

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Filip Knežević

**ANALIZA OTPORNOSTI DRVENE ZGRADE OD LLD<sup>1</sup> I CLT<sup>2</sup> ELEMENATA  
IZLOŽENE POŽARNOM DJEOVANJU**

Zagreb, 2018.

---

<sup>1</sup> Lijepljeno lamelirano drvo

<sup>2</sup> Križno lamelirano drvo

*Ovaj rad izrađen je pri Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom Prof. dr. sc. Vlatke Rajčić, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.*

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. POŽAR U EUROPSKIM NORMAMA ZA PROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJA (EUROKOD).....	6
2.1. Požar u nastanku (zapaljenje i širenje).....	6
2.2. Flash-over (“vatreni skok“) .....	7
2.3. Puni ili totalni požar.....	8
2.4. Hlađenje ili gašenje na odsječku.....	9
2.5. Mehanizmi sagorijevanja.....	9
3. OPĆA ANALIZA KONSTRUKCIJE.....	12
3.1. Toplinska svojstva drva .....	12
3.2. Proračunske vrijednosti karakteristika materijala.....	14
3.3. Dubina pougljenja.....	16
4. STARI PRISTUP .....	17
4.1. Standardni požar .....	18
5. NOVI PRISTUP (REALNI ILI STVARNI POŽAR).....	19
5.1. Realni požar .....	20
5.2. Događanja na konstrukciju izloženu požarnom djelovanju.....	21
5.3. Računska analiza.....	22
5.3.1. Dvije metode proračuna drvenih konstrukcija na djelovanje požara .....	23
5.3.2. Određivanje scenarija računskog požara .....	26
5.3.3. Dvije razine određivanja gustoće požarnog opterećenja .....	27
5.3.4. Računski požar .....	29
5.3.5. Rata oslobođenja topline .....	30
5.3.6. Analiza temperature.....	30
5.3.7. Toplinsko djelovanje za analizu temperature .....	31
5.3.7.1. Opća pravila prijenosa topline.....	31
5.3.7.2. Nominalne krivulje temperatura-vrijeme .....	32
5.3.7.3. Modeli prirodnog požara.....	33
5.3.8. Proračun temperature.....	38
6. ZAHTJEVI NA KONSTRUKCIJU IZLOŽENU POŽARU .....	39
7. LIJEPLJENO LAMELIRANO DRVO (LLD) .....	43
7.1. Proizvodnja LLD elemenata .....	44

7.2.	Mehanička svojstva.....	45
7.3.	Ponašanje LLD-a pod utjecajem požara .....	45
8.	KRIŽNO LAMELIRANO DRVO (CLT).....	47
8.1.	Proizvodnja CLT elemenata .....	49
8.2.	Mehanička svojstva CLT-a.....	51
8.3.	Toplinska svojstva CLT-a.....	53
8.4.	Ispitivanje CLT-a na požar .....	54
8.5.	Proračun CLT-a na požar.....	55
8.6.	Proračun CLT ploča izloženih ASTft E119 požaru.....	56
9.	OPIS KONSTRUKCIJE .....	64
9.1.	Opis proračuna.....	68
10.	STATIČKI PRORAČUN-BEZ POŽARA.....	70
10.1.	Analiza opterećenja .....	70
10.1.1.	Stalno opterećenje.....	70
10.1.2.	Uporabno opterećenje.....	71
10.1.3.	Opterećenje snijegom .....	71
10.1.4.	Opterećenje vjetrom .....	72
10.2.	Statički sustav i model konstrukcije.....	75
10.2.1.	Karakteristike poprečnih presjeka i materijala .....	75
10.3.	DIMENZIONIRANJE GLAVNIH NOSAČA.....	77
10.3.1.	Provjera graničnog stanja nosivosti.....	80
10.3.1.1.	Proračun stupova .....	80
10.3.1.2.	Proračun grede-ispod krovne ploče.....	82
10.3.1.3.	Proračun grede-kat .....	85
10.3.1.4.	Proračun spregova .....	88
10.3.2.	Provjera graničnog stanja uporabljivosti .....	90
10.4.	DIMENZIONIRANJE CLT PLOČA.....	92
10.4.1.	Provjera graničnog stanja nosivosti.....	92
10.4.1.1.	Proračun ploče kata .....	92
10.4.1.2.	Proračun krovne ploče.....	96
10.4.2.	Provjera graničnog stanja uporabljivosti .....	100
10.4.2.1.	Proračun ploče kata .....	100
10.4.2.2.	Proračun krovne ploče.....	103

