuba	
- polimerna žbuka	0,3 cm	- kombi ploce	3,5 cm	- CLT	20,0 cm
- mineralna vuna	5,0 cm	- lagana žbuka	2,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm
- CLT	14,0 cm				
- mineralna vuna	15,0 cm	UZ4 - Unutarnji nosivi zid AB - dizalo		MK1 - međukatna konstrukcija CLT	
- polimerna žbuka	0,3 cm	- armirani beton	20,0 cm	- lijevani PE sustav	0,6 cm
- silikatna žbuka	0,3 cm	- mineralna vuna	5,0 cm	- cem. estrih	6,0 cm
		- 2 x GK ploce	2,5 cm	- PE folija	0,15 cm
VZ5 - Vanjski zid CLT - nadozid		UZ5a - Unutarnji pregradni zid GK		- mineralna vuna	3,0 cm
- TPO traka	0,2 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm	- PE folija	0,15 cm
- geotekstil	0,2 cm	- parna brana	0,025 cm	- lagani beton	6,0 cm
- mineralna vuna	5,0 cm	- mineralna vuna	10,0 cm	- CLT	20,0 cm
- CLT	10,0 cm	- 2 x GK ploce	2,5 cm		
- mineralna vuna	15,0 cm				
- polimerna žbuka	0,3 cm				
- silikatna žbuka	0,3 cm				

MK2a - međukatna konstrukcija CLT - ker. pločice 0,8 cm - grad. ljepilo 0,2 cm - 2 x GK ploče 2,5 cm - mineralna vuna 3,0 cm - pijesak - suhi 6,0 cm - PE folija 0,15 cm - CLT 14,0 cm	K1 - kosi krov CLT - 2 x GK ploče 2,5 cm - CLT 14,0 cm - mineralna vuna 15,0 cm - paropropusna, vodonepropusna folija 0,02 cm - letve / kontraletve 8,0 cm - glineni crijep 1,5 cm	P2 - pod na tlu - ker. pločice 0,8 cm - grad. ljepilo 0,2 cm - cem. estrih 4,0 cm - PE folija 0,15 cm - mineralna vuna 3,0 cm - PE folija 0,15 cm - H.I. 1,0 cm - armirani beton 20,0 cm - podložni beton 5,0 cm - XPS 10,0 cm - nasip pijeska/šljunka 40,0 cm
MK2b - međukatna konstrukcija CLT - lijevani PE sustav 0,6 cm - 2 x GK ploče 2,5 cm - mineralna vuna 3,0 cm - pijesak - suhi 6,0 cm - PE folija 0,15 cm - CLT 14,0 cm - 2 x GK ploče 2,5 cm	K2 - ravni krov CLT - 2 x GK ploče 2,5 cm - CLT 14,0 cm - parna brana 0,02 cm - mineralna vuna 18,0 cm - geotekstil 0,2 cm - TPO traka 0,2 cm	P3 - pod na tlu - jama dizala - cem. estrih 6,0 cm - H.I. 1,0 cm - armirani beton 20,0 cm - XPS 10,0 cm - podložni beton 5,0 cm - nasip pijeska/šljunka 40,0 cm
MK2 - međukatna konstrukcija CLT - lijevani PE sustav 0,6 cm - 2 x GK ploče 2,5 cm - mineralna vuna 3,0 cm - pijesak - suhi 6,0 cm - PE folija 0,15 cm	K3 - ravni krov AB - armirani beton 20,0 cm - parna brana 0,02 cm - mineralna vuna 18,0 cm - geotekstil 0,2 cm - TPO traka 0,2 cm	
MK3 - međukatna konstrukcija AB - lijevani PE sustav 0,6 cm - 2 x GK ploče 2,5 cm - mineralna vuna 3,0 cm - pijesak - suhi 6,0 cm - PE folija 0,15 cm - armirani beton 14,0 cm - kombi ploče 3,5 cm - lagana žbuka 2,0 cm	P1 - pod na tlu - lijevani PE sustav 0,6 cm - cem. estrih 6,0 cm - PE folija 0,15 cm - mineralna vuna 3,0 cm - PE folija 0,15 cm - H.I. 1,0 cm - armirani beton 20,0 cm - podložni beton 5,0 cm - XPS 10,0 cm - nasip pijeska/šljunka 40,0 cm	
MK4 - međukatna konstrukcija CLT - lijevani PE sustav 0,6 cm - cem. estrih 6,0 cm - PE folija 0,15 cm - mineralna vuna 3,0 cm - PE folija 0,15 cm - lagani beton 6,0 cm - CLT 20,0 cm - mineralna vuna 15,0 cm - polimerna žbuka 0,3 cm - silikatna žbuka 0,3 cm	P2a - pod na tlu - trijem - ker. pločice 0,8 cm - grad. ljepilo 0,2 cm - cem. estrih 4,0 cm - PE folija 0,15 cm - mineralna vuna 3,0 cm - PE folija 0,15 cm - H.I. 1,0 cm - armirani beton 20,0 cm - podložni beton 5,0 cm - XPS 10,0 cm - nasip pijeska/šljunka 40,0 cm	

Slika 3.1.3 Popis građevinskih slojeva

Otpornost elemenata drvene konstrukcije na požar određuje se proračunom nosivosti reduciranog drvenog presjeka prema HRN EN 1995-1-2:2008. Kako bi se dodatno osigurala dostatna otpornost drvenih konstruktivnih elemenata na požar, dio drvenih površina oblaže se sustavom na bazi gips-kartonskih ploča (razreda reakcije na požar najmanje A2). Na preostalom, izloženom dijelu drvenih površina, zaštitu će se izvesti nanošenjem adekvatnog prozirnog protupožarnog premaza za drvo u unutarnjem prostoru, odnosno, premaznog sustava koji ne sadrži otapala ni formaldehide, a koji pod utjecajem visokih temperatura stvara izolirajući sloj. Uporabom navedenog premaza na vidljive drvene površine, osim doprinosa postizanju zahtijevanog razreda otpornosti na požar, postići će se razred reakcije na požar B-s1, d0 prema HRN EN 13501-1:2019. Svrha premaza je da kratkotrajno sprječava zapaljenje

drvene površine, izolira vrućinu, koči vatru i sprječava širenje požara, odnosno, da spriječi naknadno gorenje zaštićenih površina te da reducira dimne plinove.

3.1.2.1 Mjere zaštite od požara – mapa 01a

Zgrada se planira tako da ima tri nadzemne etaže te je kota poda najviše etaže za boravak ljudi manja od 11 m mjereno od kote vanjskog terena s kojeg je moguća intervencija vatrogasaca, odnosno evakuacija ugroženih osoba. Prema Pravilniku o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13, 87/15), predmetna građevina spada u zgrade **podskupine 4 (ZPS 4)**.

Požarno opterećenje u pojedinim dijelovima predmetne zgrade prikazano je u Tablica 3.1.1. Za određivanje veličine mobilnog požarnog opterećenja korištena je austrijska smjernica TRVB A 126. Za veličine imobilnog požarnog opterećenja korištena je smjernica TRVB 100, tablica 6.2. Obzirom da je nosiva konstrukcija zgrade škole od križno-lameliranog drva, za veličinu imobilnog požarnog opterećenja uzeta je vrijednost od 1100 MJ/m².

Tablica 3.1.1 Požarno opterećenje

Prostor	Mobilno požarno opterećenje MJ/m ²	Imobilno požarno opterećenje MJ/m ²	Ukupno MJ/m ²
Učionice	300	1100	1400
Uredi	700	1100	1800
Knjižnica	727	1100	1727
Kotlovnica	400	0	400
Kuhinja	500	1100	1600

Ostale mjere zaštite od požara koje nisu dio analize u ovom radu, sadržane su u mapi 01a [98].

3.2 CFD analiza – računalna dinamika fluida

Softver Fire Dynamics Simulator (FDS) [7] radi s proračunskim modelom dinamike fluida. U FDS simulaciji, trodimenzionalni prostor je podijeljen u male pravokutne volumene. Unutar svakog volumena, varijable plina smatraju se homogenim, ali se mijenjaju tijekom vremena. Kako bi održao zamah, FDS rješava Navier-Stokesove jednadžbe pomoću simulacije velikih vrtloga (LES) za simulaciju turbulentnih tokova. Za reakcije izgaranja koristi se model s miješanom strujom [82]. Postoji prijenos topline na čvrste površine i protok fluida. Glavna prednost ove metode je da omogućuje varijacije parametara požara i daje informacije o toplinskom opterećenju. CFD modeli mogu simulirati požar i njegove učinke, interakciju požara s nekoliko vrsta sigurnosnih sustava (kao što su protupožarna ventilacija, električna signalizacija i sustavi za gašenje požara) i utjecaj učinaka požara na kretanje osoba unutar objekta [20]. Osnova matematičkog modela FDS-a su 4 jednadžbe, od kojih su 3 parcijalne diferencijalne jednadžbe:

Očuvanje mase:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = \dot{m}_b^m \quad (3.1)$$

Očuvanje kutne količine gibanja:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho u) + \nabla \cdot \rho uu + \nabla_p = p_g + f_b + \nabla \cdot \pi_{ij} \quad (3.2)$$

Očuvanje energije

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho_{hs}) + \nabla \cdot \rho_{hs} \cdot u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \dot{q}_b^m - \nabla \cdot \dot{q}^n + \varepsilon \quad (3.3)$$

Jednadžba stanja:

$$p = \frac{pRT}{W} \quad (3.4)$$

Gdje su: ρ - gustoća [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], u - (u, v, w) vektor prostora, p - tlak [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$], f_b – vektor vanjske sile, π_{ij} – elektromagnetski tenzor, hs – gustoća entalpije, q_b - procesi prijenosa topline unutar kapljice, \dot{q}^m - brzina oslobađanja topline po jedinici volumena, \dot{q}^n - kondukcijski protok topline, R - univerzalna plinska konstanta, T - temperatura, W - molekularna težina, t – vrijeme, g – gravitacijsko ubrzanje, ε - brzina kinetičke energije tijekom transformacije u toplinsku energiju.

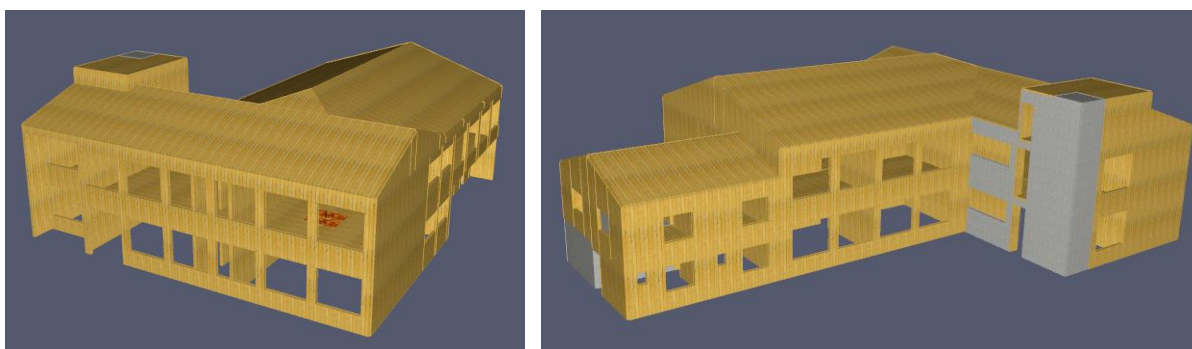
Prostorni model izrađen je u programskom sustavu PyroSim 2023 [8] koji je grafičko sučelje FDS softvera i služi za modificiranje i kontrolu ulaznih podataka.

U ovom specijalističkom radu koristit će se predefinirani model pirolize. Unaprijed definirana piroliza obično se koristi za predviđanje varijacija temperature i kretanja dima unutar određene domene uzrokovane požarom. Kako bi proveli ove simulacije, moguće je definirati

vremenski ovisan HRR i definirati površinu na kojoj će se taj HRR pojaviti. FDS koristi ove podatke za određivanje količine zapaljivih plinova koji ulaze u domenu i pale se. Alternativno, moguće je odrediti vremenski ovisnu brzinu kojom će zapaljivi plinovi ući u simuliranu domenu. Ovaj unaprijed definirani model pirolize može se implementirati korištenjem SURF „plamenika“, primijenjenog na VENT ili površinu. Nakon postizanja određene temperature paljenja, površina postaje izvor emisije plinovitog goriva. Oslobođanje topline također se može konfigurirati tako da nestane nakon što određena masa goruće površine potpuno izgori. Ovaj model pirolize zahtijeva pretpostavku brzine oslobađanja topline za predmet koji gori, što se može dobiti iz izvora kao što su literatura i razna požarna ispitivanja. U ovom radu koristila se postojeća literatura i stanje područja.

3.2.1 Generiranje 3D modela

Na osnovu arhitektonsko-građevinskih podloga i detaljnog 3D modela (Slika 3.2.1), izrađen je pojednostavljeni prostorni (3D) model objekta. Dobiveni 3D model zatim je prilagođen potrebama i formatu prihvatljivim za programski paket PyroSim [8], u kojem će se obaviti simulacija razvoja požara i dima, te detektirati temperature na površinama.

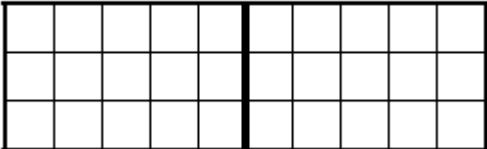
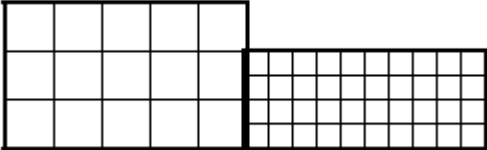
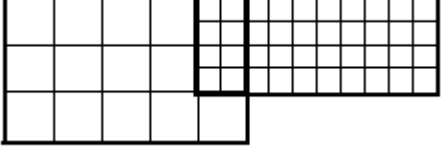
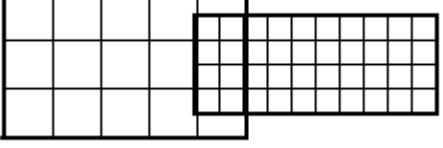
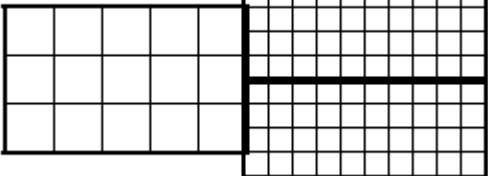
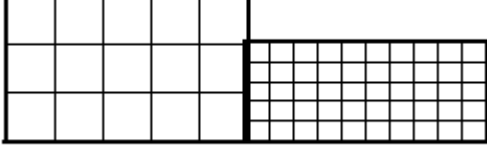


Slika 3.2.1 3d model – PyroSim

U požarnom okruženju, površine su izložene radijacijskoj i konvekcijskoj toplini. Dio te topline provodi se u čvrsti materijal u vidu toplinskog toka. Ove površine mogu se sastojati od višestrukih slojeva sastavljenih od različitih materijala, koji mogu biti podvrgnuti reakcijama toplinske razgradnje dok se toplina provodi kroz njih, mijenjajući njihov kemijski sastav. FDS pretpostavlja da se konduktivna toplina kreće okomito na čvrstu površinu i može se prikazati jednodimenzionalnom jednadžbom vodljivosti topline. Jednodimenzionalna pretpostavka ima ograničenja jer ne uzima u obzir radijalnu disperziju topline ili zagrijavanje više strana određene površine/elementa. FDS koristi „obstructions“, koje su trodimenzionalni čvrsti objekti koji „ometaju“ protok energije. Na taj način se definiraju zidovi, podovi i stropovi, kao i bilo koji drugi element konstrukcije.

3.2.2 Generiranje numeričke mreže

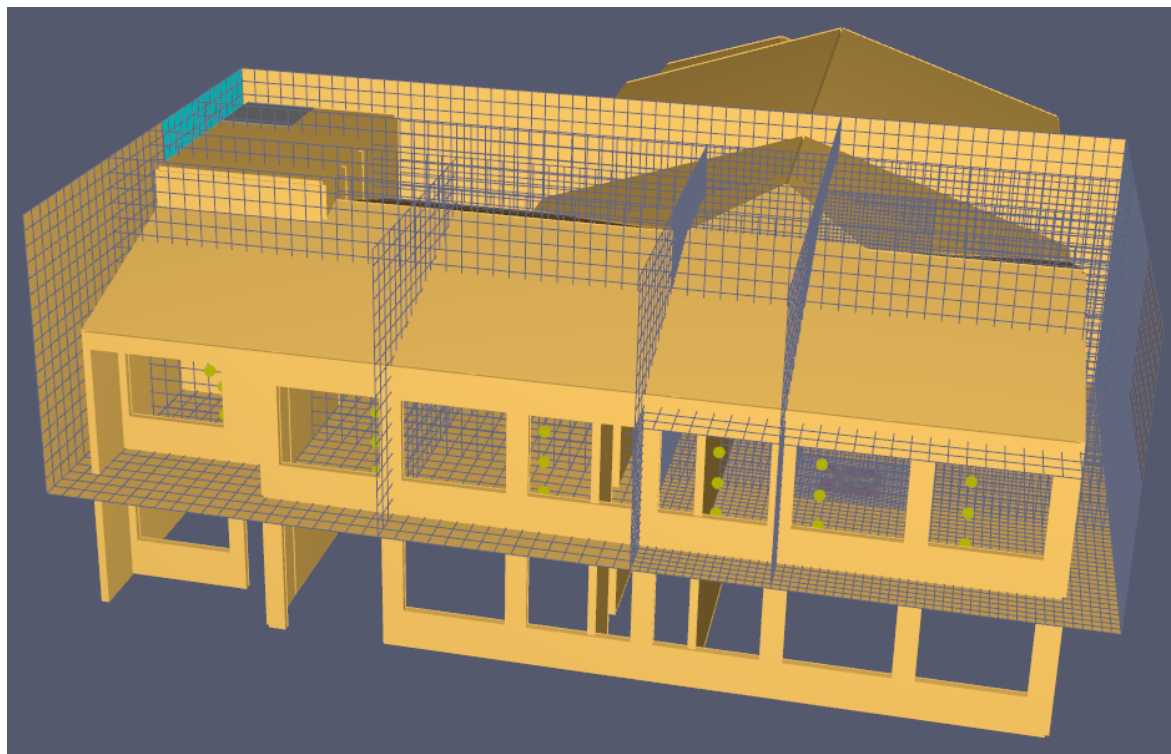
Generiranje numeričke mreže također je obavljeno u PyroSim-u [8]. U nastavku su dana pravila kojima vodilo u ovom radu (Slika 3.2.2).

	<p>Ovo je idealna vrsta poravnanja mreže</p>
	<p>Ovo je dopušteno sve dok postoji cjelovit broj finih ćelija, nasuprot svakoj gruboj ćeliji i svaka gruba ćelija samo „vidi“ fine ćelije iz jedne mreže.</p>
	<p>To je dopušteno, ali upitno.</p>
	<p>To nije dopušteno jer svaka velika ćelija mora biti potpuno prekrivena malim ćelijama.</p>
	<p>To nije dopušteno jer postoji gruba ćelija koja „vidi“ fine ćelije od dvije različite mreže.</p>
	<p>Ovo nije dopušteno jer postoji necjelovit broj finih ćelija nasuprot svakoj gruboj ćeliji.</p>

Slika 3.2.2 Pravila koja reguliraju poravnanje mreža.

Numeričke mreže za oba požarna scenarija imaju veću rezoluciju u područjima koja su od interesa za analizu (izvor požara, drvena konstrukcija ploče i zida, dovodi svježeg zraka i sl.), što je karakteristika tzv. „nestrukturiranih“ numeričkih mreža.

Konkretno, numerička mreža (Slika 3.2.3) u području interesa progušćena je u kontrolne volumene dimenzija 0.1x0.1x0.1 m dok je ostatak objekta definiran u kontrolne volumena dimenzija od 0.2x0.2x0.2 m do 0.4x0.4x0.4 metra.



Slika 3.2.3 Numerička mreža

3.2.3 Ulazni podaci i simulacija

Na osnovu generirane numeričke mreže i definiranih požarnih scenarija određeni su ulazni podaci koji su potrebni za provedbu simulacije. Reprerentativnost dobivenih numeričkih rezultata u direktnoj je ovisnosti o kvaliteti i realnosti ulaznih parametara. Iz tog razloga ulazni podaci su uzeti iz renomiranih izvora i literature.

Zapaljivost i oslobođena požarna snaga razgradnjom drvenih konstrukcija definirana je kalorimetrijskim mjerenjima [99–101]. Sve unutarnje pregrade izrađene su od CLT ploča debljine 100 mm. Obodni zid se sastoji od CLT ploča debljine 140 mm, koji je s unutarnje strane obložen gips pločama, s vanjske strane izolacijom od mineralne vune s tankoslojnom žbukom. Unutarnji nosivi i požarni pregradni zidovi izrađeni su od CLT ploča debljine 140 mm i obostrane obloge od gips ploča. Međukatna konstrukcija izvedena je od CLT ploča debljine 200 mm. Fizičke karakteristike građevinskih materijala korištenih u modelu, prikazuje Tablica 3.2.1.

Tablica 3.2.1 Popis slojeva nosive konstrukcije

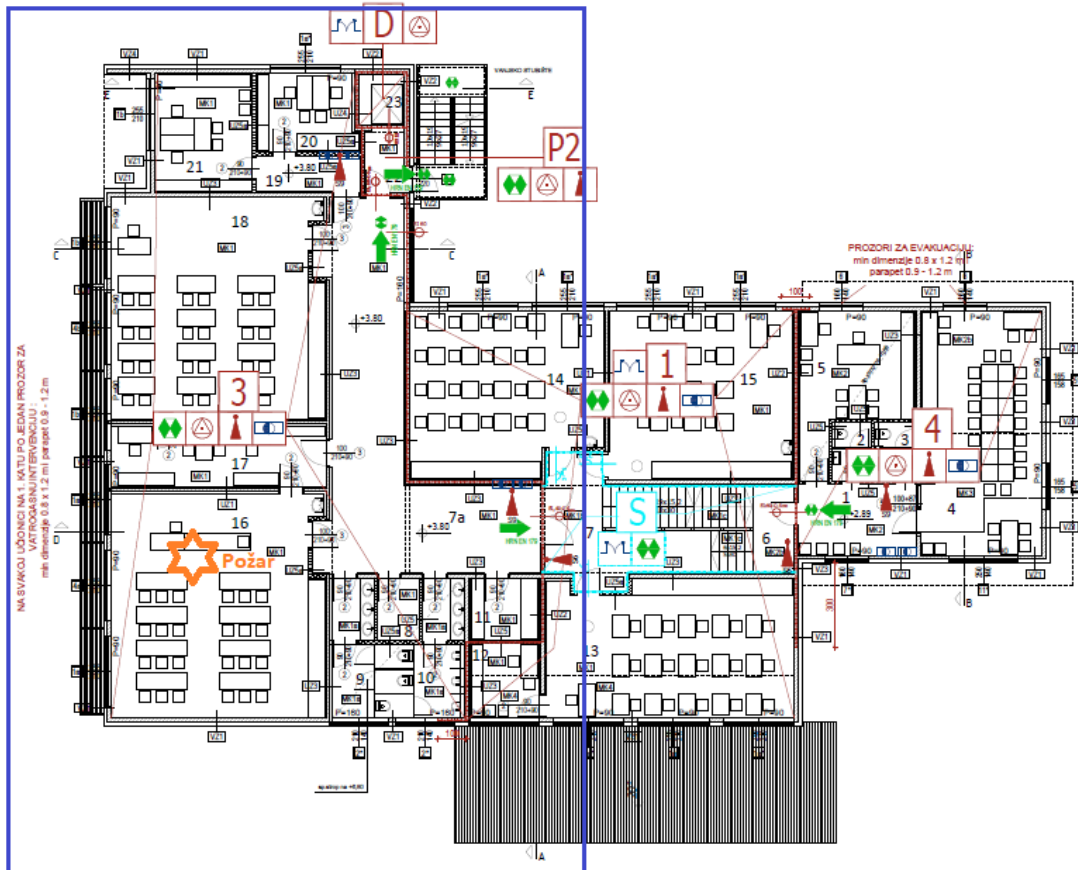
Konstrukcija	Sloj	Debljina (mm)	Gustoća (kg/m ³)	λ [W/mK]	Specifična toplina (kJ/kgK)	Emisivnost	Razred reakcije na požar zahtijeva njih slojeva prema HRN EN 13501-1
Vanjski zid	Gips - kartonske ploče	2x12.5	750	0.25	1.06	0.9	min A2
	CLT	140	470	0.13	1.6	0.9	D
	Mineralna vuna	150	120	0.037	1.74	0.9	min A2
	Silikatna žbuka	3	1800	0.9	0.01	0.9	min A2

Unutarnji zid na granici pož. odjeljka	Gips - kartonske ploče	2x12.5	750	0.25	1.06	0.9	min A2
	CLT	140	470	0.13	1.6	0.9	D
	Mineralna vuna	100	120	0.037	1.74	0.9	min A2
	Gips - kartonske ploče	2x12.5	750	0.25	1.06	0.9	min A2

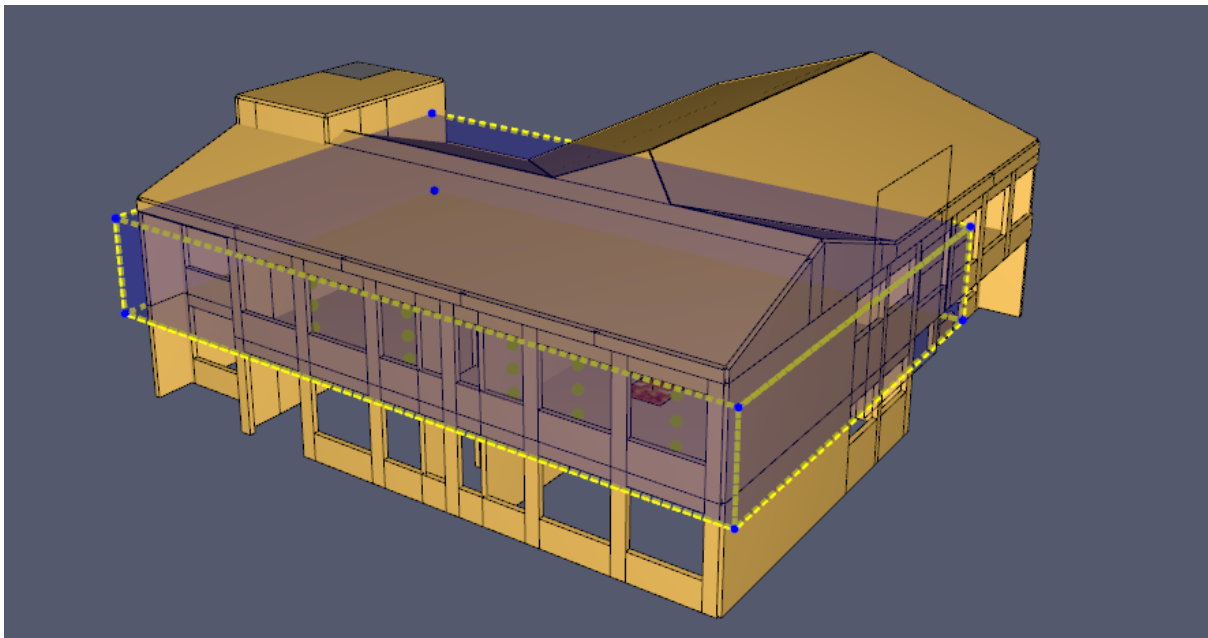
Unutarnji nosivi zid	Gips - kartonske ploče	2x12.5	750	0.25	1.06	0.9	min A2
	CLT	100	470	0.13	1.6	0.9	D
	Gips - kartonske ploče	2x12.5	750	0.25	1.06	0.9	min A2

Međukatna konstrukcija	Gips - kartonske ploče	2x12.5	750	0.25	1.06	0.9	min A2
	Mineralna vuna	30	120	0.037	1.74	0.9	min A2
	CLT	200	470	0.13	1.6	0.9	D
	Gips - kartonske ploče	2x12.5	750	0.25	1.06	0.9	min A2

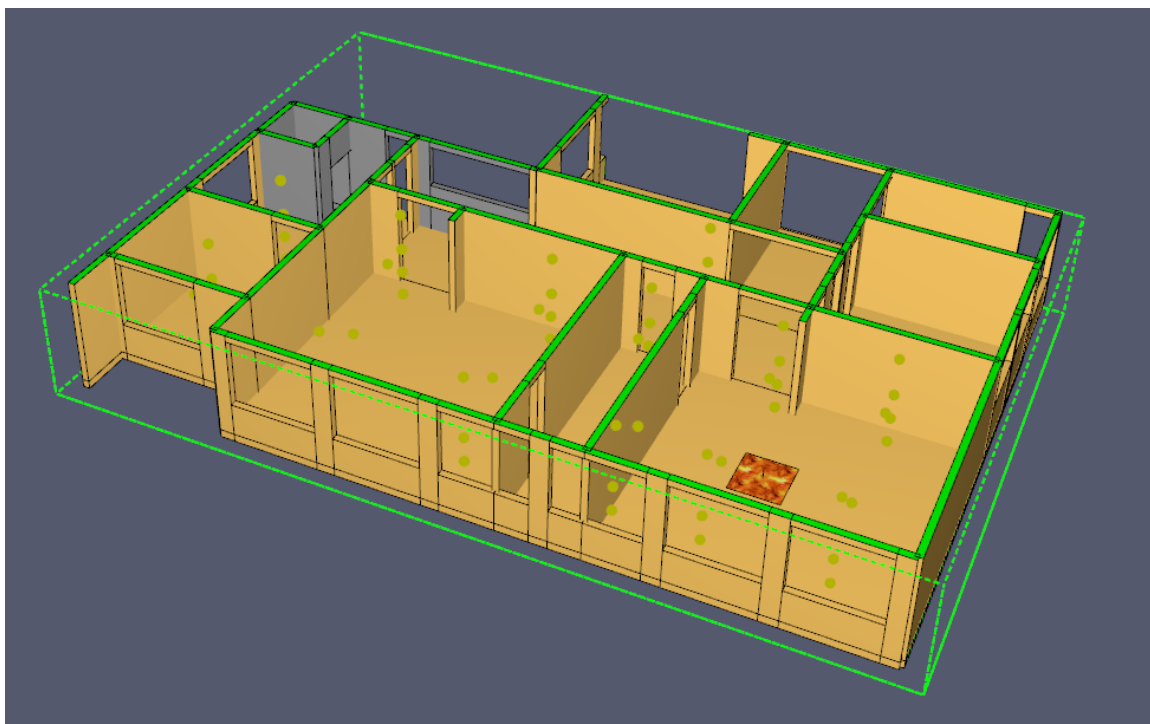
U modelu se razmatra požar u učionici, koja je dio najvećeg požarnog odjeljka (Slika 3.2.4). Metoda projektiranja požara uključuje izbor scenarija požara, određivanje vrste i snage požara, proračun razvoja temperature u konstrukcijskim elementima i proračun mehaničkog ponašanja konstrukcije izložene požaru.



(a) Tlocrt kata



(b) 3D pogled objekta



(c) 3D prikaz požarnog odjeljka

Slika 3.2.4 Lokacija požara i odabrani požarni sektor

3.2.4 Reakcije

Razvoj točnog modela reakcija ključan je za postizanje pouzdanih rezultata. Ovaj odjeljak opisuje proces definiranja modela reakcije, obrazloženje iza odabranog modela, i neizvjesnosti povezane s njegovom provedbom. Uvidom u stanje područja, vidljiv je prikaz različite vrijednosti topline izgaranja za drvo. Dok Bartlett i sur. [102,103] sugeriraju vrijednost od 17.5 MJ/kg, Rinta-Paavola & Hostikka [104] predlažu 13.75 MJ/kg. Da bi se uzele u obzir ove razlike i umanjile neopravdane pretpostavke, dvije različite reakcije uključene su u model: CRIB piroliza, te ELEMENT piroliza. Reakcije za zidne i stropne elemente su iste, dok CRIB piroliza predstavlja reaktivnu vrstu koja se uvodi se u domenu preko „PLAMENIKA“ i dodjeljuje mu se toplina izgaranja u vrijednosti od 17,5 MJ/kg u skladu s Bartlett i sur, dok su za stropovi i zidovi označavaju reaktivnu vrstu koju stvara materijal smreke uslijed pirolize, ima vrijednost topline izgaranja od 13,75 MJ/kg kako su opisali Rinta-Paavola & Hostikka.

Proces izgaranja modeliran je kao reakcija $C3.4H6.2O2.5N0$. Prinosi čađe i CO nisu navedeni u studiji Rinta-Paavola i Hostikka; stoga, vrijednosti od 0.015 za čađu i 0.004 za CO (g/g) usvojene su na temelju podataka iz prethodno navedene literature (poglavlje 2.5.1).

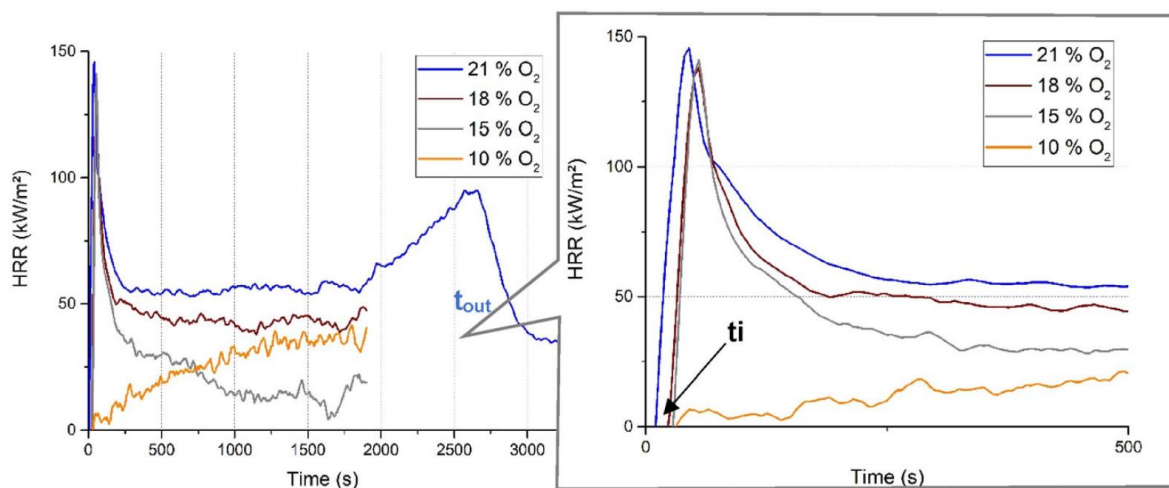
3.2.5 Požarni scenariji

Zapaljena svijeća na stolu u sobi smatrana je izvorom požara u simulaciji, pri čemu je došlo do zapaljenja stola, a potom i razvoja požara objektu. U parametarskim simulacijama požara

razmatramo sljedeće uvjete:

- Prosječna gustoća imobilnog požarnog opterećenja (CLT) je 1100 MJ/m².
- Opskrbu kisikom osiguravaju otvori u vanjskim zidovima
- Simulacija se provodi u vremenu od 15 minuta (900 sekundi), jer za lokaciju, gdje se nalazi zgrada nadležna je JVP Petrinja (Vatrogasna ulica 57, Petrinja) sa stalnim dežurstvom, a koja se nalazi na udaljenosti cca 10 km od predmetne zgrade. Od JVP Petrinja do predmetne zgrade vode prometnice s reguliranim prometom, pa je predviđeno vrijeme dolaska vatrogasne postrojbe na intervenciju 15 minuta.

U **varijanti A**, smatra se da si CLT elementi nezaštićeni/izloženi, te pridonose razvoju požara i količini oslobođene topline. Definiranje ispravne toplinske snage nije jednostavno. U nastavku su dani kalimetrijski podaci (Slika 3.2.5) dobiveni iz eksperimentalnih ispitivanja [105].



Slika 3.2.5 Ovisnost HRR-a o količini kisika [105]

Nakon zapaljenja, uočava se vršna vrijednost HRR-a, nakon čega dolazi do faze usporavanja sve do faze stagnacije sa određenom prosječnom vrijednošću HRR-a. Nadalje, različite vrijednosti HRR-a su dobivene za različite toplinske tokove. Ipak, može se uočiti korelacija između vršne vrijednosti HRR te prosječne vrijednosti HRR-a.

U Pyrosim-u [8], svi CLT elementi definirani su na način da pridonose razvoju požara nakon što dosegnu temperaturu od 384 °C (Slika 3.2.6a), kada se oslobađa određena količina HRRPUA što je definirano normaliziranom krivuljom HRRPUA (Slika 3.2.6), na osnovu prethodnih eksperimentalnih istraživanja razgradnje CLT-a [105].

Edit Surfaces

Surface ID: CLT-zid

Description:

Color: Appearance:

Surface Type: Layered

Material Layers Surface Props Thermal

Geometry Reaction Species Injection Particle Injection Advanced

Governed by Material

Governed Manually

Heat Release

Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 150.0 kW/m²

Mass Loss Rate: 0.0 kg/(m²·s)

Ramp-Up Time: Custom Edit Values...

Extinguishing Coefficient: 0.0 m²/(kg·s)

Ignition

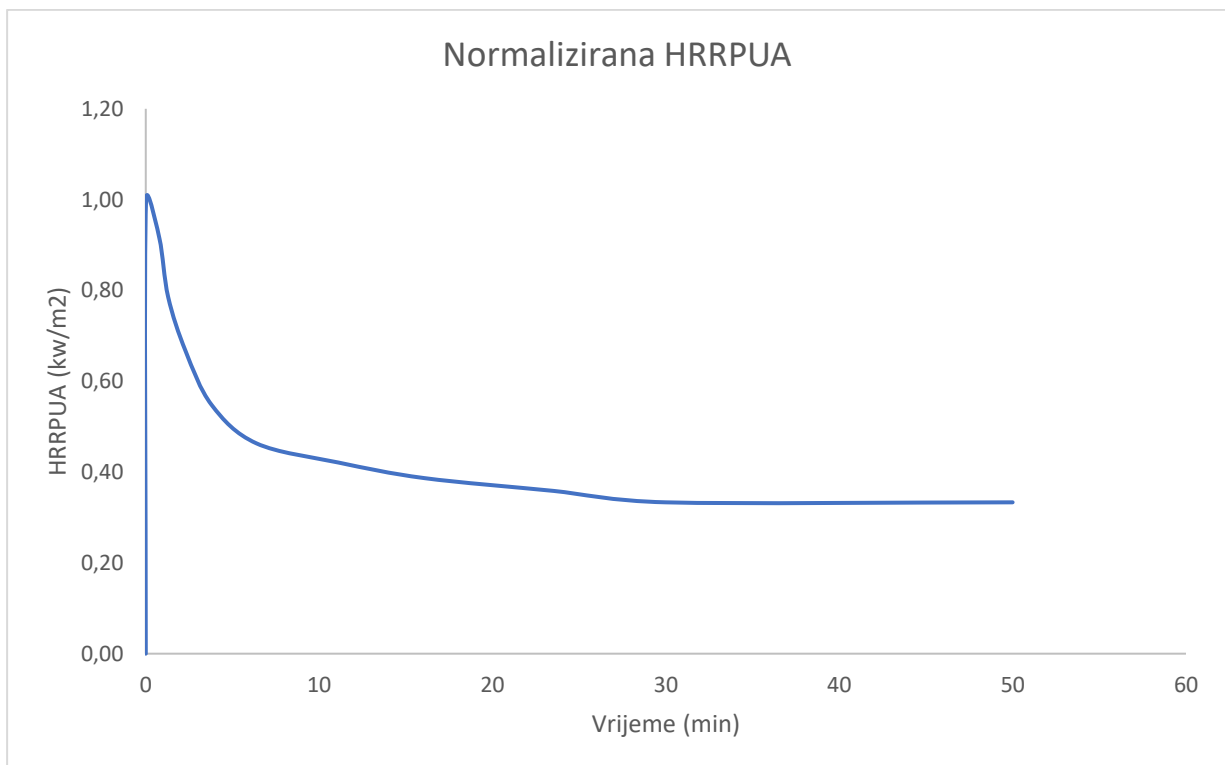
Burn Immediately

Ignite at: 384.0 °C

Heat of Vaporization: 0.0 kJ/kg

Allow obstruction to burn away

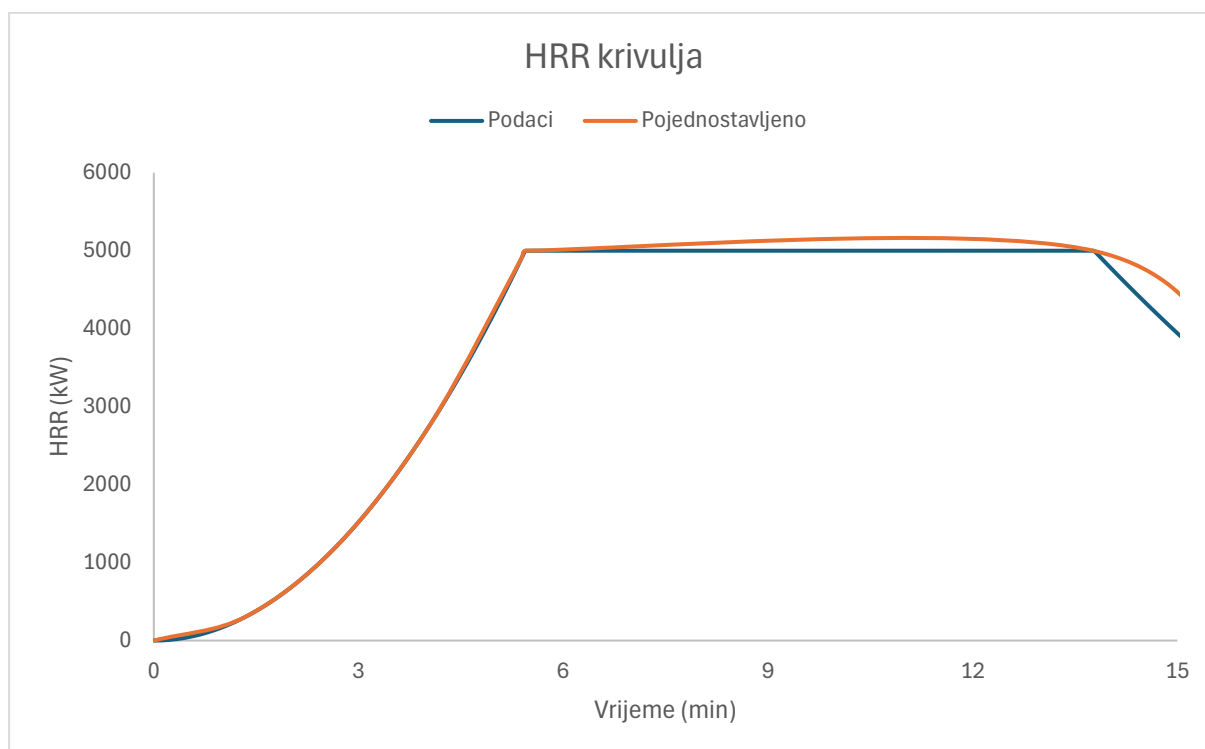
(a) HRRPUA i temperatura zapaljenja



(b) Normalizirana HRRPUA krivulja

Slika 3.2.6 Reakcija CLT-a

Varijanta B : CLT elementi zaštićeni negorivim gips-kartonskim pločama i tako ne pridonose razvoju požara. Izvor požara uveden je s jednim PLAMENIKOM, rasprostranjenim na 2.25 m² VENT-a koji se nalazi u sredini učionice i specificiran s HRRPUA krivuljom i t² razvojem za brzi požar (0.0469 kW/s²). Maksimalna vrijednost HRR-a je 5000 kW, stoga, HRRPUA iznosi 2222.22 kW/m², i maksimalna razvijena snaga dosegnuta je nakon 327 sekundi (Slika 3.2.7)



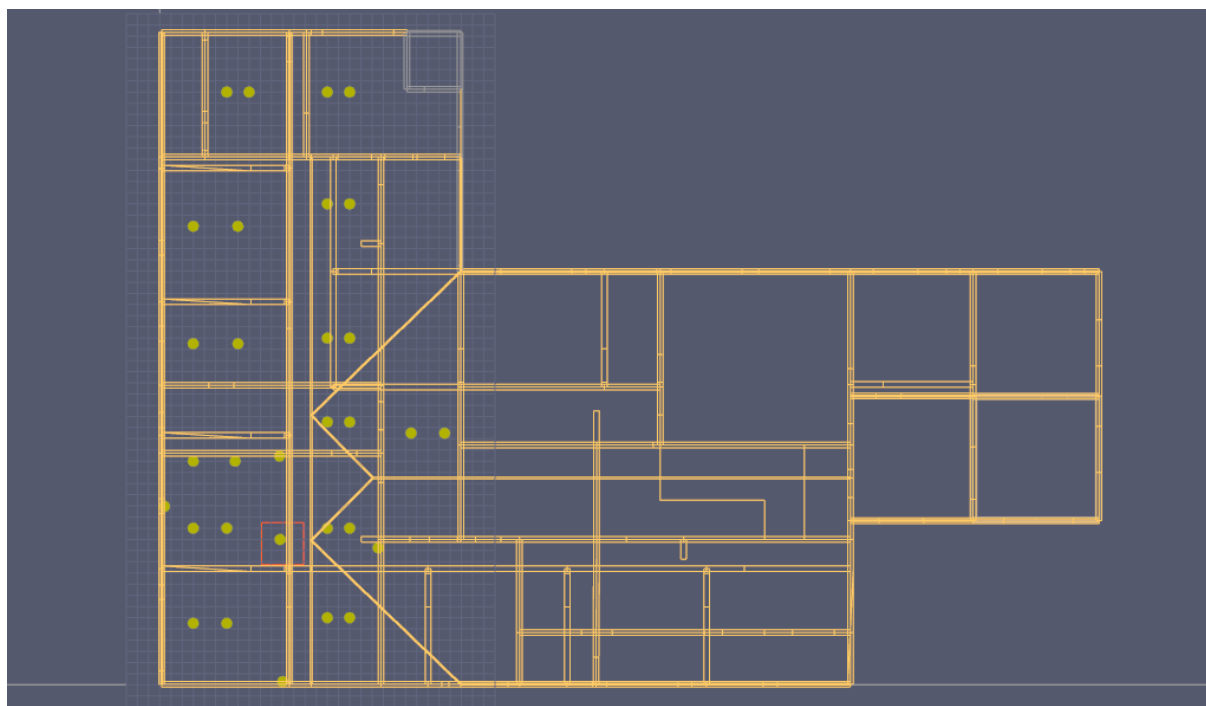
Slika 3.2.7 HRR krivulja

Kako bi se osiguralo da plamenik točno predstavlja požar, napravljena je simulacija korištenjem mreže od 10 cm i dodjeljivanjem svim površina inertne rubne uvjete. Fokus ove analize je bila isključivo HRR iz izvora požara, a ne na doprinosu od drugih materijala. Toplina izgaranja definirana je na 17.5 MJ/kg kako su pretpostavili Bartlett i sur.