11. STATIČKI PRORAČUN U POŽARNOJ SITUACIJI.....	106
11.1. Proračun stupova u požarnoj situaciji .....	106
11.1.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta.....	107
11.1.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta.....	108
11.1.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta.....	109
11.2. Proračun grede ispod krovne ploče u požarnoj situaciji .....	110
11.2.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta.....	112
11.2.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta.....	113
11.2.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta.....	114
11.3. Proračun katne grede u požarnoj situaciji .....	115
11.3.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta.....	117
11.3.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta.....	118
11.3.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta.....	119
11.4. Proračun katne ploče u požarnoj situaciji .....	120
11.4.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta.....	121
11.4.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta.....	123
11.4.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta.....	125
11.5. Proračun krovne ploče u požarnoj situaciji .....	127
11.5.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta.....	128
11.5.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta.....	130
11.5.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta.....	132
12. USPOREDBA REZULTATA .....	134
13. ZAKLJUČAK .....	137

## 1. UVOD

Drvo predstavlja jedan od prvih građevinskih materijala korištenih u ljudskoj povijesti. Prve nosive konstrukcije slagane su upravo koristeći se materijalima koje su ljudi pronalazili u prirodi poput kamena i drveta. U ranim počecima služilo je čovjeku za izradu alata, oružja i ogrjev, kasnije se upotrebljava i za brodice, mostove, željezničke pragove te u mnogim drugim aspektima čovjekova života, čineći život lakšim i ugodnijim.



Slika 1.1 Prve nastambe- drveni kolci

U graditeljskom smislu, na samim počecima, iskopani rovovi su se pokrivali drvenim trupcima ili su se oko iskopanih jama postavljali drveni stupići koji su se zatim povezivali pleterom od šiba, premazivali blatom i pokrivali granjem, slamom ili trskom. Također, gradile su se i sojenice, na riječnim ili močvarnim područjima u svrhu zaštite od neprijatelja, zvijeri ili poplava.



Slika 1.2 Sojenica

Prateći povijest graditeljstva možemo zaključiti da je drvo kao građevinski element imalo iznimnu upotrebu, čemu nam svjedoči i sama činjenica da je u drugoj polovici srednjeg vijeka i zagrebački Gornji grad bio bogat drvenim zgradama. U Turopolju i Posavini mnoga sela u potpunosti su rađena drvom, a kao zanimljivost spomenutog područja su i drvene kapelice. Na slici 2 prikazana je kapela sv. Jurja kao jedna od najstarijih i najvrjednijih drvenih kapela u Posavini.



Slika 1.3 Drvena kapela Sv. Jurja-Turopolje

U Hrvatskoj, osobito u Zagorju, imamo dugu tradiciju gradnje drvenih kuća sa zidovima od gline s pljevom, sitnim granjem ili s isprepletenim šibama, s drvenim krovom u počecima pokrivenim slamom. Takve kuće su doživjele preko 100 godina, uz redovno održavanje zidova. Ovakav tip kuća nije imao betonski nego zemljani pod, a temelj su predstavljali naslagani veliki komadi kamena. Kroz povijest javljaju se različiti sustavi drvenih konstrukcija, jedan od prepoznatljivih sustava je definitivno kanatni sustav kojeg karakteriziraju arhitektonski naglašeni elementi stupova, greda i kosnika, koji se obvezno sijeku u kutovima zgrade i spajaju tesarskim vezama. Primjeri srednjovjekovne kanatne gradnje danas su urbano arhitektonsko nasljeđe nekih europskih regija (istočna i srednja Europa, Velika Britanija, sjeverna Njemačka, Danska i Nizozemska).



Slika 1.4 Drvena kuća-kanatni sustav

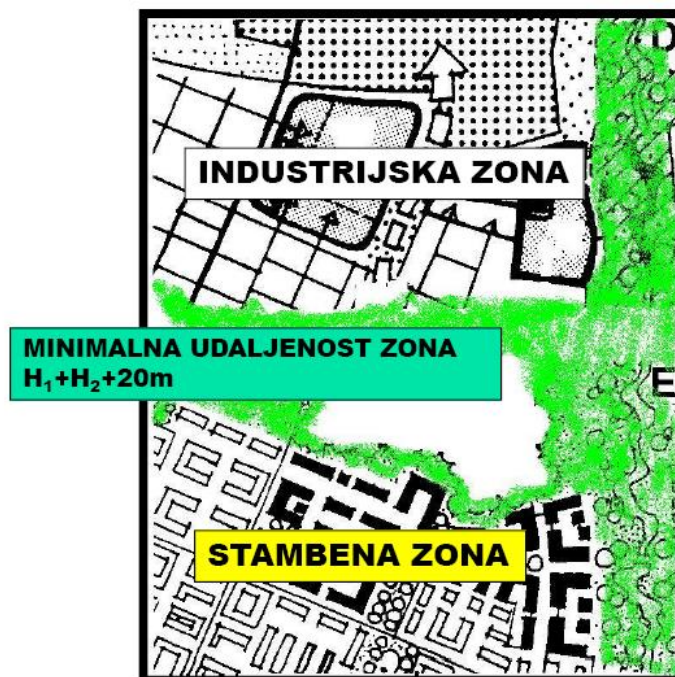
U 19. stoljeću razvija se gradnja laganih okvira, to su sustavi koji su se prvenstveno razvili u SAD-u, a kasnije se počinju primjenjivati i u Kanadi. Danas, promatrajući na svjetskoj razini, možemo reći da se svijet vraća prirodi, da lagano završava razdoblje primjene isključivo betona i čelika. Primjećujemo da se sve češće primjenjuje drvo kao konstruktivni element za obiteljske kuće, kao i za visoke zgrade poslovne, stambene ili društvene namjene. Razlozi veće primjene drva su mogućnost dobrog arhitektonskog oblikovanja, mogućnost pohranjivanja ugljikovog dioksida kao i sprječavanje zagađenja do kojeg dolazi pri proizvodnji čelika i betona. No promatrajući današnju arhitekturu Hrvatske, primjena drva kao osnovnog nosivog elementa za izvedbu zgrada je iznimno slaba. Kao zemlja čije 47% kopnene površine čine šume i šumske površine, Hrvatska bi trebala imati razvijenu drvnu industriju, obrazovati mlade ljude o kvaliteti i ponašanju drva, njegovoj važnosti i primjeni u graditeljstvu. Mnogi ljudi izbjegavaju primjenu drva zbog straha od njegova ponašanja pod djelovanjem potresa ili požara. Međutim drveni elementi izvrsno se ponašaju upravo pod ta dva djelovanja, npr. pod djelovanjem požara, glavni nedostatak drvene zgrade bit će čelik koji



će se koristiti za vezanje elemenata, osobito ako će biti izravno izložen požarnom opterećenju. U Hrvatskoj još uvijek vlada strah da primjenom drva povećavamo opasnost od pojave požara te ugrožavamo vlastitu sigurnost zbog njegove slabije požarne otpornosti, međutim promatrajući svjetsku razinu na kojoj je primjena drva iznimno velika, može se zaključiti da se ponašanje drva u požaru ipak ne ocjenjuje kao opasno.

Upravo zato, jedan od ciljeva ovog rada je analizirati ponašanje elemenata drvene zgrade slijepljenim lameliranim (LLD) stupovima i gredama te križno lijepljenim pločama (CLT) pod požarnim djelovanjem.

Drugi cilj ovog rada je pokazati da drveni elementi zadovoljavaju požarnu otpornost zahtijevanu Europskim normama, povećanjem presjeka za samo par centimetara u odnosu na minimalno zahtijevane dimenzije presjeka pod definiranim statičkim djelovanjima. Odredbama novog Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije definirana je obveza primjene norme HRN EN 1995-1-2 za slučaj kad se za drvenu konstrukciju zahtijeva poseban dokaz otpornosti na djelovanje požara. Metode proračuna, načela i pravila definirana u normi rezultat su opsežnih istraživanja oponašanja drva izloženog požaru i tehnika za "poboljšavanje" ponašanja drva [1]. Svrha ovog rada nije prezentiranje navedene norme, ali je bitno znati da se metode proračuna temelje na poznavanju i razumijevanju ponašanja drva u požaru te učinku pasivnih mjera zaštite na povećanje otpornosti drva na požarno djelovanje, odnosno utjecaju na produljenje vremena u kojem elementi, priključci i/ili dijelovi drvene konstrukcije zadržavaju projektiranu mehaničku otpornost i stabilnost, sprječavanju širenja vatre i dima kroz konstrukciju kao i širenje vatre na susjedne građevine, omogućenoj evakuaciji ljudi te omogućenoj zaštiti spasilačkog tim, što definira Zakon o gradnji. Sukladno tome u fazi izrade dokumentacije prostornog uređenja potrebni su podaci iz područja zaštite od požara koji se odnose na zahtjeve vezane za zoniranje (položaj industrijskih zona u odnosu na stambene), međusobnu udaljenost zona obzirom na njihovu namjenu i ružu vjetrova.