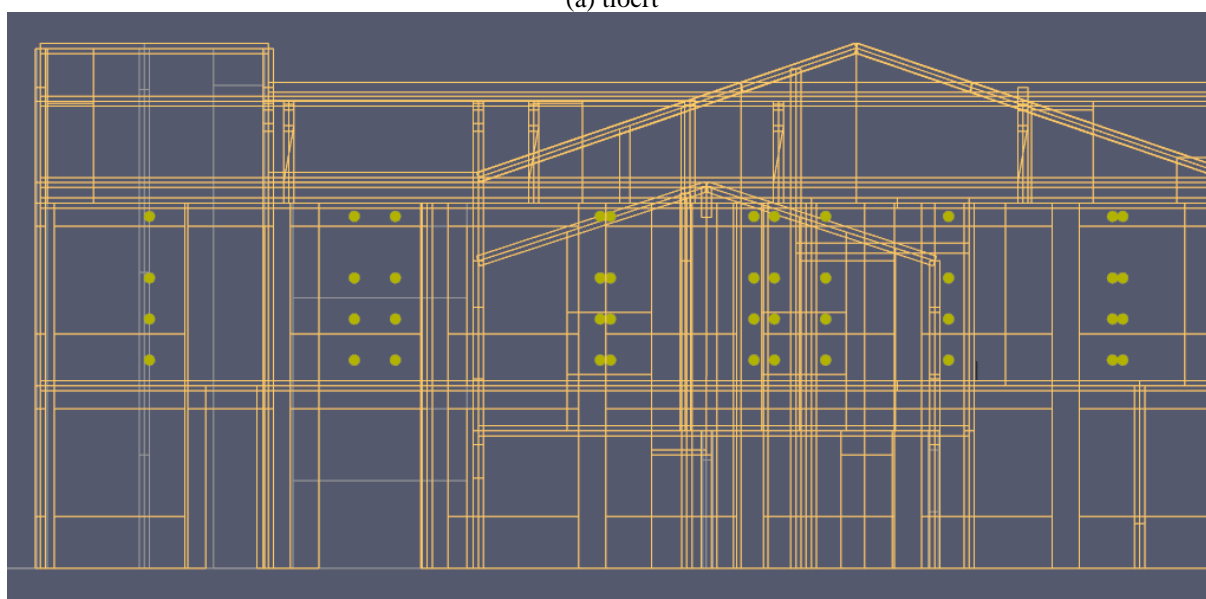
3.2.6 Konfiguracija mjernih uređaja

Kako bi se prikupili podaci iz simulacija, uređaji (solid and gas-phase) postavljeni su unutar domene. Primarni interes bio je dobivanje podataka o temperaturi plinova, razvijenoj toplinskoj snazi, razvijenim temperaturama na CLT površinama, te proizvedenom dimu, tj. vidljivosti. Posljedično, uređaji su smješteni na različitim visinama od gotovog poda, te u blizini zidova i poda/stropa.

Slika 3.2.8 prikazuje tlocrtni i bočni raspored uređaja na zidovima i stropu, kao i uređaje za temperaturu plinova i vidljivost. Uređaji za plinovitu fazu ravnomjerno su raspoređeni u prostoriji za mjerenje sobne temperature na 80, 160, 200 i 320 mm iznad razine poda.



(a) tlocrt



(b) pogled

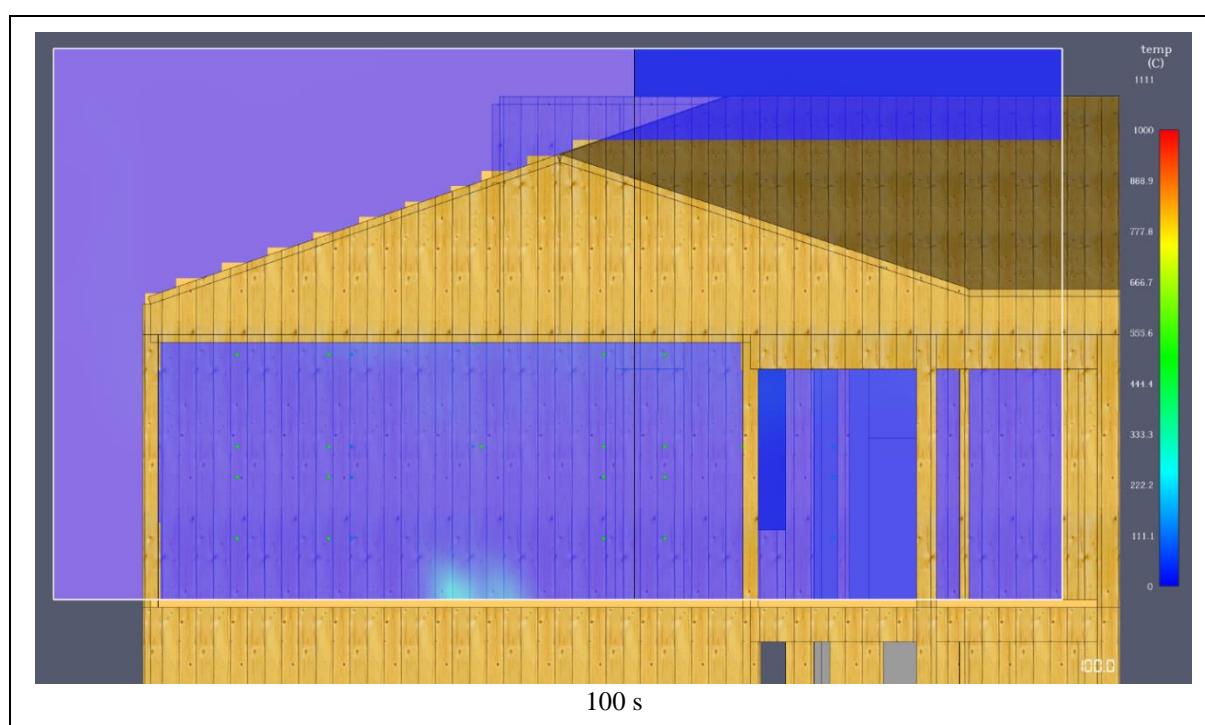
Slika 3.2.8 Raspored mjernih uređaja

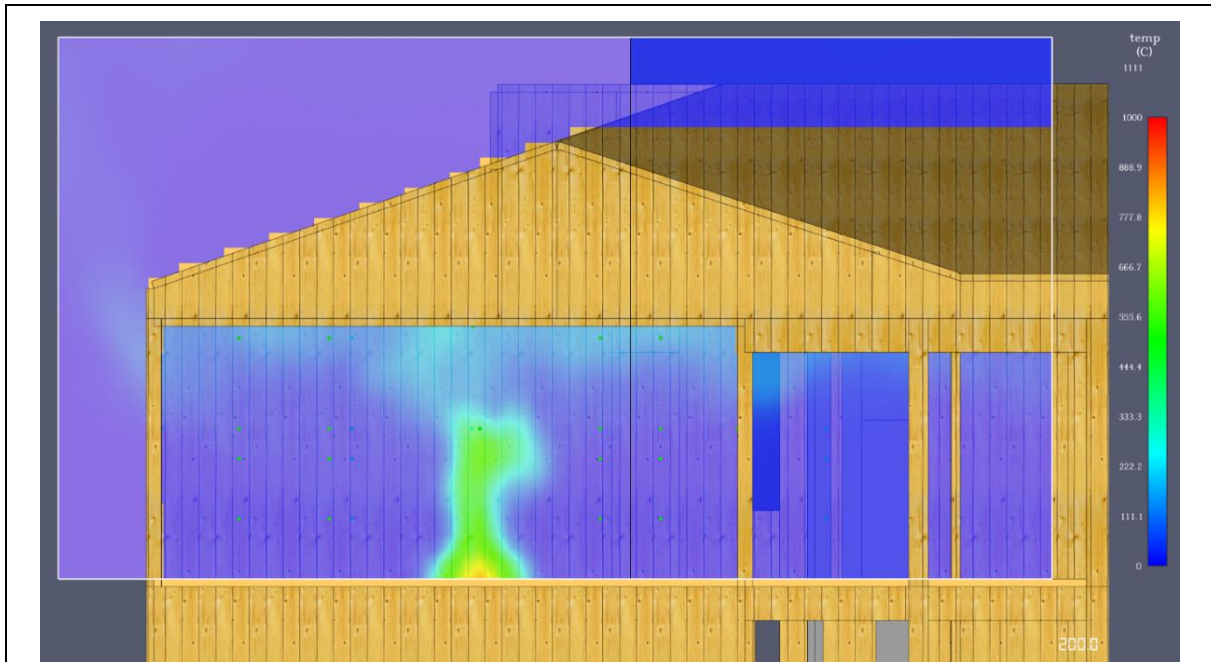
Uređaji na elementima, smješteni na izložanim i inkapsuliranim površinama unutar odjeljka, mjerili su temperaturu na površini i na različitim dubinama unutar CLT elemenata. Uređaji su postavljeni na zidove učionice, prvo na izloženoj površini, a zatim na dubinama svakih 20 mm, točno na linijama lijepljena CLT slojeva koji čine zid ili strop.

3.2.7 Rezultati CFD simulacije

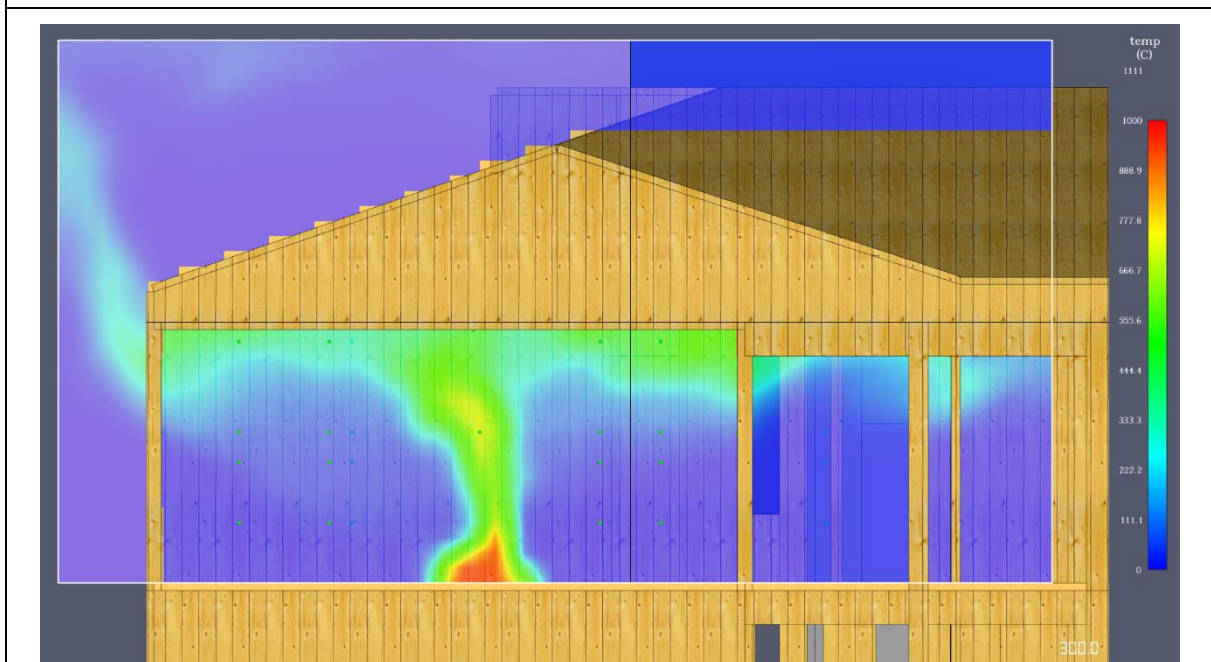
Ovo poglavlje prikazuje rezultate CFD simulacija provedenih u sklopu specijalističkog rada. U početku se prikazuju rezultati vezani za razvijenu toplinsku snagu (HRR), temperaturu plinova, a zatim i krutih površina, te u konačnici vidljivost. Nakon toga, simulacija koja se smatra najprikladnijom za usporedbu s eksperimentalnim podacima o požaru u CLT odjeljcima je detaljnije istražena.

Slika 3.2.9 prikazuje vizualizacije podataka o temperaturi plinova dobivenih u intervalima od svakih 100 sekundi, gdje je prikazan razvoj požara tijekom 15-minutne simulacije, za slučaj A, kada su CLT elementi izloženi.

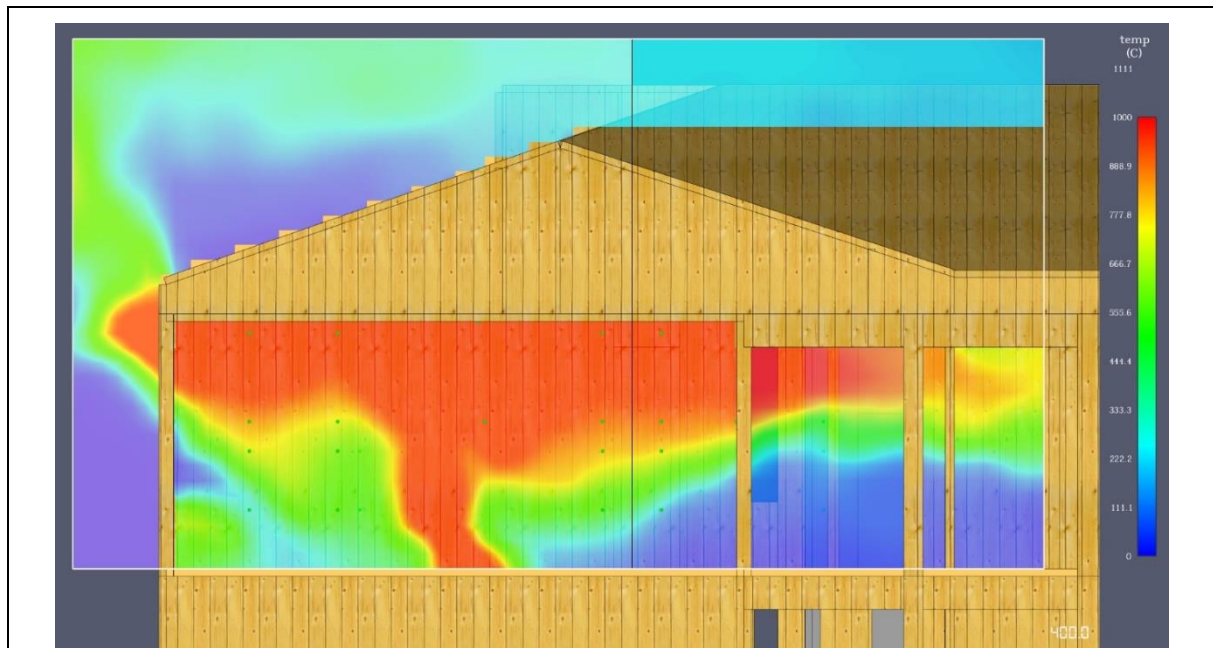




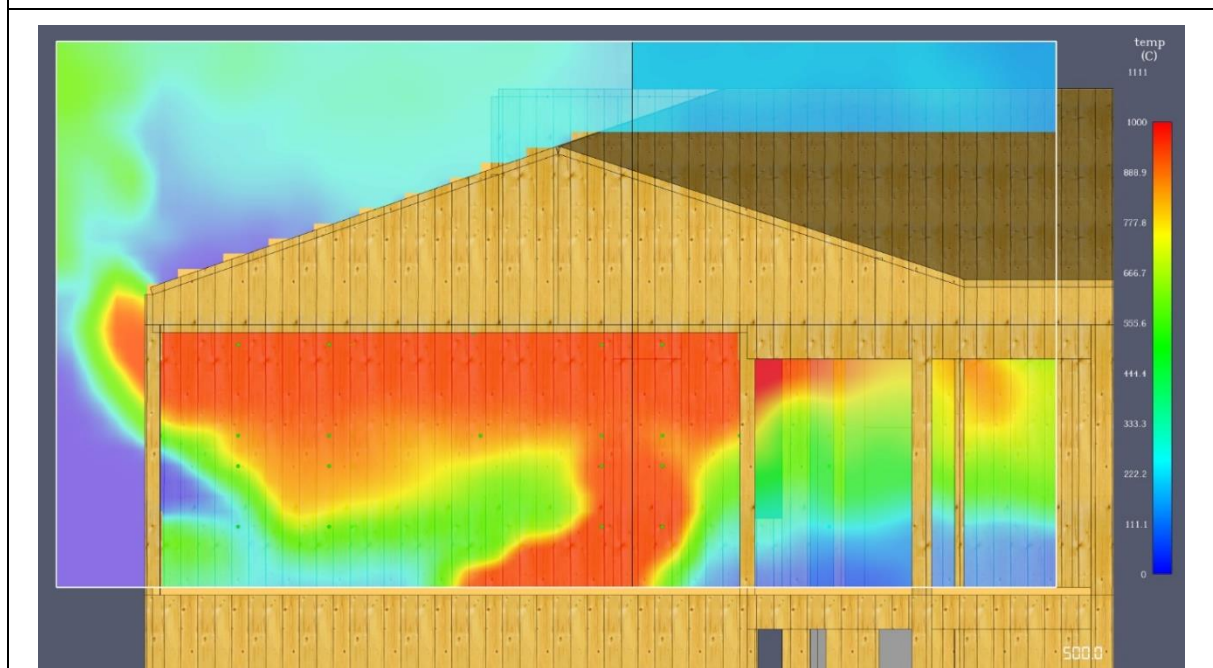
200 s



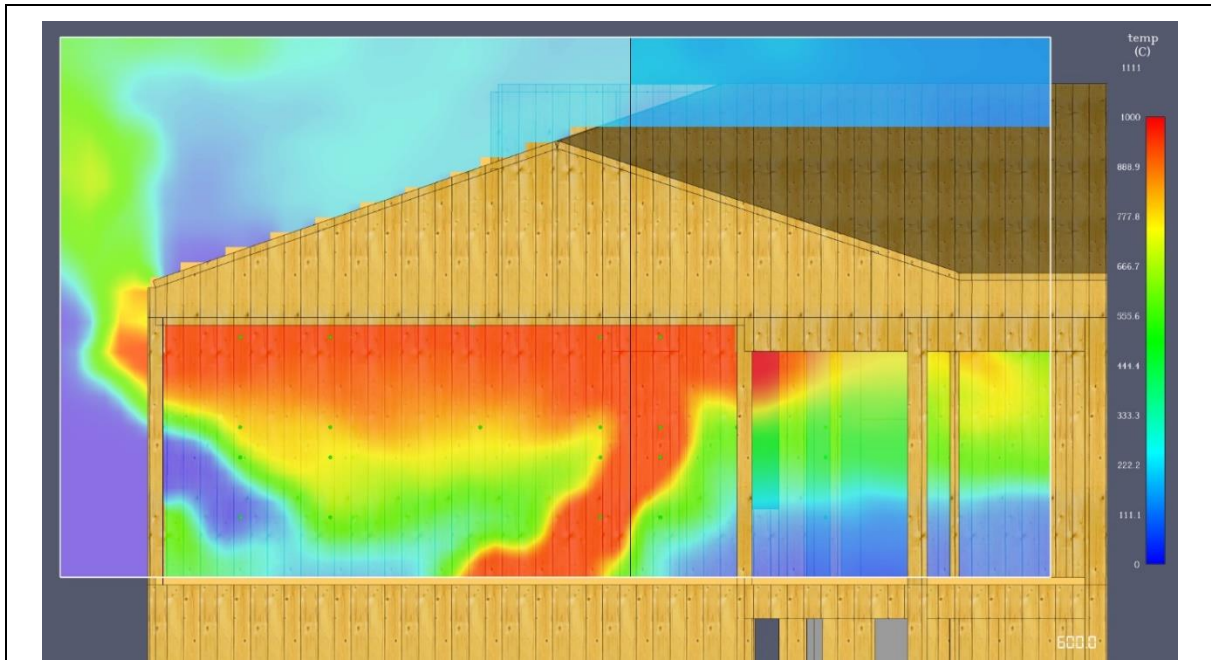
300 s



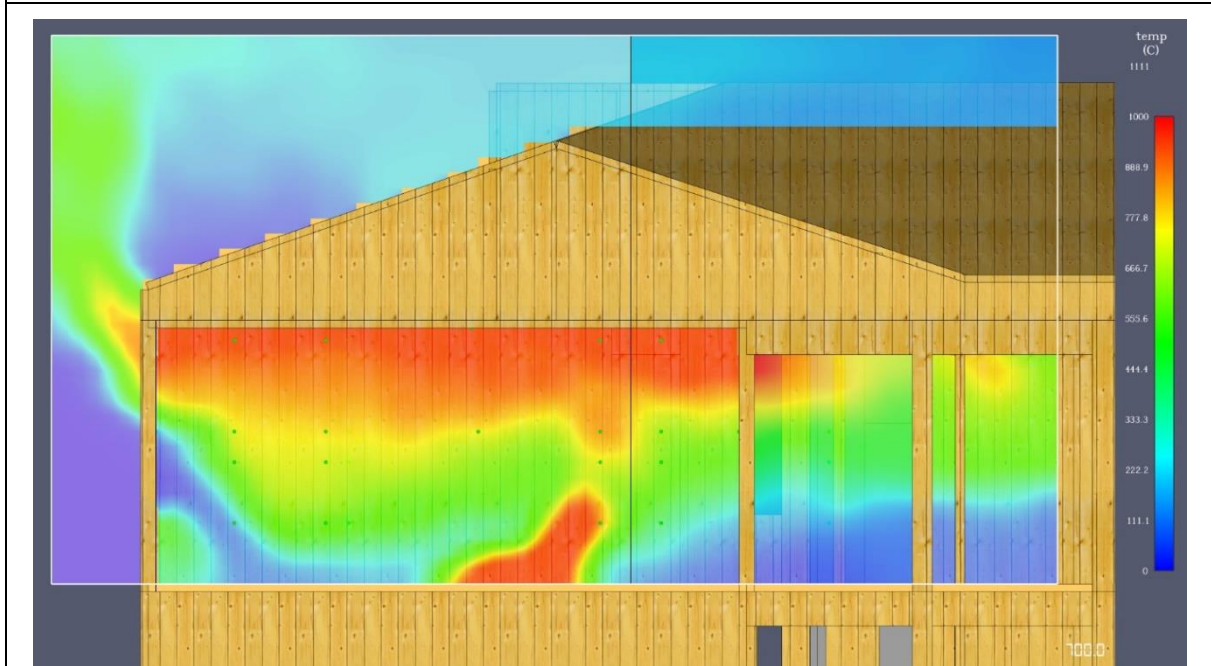
400 s



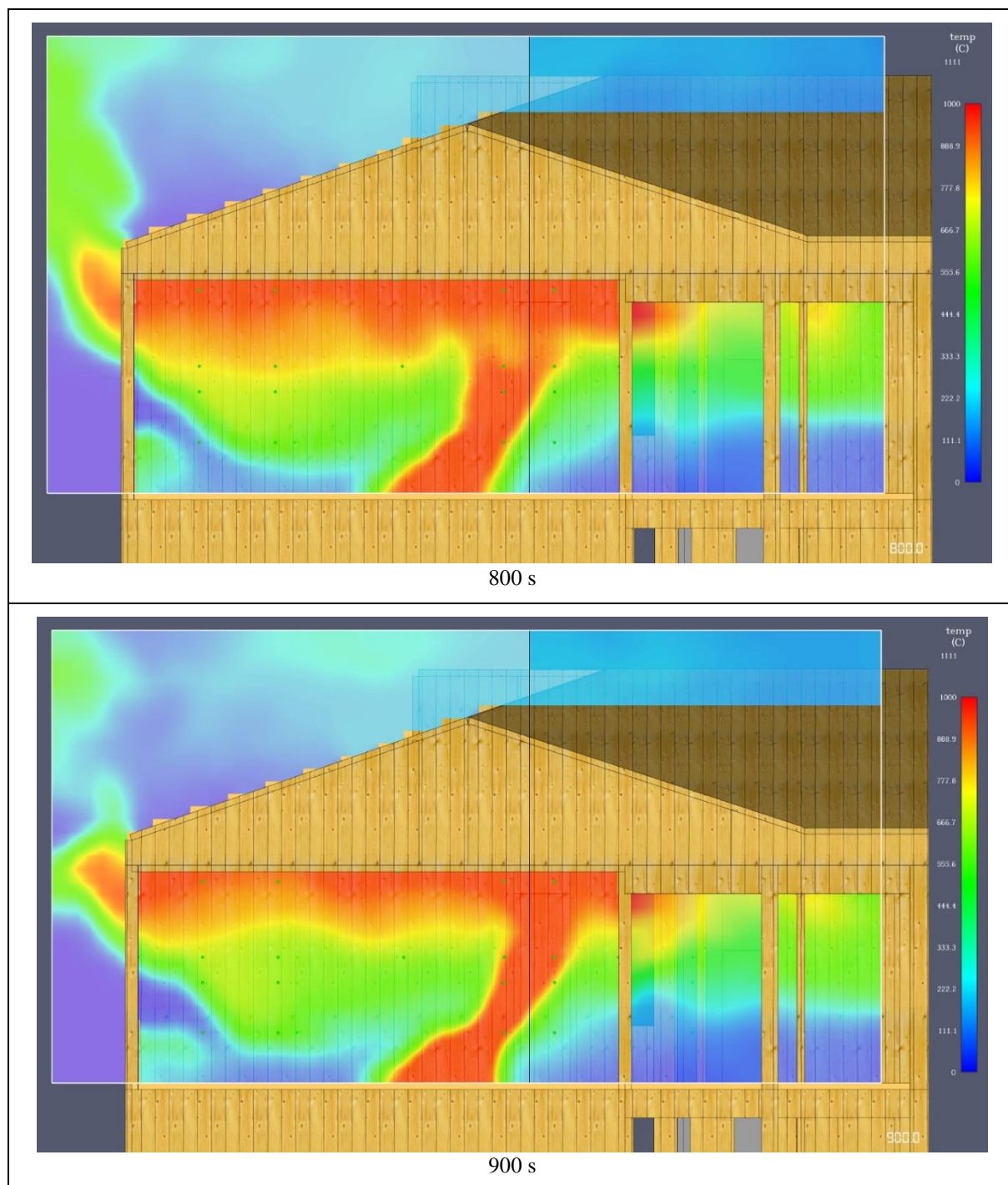
500 s



600 s

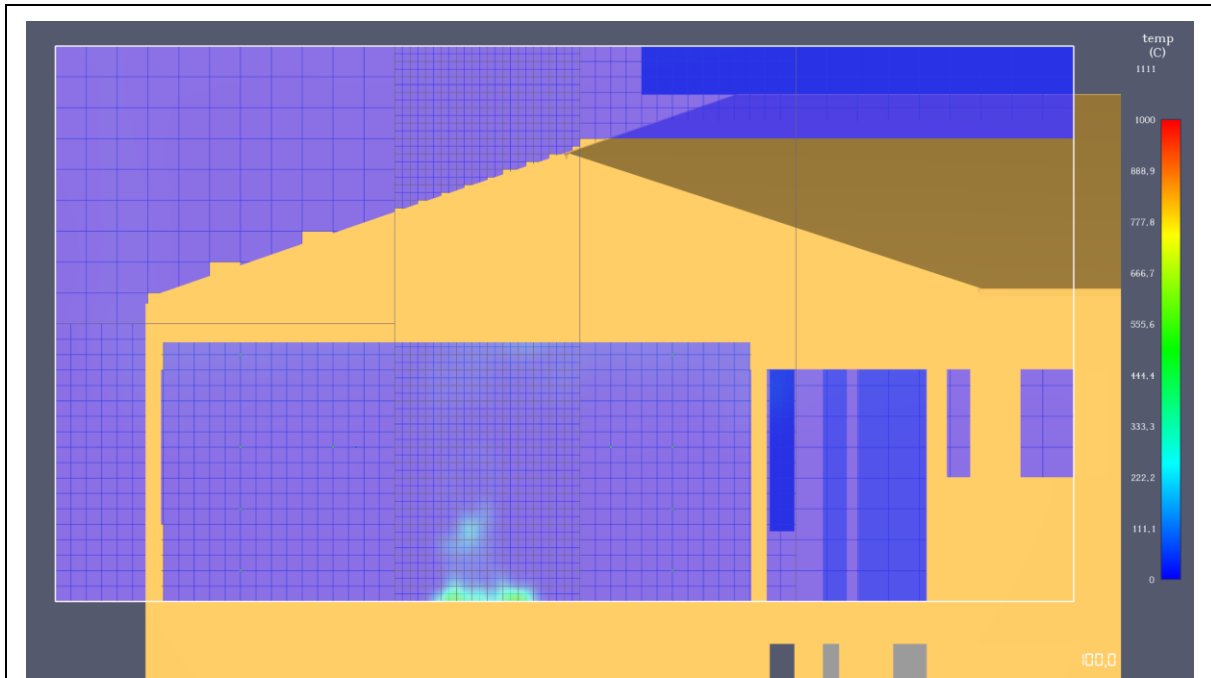


700 s

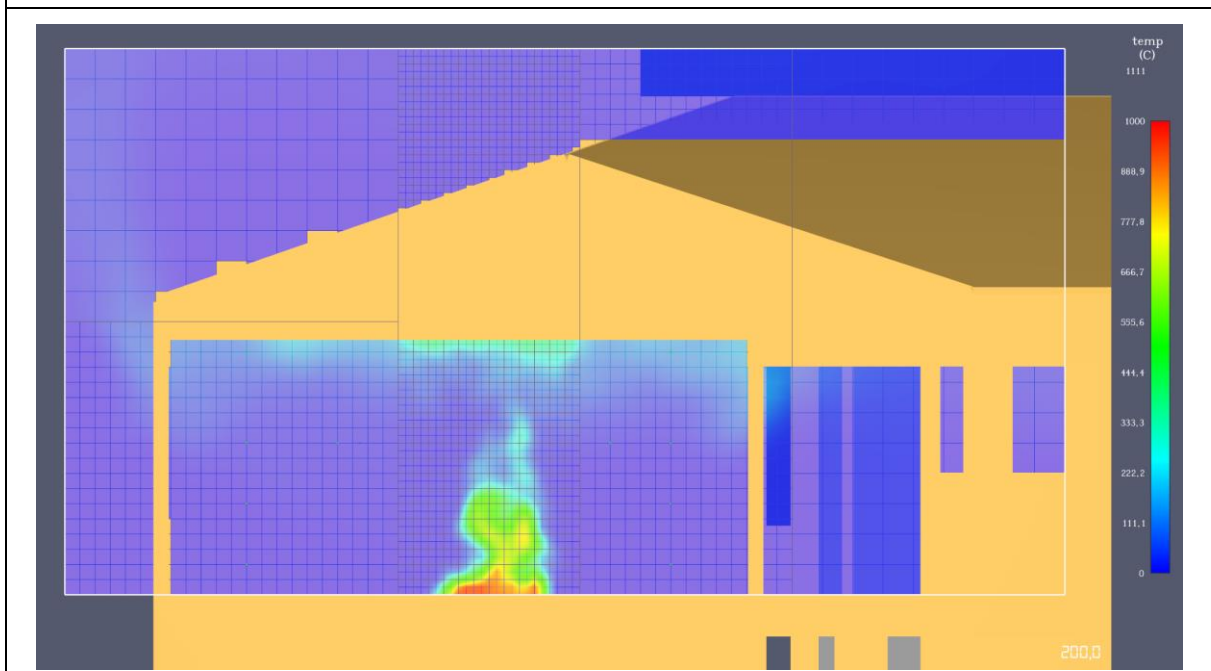


Slika 3.2.9 Razvoj temperature (varijanta A) - svakih 100 sekundi

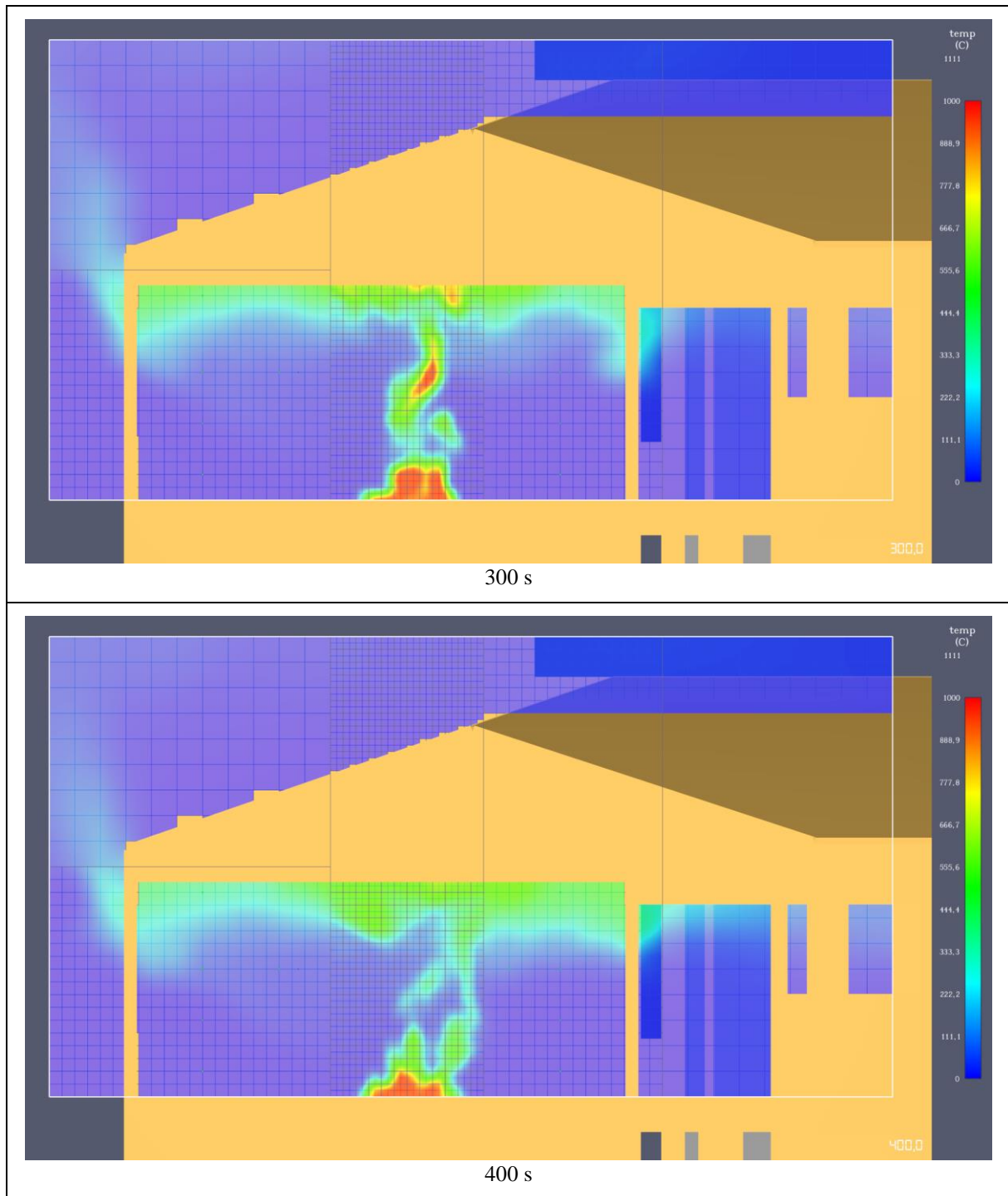
prikazuje vizualizacije podataka o temperaturi plinova dobivenih u intervalima od svakih 100 sekundi, gdje je prikazan razvoj požara tijekom 15-minutne simulacije, za slučaj B, kada su CLT elementi zaštićeni.

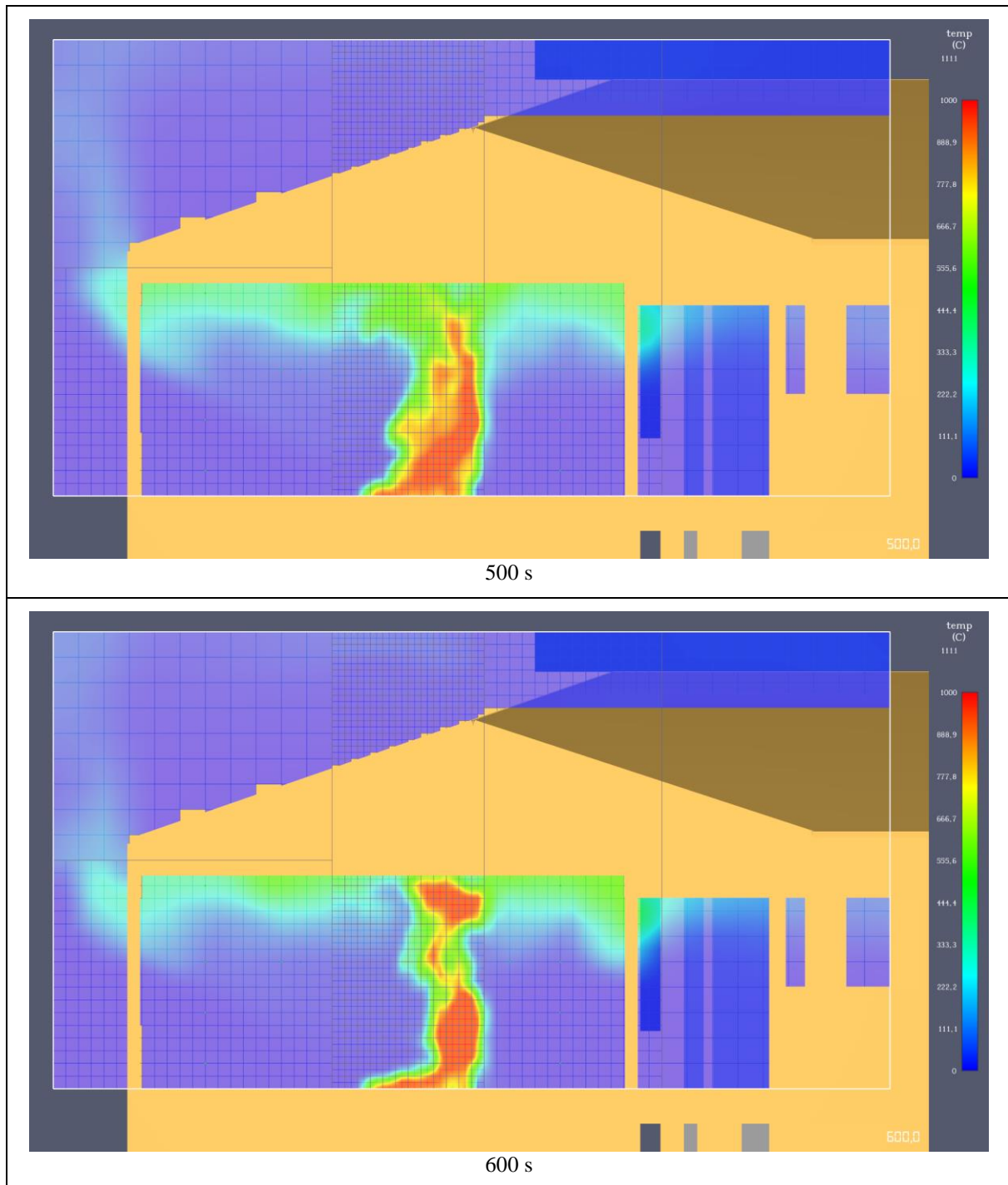


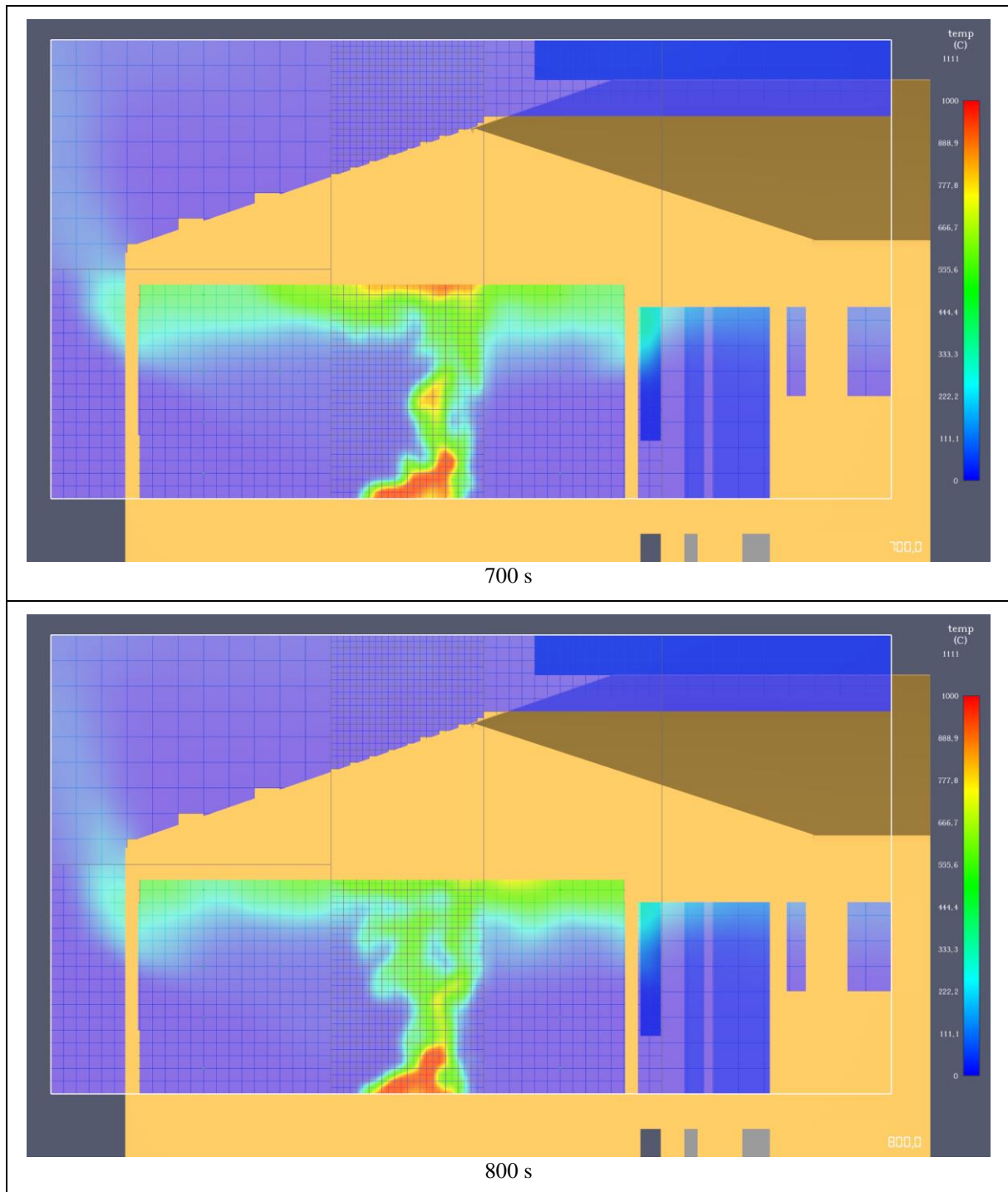
100 s

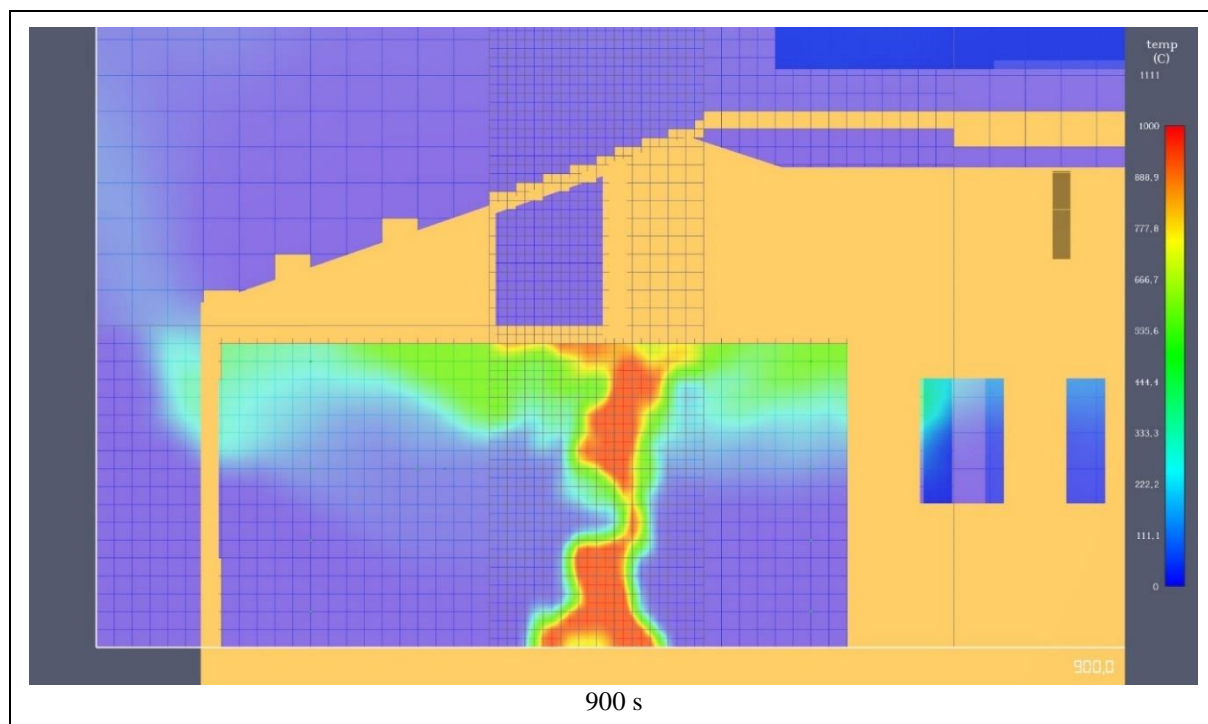


200 s





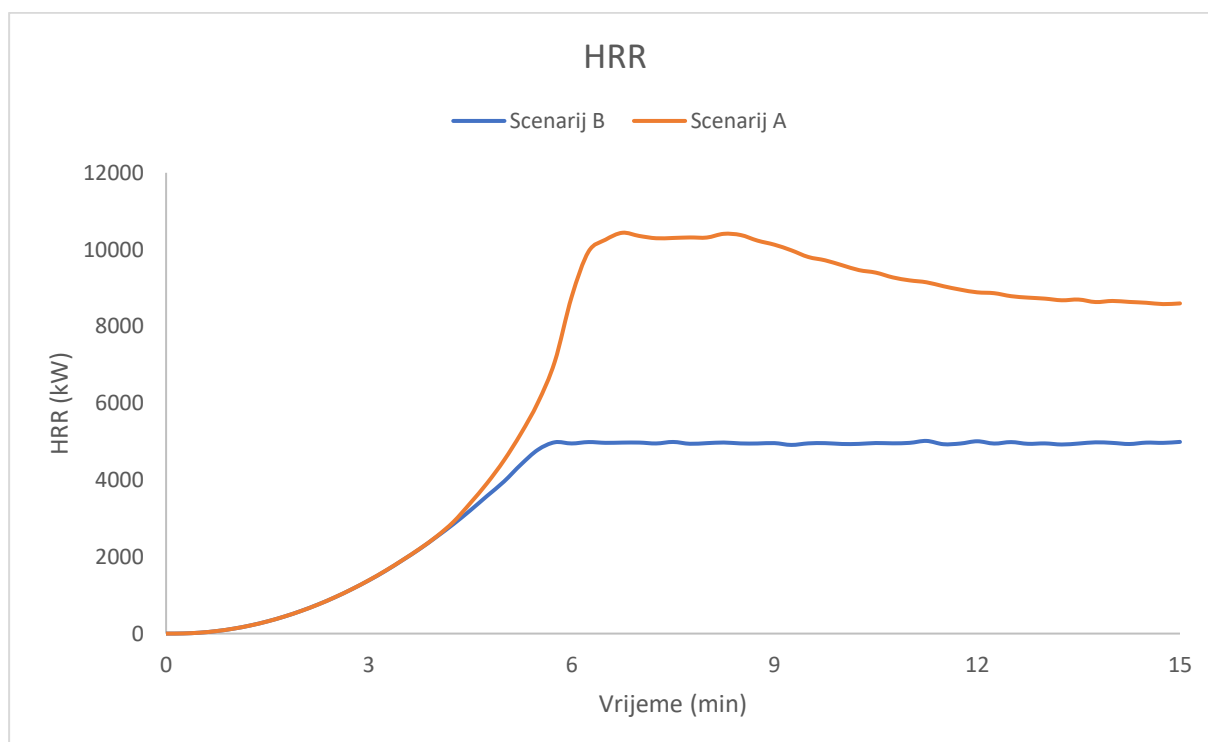




Slika 3.2.10 Razvoj temperature (varijanta A) - svakih 100 sekundi

3.2.7.1 HRR – požarna snaga

Slika 3.2.11 prikazuje pomični prosjek ukupnog HRR-a kroz simulaciju, za oba slučaja.



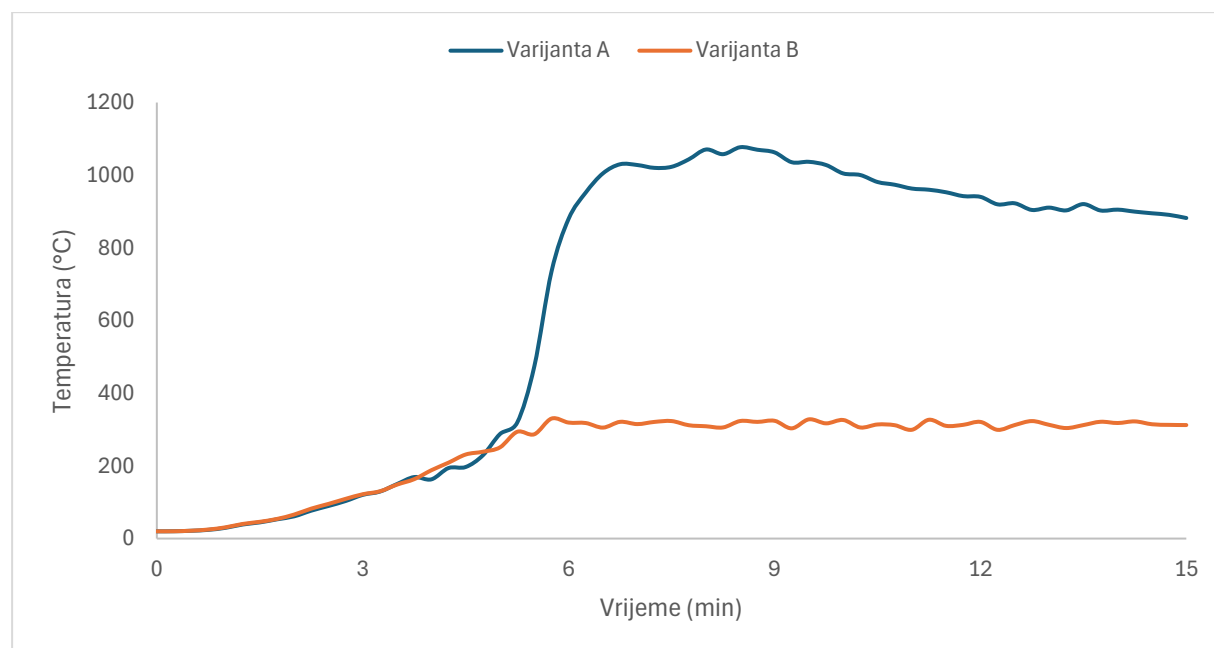
Slika 3.2.11 Usporedba HRR u požarnom odjeljku zaštićenog (B) i izloženog (A) CLT-a

HRR pokazuje uzlazni trend jer inicijalni požar unosi hlapljive tvari u odjeljak. HRR se penje u skladu s unaprijed definiranim otpuštanjem hlapljivih tvari, pokazujući prosječno povećanje u skladu s brzim požarom, te svoj maksimum doseže za 327 sekundi (5.45 min-krivulja B). Za izložene CLT elemente, nakon 250 sekundi (4.17 min.) dolazi do naglog povećanja HRR-a, eskalirajući od 3000 kW do 10000 kW unutar 150 sekundi (2.5 min.). Ovaj vršni traje oko 100 sekundi s maksimalnim zabilježenom vrijednošću od 10410 kW. Vrhunac HRR-a podudara se s inicijalnim požarom koji doseže svoju procijenjenu maksimalnu HRR od 5000 kW. Tijekom ove faze, pirolizati izlaze s drvenih površina doprinose HRR-u s dodatnih 5000 kW. To implicira da do 50% HRR-a može se pripisati dopunskom gorivu iz CLT-a., što prikazuje Slika 3.2.11 gdje je ukupni HRR iz simulacije uspoređen s procijenjenim HRR-om od izvora požara.

U 510 sekundi (8.5 minuta) simulacije, primjetan je pad HRR. Stopa opadanja je manja od stope rasta koja je dovela do maksimuma. Ova vrijednost je održavana do kraja simulacije što pokazuje da površine nastavljaju emitirati energiju čak i nakon što je požar ugašen.

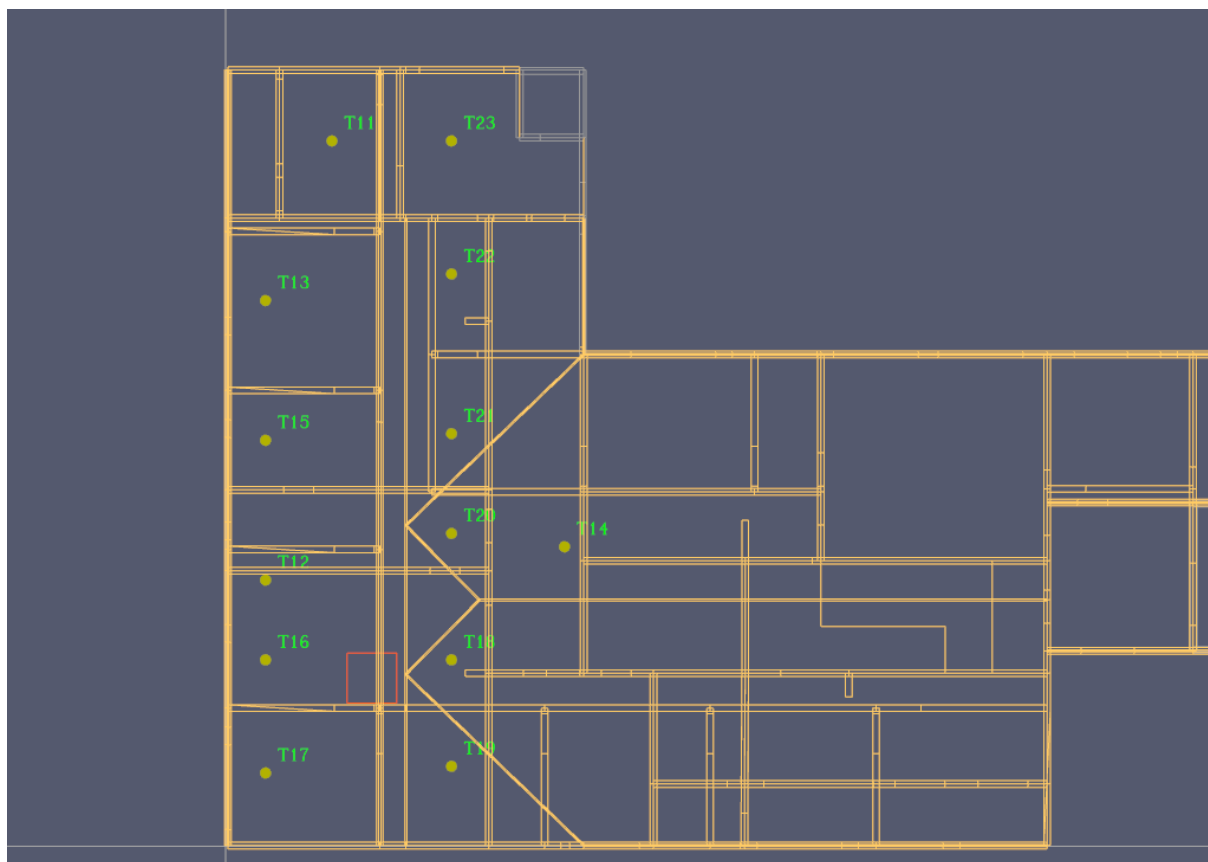
3.2.7.2 Temperature plinova

Slika 3.2.12 prikazuje prosječnu temperaturu plinova unutar učionice, 200 cm iznad razine poda. U simulaciji, najviša temperatura se postiže oko 360 (6 minuta) sekundi za slučaj B, odnosno 450 sekundi (7.5 minuta) nakon početka požara. Pad temperature počinje ubrzo nakon što su dosegnute vršne temperature uz polaganu opadajuću stopu. Simulacija je završila nakon 15 minuta kada je temperatura pala s vrhunca na 418 °C, odnosno 300 °C.



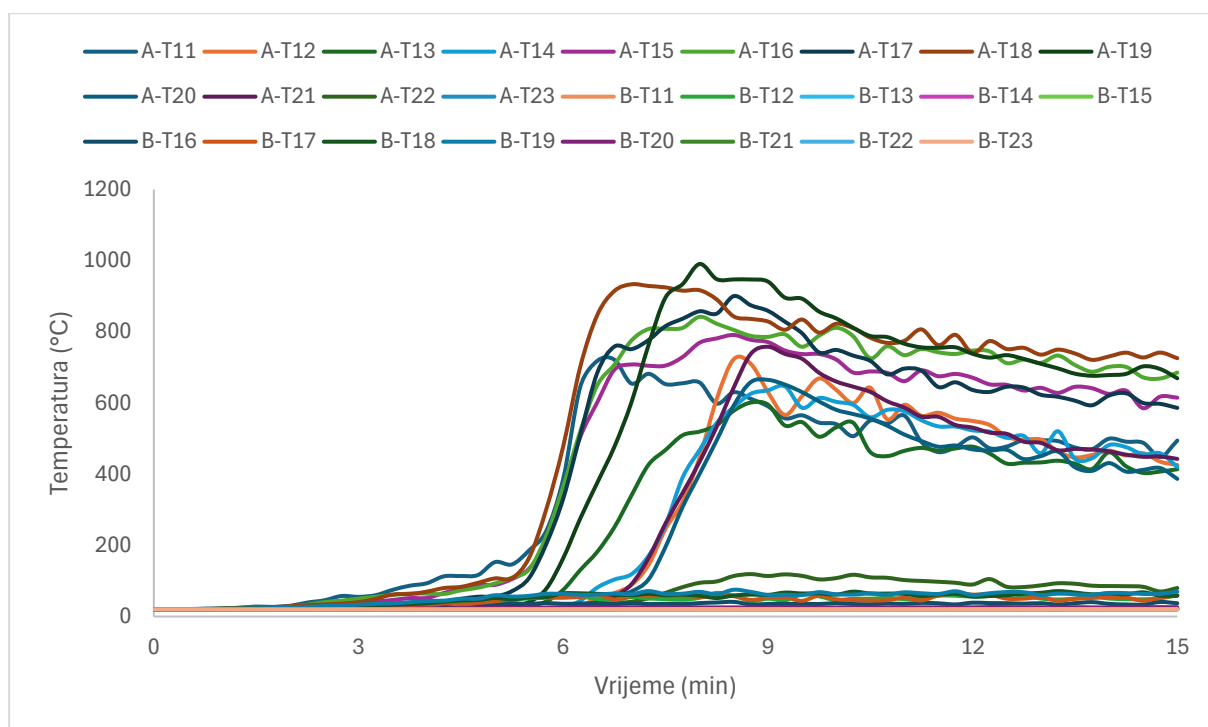
Slika 3.2.12 Prosječna temperatura plina 200 cm iznad razine poda

Nadalje, prikazan je je raspored temperatura na visini od 1.6 m, u cijelom požarnom odjeljku. Raspored mjernih uređaja može se vidjeti u nastavku (Slika 3.2.13)



Slika 3.2.13 Raspored mjernih uređaja na visini od 1.6m od poda

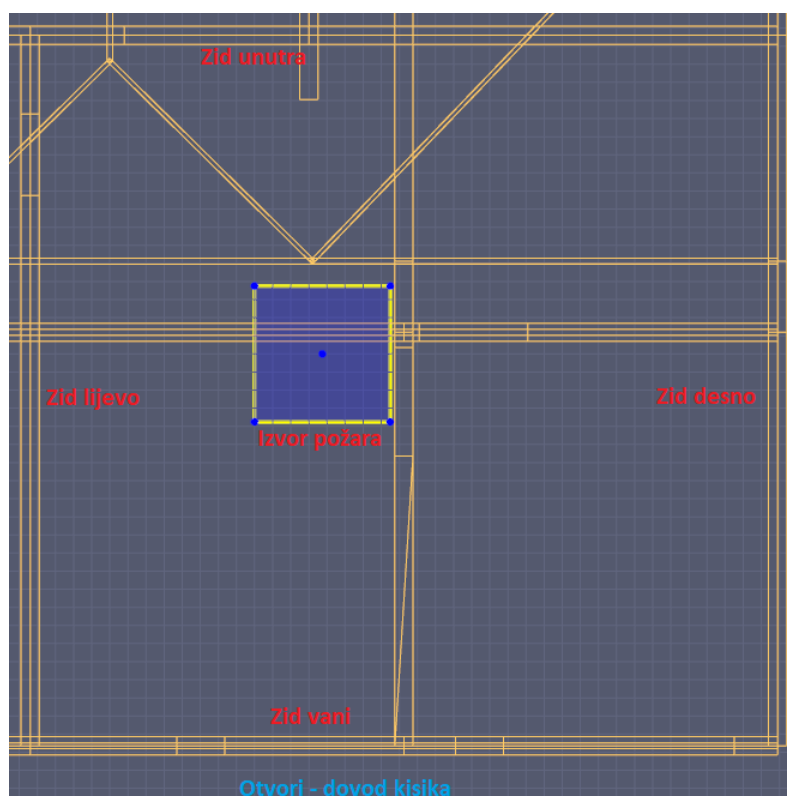
Slika 3.2.14 prikazuje prosječne temperature plinova unutar učionice, 200 cm iznad razine poda, za obje varijante. U simulaciji, najviša temperatura se postiže oko 480 s (8 minuta) sekundi za slučaj A, dok za slučaj B najviša izmjerena temperatura iznosila 75°C, u trenutku 510 s (8.5 minuta) od početka požara . Pad temperature počinje ubrzo nakon što su dosegnute vršne temperature uz polagano padajuću stopu. Simulacija je završila nakon 15 minuta kada je temperatura pala s vrhunca na prosječno 550 °C, odnosno 50 °C.



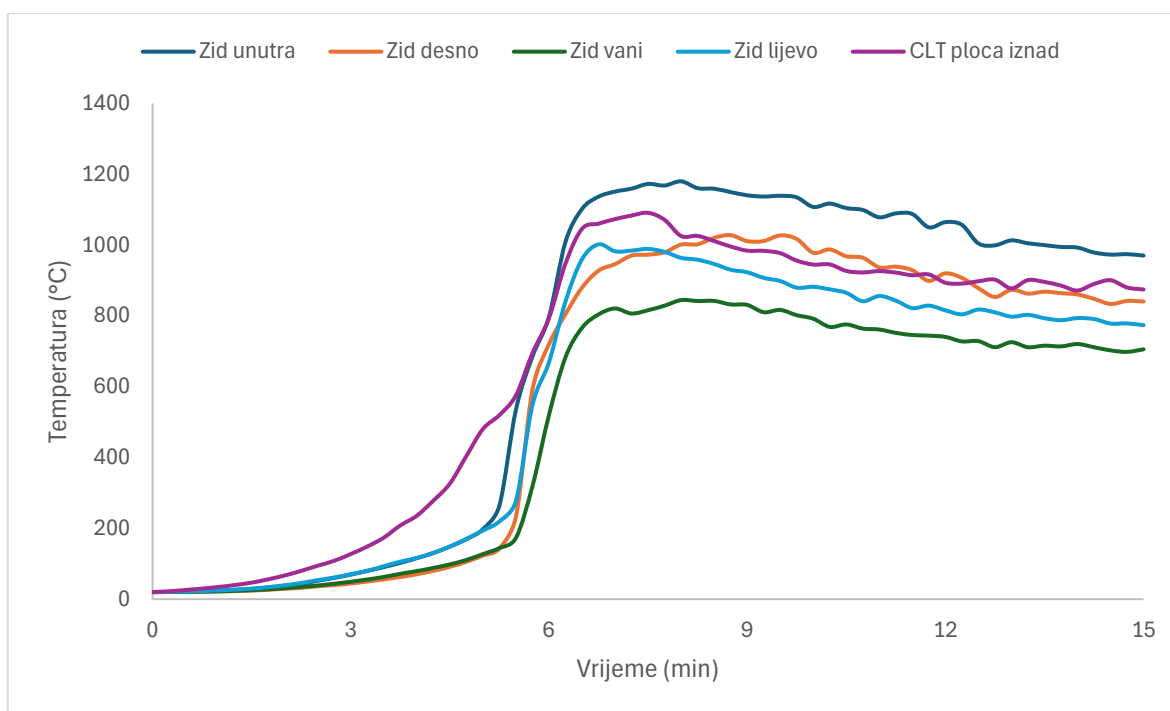
Slika 3.2.14 Temperature u požarnom odjeljku na visini od 1.6 m od poda.

3.2.7.3 Temperature krutih tijela (CLT-a)

U ovom odjeljku analiza se temperatura na površini CLT-a, koji omeđuje učionicu u kojoj je nastao požar. U ovisnosti u položaju zida u odnosa na izvor požara i ventilaciju (Slika 3.2.15a), vidljiva je razlika razvijenih temperatura (Slika 3.2.15b)



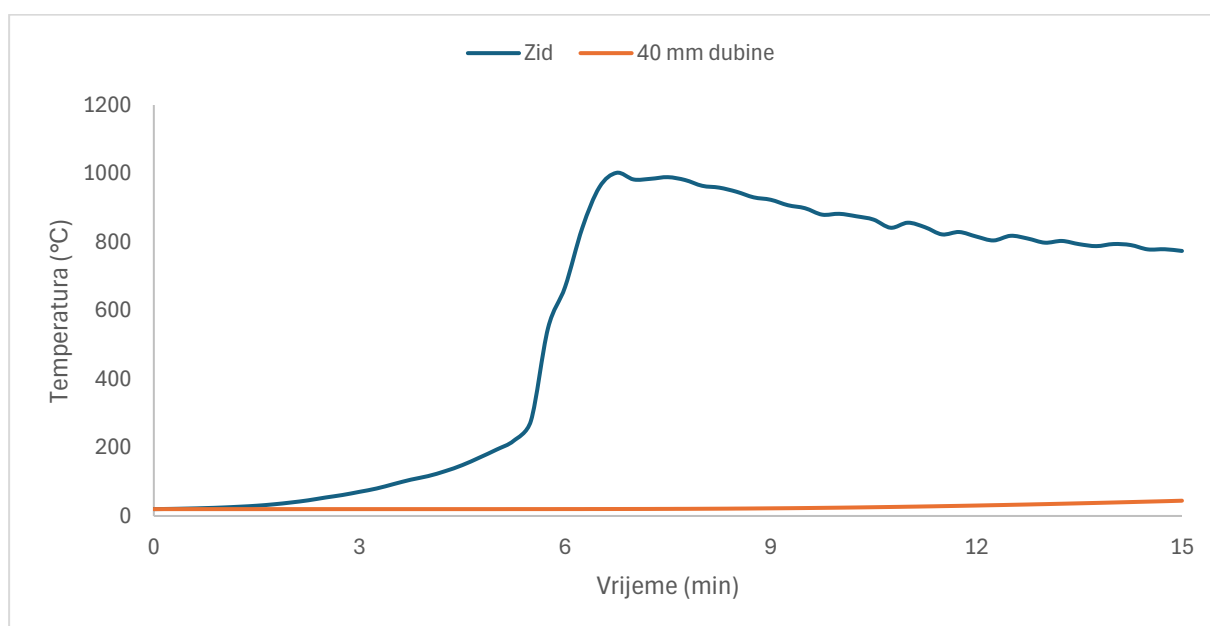
(a) raspored CLT zidova;



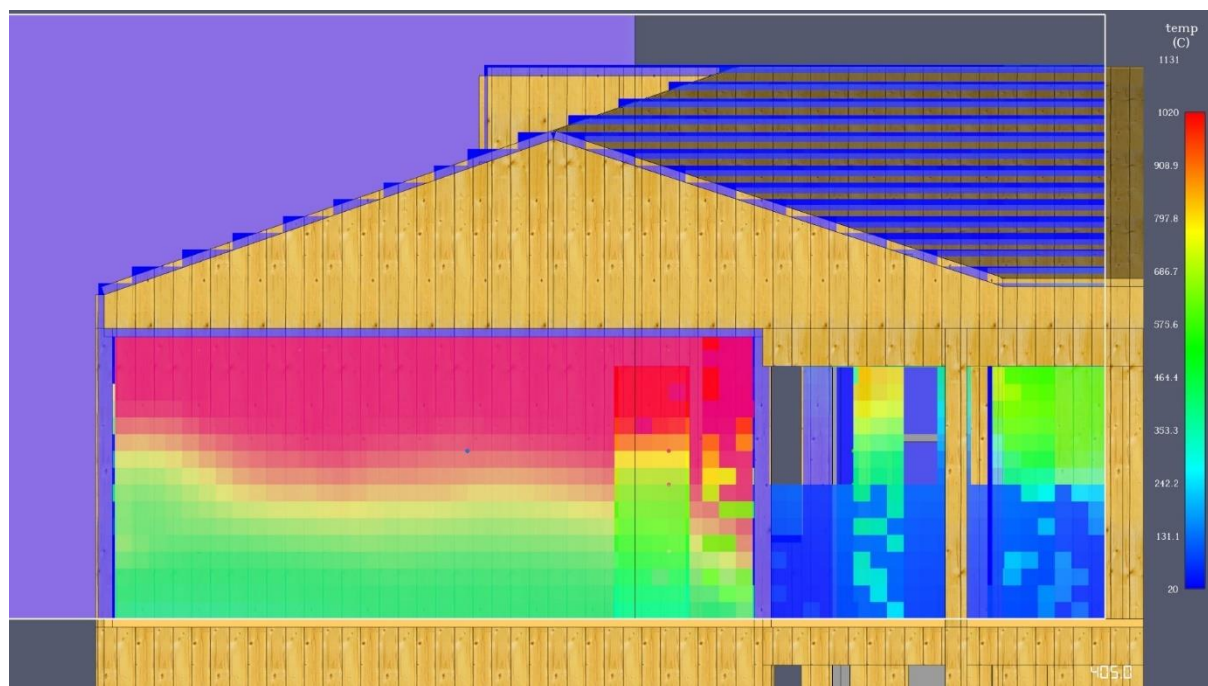
(b) razvoj temperature u CLT-u

Slika 3.2.15 Temperature krutih tijela

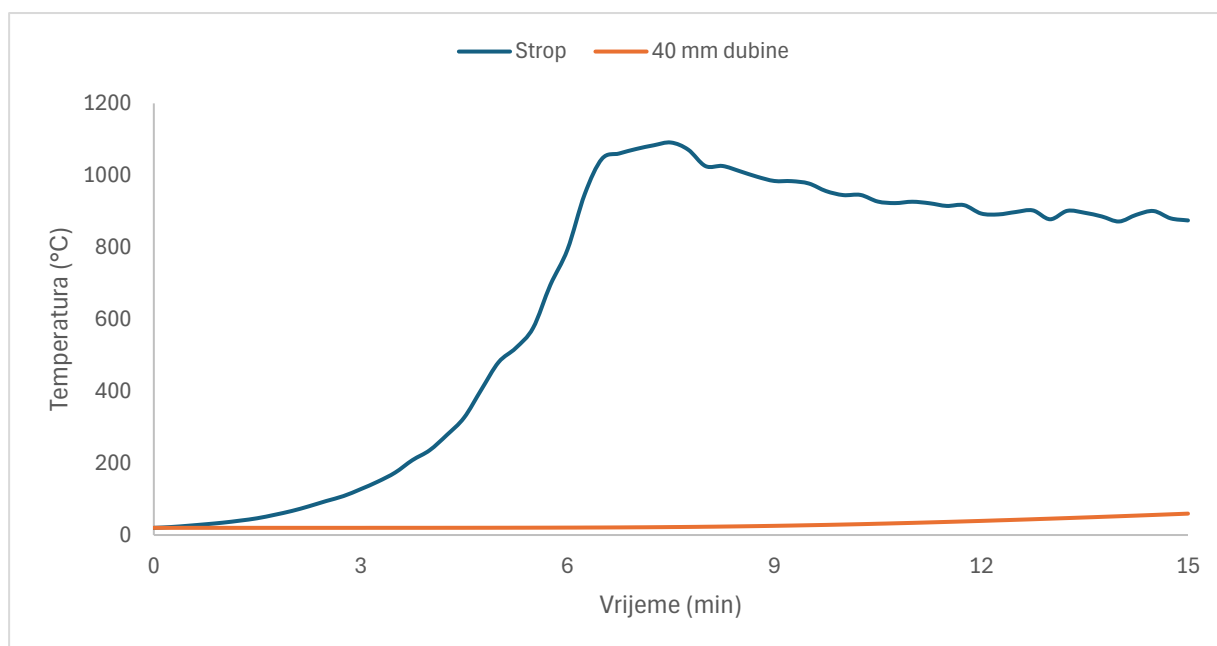
Slika 3.2.16 prikazuje prosječne temperature po debljini (varijanta A) izloženih zidova i stropa. Izmjerena površinska temperatura izložene površine pokazuje brz porast u skladu sa zagrijavanjem odjeljka. Mjerenje temperature na dubini prvog sloja od 40 mm za zid i strop ima zanemariv porast temperature i mjerenja temperature dublje u elemente stoga nisu uključene u analizu. Zidna površina doseže prosječni maksimum od 1000 °C oko 405 sekundi (6.75 minuta), dok površina stropa doseže 1090 °C oko 450 sekundi (7.5 minuta). Očekuje se da će vidljivo smanjenje prema kraju trajati u skladu s padajućim HRR-om.



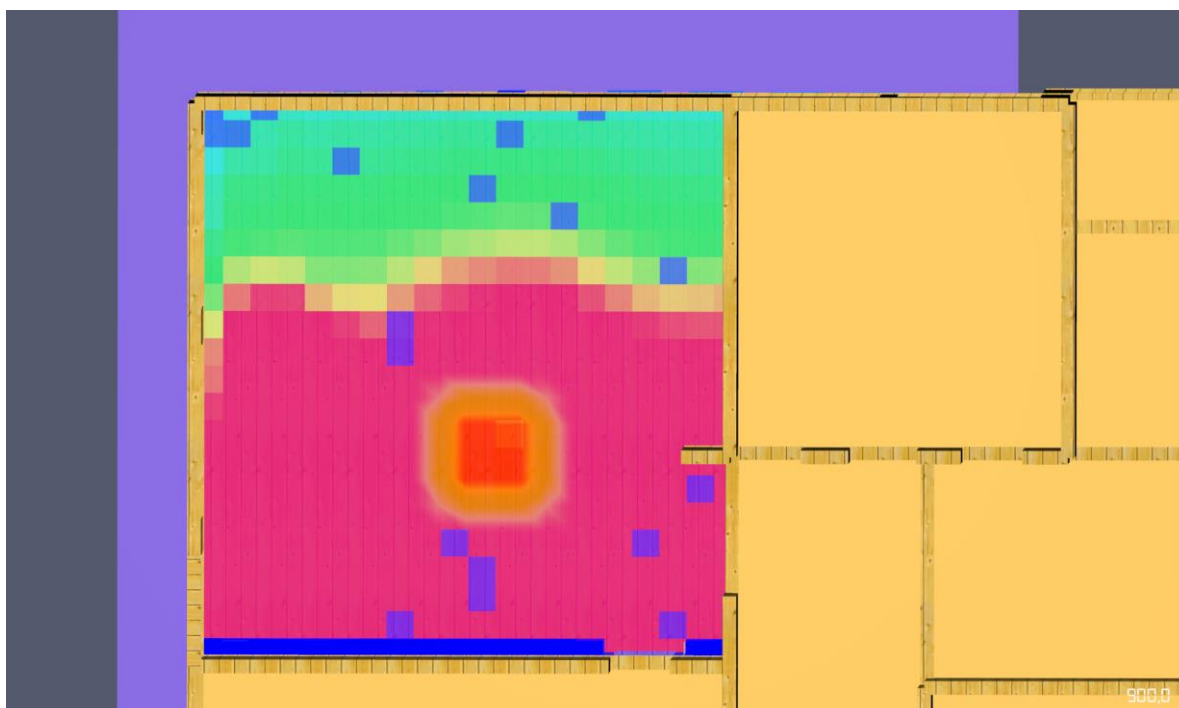
(a) Razvoj temperature u na površini zida i na 40 mm dubine



(b) Temperatura zida



(c) Razvoj temperature u na površini stropa i na 40 mm dubine

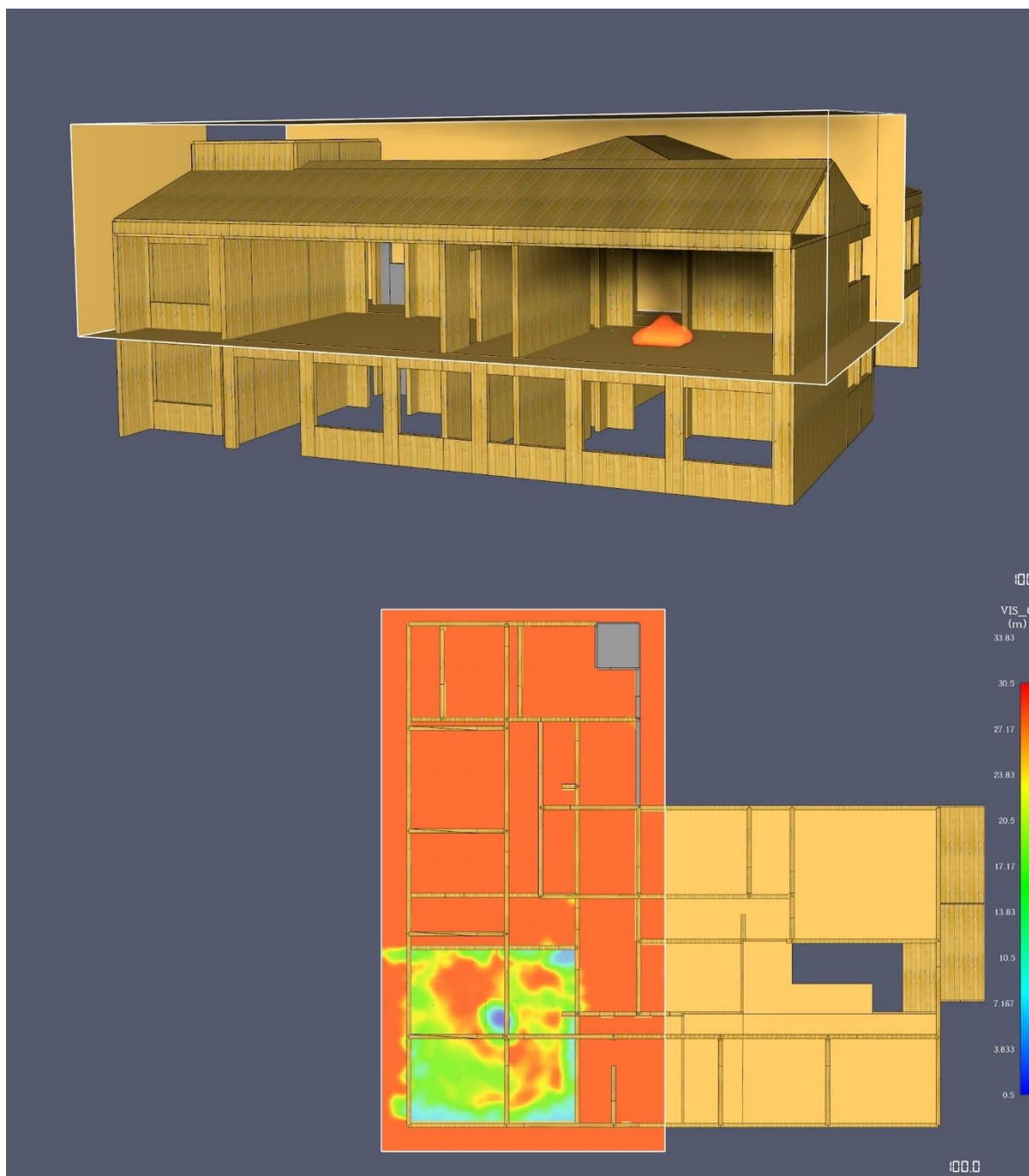


(d) Temperatura stropa

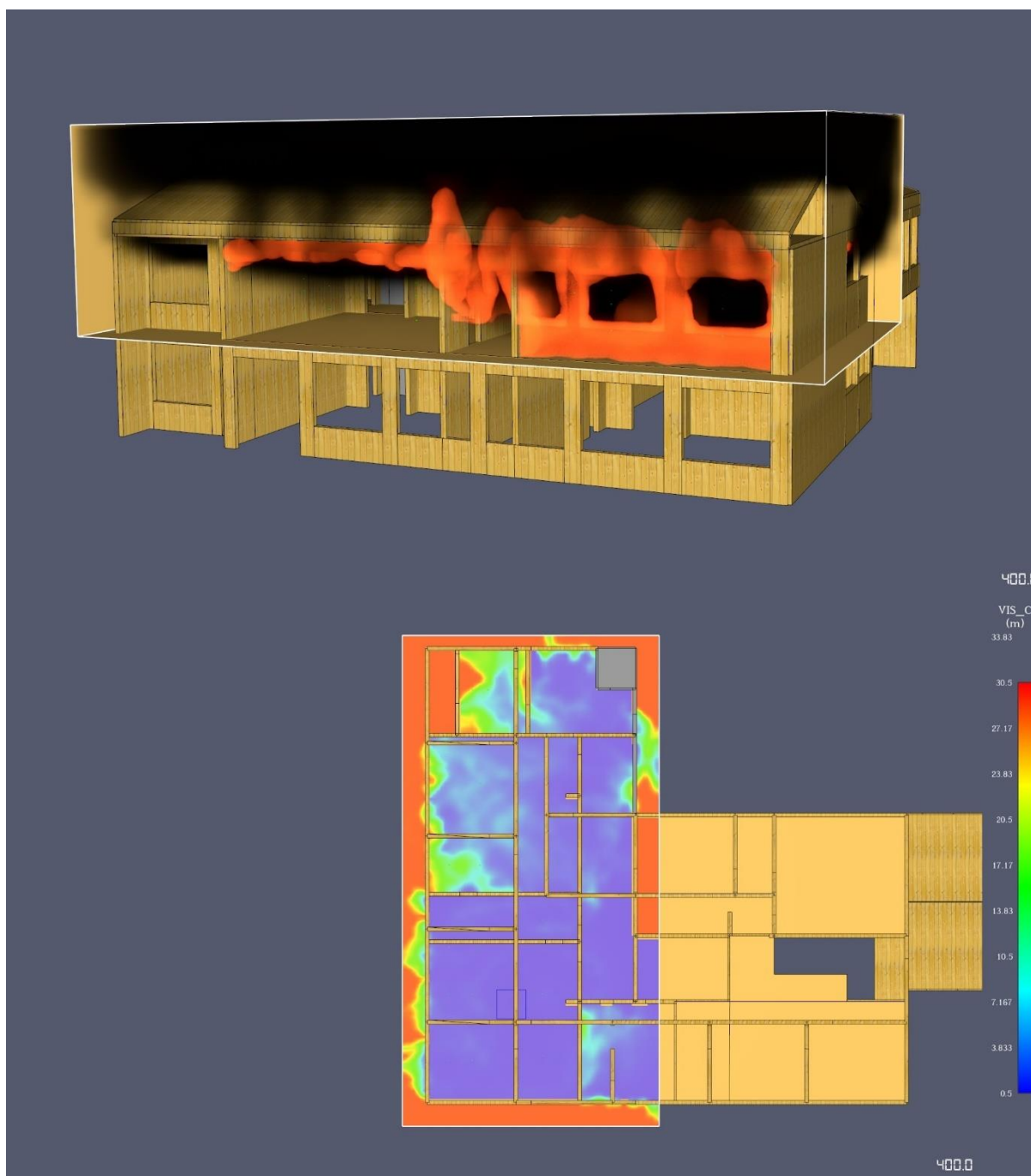
Slika 3.2.16 Temperature izloženog CLT-a

3.2.7.4 Vidljivost

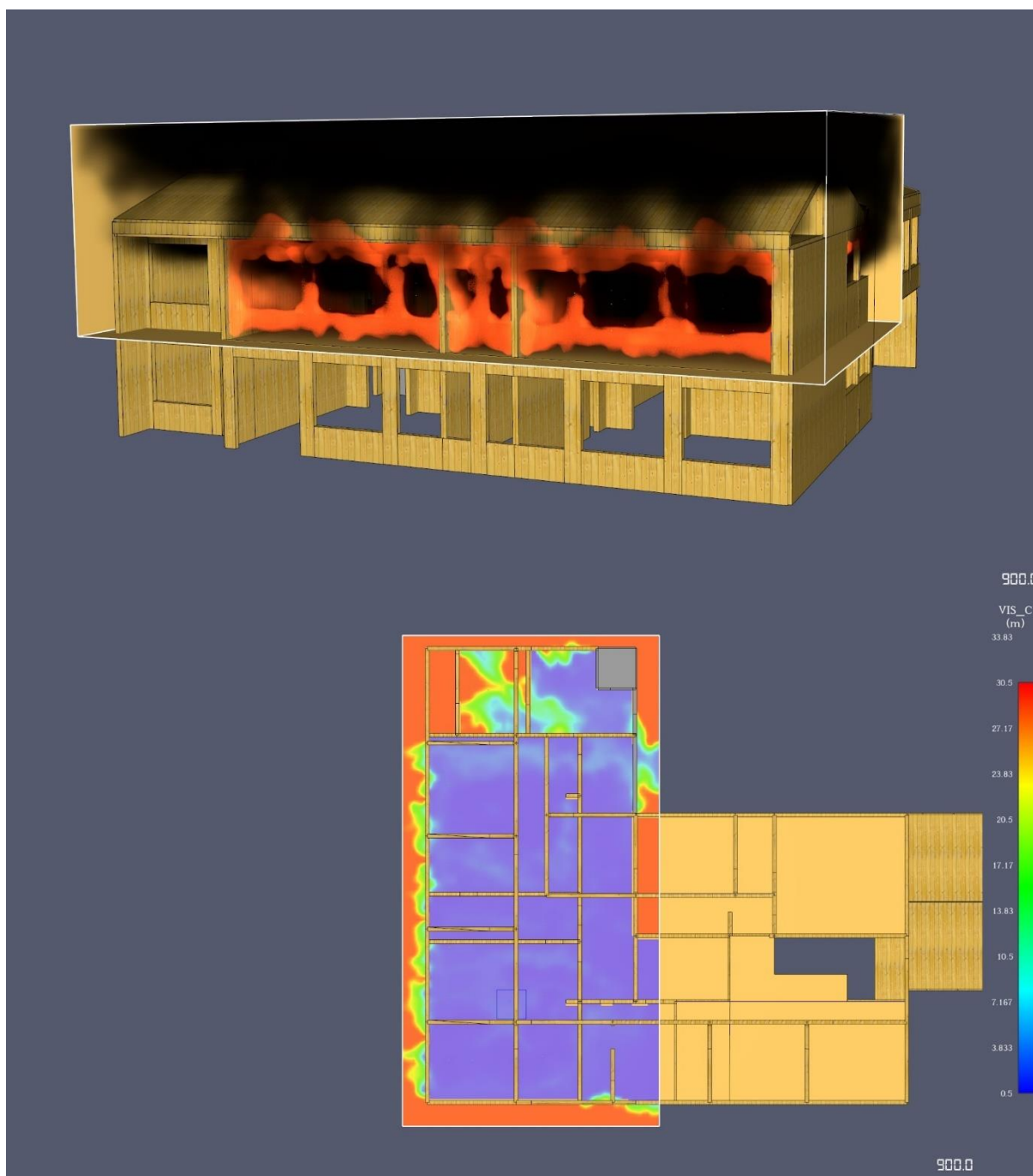
Slika 3.2.17 prikazuje razvoj čađe (varijanta A, izložen CLT) u određenim vremenskim intervalima. Rezultati su predstavljeni u 3D prikazu, te prikazu gustoće čađe na visini od 2 m od poda. Prikazani su rezultati nakon 100 (1.67 min.), 400 (6.67 min.) i 900 sekundi (15 min.). Može se uočiti da je u početku vidljivost značajnije smanjena pretežito u učionici u kojoj je iniciran požar, i to na prosječnu vrijednost od 20 metara, dok je u susjednim prostorijama prosječnu 30 m. U ostalim prostorijama nema značajnijeg smanjenja vidljivosti. Nakon 320 sekundi dim se širi u susjedne prostorije, i već nakon 400 sekundi vidljivost u učionici je manja od 2m, a u susjednim prostorija je smanjena na prosječnu vrijednost od 5m. Na kraju, nakon 900 sekundi (15 minuta), dim se proširio unutar cijelog požarnog odjeljka i vidljivost je značajno smanjena.