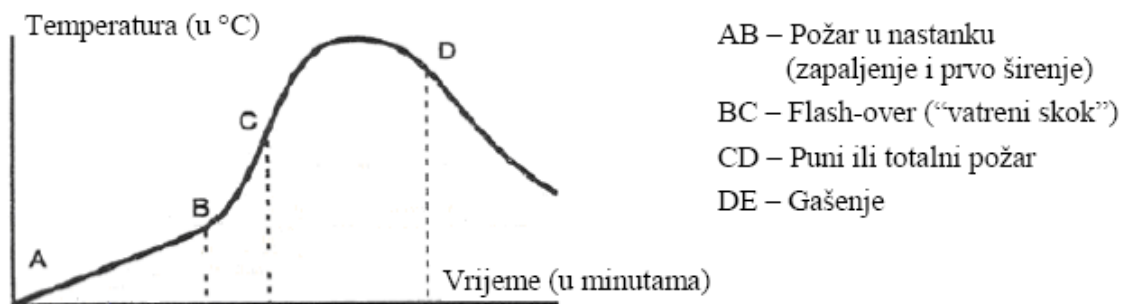
Slika 1.5 Udaljenost između industrijskih i stambenih zona

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 pasivnih mjera zaštite. Problematika koja se navodi kroz tekst bit će pokazana na pokaznom primjeru u radu.

## 2. POŽAR U EUROPSKIM NORMAMA ZA PROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJA (EUROKOD)

Požar je vrlo važan čimbeniku gradnji te ga je potrebno uzeti u obzir već u samom početku projekta jer može utjecati na odabir materijala ili konstrukcijskog sustava. U normi EN 1991-1-2 dana su potrebna pravila za opis toplinskog i mehaničkog djelovanja na konstrukcije koje su izložene požaru. Kod toga su uključeni aspekti pouzdanosti, postupci proračuna i modeli proračuna. Uz osnovne zahtjeve koje mora zadovoljiti, konstrukcija mora biti projektirana na taj način da u slučaju nastanka požara zadrži zahtijevana svojstva u određenom vremenskom periodu.

Požar se širi razvijanjem plamena, i sadrži četiri osnovne faze “stvarnog požara” prikazane na slici, pri čemu treba naglasiti važnost dviju faza– *požar u nastanku* i *puni požar*, sa različitim ponašanjem materijala unutar svake od njih.



Slika 2.1 Krivulja stvarnog požara

### 2.1. Požar u nastanku (zapaljenje i širenje)

Prvu fazu možemo definirati i kao početni požar. Ona obuhvaća čitav niz različitih procesa poput načina izgaranja materijala, stupnja zapaljivosti, brzine širenja vatre po površini i intenziteta provođenja topline. Požar se u ovoj fazi razvija vrlo sporo, ali s vremenom brzina razvoja požara se povećava. Temperatura raste polako i napreduje gotovo linearno, zapaljive tvari su prisutne u malim i ograničenim postocima te još nisu zahvaćene plamenom, usporeno je zagrijavanje okoline (zidovi i stropovi su još hladni i pojačano upijaju toplinu), a vlaga isparava iz svih materijala.



Slika 2.2 Početni požar-zapaljenje



Slika 2.3 Početni požar-širenje

## 2.2. *Flash-over* (“vatreni skok“)

Flash-over ili “vatreni skok“ prijelaz je (faza ili točka nakon koje nema povratka) iz faze nastanka u fazu punog požara. Ova faza obilježena je prepoznatljivim učincima požara: jakom svjetlošću, velikom toplinom, otvorenim plamenom te velikom brzinom širenja požara. Temperatura uspijeva destilirati zapaljive proizvode, a nastali plinovi u reakciji sa zrakom stvaraju zapaljivu mješavinu. Dolazi do razvoja velike topline što uzrokuje povećanje temperature okoline koja postaje dovoljna za zapaljenje, a potom, u eksponencijalnoj funkciji ubrzano raste dostižući 500/600°C u 5/25 minuta (ovisno o gorivu i dostupnoj količini inhibitora gorenja). Požar na početku zahvaća samo plinovita goriva, ali se brže širi na sva prisutna. Stvorena količina topline čini sve fenomene širenja praktički zanemarivim, a sva zaostala vlaga eliminira se velikom brzinom.