(a) Prikaz razvoja dima nakon 100 s



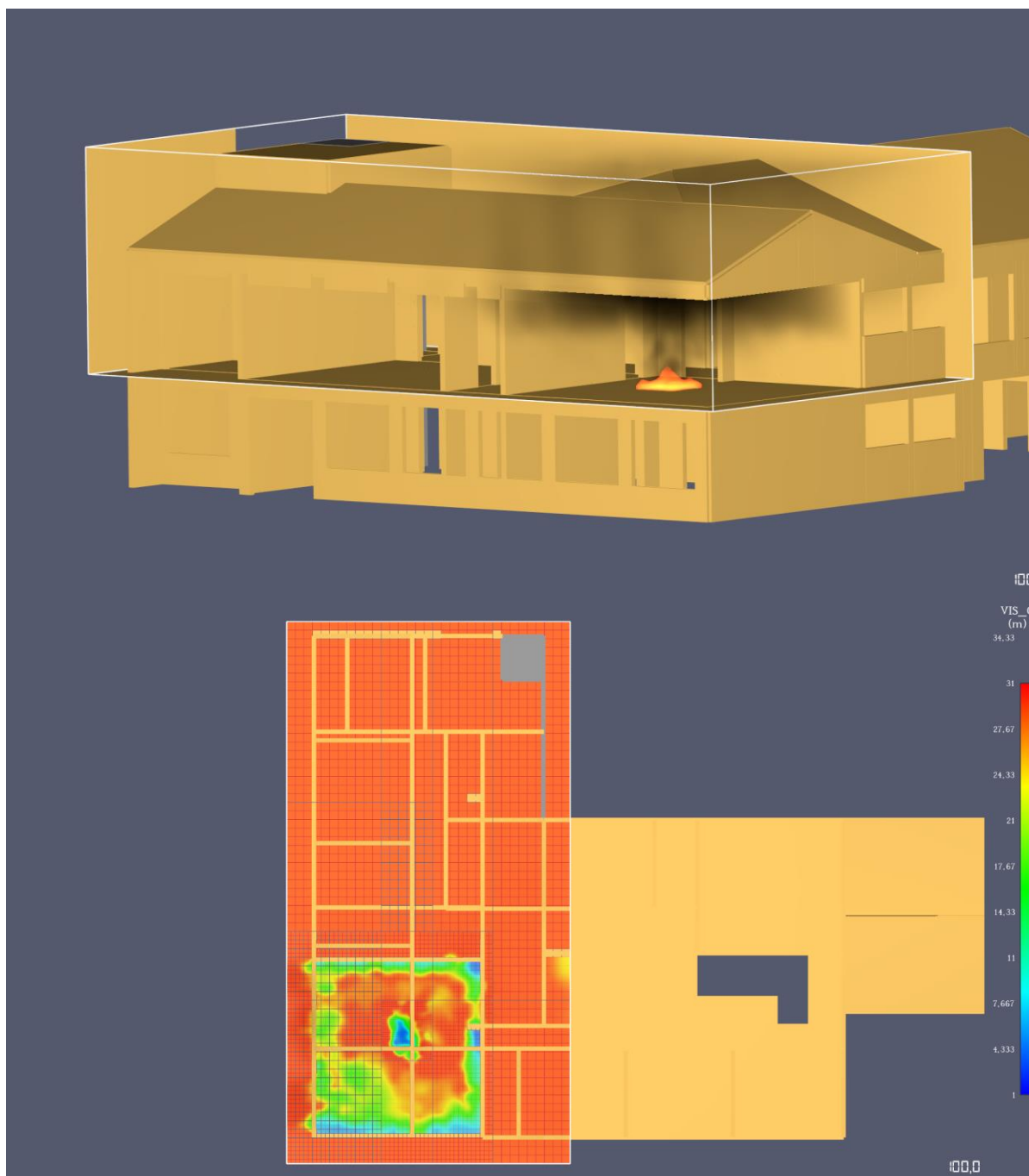
(b) Prikaz razvoja dima nakon 400 s



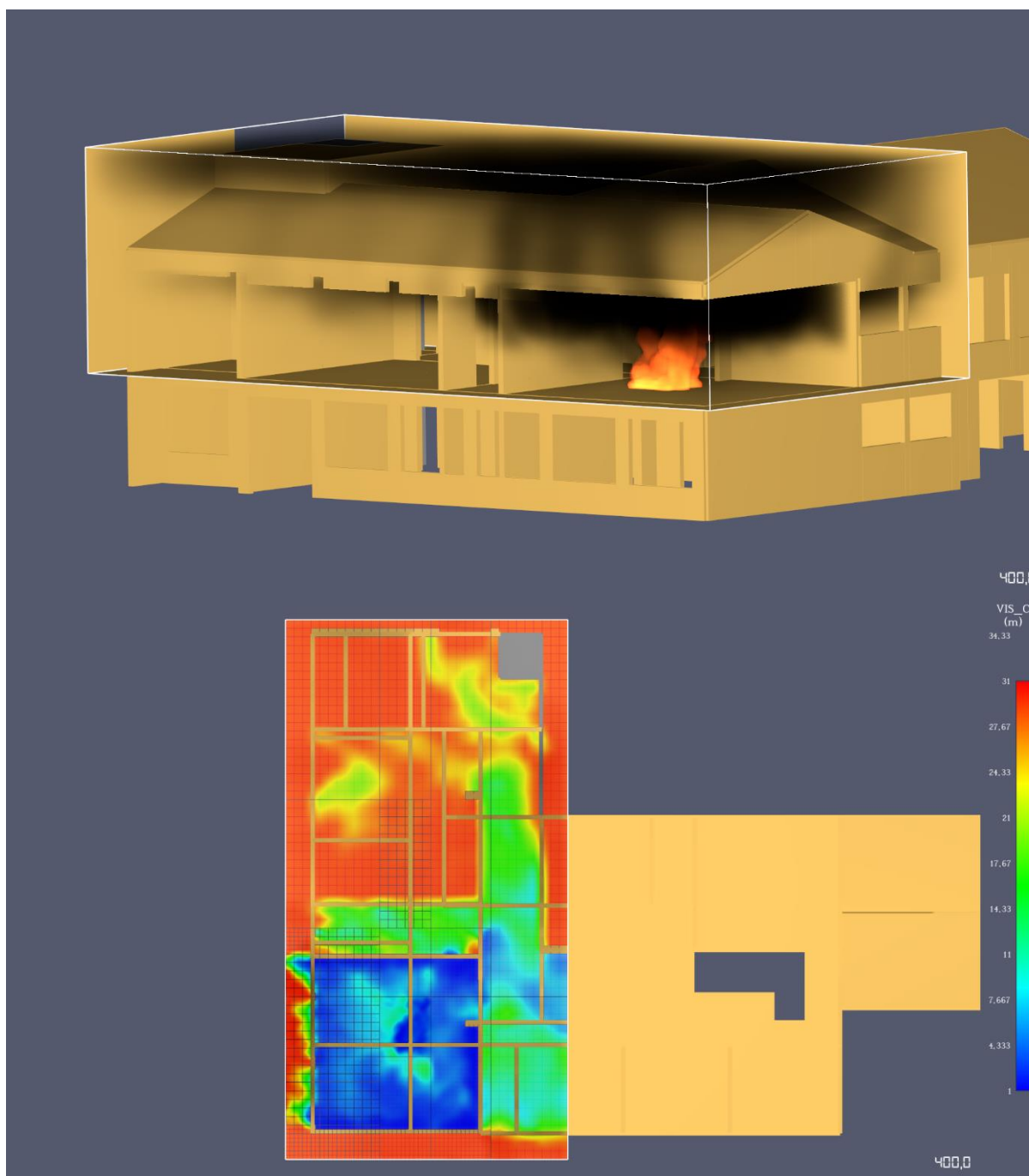
(b) Prikaz razvoja dima nakon 900 s

Slika 3.2.17 Vidljivost i gustoća čađe/dima – scenarij A

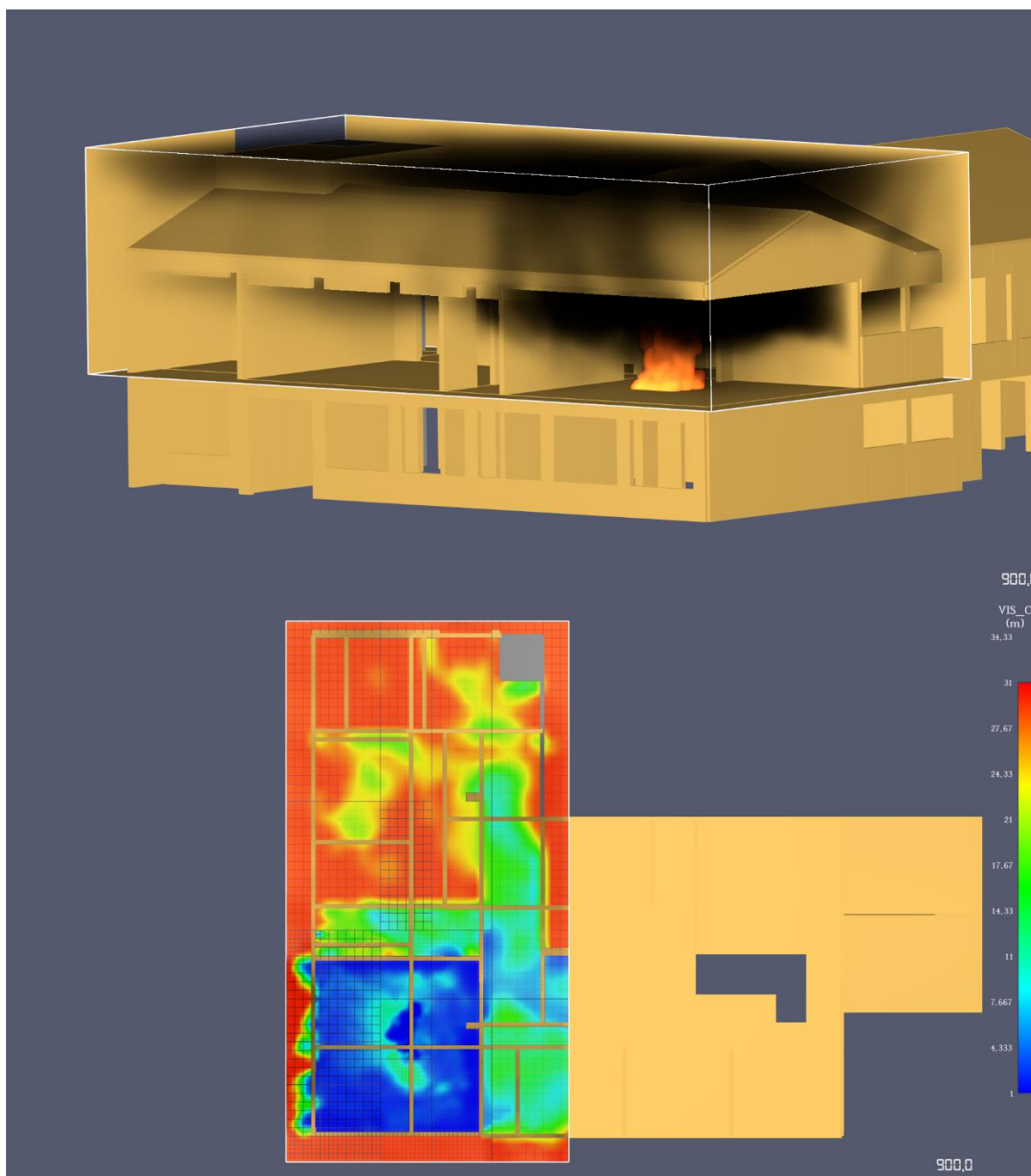
Slika 3.2.18 prikazuje razvoj čađe (varijanta B, zaštićen CLT) u određenim vremenskim intervalima. Prikaz se sastoji od 3D prikaza, te prikaza gustoće čađe na visini od 2 m od poda. Prikazani su rezultati nakon 100 (1.67 min.), 400 (6.67 min.) i 900 sekundi (15 min.). Može se uočiti da je vidljivost značajnije smanjena pretežito u učionici u kojoj je iniciran požar, i to na prosječnu vrijednost od 6 metara, dok je u susjednim prostorijama prosječnu 15 m. U ostalim prostorijama nema značajnijeg smanjenja vidljivosti.



(a) Prikaz razvoja dima nakon 100 s



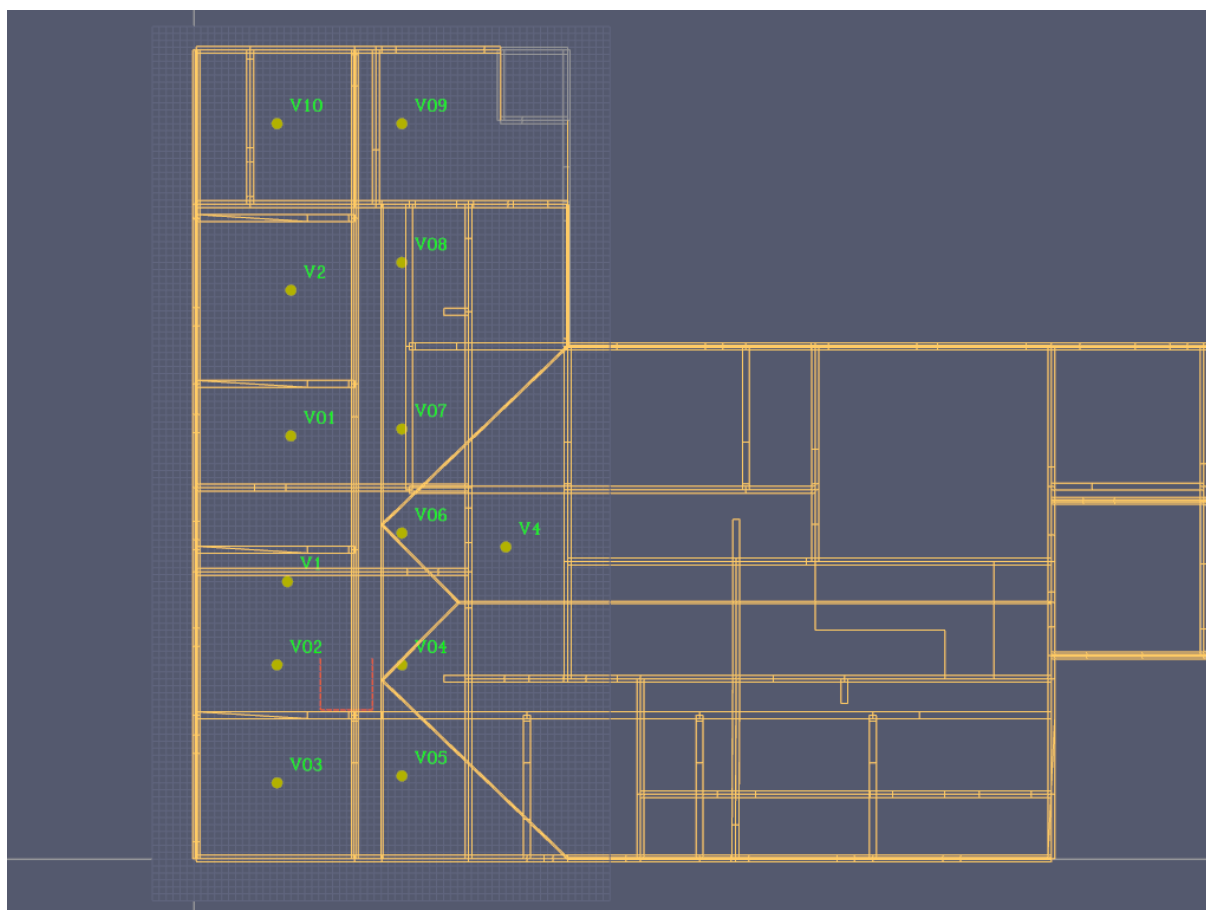
(c) Prikaz razvoja dima nakon 400 s



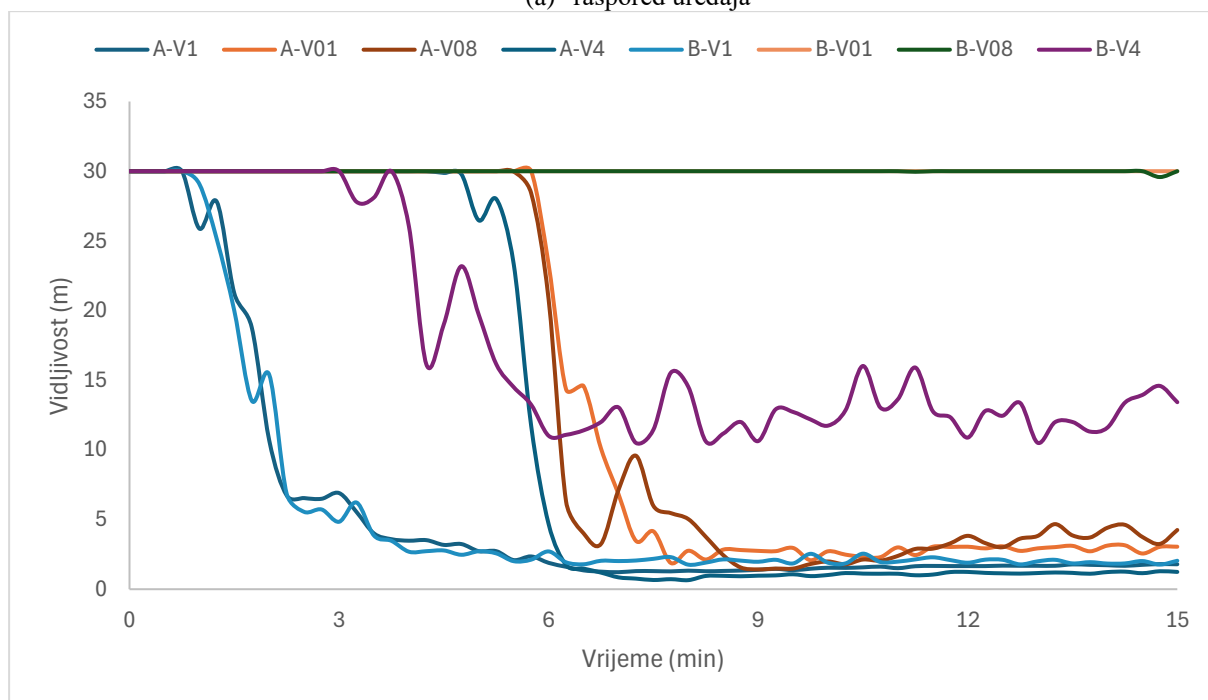
(d) Prikaz razvoja dima nakon 900 s

Slika 3.2.18 Vidljivost i gustoća čađe/dima –scenarija B

Može se zaključiti da izloženost CLT-a pridonosi smanjenju vidljivosti te rasporedu samog dima, uslijed zapaljenja materijala. U varijanti A (izložen CLT) dim se više proširio unutar samog odjeljka, dok je u varijanti B više koncentriran u samoj učionici gdje je i nastao požar. Raspored uređaja za mjerenje vidljivosti prikazuje Slika 3.2.19a, dok Slika 3.2.19b prikazuje usporedbu vidljivosti za oba požarna scenarija, na karakterističnim pozicijama unutar učionice i u susjednim prostorijama.



(a) raspored uređaja

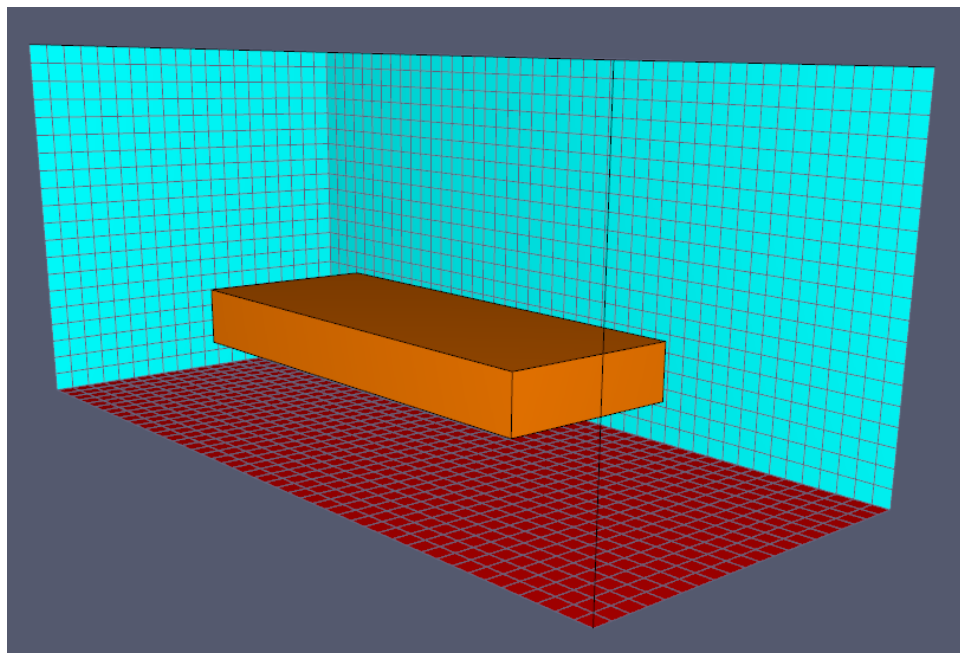


(b) vidljivost

Slika 3.2.19 Vidljivost unutar požarnog odjeljka

3.2.8 Validacija modela izgaranja CLT-a

Ovo poglavlje sadrži proces validacije modela izgaranja predstavljenog u prethodnim poglavljima. U tu svrhu izrađen je detaljni model CLT elementa dimenzija 200x60x500 mm, sa fino mrežom od 20 mm (Slika 3.2.20).



Slika 3.2.20 3D prikaz CLT elementa

U nastavku će biti prikazan „Burn Away“ mode, tj. proces zapaljenja i gorenja drva, a samim tim i „nestanka“ ćelija CLT-a. Definiranje materijala i reakcije je sukladno prethodnom poglavlju, kako prikazuje Tablica 3.2.2.

Tablica 3.2.2 Geometrija, materijal i reakcija CLT-a.

CLT ploča		
Podaci o materijalu		
Toplina izgaranja =	17900	kJ/kg
HRR =	150	kW/m ²
Specifična toplina	1.36	kJ/kgK
Geometrija Podaci		
D =	0.06	m
b =	0.2	m
L =	0.5	m
CLT volumen =	0.006	m ³
CLT površina =	0.144	m ²
Gustoća =	450	kg/m ³

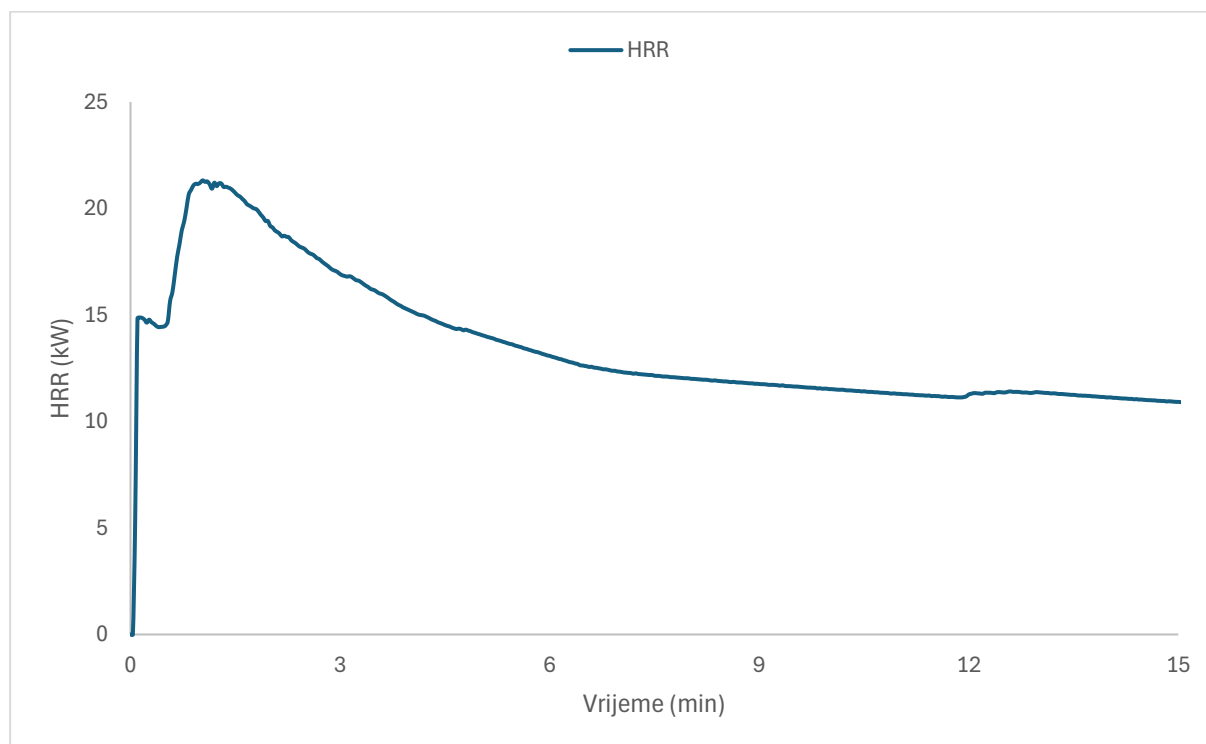
Važno je napomenuti da je reakcija materijala bila definirana funkcijom, a ne konstantom vrijednošću, a sve prema poglavlju 3.2.5, te slici Slika 3.2.6.

Temperature zapaljenja definirana je na 384 °C, te drvo počinje emitirati nakon što se zapali. Donja površina (*igniter surface*) predstavlja toplinski tok od 100 kW/m². Nadalje, definirana je „Bulk Density“ na 450 kg/m³ za CLT element. Ovo je od krucijalne važnosti jer na ovaj način FDS uzima obzir stvarni volumen elementa prilikom izračuna mase gorive tvari. Na osnovu gore navedenih podataka, lako se može izračunati koliki je maksimalni HRR, koliko vremena je potrebno da CLT izgori, te koliki je ukupna oslobođena toplinska snaga HRR (Tablica 3.2.3)

Tablica 3.2.3 Očekivani rezultati modela izgaranja CLT-a

CLT - očekivani rezultati			
Max HRR =	21.6		kJ/s
Vrijeme do izgaranja =	2237.5		s
Ukupni HR =	48330		kJ

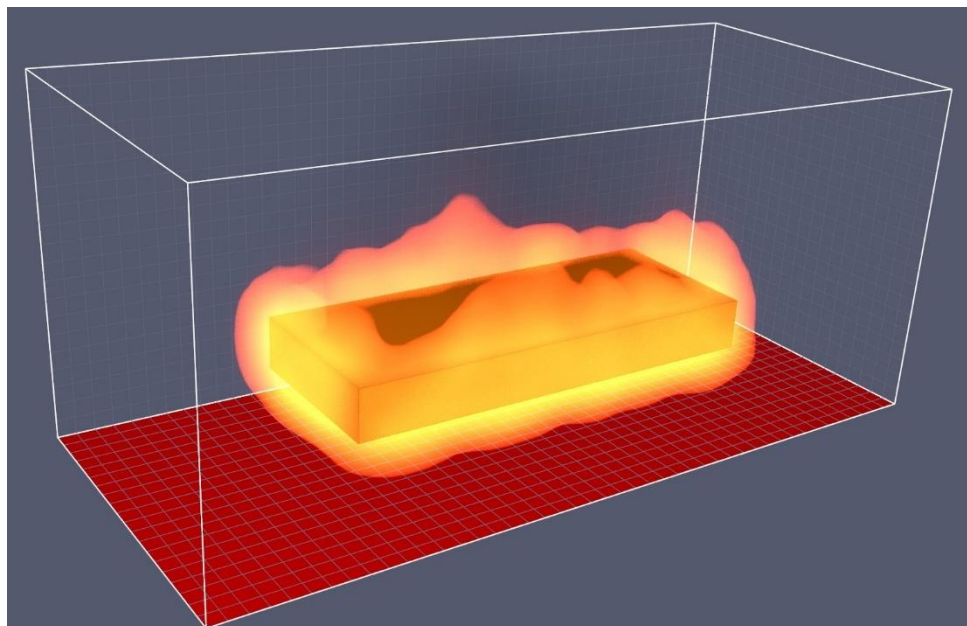
Slika 3.2.21 prikazuje rezultati FDS simulacije u vidu razvijene toplinske snage.



Slika 3.2.21 Razvijeni HRR uslijed izgaranja CLT-a

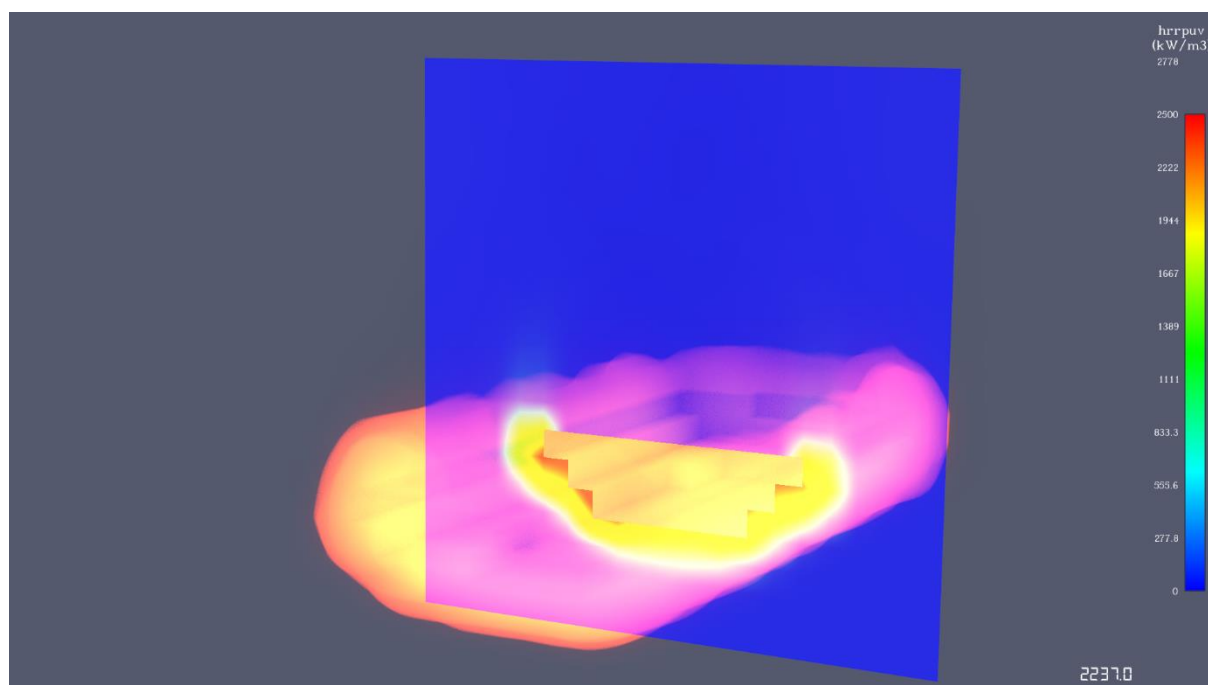
Iz dijagrama je vidljivo da je maksimalni HRR u skladu s očekivanim i iznosi 21.3 kW. Ovime se potvrđuje ispravnost modela definiranjem reakcije putem HRRPUA, i to kao funkcije, a ne konstante. U slučaju da se definirao kao konstanta, vršna vrijednost HRR-a se

pokazala znatno većom, te je HRR dijagram znatno drugačiji, iako ukupna oslobođena toplina pokazuje dobre rezultate. Sljedeći korak je analizirati samo izgaranje i brzinu izgaranja CLT-a (Slika 3.2.22).

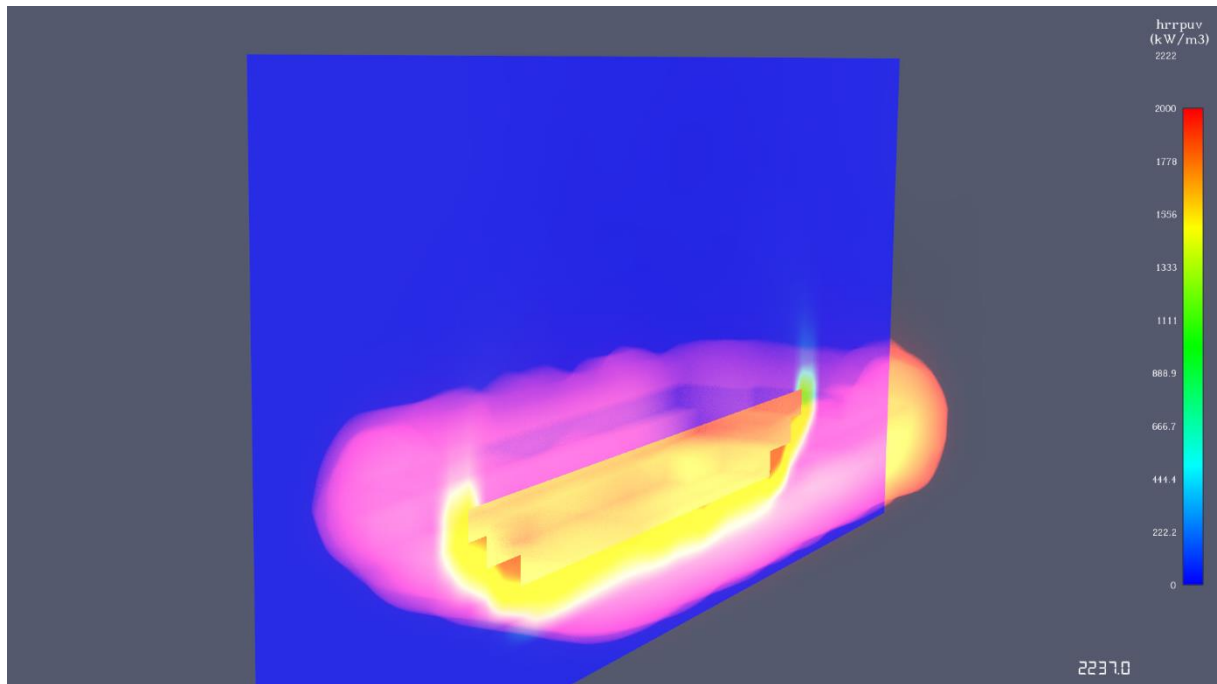


Slika 3.2.22 Proces gorenja CLT-a

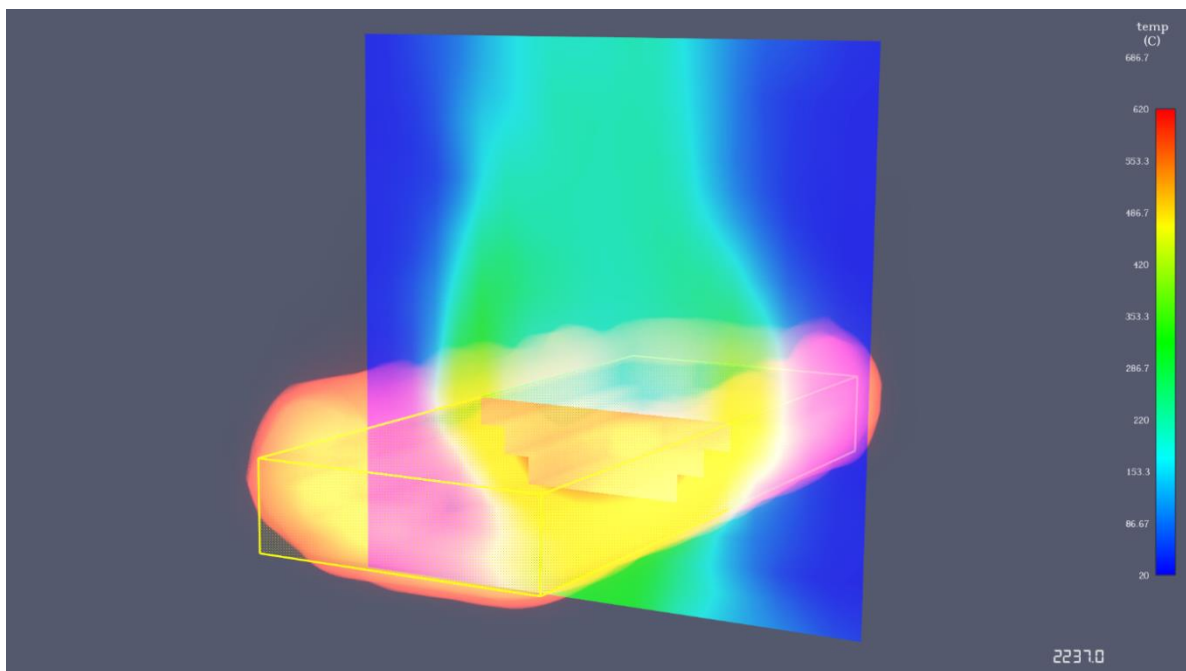
Rezultati koje prikazuje Slika 3.2.23 odnose se na razvijene temperature te HRRPUV (HRR po m^3).



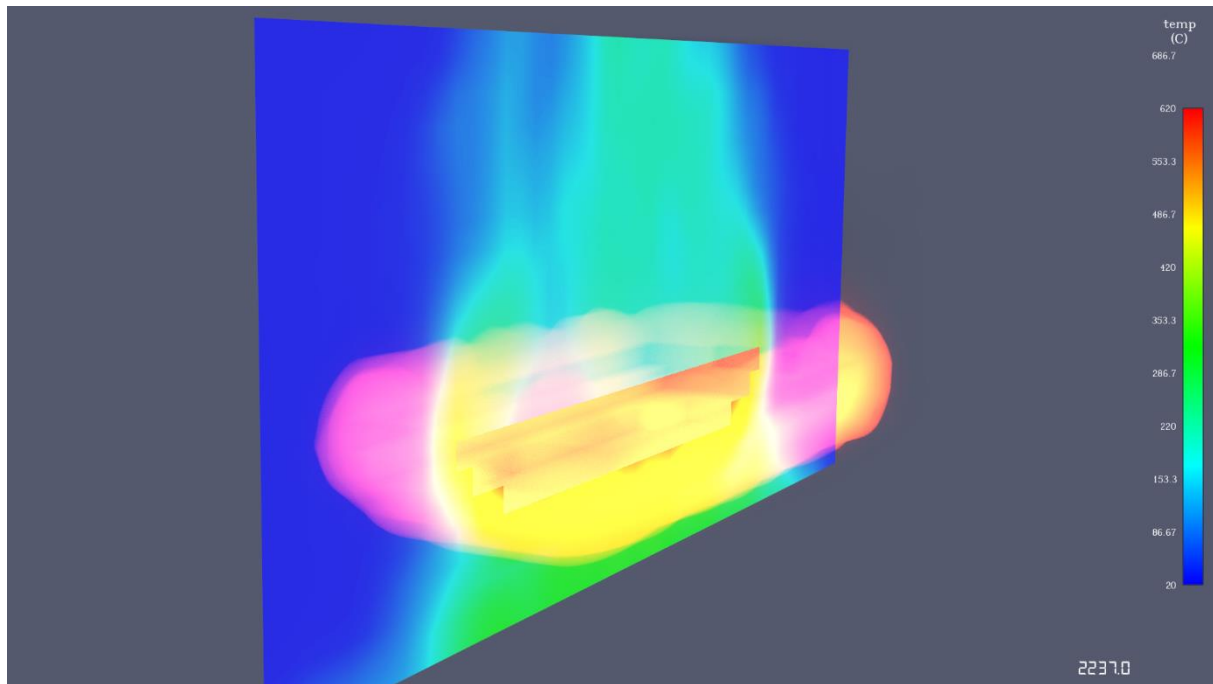
(a) temperatura x smjer



(b) temperatura y smjer



(c) HRRPUV x smjer



(d) HRRPUV y smjer

Slika 3.2.23 Rezultati CFD analize sagorijevanja drva

Ukoliko izmjerimo preostali presjek nakon 33 min (1980 s), može se uočiti da je veći dio prvog sloja (čelija 20 mm) nestao, što odgovara proračunu prema EC5 (0.65mm/min) koji će se provesti u nastavku.

Ovim postupkom se čini još jedan korak naprijed prilikom modeliranja sagorijevanja drva, i ujedno i najdalji korak prije samog modeliranja pirolize.

3.3 MKE - Požarna otpornost i dokaz nosivosti drvene konstrukcije prema EC5

Zahtjev za požarnu otpornost prema standardu HR EN 1995-1-2 za nosive konstrukcije koje se nalaze u požarnom odjeljku je R60. U simulaciji, za rubne uvjete parametarskog požara kontroliranog ventilacijom, vrijeme izloženosti požarnom opterećenju znatno je niže od minimalno zahtijevane vrijednosti požarne otpornosti u standardnim uvjetima uporabe. Iz toga slijedi da je njihovo dimenzioniranje u praksi značajno na strani sigurnosti, stoga će se u nastavku provesti proračun drvenih elemenata prema EN 1995-1-2.

Statički proračun konstrukcije predmetne građevine izvršen je računalnim programu DLUBAL RFEM. Proračun je proveden prema općim principima projektiranja (prema nizovima HRN EN 1990:2011 i HRN EN 1991:2008), metodom konačnih elemenata. Izvršeno je cjelovito dimenzioniranje elemenata konstrukcije predmetne građevine za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabivosti (prema HRN EN 1995:2013). Geometrijski oblik strukture računalnog modela definiran je kao prostorno - statički neodređeni sustav, uz poštivanje ekscentriciteta pojedinih elemenata. Karakteristike materijala u računalnom modelu, geometrijske karakteristike profila (poprečnih presjeka) elemenata strukture računalnog modela te karakteristike opterećenja i kombinacija opterećenja na strukturu računalnog modela konstrukcije predmetne građevine, definirane su realnim vrijednostima za svaki proračunski korak.

3.3.1 Analiza opterećenja

3.3.1.1 Stalno

Za svaki element građevine potrebno je pretpostaviti vlastitu težinu koja ovisi o gustoći materijala od kojeg je element izrađen te geometriji samog elementa. U predmetnom slučaju vlastitu težinu svih elemenata nosivog sustava proračunava i u obzir uzima automatski računalni program. Poradi zasebnog statičkog proračuna potrebno je pretpostaviti i težinu sekundarnih elemenata (pregradni zidovi, ograde, brisoleji,...), opreme građevine (težina potkonstrukcije, pokrova i fasade) te dodatno stalno opterećenje.

Pozicija		P			
Opis pozicije		Prizemlje			
Stalno opterećenje (g)	Sloj	Zapreminska težina [kg/m ³]	Debljina sloja [cm]	Iznos površinskog opterećenja [kN/m ²]	
	1	Keramika		3	0,6
	2	HI polimercementi premaz		0,3	0,01
	3	Estrih		6	1,18
	4	PE folija		0,2	0,01
	5	Mineralna vuna		3	0,04
	6	PE folija		0,2	0,01
	7	Hidroizolacija		1,00	0,10
	8	Dodatno stalno			0,50
		Ukupno:			2,45
Pozicija		MK			
Opis pozicije		Međukatna konstrukcija - korisni prostor			
Stalno opterećenje (g)	Sloj	Zapreminska težina [kg/m ³]	Debljina sloja [cm]	Iznos površinskog opterećenja [kN/m ²]	
	1	Keramika		3	0,6
	2	HI polimercementi premaz		0,3	0,01
	3	Estrih		6	1,18
	4	PE folija		0,2	0,01
	5	Mineralna vuna		3	0,04
	6	PE folija		0,2	0,01
	7	Hidroizolacija		1,00	0,1
	8	Podgled		7,5	0,22
	9	Dodatno stalno			0,5
	Ukupno:			2,67	
Pozicija		MU			
Opis pozicije		Međukatna konstrukcija - Učionice			
Stalno opterećenje (g)	Sloj	Zapreminska težina [kg/m ³]	Debljina sloja [cm]	Iznos površinskog opterećenja [kN/m ²]	
	1	Polietilen		0,6	0,6
	2	Estrih		6	1,18
	3	PE folija		0,2	0,01
	4	Mineralna vuna		3	0,04
	5	PE folija		0,2	0,01
	6	Dodatno stalno			0,5
	Ukupno:			2,34	
Pozicija		S			
Opis pozicije		Stubište			
Stalno opterećenje (g)	Sloj	Zapreminska težina [kg/m ³]	Debljina sloja [cm]	Iznos površinskog opterećenja [kN/m ²]	
	1	Gazišta		16	2,25
	2	Ograda			0,18
	3	Podgled		7,5	0,22
	4	Dodatno stalno			0,5
	Ukupno:			3,15	
Pozicija		K			
Opis pozicije		Krovište			
Stalno opterećenje (g)	Sloj	Zapreminska težina [kg/m ³]	Debljina sloja [cm]	Iznos površinskog opterećenja [kN/m ²]	
	1	Pokrov		2	0,3
	2	Potkonstrukcija		8	0,07
	3	Pe folija		0,2	0,01
	4	Mineralna vuna		15	0,19
	5	Parna brana		0,2	0,01
	6	Podgled		7,5	0,22
7	Dodatno stalno			0,5	
	Ukupno:			1,30	

3.3.1.2 Uporabno opterećenje

Djelovanje uporabnog opterećenja u obzir treba uzeti kod građevine čija je korisna površina izložena nakupljanju ljudi ili stvari. Norma definira pravila za određivanje djelovanja uporabnog opterećenja, a koja se temelje na uvriježenim pravilima struke. Namjena predmetne građevine (pretežito kategorija C1 i C2 te djelomično kategorija E1) pretpostavlja opterećenost

horizontalnih podnih površina u cijeloj širini između rubova građevine što rezultira karakterističnom vrijednošću opterećenja osobama i stvarima

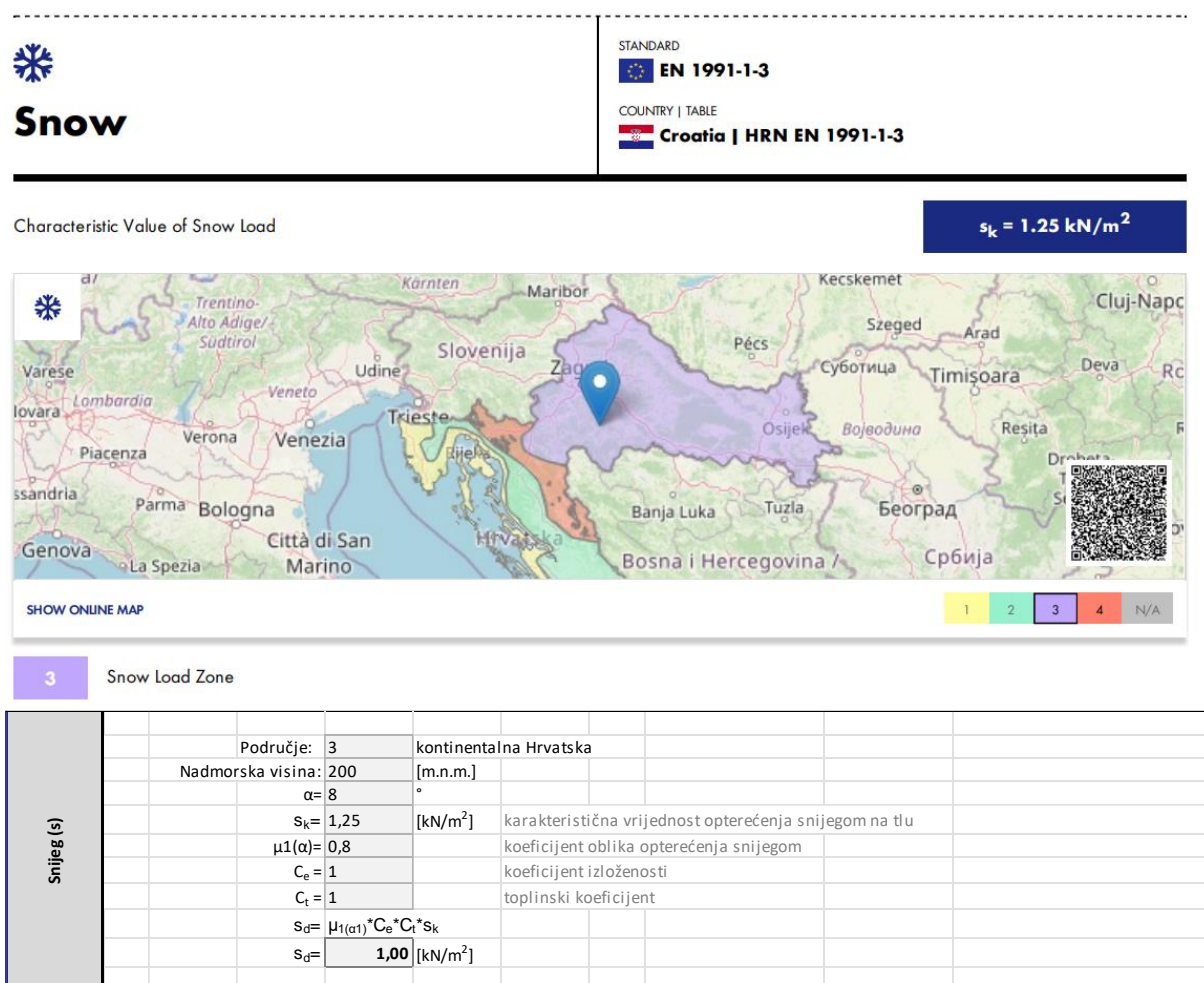
$$q_{C1,k} = 3.00 \text{ kN/m}^2 \text{ (učionice),}$$

$$q_{C2,k} = 4.00 \text{ kN/m}^2 \text{ (korisni prostor, stubište) te}$$

$$q_{E1,k} = 7.50 \text{ kN/m}^2 \text{ (knjižnica, kotlovnica i strojarnica).}$$

3.3.1.3 Snijeg

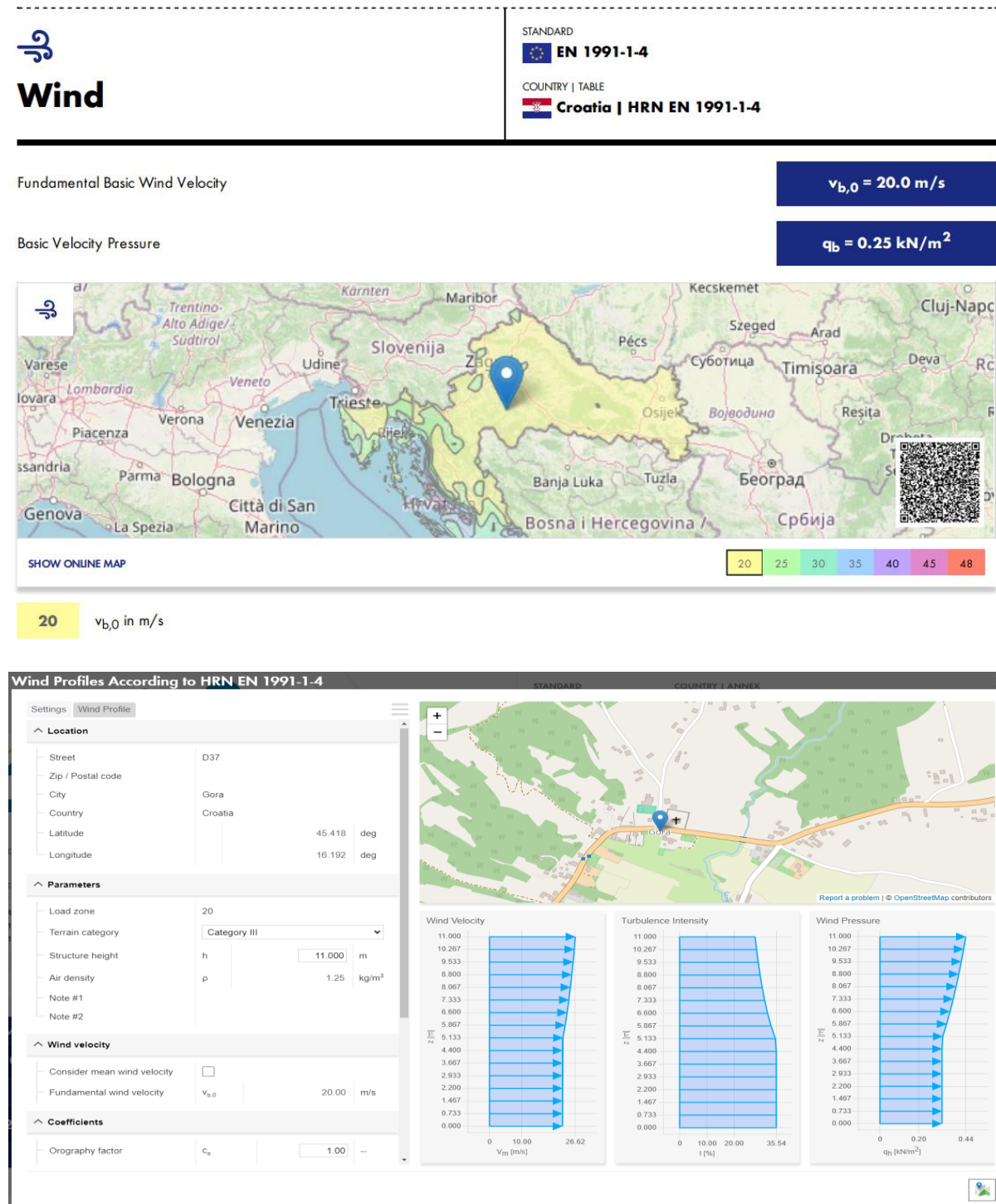
Lokacija predmetne građevine nalazi se na 200 m.n.v. i u zoni III prema karti opterećenja snijegom na tlu za RH što rezultira karakterističnom vrijednošću opterećenja snijegom $s_k = 1.25 \text{ kN/m}^2$. Krovna površina (ravni, jednostrešni i dvostrešni krov) je pod nagibom od najmanje 0° do najviše 20° što rezultira koeficijentom oblika $\mu_1 = 0.80$. Ostale karakteristike objekta rezultiraju vrijednostima koeficijenta izloženosti $C_e = 1.00$ i termalnog koeficijenta $C_t = 1.00$ (Slika 3.3.1)



Slika 3.3.1 Snijeg

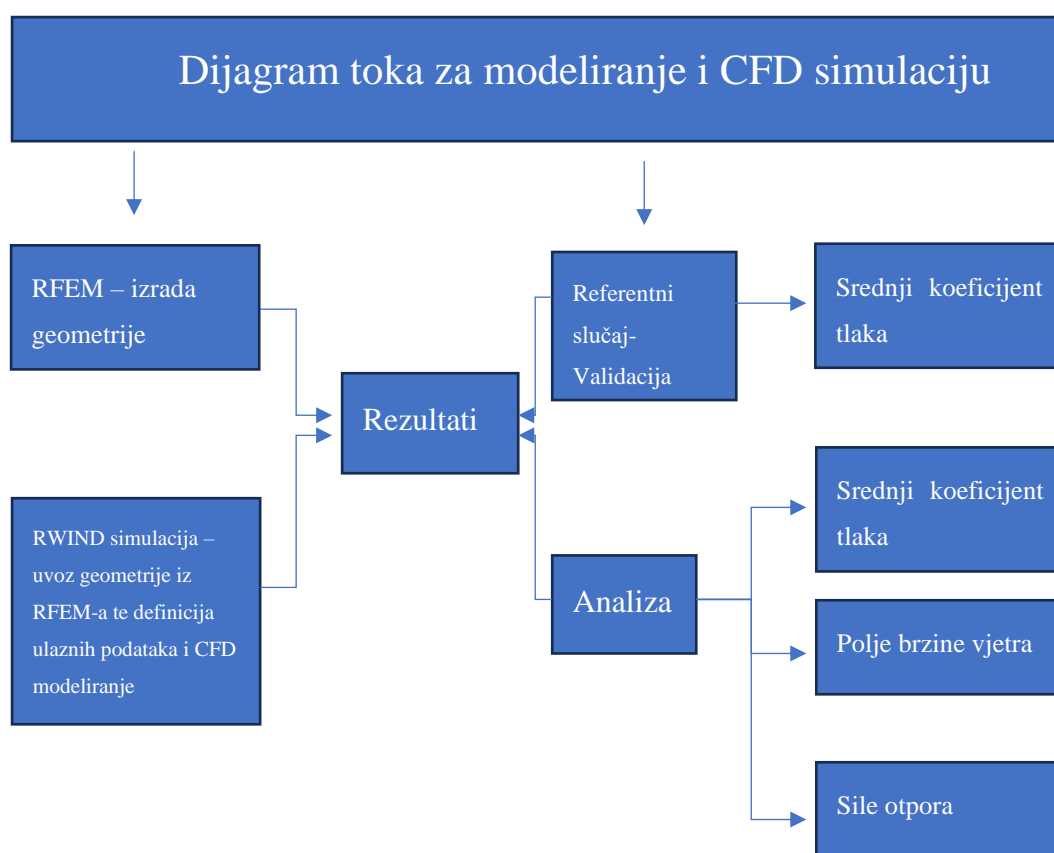
3.3.1.4 Vjetar

Lokacija predmetne građevine nalazi se u zoni II prema karti brzina vjetra za RH što rezultira karakterističnom vrijednošću gustoće zraka $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ te referentnom vrijednošću brzine vjetra $v_{\text{ref},0} = 20.00 \text{ m/s}$. Najviša točka građevine je na visini 11.08 m iznad tla terena i u II. kategoriji hrapavosti terena prema dijagramu koeficijenta izloženosti što rezultira vrijednošću koeficijenta izloženosti $C_{e(z_e)} = 2.45$. Ostale karakteristike građevine rezultiraju vrijednostima koeficijenta smjera vjetra $c_{\text{dir}} = 1.00$ i koeficijenta doba $c_{\text{season}} = 1.00$ (Slika 3.3.2).

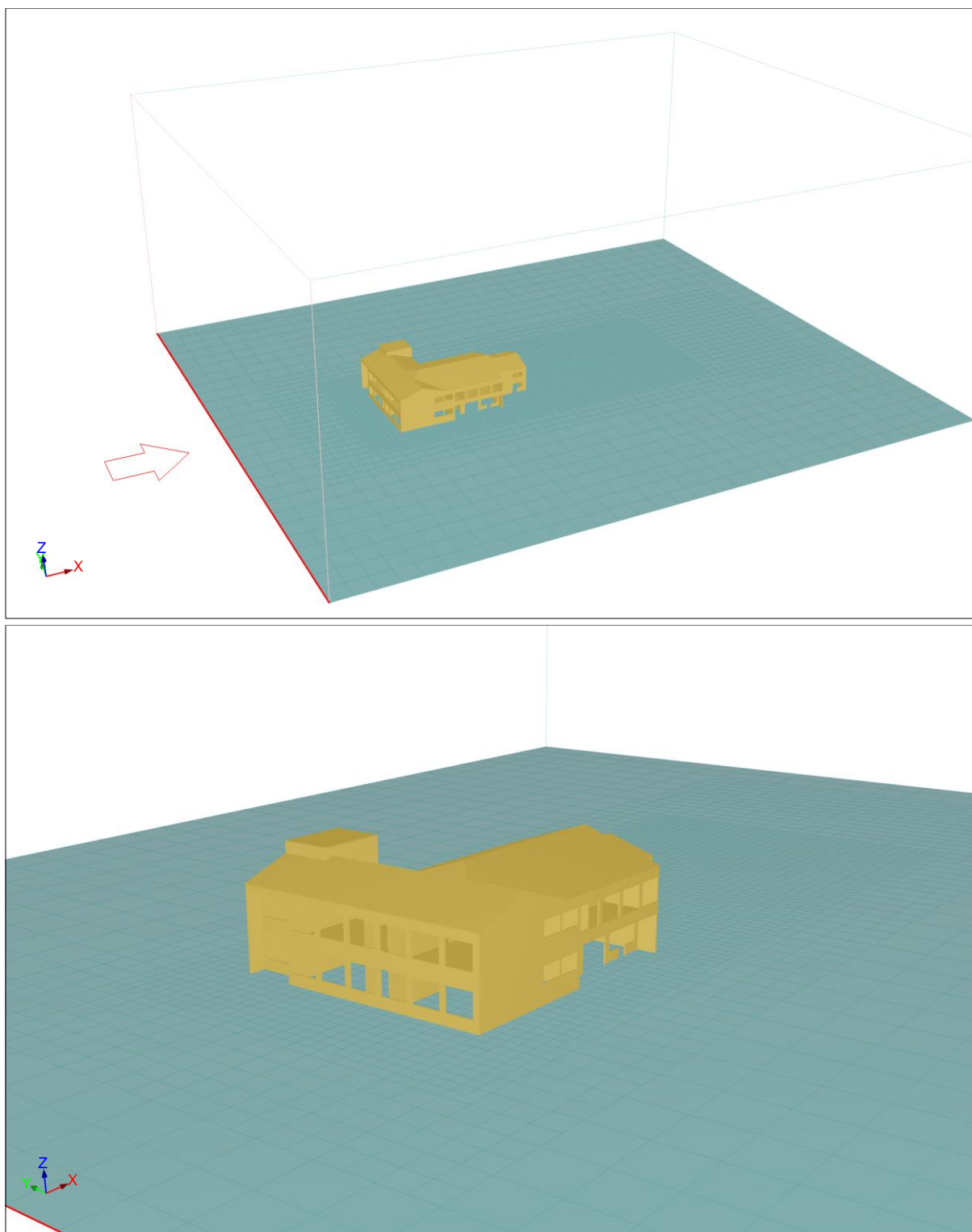


Slika 3.3.2 Vjetar

Određivanje opterećenja vjetrom koristio se digitalni aerodinamički tunel za numeričku simulaciju strujanja vjetra, odnosno CFD analiza. RWIND 2 je program za generiranje opterećenja vjetrom temeljen na CFD (Computational Fluid Dynamics). Numerička simulacija strujanja vjetra generira se oko svake zgrade, uključujući tipove nepravilne ili jedinstvene geometrije, kako bi se odredila opterećenja vjetrom na površine i elemente. RWIND 2 je samostalni program i može se koristiti kao samostalna aplikacija ili kao dodatak softveru za strukturnu analizu i dimenzioniranje u RFEM-u. Dijagram toka za analizu protoka zraka prikazan je u nastavku (Slika 3.3.3).



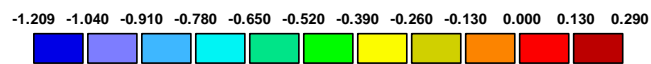
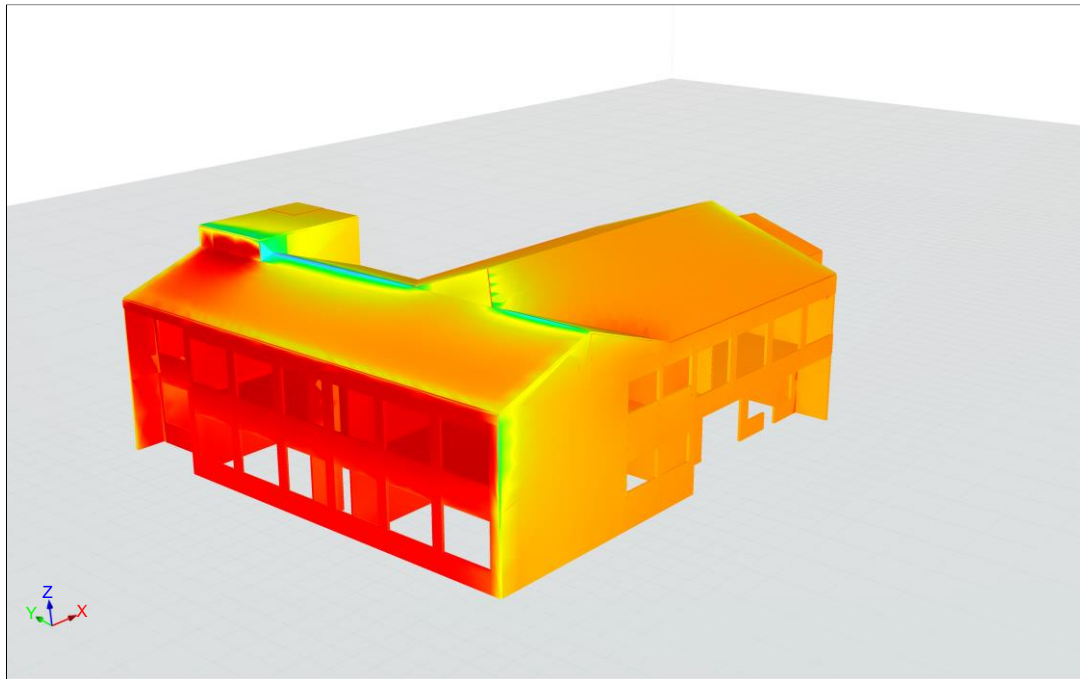
Slika 3.3.3 Dijagram toka za analizu protoka zraka



Slika 3.3.4 3D model – RWIND CFD

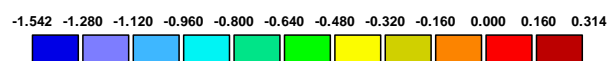
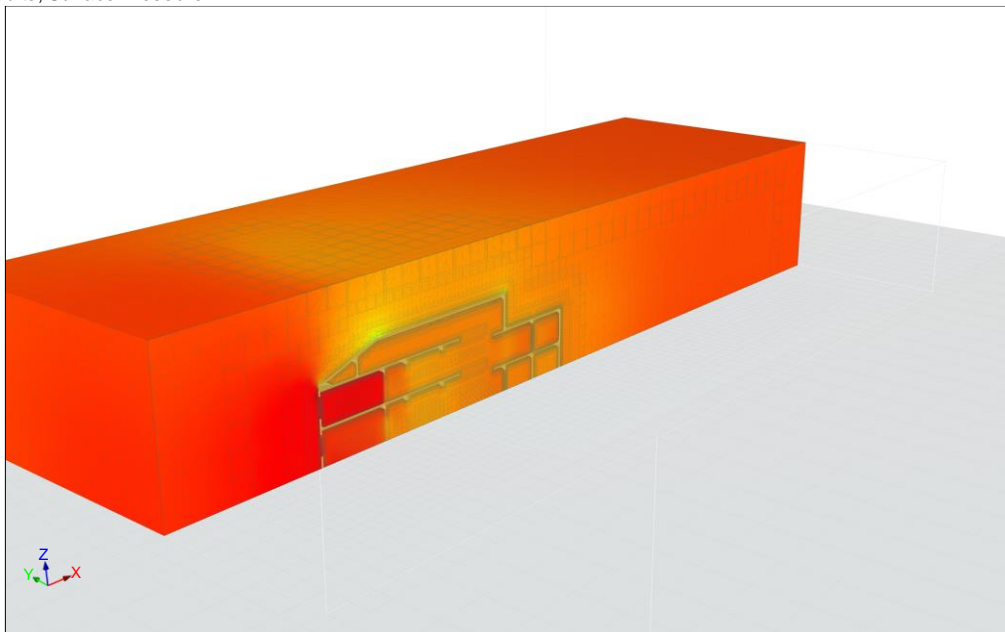
Rezultati CFD analize:

- Vjetar smjer 0 °



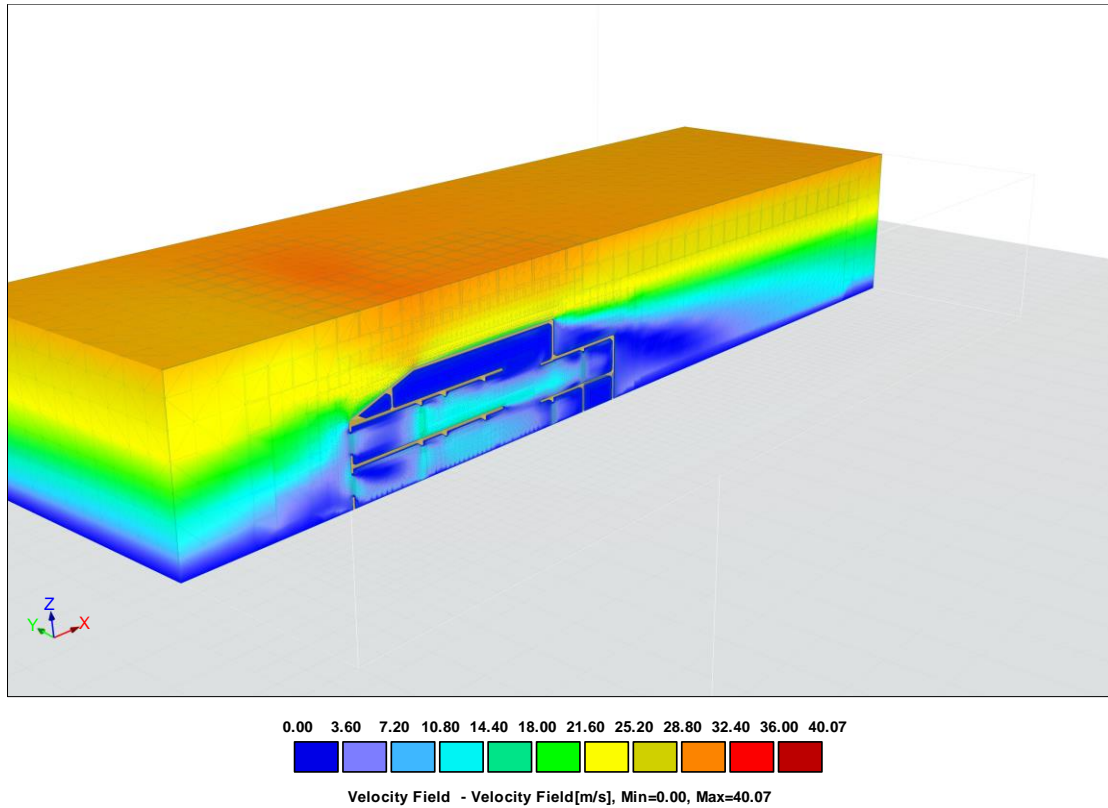
Surface Pressure - Surface Pressure[kN/m²], Min=-1.209, Max=0.290

Project GORA
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Surface Pressure

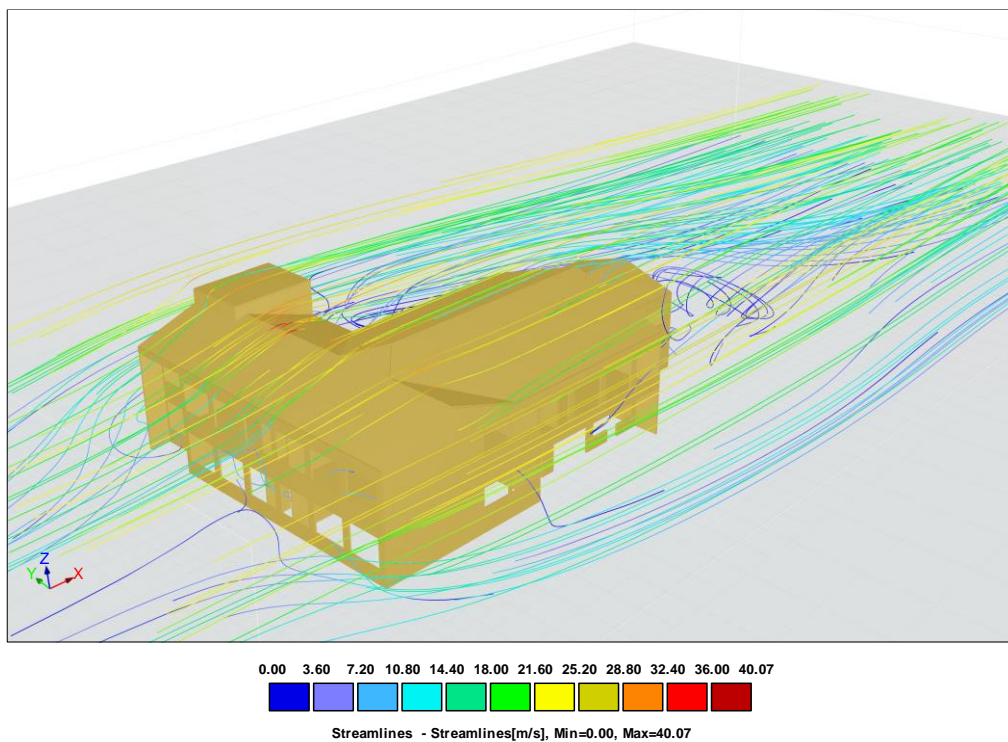


Pressure Field - Pressure Field[kN/m²], Min=-1.542, Max=0.314

Project GORA
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Pressure Field



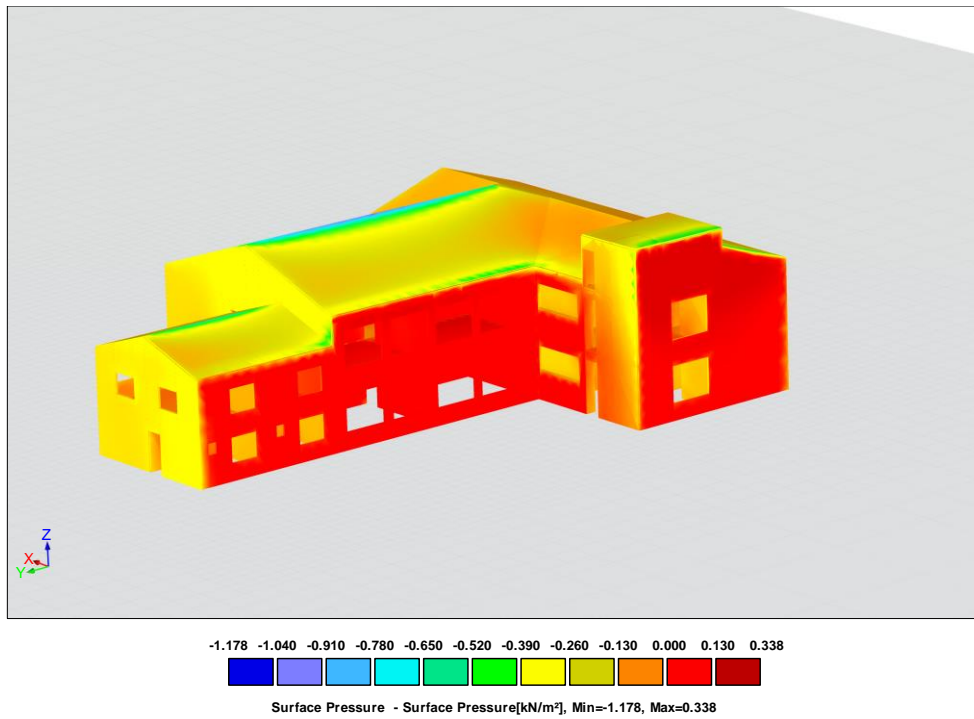
Project GORA
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Velocity Field



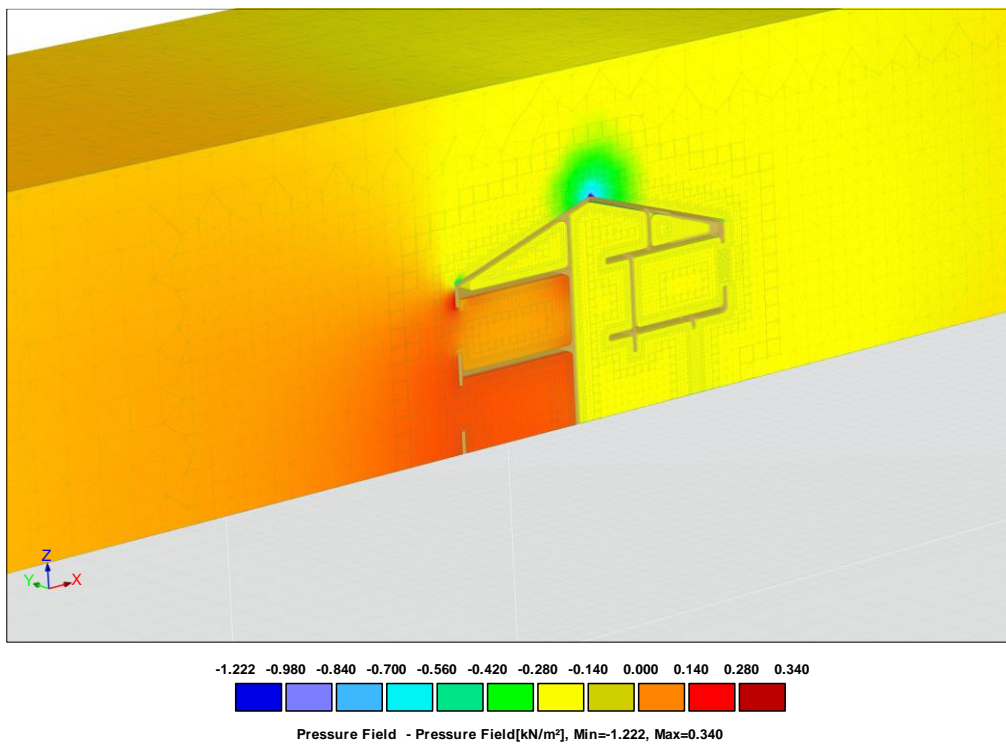
Project GORA
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Streamlines

Slika 3.3.5 Vjetar 0° stupnjeva

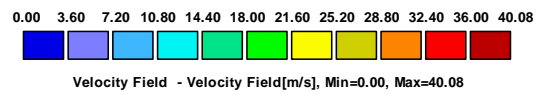
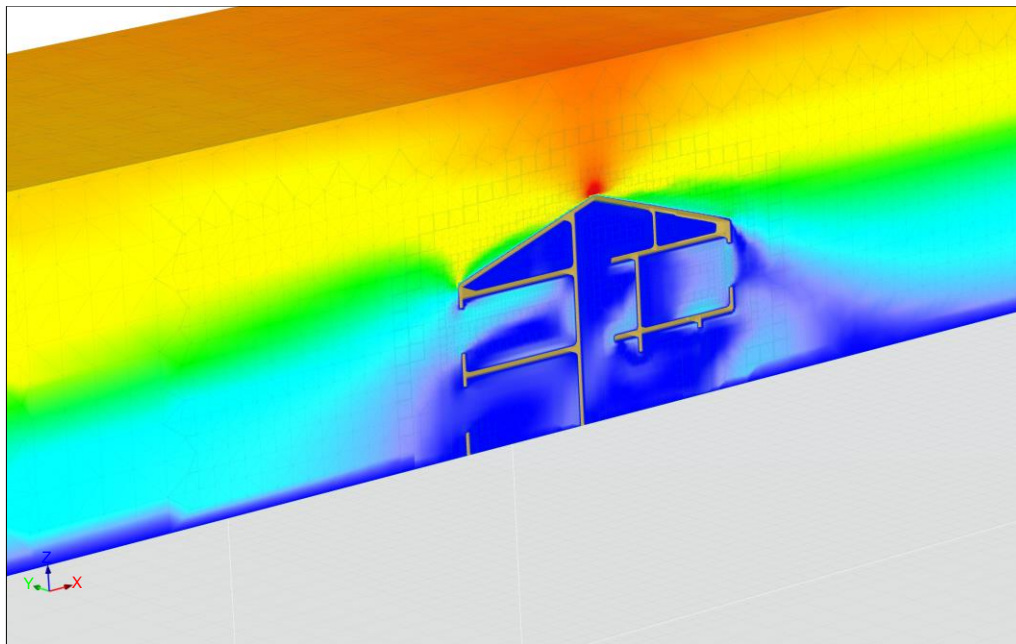
- Vjetar smjer 90 °



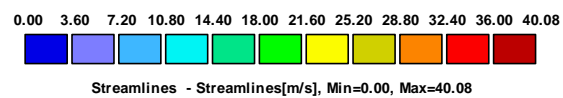
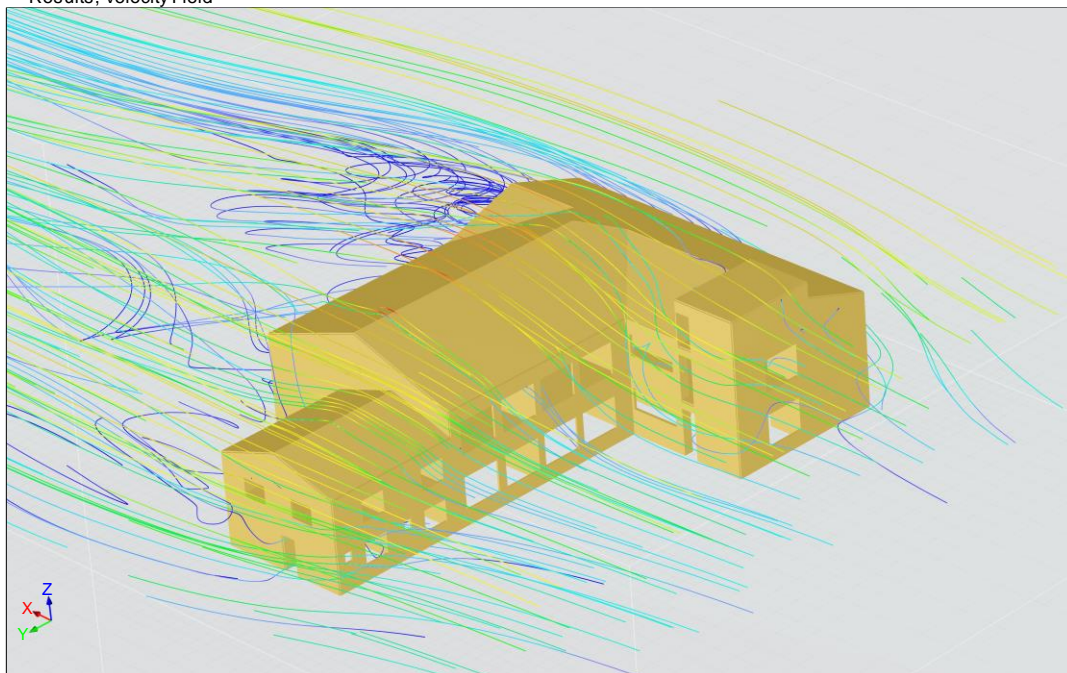
Project GORA_090
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Surface Pressure