Slika 2.4 Faza vatrenog skoka

### 2.3. Puni ili totalni požar

Puni požar je faza u kojoj vatra zahvaća sve zapaljive materijale. Uslijed velike količine proizvedene topline dolazi do rasta temperature, dolazi do velike transmisije topline u okolinu jer su sad temperature u pregradama iznimno visoke, a trajanje ove faze ovisi o masi prisutnog goriva i doprinosu inhibitora. Potrebno svojstvo materijala jest sposobnost da održi nosivost i ograniči požar na područje nastanka kako širenje plamena ili proizvedenih plinova ne bi izazvalo visoke temperature na suprotnoj strani od one zahvaćene požarom, odnosno prijenos požara na okolna područja. Otpornost na požar prvenstveno će ovisiti o materijalu, međutim svojstvo odupiranja punom požaru pripisuje se pojedinom dijelu konstrukcije (ne materijalu) jer ponašanje nosivih elemenata ovisi i o drugim činiteljima (uvjeti na osloncima, visina na kojoj je požarno opterećenje i raspored opterećenja). Razvijene temperature više su i od 900 °C i rastu konstantno do dostizanja toplinske ravnoteže između vanjskog i opožarenog okruženja. Ova faza je najopasnija jer su moguća oštećenja (nekonstrukcijski elementi), otkazivanja (elementi i dijelovi konstrukcije) ili rušenje cijele konstrukcije, a širenjem plamena kroz otvore, nastajanjem iskri i užarenih dijelova požar može zahvatiti i susjedna područja.



Slika 2.5 Faza potpuno razvijenog požara

#### 2.4. Hlađenje ili gašenje na odsječku

Faza konačnog hlađenja (od 300°C do temperature okoline) vrlo je spora i jako opasna. Hladni materijal s površine skriva mjesta gdje vatra “tinja“ i moguće je novo zapaljenje. Zapaljivi materijal počinje se trošiti, disperzija postaje sve važnija (pregrade i otvori), temperatura se počinje smanjivati do 200/300°C, na početku polako, a zatim sve brže, i ovisi više o učinku isijavanja iz vrućih površina nego o novom gorenju.

#### 2.5. Mehanizmi sagorijevanja

Postoje tri osnovna parametra mehanizma sagorijevanja:

- *toplinski (energetski) potencijal*: količina termičke energije koja se razvija iz potpunog sagorijevanja materijala i ovisi o kalorijskoj vrijednosti materijala. Kalorijska vrijednost drva približno je stalna za istu botaničku vrstu
- *Gornji specifični toplinski kapacitet*: energija proizvedena sagorijevanjem jedinice mase potpuno suhe tvari (tvar čije sagorijevanje ne stvara vodu).
- *Donji specifični toplinski kapacitet*: energija proizvedena upijanjem vode sadržane u drvu koje nije potpuno suho ili je proizvedena tijekom reakcije i u stanju je vodene pare.

Kemijski sastav drva možemo podijeliti na ugljik, vodik i kisik što predstavlja osnovni razlog zapaljivosti drva te nemogućnosti učiniti ga nezapaljivim materijalom. Količina kisika prisutna u celulozi dovoljna je za gorenje bez vanjskih utjecaja što znači da drvo može goriti i bez dodatnog utjecaja zraka, tj. dodatnog prisustva kisika. Gorenje je posljedica toplinske razgradnje tvari od kojih se drvo sastoji. U mehanizmu sagorijevanja drva prevladava piroliza ili suha destilacija hemiceluloze koja stvara tvari topive u vodi (kiseline), drveni katran (mješavina tvari netopivih u vodi taloženih ispod kiseline i plinova koji se ne kondenziraju već su zapaljivi) i čvrsti ostatak, drveni ugljen. Kako smo požar okarakterizirali kao djelovanje na konstrukciju, tako on izaziva i njezine odgovore, toplinski odziv nastaje izlaganjem drva izvoru topline, pri čemu će u ovisnosti o prisutnosti zraka doći do proizvodnje energije dovoljne za uništenje svih tvari u zapaljivim spojevima. Daljnjim povećavanjem gorenja doći će do stvaranja ugljena koji će donekle štiti unutarnju masu od toplinskih djelovanja, ali zbog svoje morfologije (duboke brazde i istake) dozvoljava i izmjenu plinova između okoline i površine gorućeg materijala. Nastajanje brazdi vezano je za bržu (pri nižim temperaturama) toplinsku razgradnju celuloze u odnosu na lignin, što je jedan od razloga izgleda pougljenog sloja koji podsjeća na drvo napadnuto gljivicama.