Project GORA_090
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Pressure Field



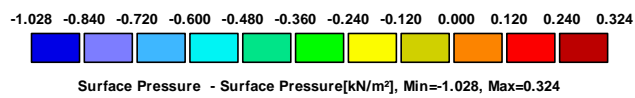
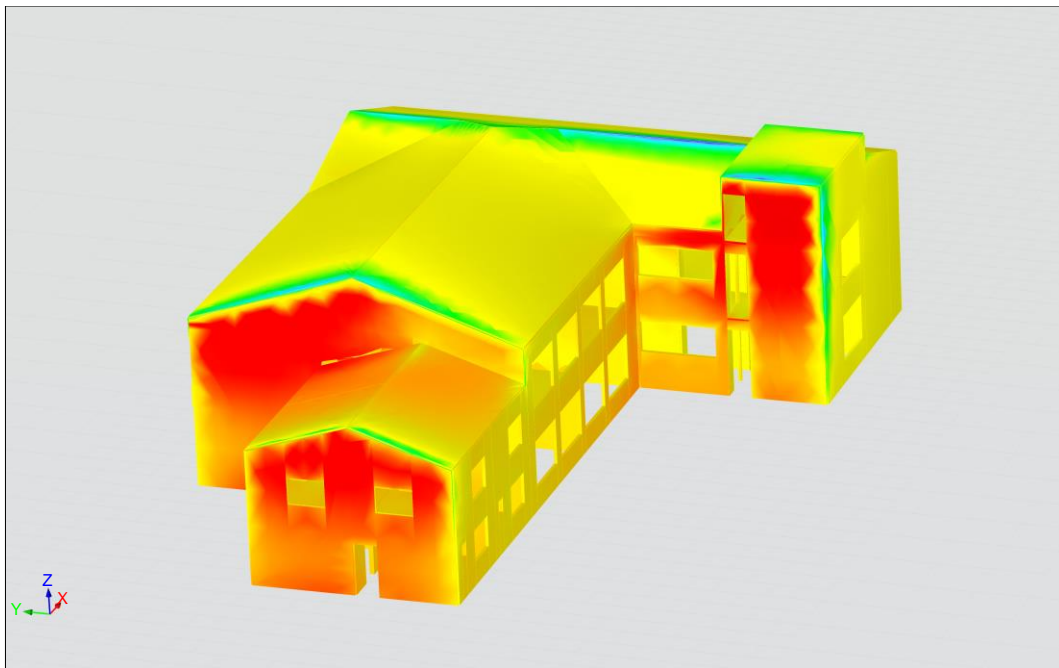
Project GORA_090
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Velocity Field



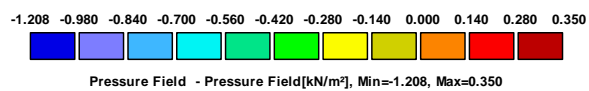
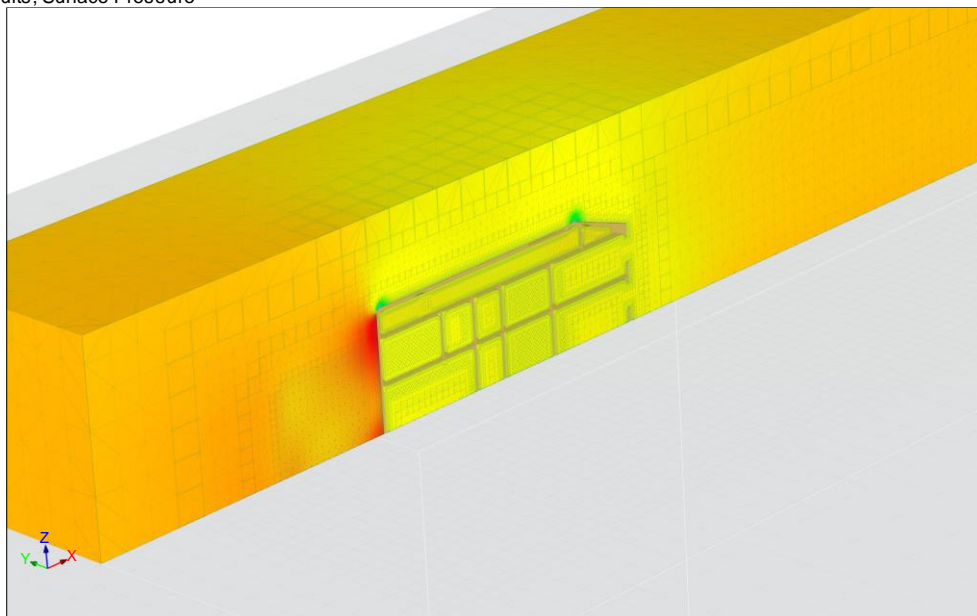
Project GORA_090
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Streamlines

Slika 3.3.6 Vjetar 90° stupnjeva

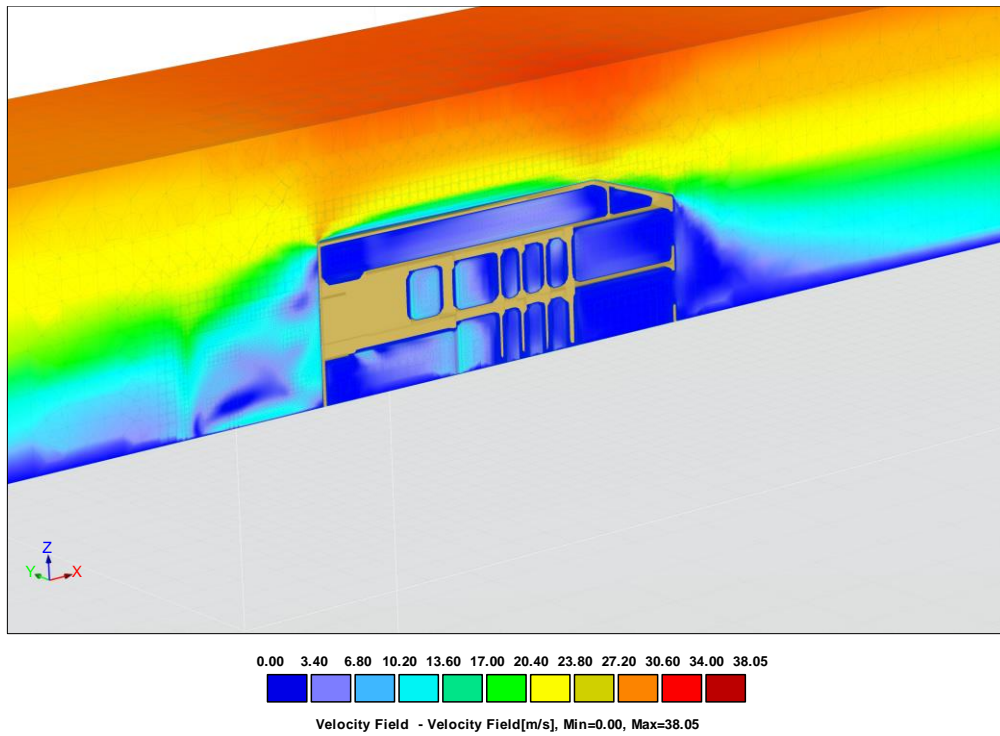
- Vjetar smjer 180 °



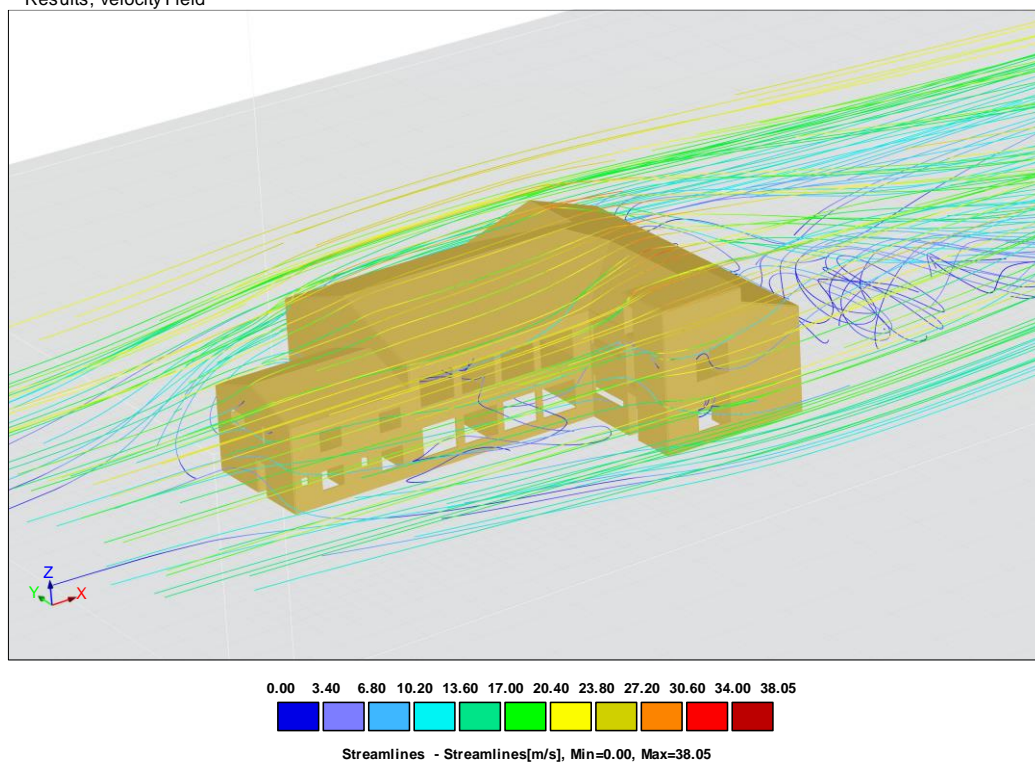
Project GORA_180
 Free Stream Velocity: 25.18 m/s
 Results, Surface Pressure



Project GORA_180
 Free Stream Velocity: 25.18 m/s
 Results, Pressure Field



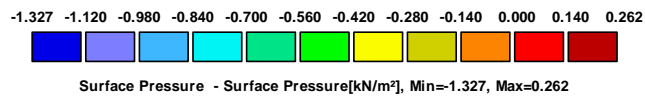
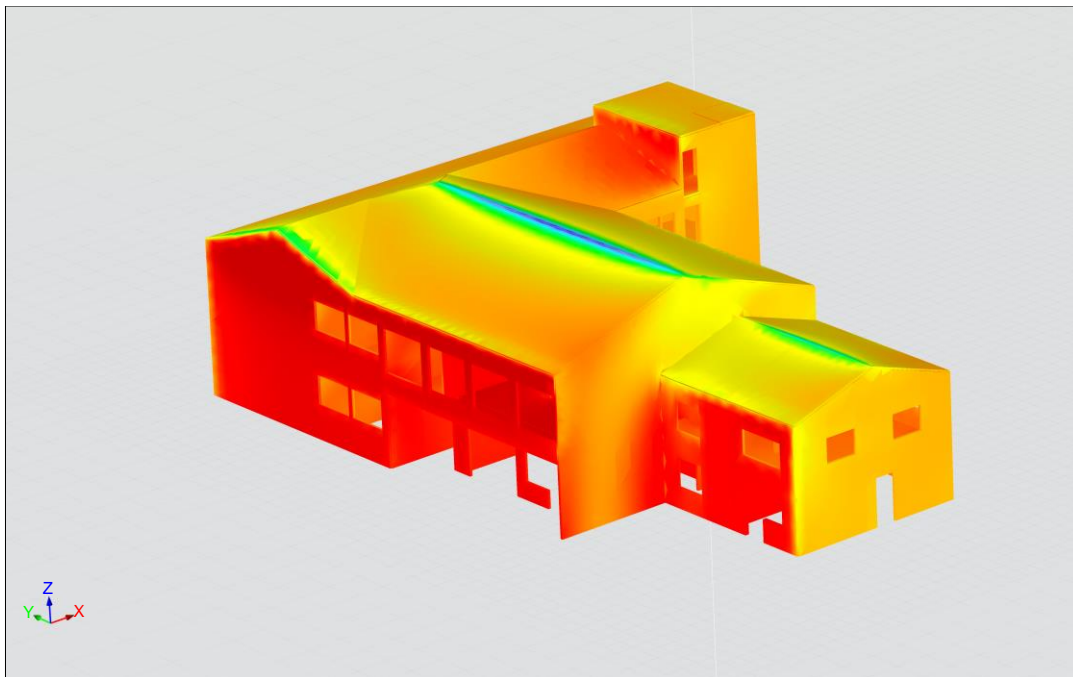
Project GORA_180
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Velocity Field



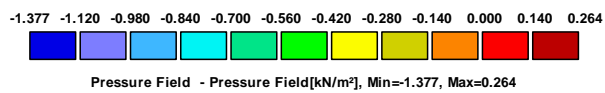
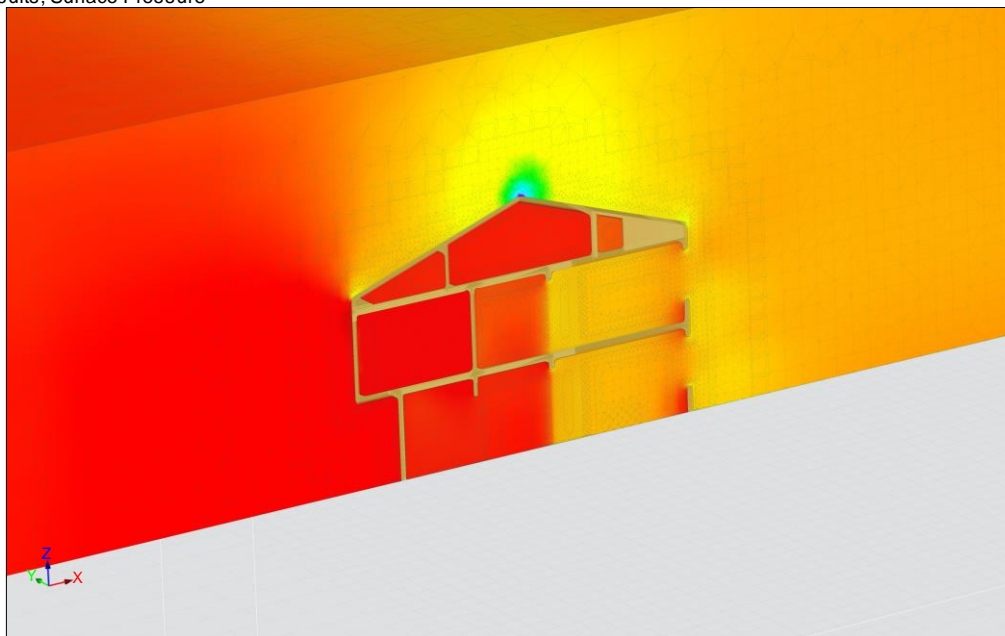
Project GORA_180
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Streamlines

Slika 3.3.7 Vjetar 180° stupnjeva

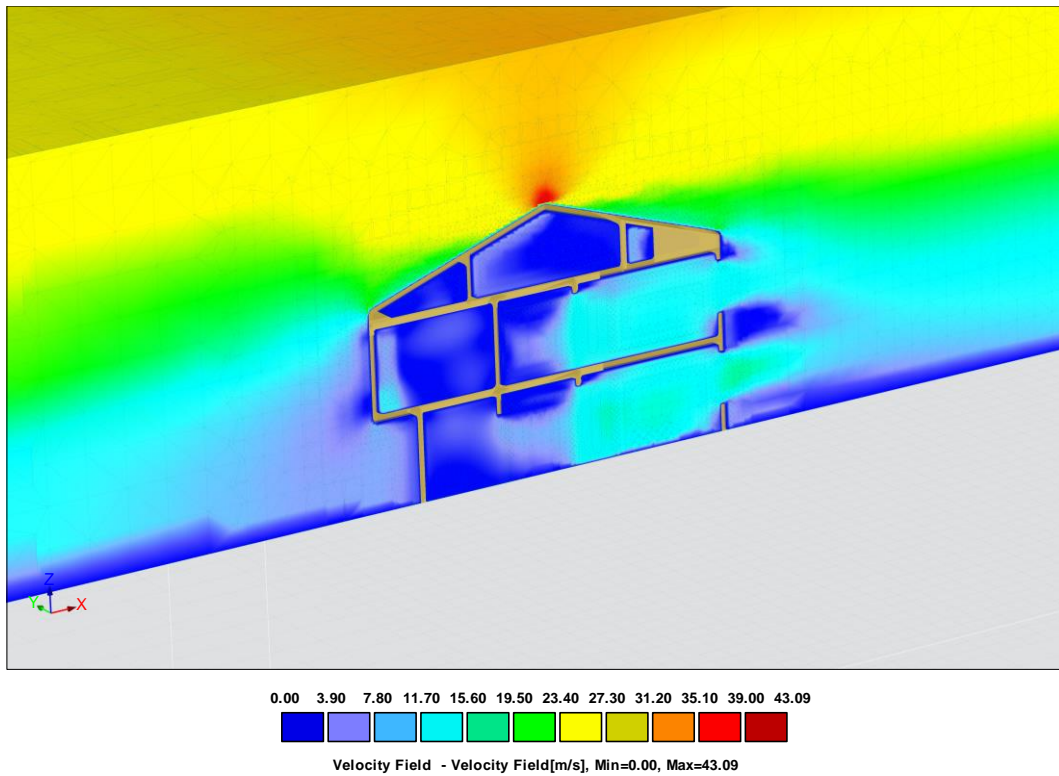
- Vjetar smjer 270 °



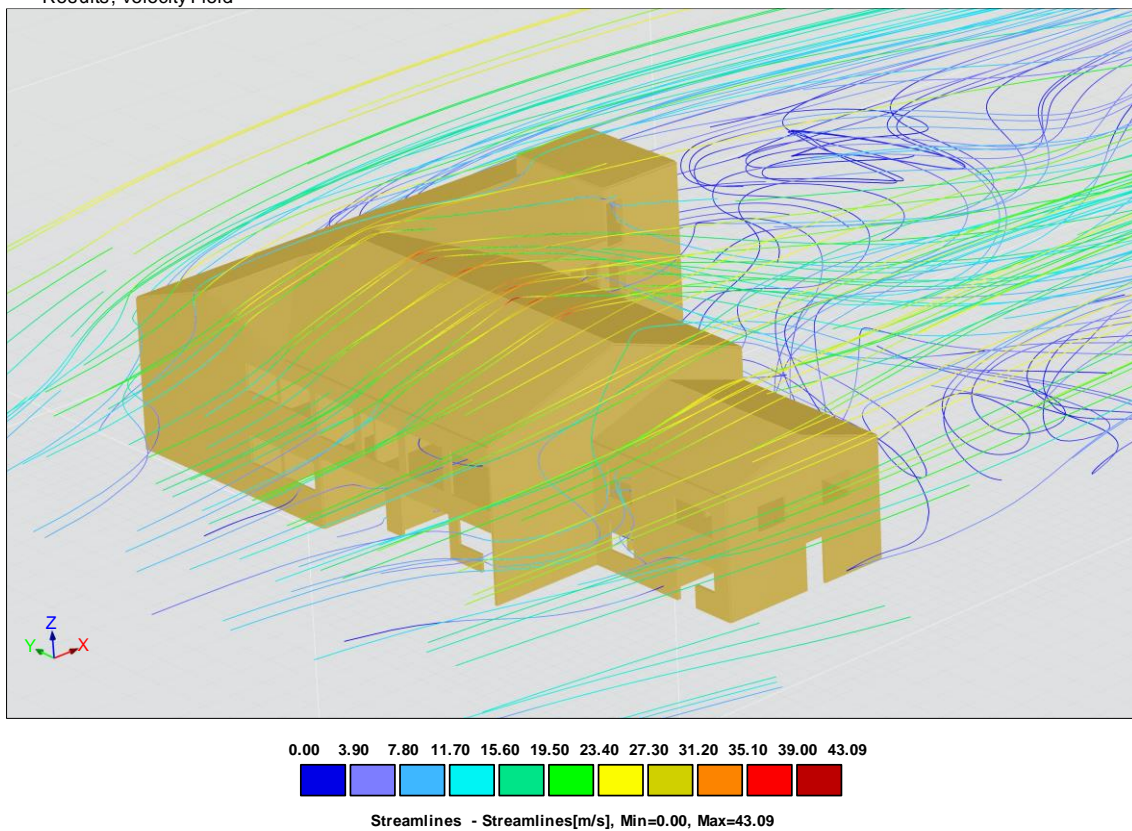
Project GORA_270
 Free Stream Velocity: 25.18 m/s
 Results, Surface Pressure



Project GORA_270
 Free Stream Velocity: 25.18 m/s
 Results, Pressure Field



Project GORA_270
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Velocity Field

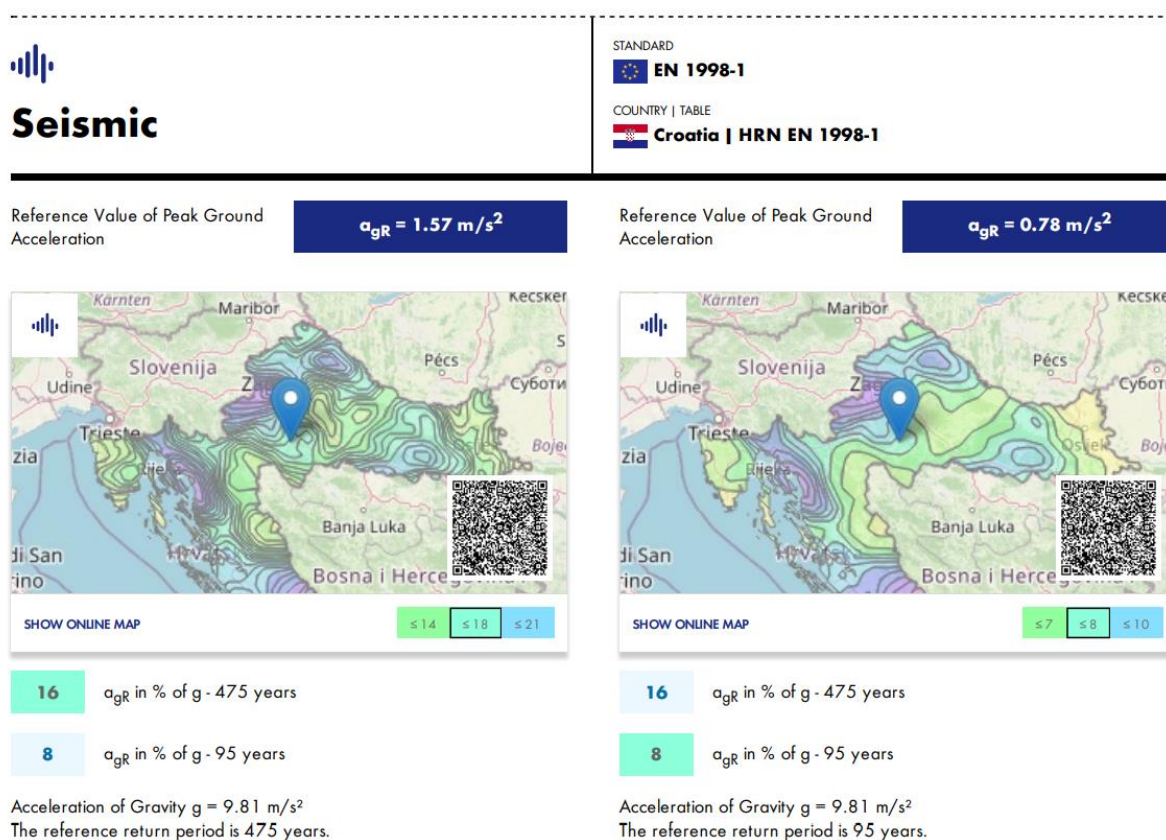


Project GORA_270
Free Stream Velocity: 25.18 m/s
Results, Streamlines

Slika 3.3.8 Vjetar 270° stupnjeva

3.3.1.5 Potres

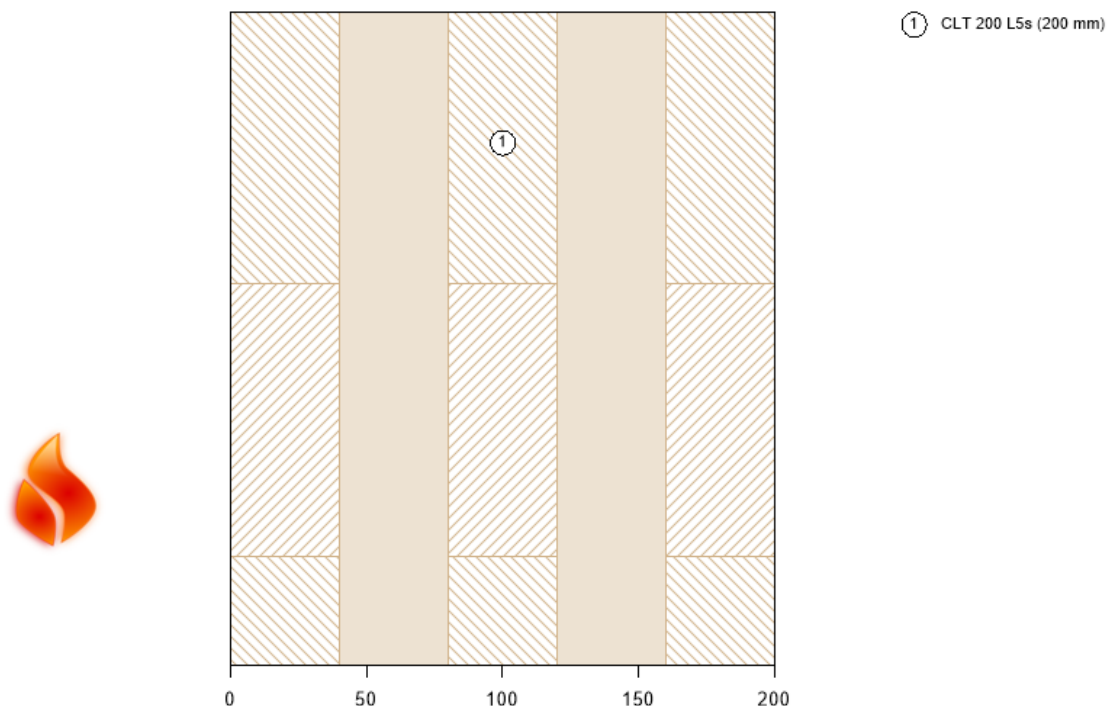
Lokacija predmetne građevine nalazi se u seizmički aktivnom području prema seizmičkoj karti za RH što rezultira karakterističnom vrijednošću ubrzanja tla $a_{g,475} = 0.157 \cdot g$ te $a_{g,95} = 0.077 \cdot g$, a predmetna građevina nalazi se na tlu sastavljenom pretežito od gustog pijeska ili krute gline s primjesama što rezultira karakteristikama tla C kategorije. Geometrijske karakteristike predmetne građevine rezultiraju vrijednostima razreda važnosti građevine III s faktorom važnosti $\gamma_I = 1.20$, koeficijentom prigušenja $c = 0.05$ te koeficijentom faktora ponašanja $q = 3.00$, koji je radi torzijsko učinka reduciran na $q' = 2.00$ (Slika 3.3.9).



Slika 3.3.9 Potresno opterećenje

3.3.1.6 Požarno opterećenje

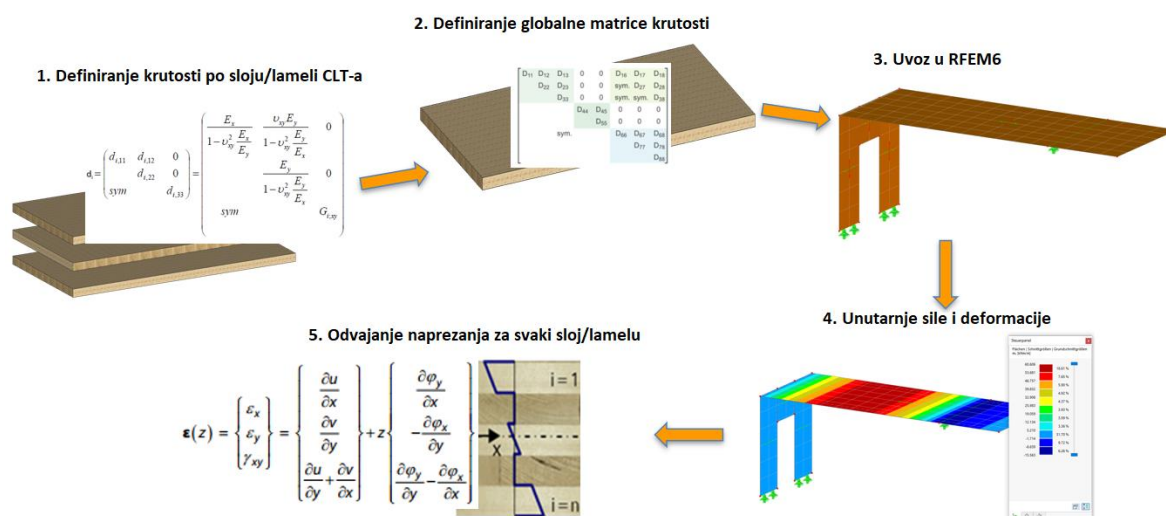
Definiranjem vremena otpornosti na požar i izloženosti požaru utvrđuje se preostali presjek na kojem se provodi dimenzioniranje prema EC5. Za slučaj zida izloženost požaru (90 minuta) definirana je s obje (bočne) strane, dok je kod ploče/stropa, samo s jedne (donje) strane. U ovom radu obrađen je samo mjerodavniji slučaj - sustav ploče (Slika 3.3.10)



Slika 3.3.10 Požarno opterećenje

3.3.2 Proces numeričke simulacije

U ovom poglavlju opisan je postupak proračuna CLT-a (Slika 3.3.11). Prvi korak je definiranje višeslojne površine i svakog pojedinog sloja (debljina i orijentacija). Nakon što su slojevi definirani, dodatak kreira se globalna matrica krutosti CLT elementa. U RFEM se zatim radi proračun unutarnjih sila i deformacija. U odgovarajućem modulu (Stress-Strain Analysis), unutarnje sile se zatim dijele na postojeće slojeve. Obično se unutarnje sile prikazuju kao tri integracijske točke po položaju.



Slika 3.3.11 Koraci prilikom numeričke simulacije i proračuna CLT-a

Modeli materijala temelje se na sljedećim uvjetima:

- Sve vrijednosti krutosti ≥ 0
- Ukupna matrica krutosti površine mora biti pozitivna

Ortotropni materijal ima posebno svojstvo da se u površini mogu definirati krutosti za svaki smjer, a lokalna orijentacija površine ili sloja u x-smjeru odgovara krutosti u x-smjeru. Da bi odredili posmičnu krutost za CLT, potrebno je rotirati orijentacije krutosti prema orijentaciji lokalne osi površine. To se mora učiniti za svaki sloj debljine tipa 'Slojevi'. U teoriji laminiranih materijala, posmična krutost slojevitog elementa izračunava se transformacijom svih komponenti savijanja i posmika u odgovarajućim smjerovima svakog sloja.

Prednost proračuna je da kada su određeni slojevi CLT-a izgorjeli, modifikacija uzeta u daljnjem proračunu ne odnosi se samo na naprezanja, nego i na krutost. Naime, krutost je reducirana za sve kombinacije opterećenja, i u skladu s tim, samo određeni slojevi CLT-a mogu preuzeti opterećenje, dok je u ostalim slojevima krutost jednaka nuli. Nadalje, određeni sloj se uzima u obzir samo ako je preostala debljina sloja nakon pougljenja veća od unaprijed definirane vrijednosti. U ovom proračunu, definirana je vrijednost od 3 mm, tj. ako pojedini sloj izgori tako da preostane 3 mm materijala, krutost toga sloja je automatski 0, i ne može preuzeti naprezanja. Ovim se postiže da su tanji preostali slojevi izostavljeni. Sve to upućuje na opasnost korištenja ljepila koje nema dobra svojstva pri požaru, naročito kod dugotrajnijeg opterećenja (90 min). U nastavku su dani rezultati za 3 osnovna slučaja:

1. Izloženi CLT sa ljepilom koje nema otpornost na visoke temperature
2. Izloženi CLT sa ljepilom koje ima otpornost na visoke temperature
3. Zaštićeni CLT sa gips vlaknastim pločama – tip F

Materijalne karakteristike prikazane su u nastavku (Tablica 3.3.1).

Tablica 3.3.1 Materijalne karakteristike CLT-a

Opis	Simbol	Vrijednost	Jedinica
Osnovne karakteristike			
Čvrstoće			
Karakteristična čvrstoća na savijanje	$f_{m,0,k}$	18,000	N/mm ²
Karakteristična čvrstoća savijanje (okomito)	$f_{m,90,k}$	18,000	N/mm ²
Karakteristična vlačna čvrstoća	$f_{t,0,k}$	10,150	N/mm ²
Karakteristična vlačna čvrstoća okomito na vlakanca	$f_{t,90,k}$	0,400	N/mm ²
Karakteristična tlačna čvrstoća	$f_{c,0,k}$	21,000	N/mm ²
Karakteristična tlačna čvrstoća okomito na vlakanca	$f_{c,90,k}$	2,500	N/mm ²
Karakteristična posmična čvrstoća	$f_{v,xz,k}$	2,500	N/mm ²

Karakteristična posmična čvrstoća (FM1)	$f_{v,xy,k}$	3,500	N/mm²
Karakteristična posmična čvrstoća (FM2)	$f_{v,net,k}$	8,000	N/mm²
Karakteristična posmična čvrstoća (FM3)	$f_{v,tor,k}$	2,500	N/mm²
Karakteristična čvrstoća – rolling shear	$f_{v,yz,k}$	1,000	N/mm²
Moduli			
Modul elastičnosti paralelno s vlakancima	$E_{0,mean}$	12000,0	N/mm²
Modul elastičnosti okomito na vlakanca	$E_{90,mean}$	0,0	N/mm²
Modul posmika	$G_{yz,mean}$	50,0	N/mm²
Modul posmika	$G_{xz,mean}$	690,0	N/mm²
Modul posmika	$G_{xy,mean}$	690,0	N/mm²
5-percentna vrijednosti modula elastičnosti paralelno s vlakancima	$E_{0,05}$	10000,0	N/mm²
5-percentna vrijednosti modula elastičnosti okomito na vlakanca	$E_{90,05}$	0,0	N/mm²
5-percentna vrijednosti modula posmika	$G_{yz,05}$	41,7	N/mm²
5-percentna vrijednosti modula posmika	$G_{xz,05}$	575,0	N/mm²
5-percentna vrijednosti modula posmika	$G_{xy,05}$	575,0	N/mm²
Gustoća			
Karakteristična gustoća	ρ_k	350,00	kg/m³
Srednja gustoća	ρ_m	420,00	kg/m³

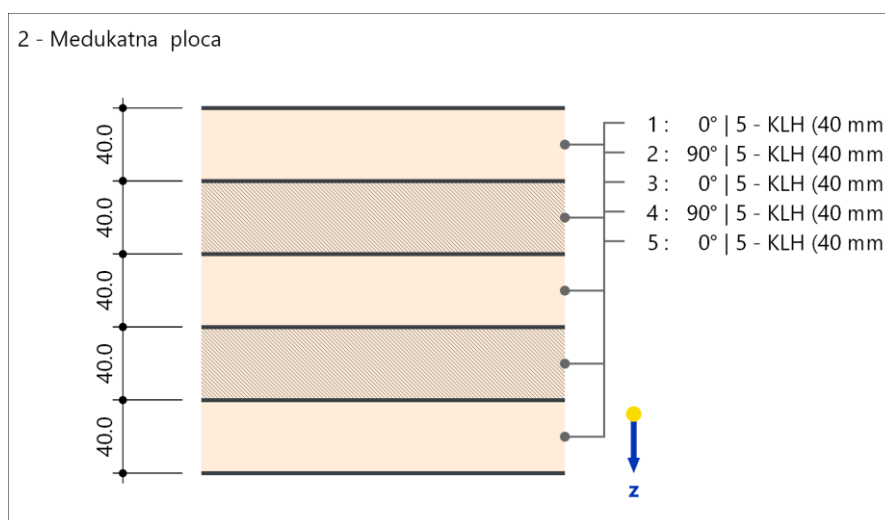
3.3.3 Rezultati (požarna otpornost)

U nastavku su analizirani rezultati MKE prema EN1995-1-2, uzimajući u obzir preporuke iz prEN1995-1-2:2025. Analizirana su 3 slučaja; izloženi CLT (površina ljepila nije cjelovita tijekom izloženosti požaru), izloženi CLT (površina ljepila je cjelovita tijekom izloženosti požaru), te zaštićeni CLT (ploče tipa F).

3.3.3.1 Izloženi CLT, 5 slojeva (200 mm) i ljepilo koje nema otpornost na visoke temperature

Ovaj slučaj karakterizira povećanje jednodimenzionalne stope pougljenja koja se koristi za proračun prvih 25 mm dubine pougljenja svakog unutarnjeg sloja.

U nastavku su prikazani dijagrami raspodjele naprezanja (i krutosti), te karakteristike pougljenja u slučaju izloženog CLT-a (Slika 3.3.12), sa ljepilom koje nije otporno za visoke temperature.

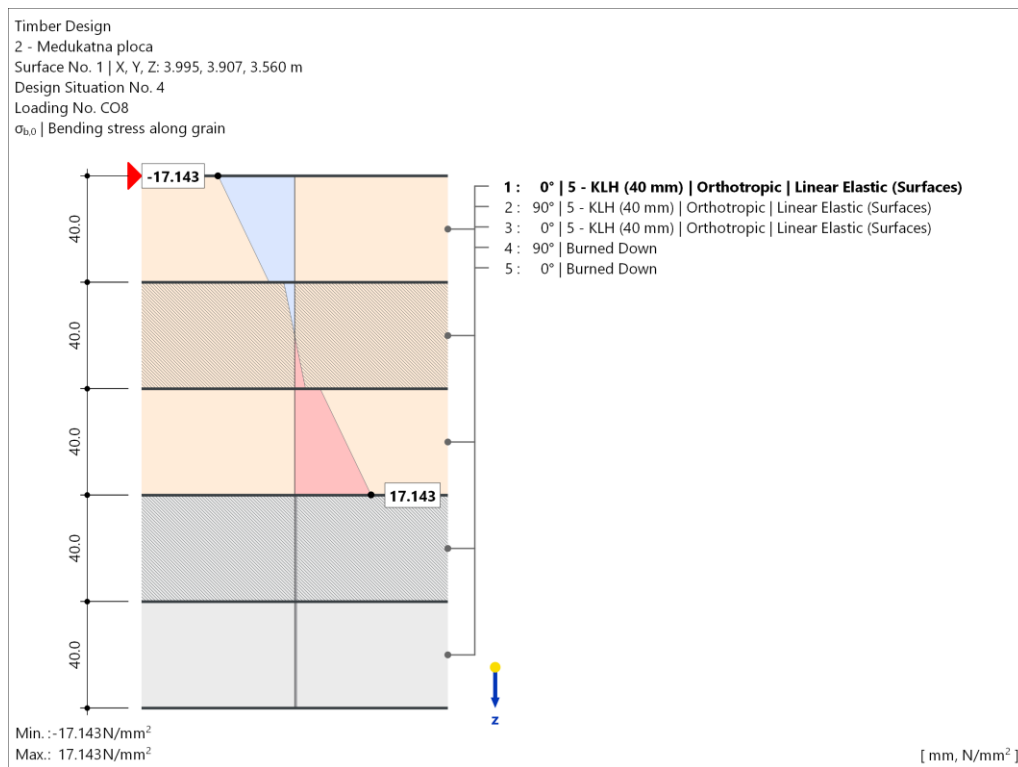


Slika 3.3.12 CLT međukatna ploča

Peti sloj (prvi izloženi sloj), potpuno je izgorio nakon 90 min, dok je četvrti sloj, nakon 90 min izloženosti, većim dijelom izgorio, tj. preostalo je 2 mm drva, a prema EC5, lamela u kojoj je preostalo manje od 3 mm drva, ne sudjeluje u prijenosu opterećenja. Ostali slojevi su potpuno očuvani. Ukupna preostala debljina CLT-a je 120 mm (Slika 3.3.13). Iskoristivost je 0.621 (Slika 3.3.15).