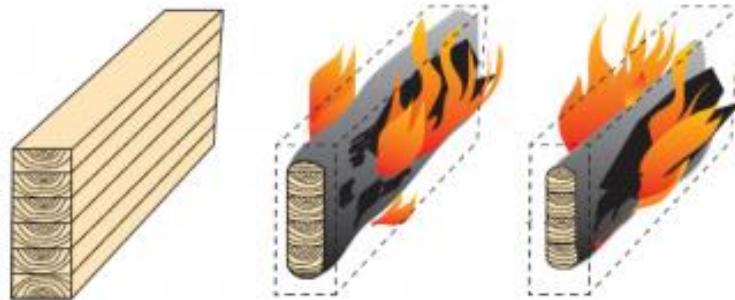


Slika 2.6 Prikaz oštećenja uslijed a) požarnog djelovanja b) napada gljivica

Pri temperaturi iznad 170 °C započinju pojave popraćene izmjenama strukture celuloze i proizvodnjom zapaljivih plinova pirolize koji pridonose širenju požara. Ulazak u “flash-over” fazu smatra se dostizanjem temperature od 200 - 220 °C. Leteće čestice koje se proizvedu sagorijevanjem kreću se prema vanjskoj površini hladeći ugljen, pri čemu uslijed učinka refleksije nastaje nazovi-stalna situacija, uspostavlja se ravnoteža između gubitka materije na površini i povlačenja nepromijenjenog drva, a sve se odvija brzinom pougljenja od 0,6 - 0,7

mm/minuti (ovisno o vrsti drva / proizvoda na osnovi drva). U sloju pirolize (području između pougljenog sloja i nepromijenjenog dijela presjeka) drvena supstanca vatrom je kemijski promijenjena, no još uvijek ne i potpuno razgrađena.

Ono što je svojstvenu drvu jest promjena presjeka, dok kod čeličnih elemenata dolazi do smanjenja mehaničkih svojstava. Stoga pri proračunu drvenih elemenata u požarnim situacijama promatramo samo nepromijenjeni dio ispod pougljenog sloja koji ima početne vrijednosti temperature i mehaničkih svojstava. Poznavanje ovog fenomena može u određenim scenarijima omogućiti određivanje vremena od trenutka zapaljenja do samog sloma. U realnoj požarnoj situaciji ispod pougljenog sloja nalazit će se sloj pirolize koji nije pougljen, ali mehanička svojstva drva su izmijenjena uslijed djelovanja temperature. Upravo na ove dvije konstatacije će se zasnivati metoda smanjenja poprečnog presjeka i metoda smanjenja mehaničkih svojstava[1].