Material Properties KLH (40 mm) KLH				
Layer Properties KLH 5s 200 DL				
Thickness of layer	d	40.0	mm	
Angle between surface x-axis and direction of grain	β	0.00	deg	
Load Duration and Service Class				
Load duration class	LDC	Medium-term		Tab. 2.1
Service class	SC	1		2.3.1.3
Parameters for Fire Design				
Time of fire exposure	t	90	min	
Coefficient	k _{fi}	1.15	--	EN 1995-1-2, 2.3(3), Tab. 2.1
Partial factor for timber in fire	$\gamma_{M,fi}$	1.00	--	EN 1995-1-2, 2.3(1)
Sides exposed to fire		+z		
Charring Depth				
Thickness of surface	h	200.0	mm	
Layer No. 1				
Layer No. 2				
Layer No. 3				
Layer No. 4 Fully charred				
Thickness of layer	d	40.0	mm	
Charring from bottom side				
Start time of layer charring	t _{start}	62	min	
Design charring rate for one-dimensional charring unde β_0		0.65	mm/min	
Increased charring rate for non-heat-proof adhesive of layers				
Coefficient increasing charring rate of inner layers	k β	2.00	--	
Increased charring rate	k $\beta \cdot \beta_0$	1.30	mm/min	
Limit time of increased charring rate	t _{a,β}	19	min	
Time period of charring with increased charring rate	t β	19	min	
Charring depth for increased charring	d _{char,β}	25.0	mm	
Time period of charring with design charring rate	t β_0	9	min	
Charring depth for charring with design charring rate	d _{char,β_0}	6.0	mm	
Charring depth for one-dimensional charring	d _{char,0}	31.0	mm	
Coefficient	k ₀	1.00	--	EN 1995-1-2, 4.2.2
Increased charring	d ₀	7.0	mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
Thickness with zero strength	k ₀ · d ₀	7.0	mm	
Effective charring depth	d _{ef}	38.0	mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
End time of layer charring	t _{end}	90	min	
Thickness to omit fire reduced layer	d _m	3.0	mm	
Remaining thickness of layer	d _{fi}	2.0	mm	≤ d _m
Layer No. 5 Fully charred				
Thickness of layer	d	40.0	mm	
Charring from bottom side				
Start time of layer charring	t _{start}	0	min	
Design charring rate for one-dimensional charring unde β_0		0.65	mm/min	
Charring depth for one-dimensional charring	d _{char,0}	40.0	mm	
Effective charring depth	d _{ef}	40.0	mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
End time of layer charring	t _{end}	62	min	
Thickness to omit fire reduced layer	d _m	3.0	mm	
Remaining thickness of layer	d _{fi}	0.0	mm	≤ d _m
Remaining thickness of surface	h _{fi}	120.0	mm	

Slika 3.3.13 Podaci o pougljenju pojedinih slojeva CLT-a



(a) savijanje

Slika 3.3.14 Naprezanje u CLT-u - 1. slučaj

Design Check FD4100 | EN 1995 | HRN | 2015-03

Fire Design

Bending along grain

$$\begin{aligned} f_{m,0,20} &= k_{fi} \cdot f_{m,0,k} \\ &= 1.15 \cdot 24.000 \text{ N/mm}^2 \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{m,0,d,fi} &= k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{m,0,20}}{\gamma_{M,fi}} \\ &= 1.00 \cdot \frac{27.600 \text{ N/mm}^2}{1.00} \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{|\sigma_{b,0,d}|}{f_{m,0,d,fi}} \\ &= \frac{|-17.143 \text{ N/mm}^2|}{27.600 \text{ N/mm}^2} \\ &= 0.621 \end{aligned}$$

$$\eta = 0.621 \leq 1 \quad \checkmark$$

$f_{m,0,20}$ 20% fractile of bending strength along grain at normal temperature

k_{fi} Coefficient

$f_{m,0,k}$ Characteristic bending strength along grain

$f_{m,0,d,fi}$ Design bending strength along grain for fire

$k_{mod,fi}$ Modification factor for fire

$\gamma_{M,fi}$ Partial factor for timber in fire

$\sigma_{b,0,d}$ Design bending stress along grain

Slika 3.3.15 Iskoristivost CLT ploče

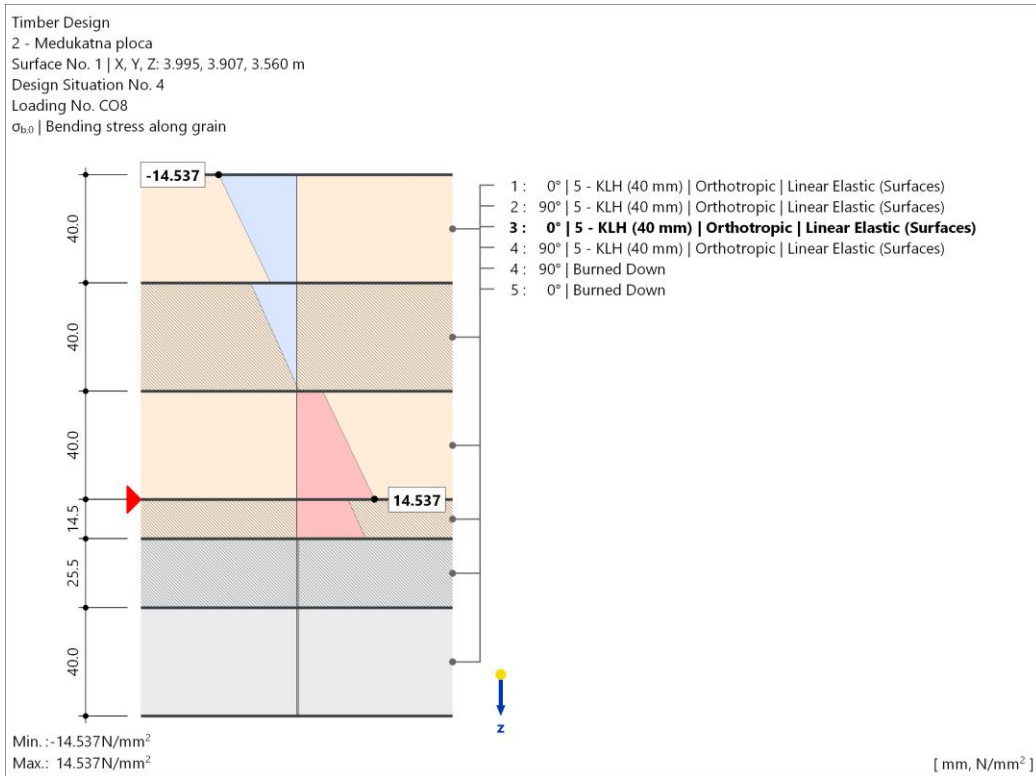
3.3.3.2 Izloženi CLT, 5 slojeva (200mm) i ljepilo koje ima otpornost na visoke temperature

Ovaj slučaj karakterizira konstantna jednodimenzionalna stopa pougljenja - ne povećava se nakon doseganja unutarnjeg sloja.

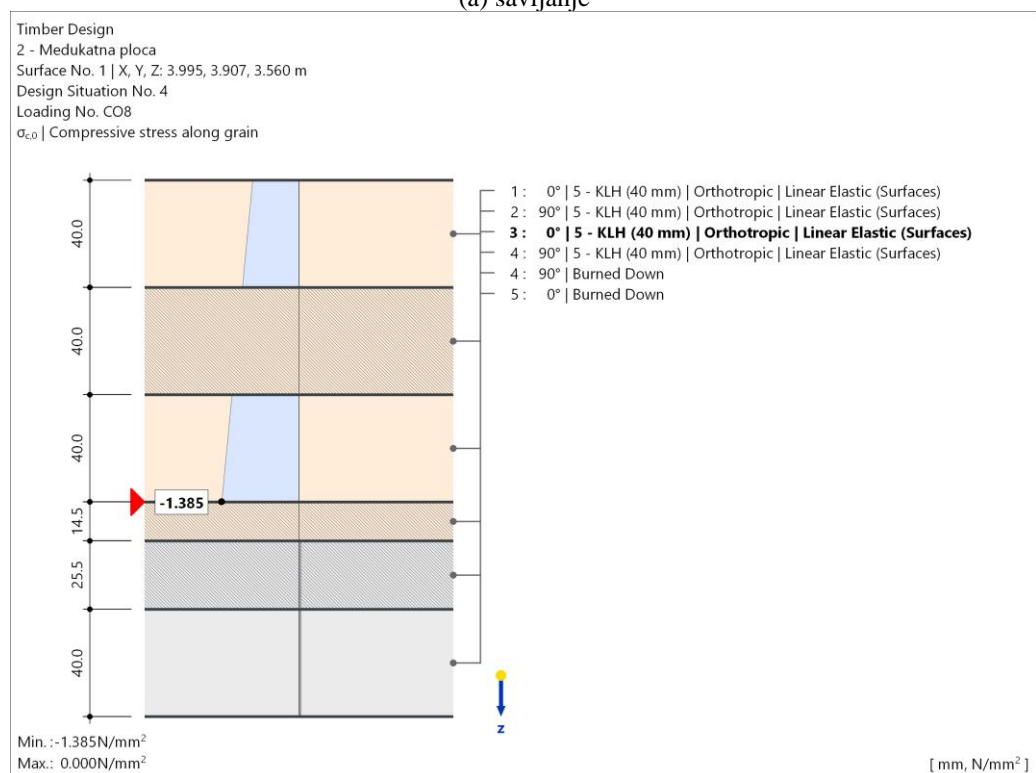
U nastavku su prikazani dijagrami raspodjele naprezanja (i krutosti), te karakteristike pougljenja u slučaju izloženog CLT-a, ali s ljepilom koje je otporno za visoke temperature. Peti sloj (prvi izloženi sloj), potpuno je izgorio, dok je četvrti sloj (drugi izloženi sloj), djelomično izgorio, tj. preostalo je 14.5 mm. Ostali slojevi su u potpunosti očuvani. Ukupna preostala debljina CLT-a je 134.5 mm (Slika 3.3.16). Iskoristivost CLT ploče je 0.577 (Slika 3.3.18)

Material Properties KLH (40 mm) KLH				
Layer Properties KLH 5s 200 DL				
Thickness of layer	d		40.0 mm	
Angle between surface x-axis and direction of grain	β		0.00 deg	
Load Duration and Service Class				
Load duration class	LDC		Medium-term	Tab. 2.1
Service class	SC		1	2.3.1.3
Parameters for Fire Design				
Time of fire exposure	t		90 min	
Coefficient	k _{fi}		1.15 --	EN 1995-1-2, 2.3(3), T _a
Partial factor for timber in fire	$\gamma_{M,fi}$		1.00 --	EN 1995-1-2, 2.3(1)
Sides exposed to fire			+z	
Charring Depth				
Thickness of surface	h		200.0 mm	
Layer No. 1				
Layer No. 2				
Layer No. 3				
Layer No. 4 Partially charred				
Thickness of layer	d		40.0 mm	
Charring from bottom side				
Start time of layer charring	t _{start}		62 min	
Design charring rate for one-dimensional charring under	β_0		0.65 mm/min	
Charring depth for one-dimensional charring	d _{char,0}		18.5 mm	
Coefficient	k ₀		1.00 --	EN 1995-1-2, 4.2.2
Increased charring	d ₀		7.0 mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
Thickness with zero strength	k ₀ · d ₀		7.0 mm	
Effective charring depth	d _{ef}		25.5 mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
End time of layer charring	t _{end}		90 min	
Remaining thickness of layer				
dfi			14.5 mm	
Layer No. 5 Fully charred				
Thickness of layer	d		40.0 mm	
Charring from bottom side				
Start time of layer charring	t _{start}		0 min	
Design charring rate for one-dimensional charring under	β_0		0.65 mm/min	
Charring depth for one-dimensional charring	d _{char,0}		40.0 mm	
Effective charring depth	d _{ef}		40.0 mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
End time of layer charring	t _{end}		62 min	
Thickness to omit fire reduced layer				
dm			3.0 mm	
Remaining thickness of layer	dfi		0.0 mm	≤ dm
Remaining thickness of surface				
hfi			134.5 mm	

Slika 3.3.16 Podaci o pougljenju pojedinih slojeva CLT-a – ljepilo otporno na visoke temperature



(a) savijanje



(b) tlak paralelno s vlakancima

Slika 3.3.17 Naprezanje u CLT-u – 2. slučaj

Design Check FD6100 | EN 1995 | HRN | 2015-03

Fire Design

Bending and compression along grain

$$\begin{aligned} f_{c,0,20} &= k_{fi} \cdot f_{c,0,k} \\ &= 1.15 \cdot 24.000 \text{ N/mm}^2 \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{c,0,d,fi} &= k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{c,0,20}}{\gamma_{M,fi}} \\ &= 1.00 \cdot \frac{27.600 \text{ N/mm}^2}{1.00} \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{m,0,20} &= k_{fi} \cdot f_{m,0,k} \\ &= 1.15 \cdot 24.000 \text{ N/mm}^2 \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{m,0,d,fi} &= k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{m,0,20}}{\gamma_{M,fi}} \\ &= 1.00 \cdot \frac{27.600 \text{ N/mm}^2}{1.00} \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{|\sigma_{c,0,d}|}{f_{c,0,d,fi}} + \frac{|\sigma_{b,0,d}|}{f_{m,0,d,fi}} \\ &= \frac{|-1.385 \text{ N/mm}^2|}{27.600 \text{ N/mm}^2} + \frac{|14.537 \text{ N/mm}^2|}{27.600 \text{ N/mm}^2} \\ &= 0.577 \end{aligned}$$

$$\eta = 0.577 \leq 1 \quad \checkmark$$

$f_{c,0,20}$ 20% fractile of compressive strength along grain at normal temperature

k_{fi} Coefficient

$f_{c,0,k}$ Characteristic compressive strength along grain

$f_{c,0,d,fi}$ Design compressive strength along grain for fire

$k_{mod,fi}$ Modification factor for fire

$\gamma_{M,fi}$ Partial factor for timber in fire

$f_{m,0,20}$ 20% fractile of bending strength along grain at normal temperature

$f_{m,0,k}$ Characteristic bending strength along grain

$f_{m,0,d,fi}$ Design bending strength along grain for fire

$\sigma_{c,0,d}$ Design compressive stress along grain

$\sigma_{b,0,d}$ Design bending stress along grain

Slika 3.3.18 Iskoristivost CLT ploče – ljepilo otporno na visoke temperature

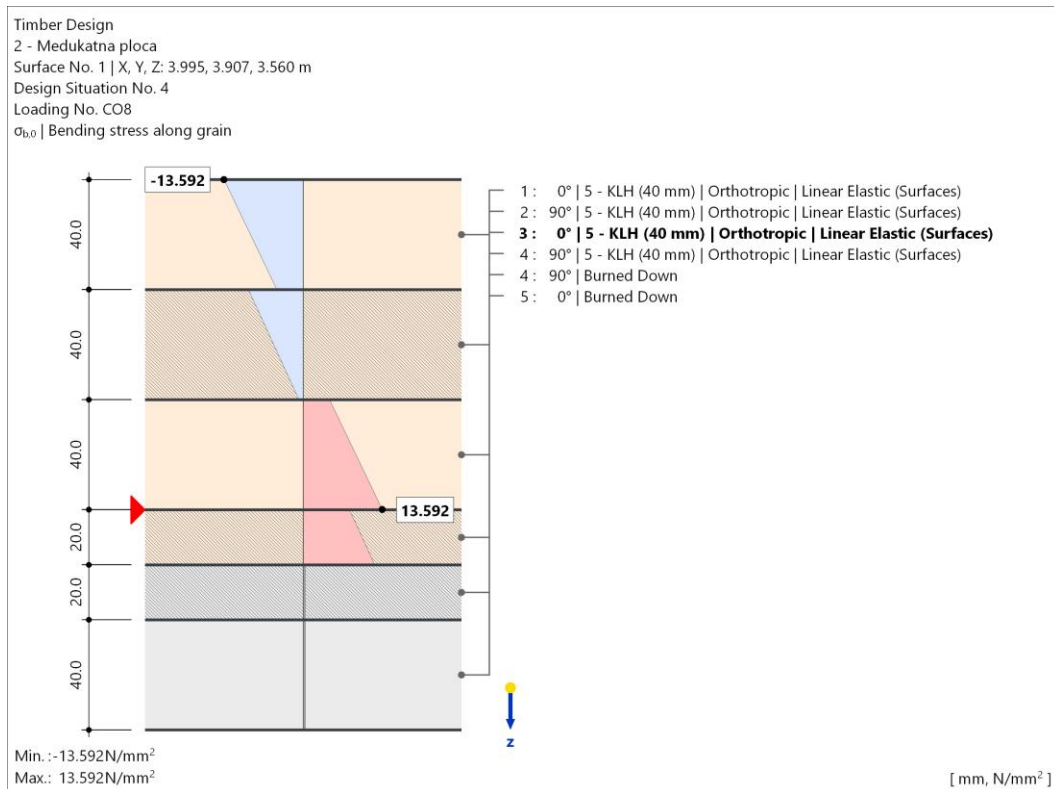
3.3.3.3 Zaštićeni CLT, 5 slojeva (200mm) – gips vlaknasta ploče – tip F

Ovaj slučaj karakterizira definiranje početka pougljenja (21 min), od početka požara, izolacijskog koeficijenta (0.78), vremena do propadanja zaštitnih ploča (32 min), te post-proteksijskog koeficijenta (2.00).

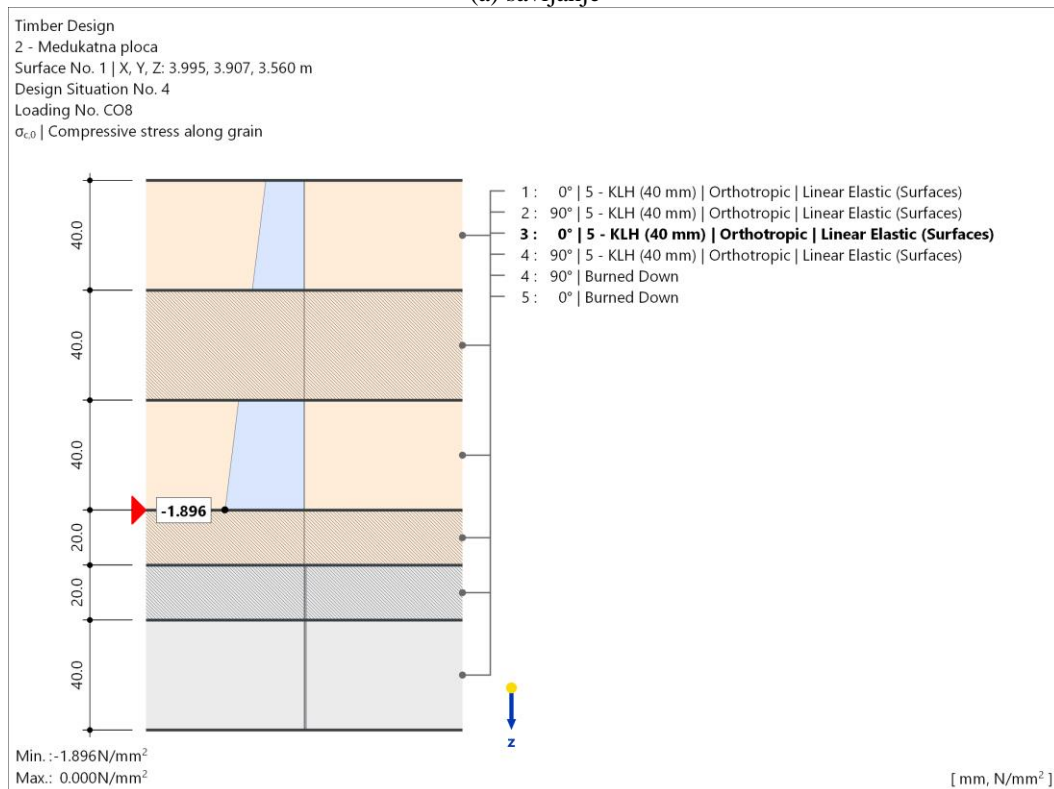
U nastavku su prikazani dijagrami raspodjele naprezanja (i krutosti), te karakteristike pougljenja u slučaju zaštićenog CLT-a gips vlaknastim pločama tipa F. Peti sloj (prvi izloženi sloj), potpuno je izgorio, dok je četvrti sloj (drugi izloženi sloj) djelomično izgorio, tj. preostalo je 20 mm drva. Svi ostali slojevi u potpunosti su očuvani. Ukupna preostala debljina CLT-a je 140 mm (Slika 3.3.19). Iskoristivost CLT ploče je 0.561 (Slika 3.3.21).

Material Properties KLH (40 mm) KLH				
Layer Properties KLH 5s 200 DL				
Thickness of layer	d		40.0 mm	
Angle between surface x-axis and direction of grain	β		0.00 deg	
Load Duration and Service Class				
Load duration class	LDC		Medium-term	Tab. 2.1
Service class	SC		1	2.3.1.3
Parameters for Fire Design				
Time of fire exposure	t		90 min	
Coefficient	k _{fi}		1.15 --	EN 1995-1-2, 2.3(3), Tab. 2.1
Partial factor for timber in fire	$\gamma_{M,fi}$		1.00 --	EN 1995-1-2, 2.3(1)
Sides exposed to fire			+z	
Sides with initial fire protection			+z	
Charring Depth				
Thickness of surface	h		200.0 mm	
Layer No. 1				
Layer No. 2				
Layer No. 3				
Layer No. 4 Partially charred				
Thickness of layer	d		40.0 mm	
Charring from bottom side				
Start time of layer charring	t _{start}		70 min	
Design charring rate for one-dimensional charring under	β_0		0.65 mm/min	
Design charring rate				
Time period of charring with design charring rate	t β_0		20 min	
Charring depth for charring with design charring rate	d _{char,β_0}		13.0 mm	
Charring depth for one-dimensional charring	d _{char,0}		13.0 mm	
Coefficient	k ₀		1.00 --	EN 1995-1-2, 4.2.2
Increased charring	d ₀		7.0 mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
Thickness with zero strength	k ₀ · d ₀		7.0 mm	
Effective charring depth	d _{ef}		20.0 mm	EN 1995-1-2, 4.2.2
End time of layer charring	t _{end}		90 min	
Remaining thickness of layer	d _{fi}		20.0 mm	
Layer No. 5 Fully charred				
Remaining thickness of surface	h _{fi}		140.0 mm	

Slika 3.3.19 Podaci o pougljenju pojedinih slojeva CLT-a zaštićenog gips vlaknastim pločama tipa F



(a) savijanje



(b) tlak paralelno s vlakancima

Slika 3.3.20 Naprezanje u CLT-u – 3. slučaj

Design Check FD6100 | EN 1995 | HRN | 2015-03

Fire Design

Bending and compression along grain

$$\begin{aligned} f_{c,0,20} &= k_{fi} \cdot f_{c,0,k} \\ &= 1.15 \cdot 24.000 \text{ N/mm}^2 \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{c,0,d,fi} &= k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{c,0,20}}{\gamma_{M,fi}} \\ &= 1.00 \cdot \frac{27.600 \text{ N/mm}^2}{1.00} \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{m,0,20} &= k_{fi} \cdot f_{m,0,k} \\ &= 1.15 \cdot 24.000 \text{ N/mm}^2 \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{m,0,d,fi} &= k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{m,0,20}}{\gamma_{M,fi}} \\ &= 1.00 \cdot \frac{27.600 \text{ N/mm}^2}{1.00} \\ &= 27.600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{|\sigma_{c,0,d}|}{f_{c,0,d,fi}} + \frac{|\sigma_{b,0,d}|}{f_{m,0,d,fi}} \\ &= \frac{|-1.896 \text{ N/mm}^2|}{27.600 \text{ N/mm}^2} + \frac{|13.592 \text{ N/mm}^2|}{27.600 \text{ N/mm}^2} \\ &= 0.561 \end{aligned}$$

$$\eta = 0.561 \leq 1 \quad \checkmark$$

$f_{c,0,20}$ 20% fractile of compressive strength along grain at normal temperature

k_{fi} Coefficient

$f_{c,0,k}$ Characteristic compressive strength along grain

$f_{c,0,d,fi}$ Design compressive strength along grain for fire

$k_{mod,fi}$ Modification factor for fire

$\gamma_{M,fi}$ Partial factor for timber in fire

$f_{m,0,20}$ 20% fractile of bending strength along grain at normal temperature

$f_{m,0,k}$ Characteristic bending strength along grain

$f_{m,0,d,fi}$ Design bending strength along grain for fire

$\sigma_{c,0,d}$ Design compressive stress along grain

$\sigma_{b,0,d}$ Design bending stress along grain

Slika 3.3.21 Iskoristivost CLT ploče – zaštićene gips vlaknastom pločom tipa F

Poglavlje 4.**DISKUSIJA**

Postoji zastarjela pretpostavka da zato što drvo gori, drvene zgrade su u većoj opasnosti od požara. Drvene konstrukcije ne predstavljaju ništa više rizika od bilo kojeg drugog oblika konstrukcija kada je ispravno projektirana i izgrađena i može zadovoljiti sve relevantne propise. U CLT zgradama, gdje može postojati veliki broj izloženih drvenih površina, potrebno je uzeti u obzir učinak povećanog požarnog opterećenja, ali i karakteristike pougljenja CLT-a. Za visoke zgrade također treba spriječiti da većina CLT-a zahvati vatru, kako bi se spriječio rizik od dugotrajnog požara koji je teško ugasiti. Kad je riječ o požarima u odjeljcima s izloženim površinama drva, dinamika požara značajno se razlikuje od onih s nezapaljivim oblogama. Najznačajnije razlike su:

- veće stope oslobađanja topline
- kraće vrijeme do flashover-a
- povećane temperature plina (a onda i krutih tijela)
- povećanu količinu dima
- produženu fazu hlađenja s višim temperaturama

Za razliku od požara u odjeljcima s nezapaljivim oblogama, požari u odjeljcima s izloženim drvenim površinama mogu nastaviti sagorijevati čak i nakon što su sva zapaljiva sredstva iz unutrašnjosti potrošena. Izložene drvene površine sudjelovat će u požaru i nastaviti gorjeti ako postoji dovoljan prijenos topline u područje pirolize unutar CLT elemenata. Toplina prenesena u elemente tijekom faze hlađenja obično je posljedica konveksijske topline sa same goruće površine i radijacijske topline sa susjednih izloženih drvenih površina stropova i zidova. Adekvatna izmjena topline između izloženih površina može produžiti fazu potpuno razvijenog požara.

Ipak, CLT ploče imaju svojstvenu otpornost na požar i mogu pridonijeti strategiji zaštite od požara unutar zgrada. Potreba za dodatnom zaštitom u obliku obloge od gipsane ploče ovisi o debljini ploče i potrebnim mjerama zaštite od požara. Bitno je da regulativa prepozna i napravi razliku CLT-a, te konstrukcija laganih drvenih okvira kod kojih je vatrootpornim oblogama osigurana zaštita od požara. U ovom slučaju to je neophodno jer drveni elementi, kao što su okviri, grede ili rogovi, obično su manjih poprečnih presjeka, koji, kada su izloženi vatri, zapalit će se i gorjeti relativno brzo ako se ne zaštiti. Razlog tomu je omjer površine prema volumenu. Međutim, CLT elementi predstavljaju robusnije elemente, kod kojih, kada se stvori pougljeni sloj, nosivost preostalog drva procjenjuje se proračunom za zahtijevanu požarnu otpornost.

CLT može biti dimenzioniran tako da pruži dovoljnu požarnu otpornost, i za mnoge manje jednokatne ili dvokatne objekte moguće je koristiti CLT ploče bez protupožarne zaštite. Međutim, u višekatnim objektima, CLT-a je uglavnom zaštićen.

Nadalje, fizički utemeljeni požari su općenitije prirode od standardizirane požarne krivulje vrijeme-temperatura, koja je razvijena kao usporedna mjera, koja se obično koristi za ispitivanje požarne otpornosti i klasifikacije komponenti. Kada su (konstruktivne) drvene površine izložene požaru u požarnom odjeljku, one doprinose dinamici požara. Posljedično, konstrukcijski drveni elementi mogu utjecati na rast, trajanje, maksimalnu temperaturu i fazu hlađenja, uključujući vjerojatnost izgaranja (samogašenje). Stoga, ovisno o količini izloženih konstruktivnih elemenata, treba uzeti u obzir dodatno otpuštanje topline. Za dimenzioniranje drvenih konstrukcija koje su izložene fizički utemeljenim požarima predložene su metode analiziranja. Prema smjernicama prEN 1995-1-2, koje su potvrđene u ovom radu, izgaranje drvenih konstrukcija može se analizirati uzimajući u obzir doprinos požarnog opterećenja konstrukcije ukupnom požarnom opterećenju. Ovo stvara nove mogućnosti za projektiranje požarne otpornosti velikih i visokih drvenih zgrada, za širok raspon projektiranih scenarija požara.

4.1 CFD analiza

Svrha ovog poglavlja je raspraviti o rezultatima predstavljenim u poglavlju 3.2.7 proizašlih iz FDS simulacija požara, u odjeljku s (ne)izloženim CLT površinama. Rezultati se uspoređuju kako bi se procijenila potrebna razina zaštite od požara i donijele mjere zaštite od požara. Osim toga, poglavlje uključuje raspravu o mogućim ograničenjima unutar modela i prijedloge za poboljšanja. Glavna pitanja vezana za CFD analizu su sljedeća:

1. Koja je razina točnosti modela?
2. Koja su ograničenja modela?
3. Kako se budući modeli mogu poboljšati u cilju dobivanja točnijih rezultata?
4. Da li su primjenjivi u praksi i realnom sektoru?

Prilikom ocjenjivanja simulacije u usporedbi s postojećim istraživanjima, uočeno je nekoliko čimbenika koji bi mogli uzrokovati odstupanja u rezultatima. Na preuranjeno predviđanje trenutka zapaljenja CLT-a modela može utjecati više čimbenika. Ulazni parametri modela koji su predloženi, mogu biti previše reaktivni u početnim uvjetima, što dovodi do ubrzane reakcije modela na unos topline. Sadržaj vlage, koji nije korišten u simulaciji bi također mogao pridonijeti ovoj pojavi. Nadalje, uočeno je manje odstupanje u HRR krivulji nakon dostizanja vršne vrijednosti, čemu uzrok može biti kompleksna dinamika požara, te ograničenja

simulacijskog modela vezano za prikaz požara unutar domene na fasadnom dijelu. Ovo sugerira da bi širenje domene moglo omogućiti dodatno izgaranje.

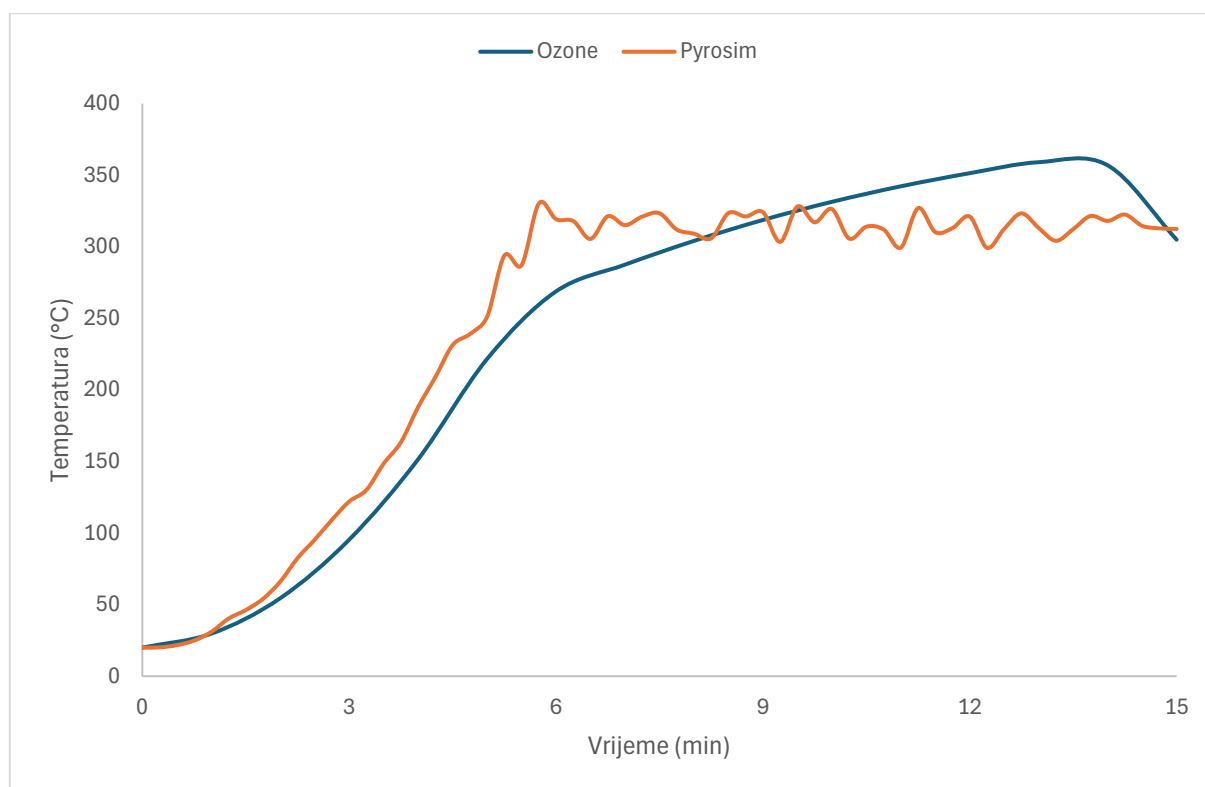
Nadalje, analiza osjetljivosti mreže bi uvelike pomogla identificiranju određenih problema. Posljedično, ako simulacija ne uspije točno prikazati količinu proizvedenih plinova pirolize, to utječe na HRR. Nažalost, takva analiza osjetljivosti iziskivala bi velike vremenske i računalne napore, zbog čega nije obrađena u sklopu ovog rada.

Nadalje, predviđanje temperature plinova izravno utječe na prijenos topline u CLT elemente, a time i na temperature unutar svih slojeva CLT-a koji nisu direktno izloženi požaru. Temperatura upravlja procesima pirolize, koji određuju protok mase pirolizata s CLT površina. Pretpostavlja se da ispravno definiranje uvjeta ventilacije uvelike utječe na razvijene temperature, stoga je potrebno opsežnije istraživanje vezano za različite uvjete ventilacije. Ukoliko se radi scenariju u požarnom odjeljku gdje je dostupna veća količina goriva (CLT-a), a dotok kisika je ograničen, javlja se razlike u procjeni dubine pougljenja (precijenjeno), u odnosu na eksperimentalna istraživanja, što u konačnici utječe na predviđenu požarnu otpornost CLT-a.

Međutim, važno je napomenuti da unatoč određenim nesigurnostima, model pokazuje obećavajuće rezultate u smislu razvijene toplinske snage i modela izgaranja CLT-a, što je bitna tema za sljedeću generaciju EN 1995-1-2. Ovo zapažanje je ohrabrujuće, sugerirajući da FDS ima potencijal u preciznom repliciranju požarnih situacija, pod uvjetom da su ulazni parametri pažljivo razmotreni i kalibrirani. U konačnici, cilj je da modeli budu prihvatljivi za praktičnu primjenu prilikom projektiranja mjera zaštite od požara.

4.2 Primjena za praktičnijih (jednostavnijih) programskih paketa – OZone

Slika 4.2.1 prikazuje usporedbu rezultata razvijenih temperatura dobivenih kompleksnijim (Pyrosim [8]) i jednostavnijim (Ozone [106]) simulacijama. Pri tome se prvenstveno misli na razinu detaljnosti definiranja ulaznih parametara, te posljedično, vrijeme proračuna. U ovom radu, korišten je i Ozone programski paket, za koji je potrebno značajno manje vremena za unos (i shvaćanje) ulaznih parametara, ali i za sami proračun. Ipak, rezultati pokazuju neznatno odstupanje što se tiče razvijenih temperatura odnosu na kompleksnije simulacije, kada nemamo dodatnih izgaranja od konstruktivnih drvenih elemenata.

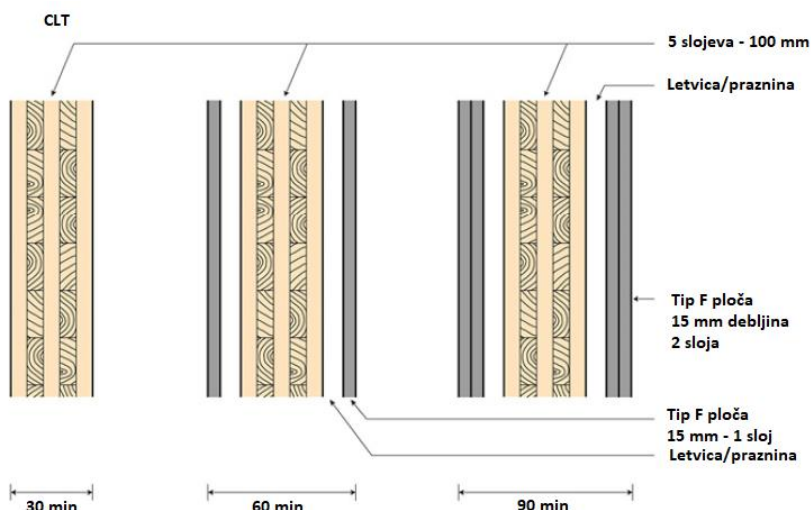


Slika 4.2.1 Usporedba razvijenih temperatura: Pyrosim i Ozone

4.3 Metoda konačnih elemenata (MKE)

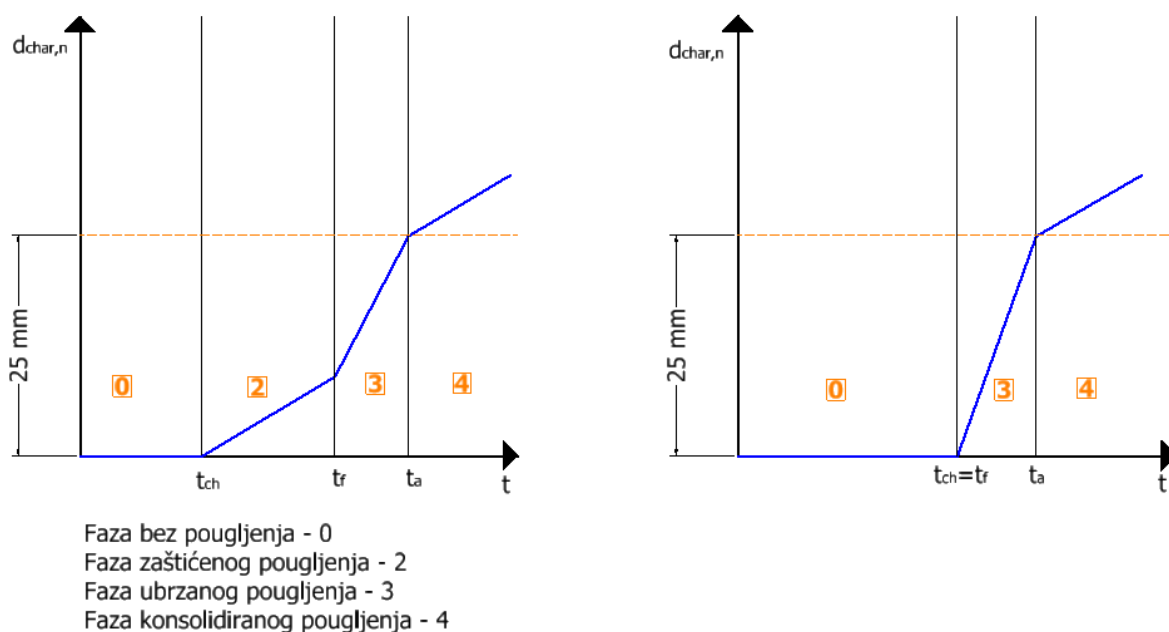
Metodom konačnih elemenata moguće je predvidjeti požarnu otpornost CLT-a s različitim sustavima zaštite, što je predstavljeno u nastavku. Požarna otpornost drvenih elemenata određuje se proračunom nosivosti reduciranog poprečnog presjeka prema HRN EN 1995-1-2:2008. Međutim, ukoliko se drvene površine zaštite protupožarnim premazom, norma nema potpuno razrađena pravila proračuna za takav slučaj. Generalno, veliki problem korisniku koji se odluči za gradnju drvom, predstavlja „skrivanje“ vidljivih površina drva. Ukoliko korisnik želi vidljive drvene površine, a s obzirom na propise u Hrvatskoj i zahtjevima za razrede reakcija na požar, treba uzeti u obzir rješenja koja nisu bila dio ovog rada. Nadalje, prema Provedbenoj odluci Europske komisije 2003/43/EC, CLT se bez ispitivanja svrstava u razred reakcije na požar D-s2, d0. Na izloženom dijelu drvenih površina, zaštita se može izvesti nanošenjem adekvatnog transparentnog protupožarnog premaza za drvo u unutarnjem prostoru, odnosno, premaznog sustava koji ne sadrži otapala ni formaldehide, a koji pod utjecajem visokih temperatura stvara izolirajući sloj (jako se pjenu). Uporabom navedenog premaza na vidljive drvene površine, osim postizanja zahtijevanog razreda otpornosti na požar, može se postići razred reakcije na požar B-s1, d0 prema HRN EN 13501-1:2019. Svrha premaza je da kratkotrajno sprječava zapaljenje drvene površine, izolira vrućinu, „koči“ vatru i sprječava širenje požara, odnosno, da spriječi naknadno gorenje zaštićenih površina te da reducira dimne plinove. Metodom konačnih elemenata moguće je predvidjeti otpornost CLT elemenata kada se na njih primjenjuje protupožarni premaz.

Kako bi se dodatno osigurala dostatna otpornost drvenih konstruktivnih elemenata na požar, dio drvenih površina može se obložiti sustavom na bazi gips-vlaknasti ploča (razreda reakcije na požar min A2), a na osnovu rezultata ovog rada (MKE), može se zaključiti da izloženi CLT može postići otpornost na požar 30 min (i više), dok oblaganjem drva zadovoljavamo uvjete od 60 (jedan sloj obloge) ili 90 min (dva sloja obloge). Slika 4.3.1 prikazuje usporedbe požarne otpornosti CLT-a.



Slika 4.3.1 Usporedba požarne otpornosti CLT-a

Za površine zaštićene protupožarnim oblogama, treba uzeti u obzir da je početak pougljenja odgođen do određenog trenutka (t_{ch}). Prema EN 1995-1-2 pougljenje se može javiti prije odvajanje protupožarne zaštite, ali s nižom brzinom pougljenja, sve do trenutka otkazivanja protupožarne zaštite (t_f). Karakteristične faze pougljenja prikazuje Slika 4.3.2.



Slika 4.3.2 Karakteristične faze pougljenja

EN 1995-1-2 daje smjernice i izraze za izračun vremena početka pougljenja (t_{ch}), odnosno u nekim slučajevima, to je ujedno i vrijeme otkazivanja protupožarne obloge (t_f), gdje je h_p debljina panela. Za obloge koje se sastoje od dva sloja, debljinu h_p treba uzeti kao debljinu vanjskog sloja i 50 % debljine unutarnjeg sloja. Izraz iz EC5 daju relativno točne rezultate za određene sustave i debljine protupožarnih obloga. Međutim, ne uzima u obzir postojanje više

od jednog sloja obloga, niti cijeli raspon debljina samih obloga, što je tematika za novi EN 1995-1-2:2025. Iako se dovršetak rada na prEN 1995-1-2:2025 očekuje ubrzo, povezani nacionalni dodaci i dodatni popratni dokumenti vjerojatno neće biti dostupni do 2027. godine. Ipak, bitne promjene su već poznate, a neke od njih su analizirane u sklopu ovog rada. Očito je da nova generacija EN 1995-1-2, rješava nedostatke postojećeg EN 1995-1-2 i, iznad svega, omogućuje nova područja primjene, čime će se omogućiti sigurno i ekonomično projektiranje drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima. Nadalje, jasno je da opseg norme raste zbog razvoja novih proizvoda, zahtjeva za detaljnijim projektiranjem, te povećanja dostupnih pristupa samom projektiranju drvenih konstrukcija. Unatoč tome, glavni fokus je na održavanju, ili čak povećanju jednostavnosti korištenja propisa. To se provodi kroz restrukturiranje, homogenizaciju i pojednostavljene metoda proračuna. Ipak, slično prijelazu na prvu generaciju EN 1995-1-2, očekuje se potrebitost dodatnog proces učenja i obuke, koji bi trebao započeti prije konačne objave, što je i jedan od ostvarenih ciljeva ovog rada.

4.4 Parametarska analiza

Iako bi svi modeli trebali biti verificirani i potvrđeni, točnost i kvaliteta rezultata ostaje u diskreciji i znanju samog korisnika. FDS i MKE modeli zahtijevaju veliki broj ulaznih podataka (termomehanička svojstva), uključujući definiranje ponašanje materijala pri izgaranju. Drvo je anizotropan materijal i stoga njegova svojstva variraju ovisno o orijentaciji vlakanca i treba ih eksplicitno uzeti u obzir. S obzirom na složenost naprednog modeliranja i raznolikost ulaznih parametara i svojstava, stvaranje baza podataka postaje relevantno, posebice za praktičnu primjenu.

U ovom poglavlju napravljena je analiza požarne otpornosti, te preostalog poprečnog presjeka različiti debljina i konfiguracija CLT elemenata (zid i ploča), nakon izloženosti od 30, 60 i 90 minuta. Vrijednosti navedene i izračunate u tablicama Tablica 4.4.1 - Tablica 4.4.4 temelje se na sljedećim uvjetima (R kriterij) :

- Predviđeni preostali presjek izračunat (u milimetrima) prema CLT komponenti i zahtijevana otpornost na požar temelje se na brzinama pougljenja i vremenu otkazivanja obloge, te proračunu prema uz pretpostavku jednostranog pougljenja, a sve u skladu s EN 1995-1-2
- Tijekom matematičkog određivanja predviđenog preostalog poprečnog presjeka, osim dubine pougljenja, mora se također uzeti u obzir sloj nulte čvrstoće i krutosti $k_0 \times d_0$ ($d_0 = 7$ mm).
- Preostali presjeci lamela debljine ≤ 3 mm ne sudjeluju u nosivosti.
- Ako lamela ne sudjeluje u nosivosti, preostala debljina lamele prikazana je u zagradi.
- Lamele/slojevi u glavnom smjeru nosivosti prikazani su **zadebljanim slovima**.

Tablica 4.4.1 Izračunate vrijednosti rezidualnog presjeka za CLT izloženi zid

CLT Zid - izloženi												
	Prvotni poprečni presjek					R kriterij						
						Preostali poprečni presjek nakon 30 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
80 C3s	20.0	40.0	20.0			0.0	(34.1)	20.0			54.1	20.0
90 C3s	30.0	30.0	30.0			4.1	30.0	30.0			64.1	64.1
100 C3s	30.0	40.0	30.0			4.1	40.0	30.0			74.1	74.1
120 C3s	40.0	40.0	40.0			14.1	40.0	40.0			94.1	94.1
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	(14.1)	20.0	20.0	20.0	74.1	60.0
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	4.1	20.0	20.0	20.0	30.0	94.1	94.1
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	14.1	20.0	20.0	20.0	40.0	114.1	114.1
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	14.1	20.0	40.0	20.0	40.0	134.1	134.1
						Preostali poprečni presjek nakon 60 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
80 C3S	20.0	40.0	20.0			0.0	8.7)	20.0			28.7	20.0
90 C3S	30.0	30.0	30.0			0.0	(12.3)	30.0			42.3	30.0
100 C3S	30.0	40.0	30.0			0.0	(22.3)	30.0			52.3	30.0
120 C3S	40.0	40.0	40.0			0.0	(35.2)	40.0			75.2	40.0
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	8.7	20.0	20.0	48.7	48.7
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	0.0	20.0	20.0	30.0	70.0	70.0
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	0.0	(15.2)	20.0	20.0	40.0	95.2	80.0
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	0.0	(15.2)	40.0	20.0	40.0	115.2	100.0
						Preostali poprečni presjek nakon 90 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
80 C3S	20.0	40.0	200.0			0.0	0.0	0.0			0.0	0.0
90 C3s	30.0	30.0	30.0			0.0	0.0	16.5			16.5	16.5
100 C3s	30.0	40.0	30.0			0.0	0.0	26.5			26.5	26.5
120 C3s	40.0	40.0	40.0			0.0	10.	40.0			50.2	40.0
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	20.0	20.0
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	0.0	0.0	16.6	30.0	46.6	30.0
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	0.0	0.0	10.2	20.0	40.0	70.2	70.2
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	0.0	0.0	30.2	20.0	40.0	90.2	90.2

Tablica 4.4.2 Izračunate vrijednosti rezidualnog presjeka za CLT zid + 12.5 mm zaštitnu ploču

CLT Zid - jedan sloj zaštitne obloge 12.5 mm												
Prvotni poprečni presjek						R kriterij						
CLT panel	Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek nakon 30 min.					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
						Lamele [mm]						
80 C3s	20.0	40.0	20.0			8.6	40.0	20.0			68.6	68.6
90 C3s	30.0	30.0	30.0			18.6	30.0	30.0			78.6	78.6
100 C3s	30.0	40.0	30.0			18.6	40.0	30.0			88.6	88.6
120 C3s	40.0	40.0	40.0			28.6	40.0	40.0			108.6	108.6
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	8.6	20.0	20.0	20.0	20.0	88.6	88.6
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	18.6	20.0	20.0	20.0	30.0	108.6	108.6
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	28.6	20.0	20.0	20.0	40.0	128.6	128.6
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	28.6	20.0	40.0	20.0	40.0	148.6	148.6
Preostali poprečni presjek nakon 60 min.												
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
80 C3S	20.0	40.0	20.0			0.0	29.0	20.0			49.0	20.0
90 C3S	30.0	30.0	30.0			0.0	30.0	30.0			60.0	60.0
100 C3S	30.0	40.0	30.0			0.0	40.0	30.0			70.0	70.0
120 C3S	40.0	40.0	40.0			10.1	40.0	40.0			90.1	90.1
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	(9.0)	20.0	20.0	20.0	69.0	60.0
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	20.0	20.0	20.0	30.0	90.0	90.0
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	10.1	20.0	20.0	20.0	40.0	110.1	110.1
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	10.1	20.0	40.0	20.0	40.0	130.1	130.1
Preostali poprečni presjek nakon 90 min.												
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
80 C3S	20.0	40.0	20.0			0.0	3.7	20.0			23.7	20.0
90 C3s	30.0	30.0	30.0			0.0	(5.5)	30.0			35.5	30.0
100 C3s	30.0	40.0	30.0			0.0	15.5)	30.0			45.5	30.0
120 C3s	40.0	40.0	40.0			0.0	(29.2)	40.0			69.2	40.0
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	3.7	20.0	20.0	43.7	43.7
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	0.0	15.5	20.0	30.0	65.5	65.5
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	0.0	(9.2)	20.0	20.0	40.0	89.2	80.0
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	0.0	(9.2)	40.0	20.0	40.0	109.2	100.0

Tablica 4.4.3 Izračunate vrijednosti rezidualnog presjeka za CLT zid + 12.5 mm zaštitnu ploču + 50 mm kamene vune

CLT Zid - jedan sloj zaštitne obloge 12.5 mm + sloj od 50 mm kamene vune												
Prvotni poprečni presjek						R kriterij						
CLT panel	Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek nakon 30 min.					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
						Lamele [mm]						
80 C3s	20.0	40.0	20.0			20.0	40.0	20.0				80.0
90 C3s	30.0	30.0	30.0			30.0	30.0	30.0				90.0
100 C3s	30.0	40.0	30.0			30.0	40.0	30.0				100.0
120 C3s	40.0	40.0	40.0			40.0	40.0	40.0				120.0
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0		20.0	100.0
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	30.0	20.0	20.0	20.0		30.0	120.0
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	40.0	20.0	20.0	20.0		40.0	140.0
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	40.0	20.0	40.0	20.0		40.0	160.0
						Preostali poprečni presjek nakon 60 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
80 C3S	20.0	40.0	20.0			0.0	(20.5)	20.0				40.5
90 C3S	30.0	30.0	30.0			0.0	(20.5)	30.0				50.5
100 C3S	30.0	40.0	30.0			0.0	(30.5)	30.0				60.5
120 C3S	40.0	40.0	40.0			0.0	40.0	40.0				80.0
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	20.0	20.0		20.0	60.0
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	10.5)	20.0	20.0		30.0	80.5
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	0.0	20.0	20.0	20.0		40.0	100.0
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	0.0	20.0	40.0	20.0		40.0	120.0
						Preostali poprečni presjek nakon 90 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
80 C3S	20.0	40.0	20.0			0.0	0.0	14.7				14.7
90 C3s	30.0	30.0	30.0			0.0	0.0	26.5				26.5
100 C3s	30.0	40.0	30.0			0.0	(6.5)	30.0				36.5
120 C3s	40.0	40.0	40.0			0.0	(20.2)	40.0				60.2
100 C5s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	(14.7)		20.0	34.7
120 C5s	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	0.0	6.5	20.0		30.0	56.5
140 C5s	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	0.0	0.0	20.0	20.0		40.0	80.0
160 C5s	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	0.0	0.0	40.0	20.0		40.0	100.0

Tablica 4.4.4 Izračunate vrijednosti rezidualnog presjeka za CLT ploču - izloženu

CLT ploča - izložena												
	Prvotni poprečni presjek					R kriterij						
						Preostali poprečni presjek nakon 30 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
100 L5S	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	(13.5)	20.0	20.0	20.0	73.5	60.0
120 L5S	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	3.5	20.0	20.0	20.0	30.0	93.5	93.5
140 L5S	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	13.5	20.0	20.0	20.0	40.0	113.5	113.5
160 L5S	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	13.5	20.0	40.0	20.0	40.0	133.5	133.5
180 L5S	40.0	30.0	40.0	30.0	40.0	13.5	30.0	40.0	30.0	40.0	153.5	153.5
200 L5s	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	13.5	40.0	40.0	40.0	40.0	173.5	173.5
						Preostali poprečni presjek nakon 60 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
100 L5S	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	(14.8)	20.0	34.8	20.0
120 L5S	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	0.0	14.9	20.0	30.0	64.9	64.9
140 L5S	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	0.0	(14.0)	20.0	20.0	40.0	94.0	80.0
160 L5S	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	0.0	(14.0)	40.0	20.0	40.0	114.0	100.0
180 L5S	40.0	30.0	40.0	30.0	40.0	0.0	(24.0)	40.0	30.0	40.0	134.0	110.0
200 L5s	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	0.0	(34.0)	40.0	40.0	40.0	154.0	120.0
						Preostali poprečni presjek nakon 90 min.						
CLT panel	Lamele [mm]					Lamele [mm]					Preostali poprečni presjek (mm)	Nosivi preostali poprečni presjek
100 L5S	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120 L5S	30.0	20.0	20.0	20.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.7	25.7	25.7
140 L5S	40.0	20.0	20.0	20.0	40.0	0.0	0.0	0.0	15.8)	40.0	55.8	40.0
160 L5S	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	0.0	0.0	15.8	20.0	40.0	75.8	75.8
180 L5S	40.0	30.0	40.0	30.0	40.0	0.0	0.0	30.7	30.0	40.0	100.7	100.7
200 L5s	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	0.0	0.0	40.0	40.0	40.0	120.0	120.0

Poglavlje 5. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJE ISTRAŽIVANJE

Prilikom provođenja *performance based* projektiranja drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima, doprinos zapaljivih materijala mijenja dinamiku požara. Intenzitet i trajanje požara su presudni faktori prilikom projektiranja, te trebaju biti ispravno procijenjeni. Napredne numeričke simulacije korištene su za procjenu performansi CLT zgrade u požarnim uvjetima. Rezultati su dodatno potvrđeni usporedbom s dosadašnjim eksperimentalnim podacima. Glavni zaključci dani su u nastavku.

5.1 CFD analiza

Jedan od ciljeva ovog rada bio je procijeniti točnost modela, te mogućnost i opravdanost primjene FDS simulacija u praksi. Zatim, specifični cilj rada bio je usporediti dinamiku požara u odjeljku, u uvjetima kada je CLT izložen ili zaštićen, te u konačnici, provesti dimenzioniranje CLT konstrukcije prema važećoj normi. Na osnovu rezultata CFD simulacije, doneseni su sljedeći zaključci:

- CFD analiza pokazala se učinkovitom za simulaciju dinamike požara u odjeljcima sa drvenim (CLT) konstruktivnim elementima.
- Napredna simulacija pokazala je obećavajuće rezultate u vidu parametara razvijene HRR, temperature plinova i krutih tijela, te vidljivosti uslijed proizvodnje dima. HRR je bio parametar koji je pokazao zadovoljavajuću točnost u odnosu na prethodna istraživanja i simulacije.
- CLT značajno doprinosi ukupno oslobođenoj HRR
- Predviđene temperature plinova i krutih tijela su u skladu, služili su kao podloga za dimenzioniranje CLT-a, ali mogu biti i baza za projektiranje mjera zaštite od požara, koji nisu dio ovog rada.
- Trenutni EN 1995-1-2 nije konzervativan u pogledu razvijenih temperatura unutar požarnog odjeljka sa izloženim drvenim površinama. Posljedično, u novu generaciju EN-a, treba razmotriti povećanje sloja nulte čvrstoće, te uvesti PBD projektiranje sa jasnim smjernicama.
- Izgaranje drva i brzina pougljenja dobivena iz naprednih simulacija (Pyrosim) potvrdila je preporuke dane u prEN 1995-1-2:2025
- Simulacija je pokazala da se dim u požarnom odjeljku više razvija u odjeljku kada je drvena konstrukcija izložena. U slučaju kada je CLT zaštićen, vidljivost

je ograničena pretežno u učionici gdje je nastao požar, dok je u slučaju izloženog CLT-a, vidljivost smanjena u gotovo cijelom požarnom odjeljku.

Drugo istraživačko pitanje bilo je usmjereno na utvrđivanje ograničenja, te su doneseni sljedeći zaključci:

- Temperatura plinovite faze, kritični je parametar koji utječe na brojne aspekte požara u odjeljcima. Stoga, potrebno je detaljnije istraživanje vezano za odabrane vrijednosti topline izgaranja CLT-a.
- Nemogućnost modela da uzme u obzir dodatnu toplinu stvorenu tinjajućim izgaranjem drva smatra se ograničenjem u postizanju točnijih rezultata. Ovaj tip izgaranja nije uključen u simulaciju, unatoč njegovom potencijalnom utjecaju na HRR i na temperaturu plinovite faze.
- Vrijeme proračuna i izvođenja simulacija. Ovaj dugotrajan proces ograničava fleksibilnost istraživanja i usporava generiranje rezultata, što otežava procjenu utjecaja različitih parametara na rezultate simulacije, te validiranje samog modela.

Zbog toga, u ovom radu istražena je mogućnost primjene „jednostavnijeg“, tj. za praksu adekvatnijeg programskog paketa – OZone. Na osnovu simulacija provedenih u programskom paketu OZone, može se zaključiti:

- OZone daje dovoljno dobre rezultate za kritične temperature unutar odjeljka, kada su elementi zaštićeni, tj. kada materijali ne pridonose dinamici požara. Kada su CLT elementi izloženi požaru, preporučuje se koristiti napredne CFD simulacije.

Na kraju, važno je naglasiti da previđeno vrijeme intervencije vatrogasaca treba u svakom slučaju poštivati, jer prekoračenje navedenog vremena kao posljedicu ima i povećanje toplinskog opterećenja objekta, odnosno toplinske snage požara. U simulaciji, vrijeme izloženosti požaru znatno je niže od minimalno zahtijevane požarne otpornosti u standardnim uvjetima uporabe, te za oba požarna scenarija možemo konstatirati da odabrani intenzitet požara u zadanom vremenu (15 min.) neće značajno reducirati mehaničke karakteristike CLT-a. Iz toga slijedi da je njihovo dimenzioniranje u praksi značajno na strani sigurnosti, stoga će se u nastavku dati glavni zaključci vezani proračun drvenih elemenata prema EN 1995-1-2.

5.2 Metoda konačnih elemenata (MKE)

Numeričke simulacije mogu pružiti detaljniji uvid u ponašanje CLT elemenata u požarnim uvjetima. Analiza i dimenzioniranje je provedeno je u programskom paketu Dlubal RFEM. Provedena je simulacija požara u trajanju od 90 minuta, za tri različita slučaja.

1. Izloženi CLT sa ljepilom koje nema otpornost na visoke temperature
2. Izloženi CLT sa ljepilom koje ima otpornost na visoke temperature
3. Zaštićeni CLT sa gips vlaknastim pločama – tip F

U prvom slučaju došlo je do povećanja jednodimenzionalne stope pougljenja koja se koristi za proračun prvih 25 mm dubine pougljenja svakog unutarnjeg sloja, i to za dva puta. Iskoristivost elementa je 62.1 %. Drugi slučaj karakterizira konstantna jednodimenzionalna stopa pougljenja - ne povećava se nakon dosezanja unutarnjeg sloja. Iskoristivost CLT-a je 57.7 %. Konačno, u trećem slučaju definira se početak pougljenja (21 min), izolacijski koeficijent (0.78), vrijeme do propadanja zaštitnih ploča (32 min), te post-protekcijski koeficijent (2.00). Iskoristivost CLT-a je 56.1 %.

Na osnovu navedenog može se zaključiti da procjena cjelovitosti površine lijepljena tijekom požara, utječe na požarnu otpornost CLT-a. Razlog tome je preostali poprečni presjek CLT- ploče u svakom pojedinom slučaju. U skladu s tim, u prvom slučaju, prva dva izložena sloja ne sudjeluju u prijenosu naprezanja (preostalo manje od 3mm debljine u drugoj lameli), dok u drugom i trećem slučaju, druga izložena lamela sudjeluje u prijenosu naprezanja. Za površine zaštićene protupožarnim oblogama, treba uzeti u obzir da je početak pougljenja odgođen do određenog trenutka (t_{ch}), koji je definiran vrstom protupožarne zaštite. Ipak, izraz za proračun trenutka otkazivanja protupožarnih ploča dan u trenutnim propisima je konzervativan i ograničen. Na osnovu analize rezultata dobivenih numeričkim simulacijama, predstavljeni su glavni zaključci:

- Za CLT, proračun efektivnog presjeka uzima u obzir nosive i nenosive slojeve. Rezultati su pokazali slaganje preporuka nove generacije EN 1995-1-2, sa MKE analizom.
- MKE (programski paket RFEM6) daje dobre rezultate vezano za požarnu otpornost izloženih i zaštićenih CLT elemenata, a proračun je prigodan (jednostavan) je za praktičnu primjenu, te usklađen s EN 1995-1-2.

- S obzirom na složenost naprednog modeliranja i raznolikost ulaznih parametara i svojstava, kreiranje tabličnih podataka za dimenzioniranje, u skladu s prEN 1995-1-2:2025 postaje relevantno, posebice za praktičnu primjenu.

5.3 Preporuke za daljnja istraživanja

Na temelju pregleda stanja područja i zaključaka izvedenih iz naprednih numeričkih simulacija provedenih u specijalističkom radu, formulirana su glavna pitanja koja bi se mogla obraditi u daljnjim istraživanjima:

- Provesti eksperimentalna istraživanja
- Samogašenje CLT-a treba uzeti u obzir u odjeljcima gdje postoje velike izložene površine
- Istražiti ponašanje spojeva CLT konstrukcija
- Eksperimentalno istražiti toplinska svojstva materijala
- Ispitati nove vrste ljepila i njihovu kompatibilnost sa CLT
- Istražiti utjecaj protupožarnih premaza na faze pougljenja, te unificirati pravila proračuna, protupožarnim premazom zaštićenih drvenih elemenata.
- Istražiti utjecaj sadržaja vode u drvu na brzinu pougljenja drva. EC5 pojednostavljeni modeli proračuna ne uzimaju u obzir ovu činjenicu.
- Istražiti ponašanje spojeva drvo-metal u požarnim uvjetima. Osim različitog ponašanja drveta i čelika u požaru, postoji interakcija između njih. Iako postoje jednostavna pravila proračuna, ona su određena potpuno empirijski, ograničeni na (nekolicinu) požarnih ispitivanja i vrijede samo za simetrične spojeve s 3 elementa (metalne ploče s bočne strane drvenih elemenata).
- Istražiti evakuaciju u objektu sastavljenom od CLT elemenata
- Vrijeme otkazivanja zaštite $t_{f,pr}$ jedan je od najvažnijih parametara koji utječu na požarnu otpornost zaštićenih drvenih konstrukcija, stoga u novoj generaciji EN-a, treba dati pojednostavljene izraze za sve vrste ploča koje se koriste za zaštitu drvenih konstrukcija.

Nastavak istraživanja temeljenog na ovom radu mogao bi donijeti potencijalna poboljšanja, te korištenja sličnih metoda prilikom simuliranja ponašanja drvenih konstrukcija u požaru, u okviru hrvatskih pravilnika. Poboljšanja navedena u nastavku mogla bi povećati preciznost i upotrebljivost modela simulacije požara uz pomoć FDS-a.

1. Detaljnije definiranje svojstava materijala i razvijanje modela pirolize: Buduća bi istraživanja mogla biti posvećena poboljšanju prikaza svojstava materijala i razvijanju modela pirolize. U ovom radu korišten je model gorenja optimiziran na temelju sličnih kaliometrijskih podataka iz prethodnih istraživanja. Nije sigurno da je li model prikladan za široku primjenu. Detaljne studije materijala mogu poboljšati točnost predviđanja ponašanja CLT-a u požarnim uvjetima, kada se ugrade u model pirolize.
2. Uključivanje tinjajućeg gorenja: Tinjajuće gorenje, zanemareno u trenutnom modelu, igra prirodnu ulogu u požarnim odjeljcima koji uključuju izložene drvene površine. Uključivanje ove pojave u simulacijski model može poboljšati predviđanja temperature i HRR-a.
3. Istraživanje učinka veličine mrežne ćelije: U ovoj studiji nije provedena analiza osjetljivosti mreže. Potrebno je provesti detaljnije istraživanje, jer veličina ćelije mreže može značajno utjecati na rezultate simulacije.
4. Ispitivanje paralelne obrade i Adaptive Mesh Refinement: Smanjenje vremena proračuna kroz strategije kao što su paralelna obrada ili Adaptive Mesh Refinement moglo bi biti fokus budućih istraživanja. Kraće vrijeme simulacije omogućilo bi fleksibilniji proces istraživanja i omogućilo detaljnije i raznolikije simulacije unutar istog vremenskog okvira.
5. Poboljšano modeliranje ventilacije: Jedno od utvrđenih ograničenja trenutnog modela uključuje točno definiranje uvjeta ventilacije unutar odjeljka. Buduće studije trebale bi se usredotočiti na poboljšanje ovog aspekta modela kako bi se poboljšale mogućnosti predviđanja.
6. Praktična primjena: Ukoliko se točnost simulacija poveća i vrijeme proračuna smanji, buduća bi istraživanja trebala razmotriti praktičnu primjenu ovih modela u planiranju zaštite od požara i analizi stanja nakon požara. S obzirom na napredak u računalnoj tehnologiji i softverskom inženjerstvu tijekom posljednja dva desetljeća, takvi će modeli vjerojatno postati privlačniji i za istraživačku i za praktičnu primjenu.

Usredotočujući se na navedene zadatke, mogu se poboljšati prediktivne mogućnosti modela simulacije požara, te povećati njihovu vrijednost u praktičnim primjenama zaštite od požara. Iako svaki model neizbježno ima ograničenja, alati za simulaciju požara postaju precizniji i korisniji kroz iterativne cikluse razvoja i usavršavanja.

1. Buchanan, A.H. Can Timber Buildings Help Reduce Global CO₂ Emissions? In *9th World Conference on Timber Engineering 2006, WCTE 2006*; **2006**; Vol. 3.
2. “On the side of nature.” Available online : <https://www.moelven.com/news/news-archive2/2019/on-the-side-of-nature> (accessed on June 24, 2022).
3. Kitek Kuzman, M. Drvo Kao Građevni Materijal Budućnosti. *Građevinar*, **2010**, 62, 313–318.
4. Zeleni čuvari planeta pod opsadom - Poslovni dnevnik. Available online : <https://www.poslovni.hr/strane/zeleni-cuvari-planeta-pod-opsadom-188083> (accessed on August 24, 2022).
5. Östman, B.; Schmid, J.; Klippel, M.; Just, A.; Werther, N.; Brandon, D. Fire Design of CLT in Europe. *Wood and Fiber Science*, **2018**, 50, 68–82.
6. Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara. Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_03_29_505.html (accessed on June 27, 2022).
7. McGrattan; Kevin B; Forney; Glenn P. Fire Dynamics Simulator (Version 4): User’s Guide.
8. Thunderhead Engineering. PyroSim. Available online : <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/> (accessed on April 22, 2024).
9. Eurocode 5: Design of timber structures -- Part 1-2: General - Structural fire design (EN 1995-1-2:2004/A2:2014): Available online : <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.2.2004.pdf> (accessed on June 27, 2022).
10. Schmid, J.; Klippel, M.; Just, A.; Frangi, A. Comparison of the Fire Resistance of Timber Members in Tests and Calculation Models. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction - Working Commission W18 - Timber Structures*, **2013**, 365–378.
11. Schmid, J.; König, J.; Just, A. The Reduced Cross-Section Method for the Design of Timber Structures Exposed to Fire-Background, Limitations and New Developments. *Structural Engineering International*, **2012**, 22, 514–522.
12. Schmid, J.; Just, A.; Klippel, M.; Fragiaco, M. The Reduced Cross-Section Method for Evaluation of the Fire Resistance of Timber Members: Discussion and

- Determination of the Zero-Strength Layer. *Fire Technology 2014 51:6*, **2014**, 51, 1285–1309.
13. Kamenická, Z.; Sandanus, J. Comparison of Simplified and Advanced Design Methods for Determining Mechanical Resistance of Timber Structures Exposed to Fire. *International Wood Products Journal*, **2017**, 8, 88–93.
 14. Hietaniemi, J. A Probabilistic Approach to Wood Charring Rate. In *Espoo*; **2005**; pp. 1–54.
 15. Mikkola, E. Charring Of Wood Based Materials. *Fire Safety Science*, **1991**, 3, 547–556.
 16. Frangi, P.A. CEN TC 250 SC5 , Progress Report EN 1995-1-2 : 2025. **2020**.
 17. Klippel, M.; Frangi, A. Fire Safety of Glued-Laminated Timber Beams in Bending. *Journal of Structural Engineering*, **2017**, 143, 04017052.
 18. Fragiaco, M.; Menis, A.; Clemente, I.; Bochicchio, G.; Ceccotti, A. Fire Resistance of Cross-Laminated Timber Panels Loaded Out of Plane. *Journal of Structural Engineering*, **2012**, 139, 04013018.
 19. Menis, A. *Dottorato in Ingegneria Strutturale Fire Resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) Elements*; Cagliari.
 20. Friquin, K.L. Charring Rates of Heavy Timber Structures for Fire Safety Design, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, **2010**.
 21. Klippel, M.; Leyder, C.; Frangi, A.; Fontana, M.; Lam, F.; Ceccotti, A. Fire Tests on Loaded Cross-Laminated Timber Wall and Floor Elements. *Fire Safety Science*, **2014**, 11, 626–639.
 22. Frangi, A.; Fontana, M.; Hugi, E.; Jübstl, R. Experimental Analysis of Cross-Laminated Timber Panels in Fire. *Fire Saf J*, **2009**, 44, 1078–1087.
 23. Emberley, R.; Inghelbrecht, A.; Doyle, N.; Torero, J.L. Components and Consequences of Cross-Laminated Timber Delamination. *Fire Science and Technology 2015*, **2017**, 273–279.
 24. Su, J.; Lafrance, P.; Hoehler, M.; Bundy, M. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests. *National Research Council of Canada*, **2018**, 396.
 25. Morrisset, D.; Hadden, R.M.; Bartlett, A.I.; Law, A.; Emberley, R. Time Dependent Contribution of Char Oxidation and Flame Heat Feedback on the Mass Loss Rate of Timber. *Fire Saf J*, **2021**, 120, 103058.

26. Crielaard, R.; van de Kuilen, J.W.; Terwel, K.; Ravenshorst, G.; Steenbakkens, P. Self-Extinguishment of Cross-Laminated Timber. *Fire Saf J*, **2019**, *105*, 244–260.
27. Thi, V.D.; Khelifa, M.; El Ganaoui, M.; Rogaume, Y. Modelling of Heat Transfer in Timber Exposed to Fire. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*; **2016**.
28. Okuni, I.M.; Bradford, T.E. Modelling of Elevated Temperature Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber: An Application of ANSYS Mechanical 2020 R1 Structural Analysis Software. *Environmental Sciences Proceedings*, **2020**, *3*, 46.
29. Silva, R. Direct Coupled Thermal-Structural Analysis in ANSYS WorkBench. *ESSS Conference and Ansys Users Meeting*, **2013**.
30. Aseeva, R.; Serkov, B.; Sivenkov, A. *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*; Springer Series in Wood Science; Springer Netherlands: Dordrecht, **2014**.
31. Building fire. Available online : https://www.chinadaily.com.cn/photo/2013-12/16/content_17176617_2.htm (accessed on August 30, 2022).
32. How safe from fire are high rise buildings? | KCRW. Available online : <https://www.kcrw.com/culture/shows/design-and-architecture/how-safe-from-fire-are-high-rise-buildings> (accessed on August 29, 2022).
33. Benković, D.; Todorovski, Đ.; Peretin, S. Sprečavanje Pojave i Širenja Požara Na Informatičkoj Opremi. *Sigurnost : časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini*, **2019**, *61*, 133–144.
34. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o gradnji. Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_04_39_802.html (accessed on August 29, 2022).
35. Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara. Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_03_29_505.html (accessed on August 29, 2022).
36. HRN EN 13501-1:2010 / Hrvatski normativni dokument / HRN4You - Hrvatski zavod za norme. Available online : <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+13501-1%3A2010> (accessed on August 29, 2022).

37. Sandhaas, C.; Blaß, H.J.; Sandhaas, C. *Timber Engineering Principles for Design for Safety*; KIT Scientific Publishing, **2017**.
38. Broughton, J.G.; Hutchinson, A.R. Adhesive Systems for Structural Connections in Timber. *Int J Adhes Adhes*, **2001**, *21*, 177–186.
39. EN 16351:2021 - Timber structures - Cross laminated timber - Requirements. Available online : <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/3f9c8502-609e-4592-9cc2-219dc2ff3720/en-16351-2021> (accessed on June 23, 2022).
40. Zelinka, S.L.; Sullivan, K.; Pei, S.; Ottum, N.; Bechle, N.J.; Rammer, D.R.; Hasburgh, L.E. Small Scale Tests on the Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber (CLT) at Elevated Temperatures. *Int J Adhes Adhes*, **2019**, *95*.
41. Emberley, R.; Torero Cullen, J. Cross-Laminated Timber Failure Modes for Fire Conditions. In *Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015)*; School of Civil Engineering, The University of Queensland: Brisbane, QLD, Australia, **2015**; pp. 1023–1030.
42. Schmidt, L. Experimental Study on the Effect of Char Fall off on the Heat Transfer within Loaded CLT Columns Exposed to Radiant Heating, Master Thesis, The University of Edinburgh, College of Science and Engineering, **2020**.
43. Kucíková, L.; Janda, T.; Šejnoha, M.; Sýkora, J. Experimental Investigation of Fire Resistance of GLT Beams. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, **2020**, *8*, 99–110.
44. Johansson, E.; Svenningsson, A. *Delamination of Cross-Laminated Timber and Its Impact on Fire Development Focusing on Different Types of Adhesives*; Lund, Sweden, **2018**.
45. Čolić, A. Study of the Char Fall-off Phenomenon in Cross-Laminated Timber under Fire Conditions, Master's Thesis, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK, **2021**.
46. Richter, K.; Steiger, R. Thermal Stability of Wood-Wood and Wood-FRP Bonding with Polyurethane and Epoxy Adhesives. *Adv Eng Mater*, **2005**, *7*, 419–426.
47. Clauß, S.; Joscak, M.; Niemz, P. Thermal Stability of Glued Wood Joints Measured by Shear Tests. *European Journal of Wood and Wood Products 2010* *69:1*, **2010**, *69*, 101–111.

-
48. Zelinka, S.L.; Sullivan, K.; Pei, S.; Ottum, N.; Bechle, N.J.; Rammer, D.R.; Hasburgh, L.E. Small Scale Tests on the Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber (CLT) at Elevated Temperatures. *Int J Adhes Adhes*, **2019**, *95*.
 49. Morrisset, D.; Hadden, R.M.; Bartlett, A.I.; Law, A.; Emberley, R. Time Dependent Contribution of Char Oxidation and Flame Heat Feedback on the Mass Loss Rate of Timber. *Fire Saf J*, **2021**, *120*, 103058.
 50. Rackauskaite, E.; Kotsovinos, P.; Barber, D. Letter to the Editor: Design Fires for Open-Plan Buildings with Exposed Mass-Timber Ceiling. *Fire Technol*, **2021**, *57*, 487–495.
 51. Fire Sprinkler System for Industries And Warehouses. Available online : <https://www.indiamart.com/proddetail/fire-sprinkler-system-for-industries-and-warehouses-20246994488.html> (accessed on August 29, 2022).
 52. Sauerbier, P.; Mayer, A.K.; Emmerich, L.; Militz, H. Fire Retardant Treatment of Wood – State of the Art and Future Perspectives. *Wood & Fire Safety*, **2020**, 97–102.
 53. Sredstvo za zaštitu od požara za drvo: tehničke karakteristike, potrošnja. Available online : <https://hr.puntomariner.com/fire-retardant-for-wood-technical> (accessed on August 29, 2022).
 54. Permatex - Wood Fire Protection. Available online : <http://permatextr.com/fire-retardant-for-wood-organic.html> (accessed on August 29, 2022).
 55. Zaštita drvenih konstrukcija od požara. Available online : <https://webgradnja.hr/clanci/zastita-drvenih-konstrukcija-od-pozara/4140> (accessed on August 29, 2022).
 56. Jeleč, M.; Varevac, D.; Rajčić, V. Križno Lamelirano Drvo (CLT) - Pregled Stanja Područja. *Građevinar*, **2018**, *70*, 75–95.
 57. Cross Laminated Timber. Available online : <https://technologyinarchitecture.com/cross-laminated-timber/> (accessed on September 9, 2021).
 58. Bedon, C.; Chifliganec, C.; Džolev, I.; Pečenko, R.; Hozjan, T. Numerical Modelling of Timber Concrete Composite Structures in Fire, COST Action FP 1404-Guidance Document, **2018**.
 59. Pečenko, R. Mechanical Response of Curved Timber Beams with Variable Height under Fire Conditions, Doctoral thesis, Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Slovenia, **2013**.

-
60. Werther, N.; O, J.W.; Spellman, P.M.; Abu, A.K.; Moss, P.J.; Buchanan, A.H.; Winter, S. Parametric Study of Modelling Structural Timber in Fire with Different Software Packages. In *Proceedings of the 7 th International Conference on Structures in Fire*; Fontana, M.; Frangi, A.; Knobloch, M., Eds.; Zurich, **2012**.
 61. O, J.W.; Abu, A.K.; Carradine, D.M.; Moss, P.J.; Buchanan, A.H. Modelling the Fire Performance of Structural Timber Floors. In *Proceedings of the 7 th International Conference on Structures in Fire*; Fontana, M.; Frangi, A.; Knobloch, M., Eds.; Zurich, **2012**.
 62. Regueira, R.; Guaita, M. Numerical Simulation of the Fire Behaviour of Timber Dovetail Connections. *Fire Saf J*, **2018**, *96*, 1–12.
 63. Tran, T.T.; Khelifa, M.; Nadjai, A.; Oudjene, M.; Rogaume, Y. Modelling of Fire Performance of Cross Laminated Timber (CLT) Panels. *J Phys Conf Ser*, **2018**, *1107*.
 64. Szász, A.; Hlavička, V.; Lublós, É.; Biró, A. Numerical Modelling of the Fire Resistance of Double Sheared Steel-to-Timber Connections. *Journal of Building Engineering*, **2021**, *37*.
 65. O'Neill, J.W.; Abu, A.K.; Abu, A.K.; Carradine, D.M.; Moss, P.J.; Buchanan, A.H. Predicting the Fire Performance of Structural Timber Floors. *8th International Conference on Structures in Fire*, **2014**.
 66. Palma, P.; Frangi, A. Modelling the Fire Resistance of Steel-to-Timber Dowelled Connections Loaded Perpendicularly to the Grain. *Fire Saf J*, **2019**, *107*, 54–74.
 67. Audebert, M.; Dhima, D.; Bouchair, A. Proposal for a New Formula to Predict the Fire Resistance of Timber Connections. *Eng Struct*, **2020**, *204*.
 68. Naser, M.Z. Fire Resistance Evaluation through Artificial Intelligence - A Case for Timber Structures. *Fire Saf J*, **2019**, *105*, 1–18.
 69. Racher, P.; Laplanche, K.; Dhima, D.; Bouchair, A. Thermo-Mechanical Analysis of the Fire Performance of Dowelled Timber Connection. *Eng Struct*, **2010**, *32*, 1148–1157.
 70. Erchinger, C.; Frangi, A.; Fontana, M. Fire Design of Steel-to-Timber Dowelled Connections. *Eng Struct*, **2010**, *32*, 580–589.
 71. Twomey, B. The Performance and Behavior of Lightweight Wood Exposed to Fire Conditions, Master Theses, Worcester Polytechnic Institute, **2007**.
 72. König, J. *Fire Exposed Simply Supported Wooden I-Joists in Floor Assemblies*; SP Swedish National Testing and Research Institute, Stockholm, Sweden, **2006**.

-
73. Frangi, A.; König, J. Effect of Increased Charring on the Narrow Side of Rectangular Timber Cross-Sections Exposed to Fire on Three or Four Sides. *Fire Mater*, **2011**, *35*, 593–605.
 74. Boverket. *BFS 2011:27 Boverkets Allmänna Råd Om Analytisk Dimensionering Av Byggnaders Brandskydd, BBRAD*; **2011**; Vol. 1.
 75. Pettersson, C. Brandteknisk Analys Av Multifunktionella Byggnader-Antagonistiska Hot Och Dominoeffekter.
 76. Korhonen, T.; Hostikka, S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, Technical Reference and User's Guide (FDS 5.5.0, Evac 2.2.1). *Technical Reference and User's Guide. VTT Technical Research Centre of Finland*, **2010**.
 77. Jakobsen, A.; Morten Birk Sabroe Valkvist, A.; Safety Jens Christian Bennetsen, N.; Rolf Ehlert Carstensen, R.; Gustav Lanng Madsen, C.; Kim Sommerlund-Thorsen, C.; Carsten Strüwing Hansen, D.; Brandvaesen Hovedstadens Beredskab Sune Nygaard, F.; Bro Lars Schiøtt Sørensen, C.; Norske Veritas, D. CFD Best Practice Deltagende Parter. **2009**.
 78. SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection, 2nd Edition. Available online : <https://www.nfpa.org/product/sfpe-engineering-guide/pbooksfpe/sfpe-engineering-guide-to-performance-based-fire-protection/sfpe06> (accessed on March 18, 2024).
 79. Osvaldová, L.M.; Gašpercová, S. The Evaluation of Flammability Properties Regarding Testing Methods. *Civil and Environmental Engineering*, **2015**, *11*, 142–146.
 80. Rein, G.; Bar-Ilan, A.; Fernandez-Pello, A.C.; Alvares, N. A Comparison of Three Models for the Simulation of Accidental Fires. <http://dx.doi.org/10.1177/1042391506056926>, **2006**, *16*, 183–209.
 81. Olenick, S.M.; Carpenter, D.J. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*, **2003**, *13*, 87–110.
 82. Jancík, J.; Magdolenová, P.; Markert, F. Comparison of Cone Calorimetry and FDS Model of Low-Density Fiberboard Pyrolysis. *Wood & Fire Safety*, **2020**, 144–151.
 83. Alvares, N.; Fernandez-Pello, A.C. Fire Initiation and Spread in Overloaded Communication System Cable Trays. *Exp Therm Fluid Sci*, **2000**, *21*, 51–57.

-
84. Tabaczanski, R.; Corrêa, C.; Pires, T.A.; Rêgo e Silva, J.J. Simulação Numérica e Experimento de Incêndio Em Dormitório Residencial. *Revista ALCONPAT*, **2018**, *9*, 15–29.
 85. Li, S.; Jiaolei, Z.; Zhao, D.; Deng, L. Study on Fire Resistance of a Prefabricated Reinforced Concrete Frame Structure. *Journal of Structural Fire Engineering*, **2021**, *12*, 363–376.
 86. Narodne Novine (2019), Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19). Available online : <https://www.zakon.hr/z/690/Zakon-o-gradnji> (accessed on April 22, 2024).
 87. Narodne Novine (2023), Zakon o zaštiti od požara (NN 92/10, 114/22),. Available online : <https://www.zakon.hr/z/349/Zakon-o-zaštiti-od-požara> (accessed on April 22, 2024).
 88. Narodne Novine (2003.), Pravilnik o uvjetima za vatrogasne pristupe (NN 35/94, 55/94, 142/03). Available online : <https://www.zakon.hr/cms.htm?id=52723> (accessed on April 22, 2024).
 89. Narodne Novine (2013.), Pravilnik o vatrogasnim aparatima (NN 101/11, 74/13). Available online : <https://www.zakon.hr/cms.htm?id=12153> (accessed on April 22, 2024).
 90. Narodne Novine (2006.), Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara (NN 08/06). Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_01_8_180.html (accessed on April 22, 2024).
 91. Narodne Novine (1999.), Pravilnik o sustavima za dojavu požara (NN 56/99). Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1999_06_56_1055.html (accessed on April 22, 2024).
 92. Narodne Novine, (2020.) “Pravilnik o zaštiti na radu za mjesta rada (NN 105/20). Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_09_105_1965.html (accessed on April 22, 2024).
 93. Narodne Novine (2011.), Pravilnik o mjerama zaštite od požara kod građenja (NN 141/11). Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2011_12_141_2822.html (accessed on April 22, 2024).

-
94. Službeni list br. 7/84 (1984.), Narodne novine 5/02 (2002.), Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu visokih objekata od požara. Available online : https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_tehnickim_normativima_za_zastitu_visokih_objekata_od_pozara.html (accessed on April 22, 2024).
 95. Narodne Novine (2008.), Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08). Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_08_93_2948.html (accessed on April 22, 2024).
 96. Jelčić Rukavina, M.; Carević, M.; Banjad Pečur, I. Zaštita Pročelja Zgrada Od Požara - Priručnik Za Projektiranje i Izvođenje. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*, **2017**.
 97. HRN EN 1990:2011 / Hrvatski normativni dokument / HRN4You - Hrvatski zavod za norme. Available online : <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1990%3A2011> (accessed on August 29, 2022).
 98. PLANETARIS d.o.o. *MAPA 01 - Arhitektonski Projekt Obnove Zgrade Za Cjelovitu Obnovu Zgrade, Osnovna Škola Ivan Goran Kovačić Petrinja, Gora 61a, 44250 Petrinja*; **2021**.
 99. Tran, H.C.; White, R.H. Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter. *Fire Mater*, **1992**, *16*, 197–206.
 100. Wiesner, F.; Bisby, L.A.; Bartlett, A.I.; Hidalgo, J.P.; Santamaria, S.; Deeny, S.; Hadden, R.M. Structural Capacity in Fire of Laminated Timber Elements in Compartments with Exposed Timber Surfaces. *Eng Struct*, **2019**, *179*, 284–295.
 101. Wade, C.A. A Theoretical Model of Fully Developed Fire in Mass Timber Enclosures, **2019**.
 102. Bartlett, A.I.; Hadden, R.M.; Hidalgo, J.P.; Santamaria, S.; Wiesner, F.; Bisby, L.A.; Deeny, S.; Lane, B. Auto-Extinction of Engineered Timber: Application to Compartment Fires with Exposed Timber Surfaces. *Fire Saf J*, **2017**, *91*, 407–413.
 103. Hadden, R.M.; Bartlett, A.I.; Hidalgo, J.P.; Santamaria, S.; Wiesner, F.; Bisby, L.A.; Deeny, S.; Lane, B. Effects of Exposed Cross Laminated Timber on Compartment Fire Dynamics. *Fire Saf J*, **2017**, *91*, 480–489.
 104. Rinta-Paavola, A.; Hostikka, S. A Model for the Pyrolysis of Two Nordic Structural Timbers. *Fire Mater*, **2022**, *46*, 55–68.

105. Lamandé, A.; Marchetti, V.; Bourbigot, S.; Fontaine, G. Effects of Oxygen Concentration on the Reaction to Fire of Cross-Laminated Timber in a Controlled-Atmosphere Cone Calorimeter. *Fire Technol*, **2024**, 1–26.
106. Cadorin, J.F.; Pintea, D.; Franssen, J.M. The Design Fire Tool OZone V2.0- Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests 1st DRAFT 11 Th of June 2001.