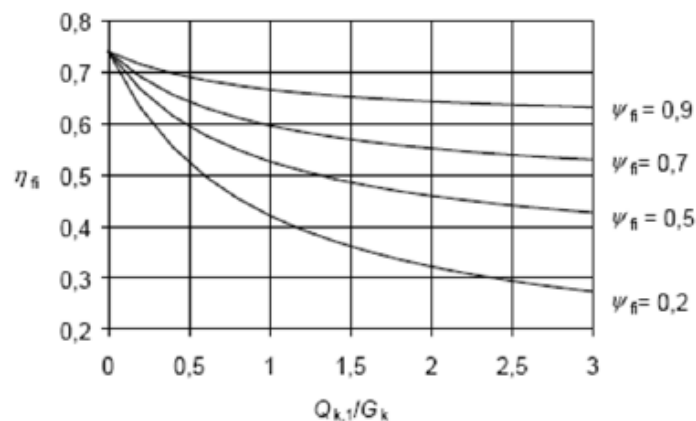


Slika 2.7 Smanjenje nosivog dijela presjeka pod utjecajem požara



### 3. OPĆA ANALIZA KONSTRUKCIJE

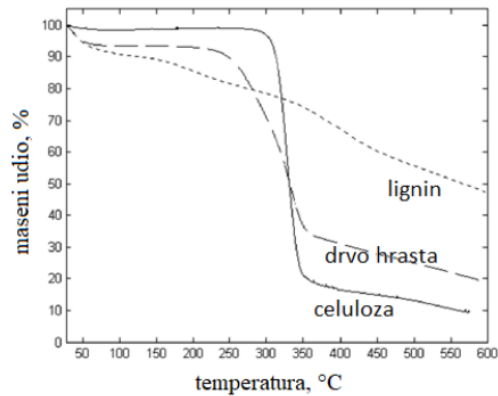
Opće pravilo koje vrijedi za sve tipove konstrukcija i koje ona mora zadovoljiti kaže da proračunska vrijednost djelovanja,  $E_{d,fi}$ , mora biti manja ili jednaka vrijednosti odgovarajuće proračunske otpornosti  $R_{d,fi}$  ( $E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$ ).  $E_{d,fi}$  predstavlja reduciranu vrijednost proračunskog djelovanja  $E_d$  za običnu temperaturu. Redukcija se vrši tako da se proračunsko djelovanje pomnoži s faktorom redukcije promatranog opterećenja tijekom požara  $\eta_{fi}$ . Osim što norma EN 1995-1-2 daje izraz za  $\eta_{fi}$ , on se također može očitati ovisno o faktoru kombinacije  $\psi_{fi}$  i o omjeru  $Q_{k,1}/G_k$ .



Slika 3.1 Očitavanje faktora redukcije  $\eta_{fi}$  u ovisnosti o faktoru kombinacije  $\psi_{fi}$  i o omjeru  $Q_{k,1}/G_k$

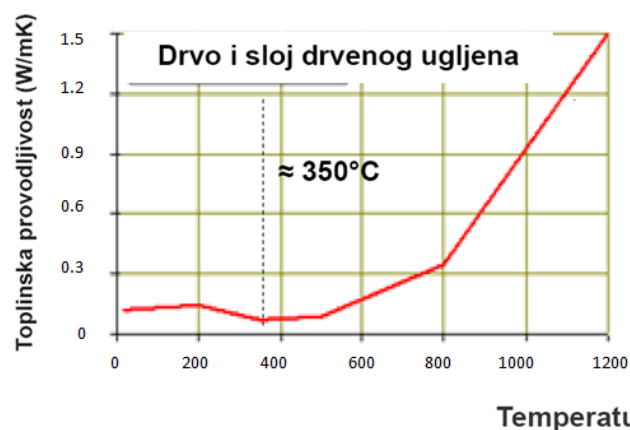
#### 3.1. Toplinska svojstva drva

Izlaganjem drva visokim temperaturnim djelovanjima uzrokovat će hlapljenje tvari koji će u dodiru s otvorenim plamenom gorjeti. Tako da tvrdnja da drvo ne gori, koja se čini nevjerovatna, je točna, jer zapravo gore plinovi koji iz drva isparavaju pri visokim temperaturama. [2] Toplinska svojstva drva određuju se termogravimetrijskim analizama. Drvo zagrijavamo u peći u zaštitnoj atmosferi dušika na temperaturu od 500 do 600°C te se tijekom procesa pirolize mjeri gubitak mase izražen u postotcima. Nakon tog koraka temperatura se smanji na približno 300°C, a u peć se pusti zrak te se uz postepeno zagrijavanje izgara drveni ugljen, čvrsta tvar nastala kao produkt pirolize drva.



Slika 3.2 Rezultati termogravimetrijske analize drva hrasta, čiste celuloze i lignina[3]

Toplinska provodljivost drva, mjerena pri vlažnosti od 12%, kreće se između 0,4 i 1,2 W/mK, a ovisit će o zapreminskoj masi, vlažnosti, smjeru vlaknaca, nepravilnostima u građi te utjecaju temperature. Povećavanjem temperature, zapreminske mase i vlažnosti, rasti će i toplinska provodljivost drva. Glavna karakteristika drva je anizotropnost, tako će i svojstvo provodljivosti topline drva biti u smjeru vlaknaca 1,5-2,8 puta veće nego okomito na vlakanca. Specifični toplinski kapacitet drveta gotovo je neovisan o volumenskoj masi i vrsti drva, primaran utjecaj na njega imat će temperatura i vlažnost drva. Toplinsko širenje drva u smjeru vlaknaca je vrlo malo. U radijalnim i tangencijalnim smjerovima, širenja uslijed temperaturnih djelovanja su mnogo veća.



Slika 3.3 Promjena toplinske provodljivosti drva obzirom na promjenu temperature[4]

Tablica 3.1 Toplinska vodljivost i srednji specif. topl. kapacitet drva i drvenog ugljena

		Gustoća g/cm <sup>3</sup>	Toplinska provodljivost W/(mK)	Specifični toplinski kapacitet kJ/(kgK)
Ugljen	s vlakancima	0,28	0,15	0,963
	^ na vlakanca		0,1	
Drvo	s vlakancima	0,45	0,38	1,34-2,01
	^ na vlakanca		0,15	

Tablica 3.2 Usporedba vrijednost toplinske vodljivosti između različitih vrsta drva

Materijal	četinjače	listače
Koef.topl.vodljivosti; W/(mK)	0,13	0,75

### 3.2. Proračunske vrijednosti karakteristika materijala

Za određivanje mehaničke otpornosti potrebno je prvo odrediti proračunske vrijednosti čvrstoće  $f_{d,fi}$  i krutosti materijala  $S_{d,fi}$ , po definiranim izrazima:

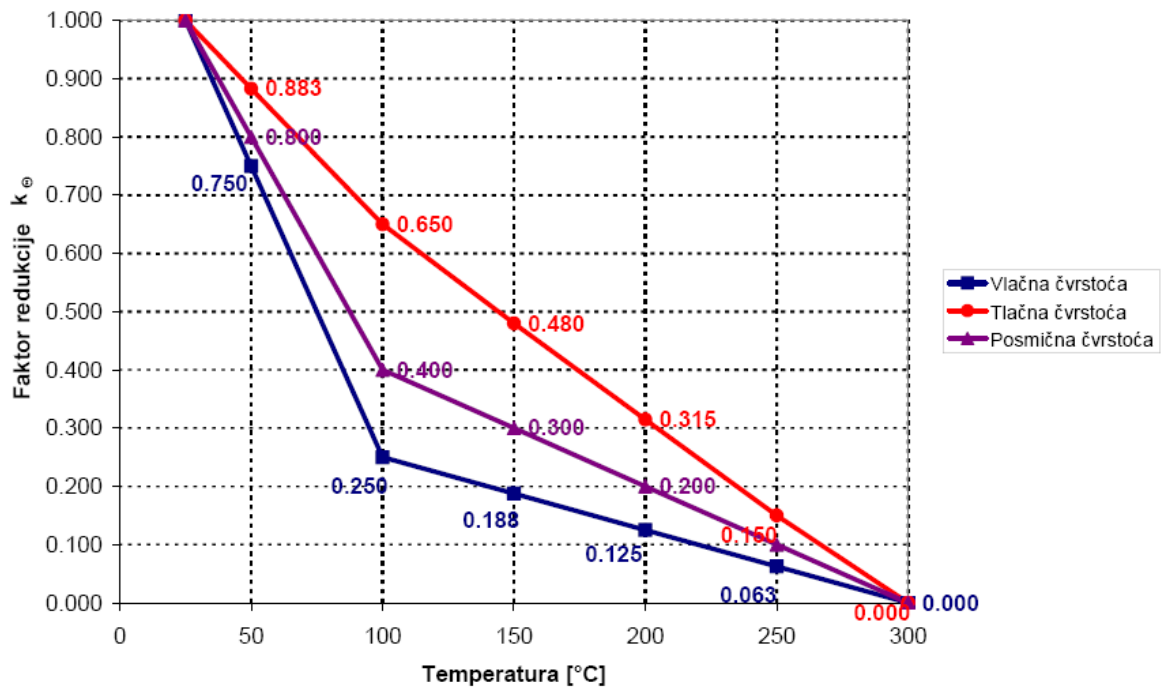
$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{i} \quad S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

Pri čemu će se vrijednosti faktora modifikacije u požarnoj situaciji,  $k_{mod,fi}$ , uzimati ovisno o metodi proračuna promatranog elementa, 20%-tni fraktil čvrstoće  $f_{20}$  dobije se množenjem faktora redukcije  $k_{fi}$  s karakterističnom čvrstoćom pri normalnoj temperaturi  $f_k$ . Analogno tomu  $S_{20}$  dobije se množeći faktor redukcije  $k_{fi}$  i 5%-tni fraktil krutosti,  $S_{05}$ , (modul elastičnosti ili modul posmika) pri normalnoj temperaturi. Preporučena vrijednost parcijalnog faktora sigurnosti za drvo u požarnoj situaciji iznosi  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ , ali se ta vrijednost može posebno definirati u nacionalnom dodatku pojedine države.

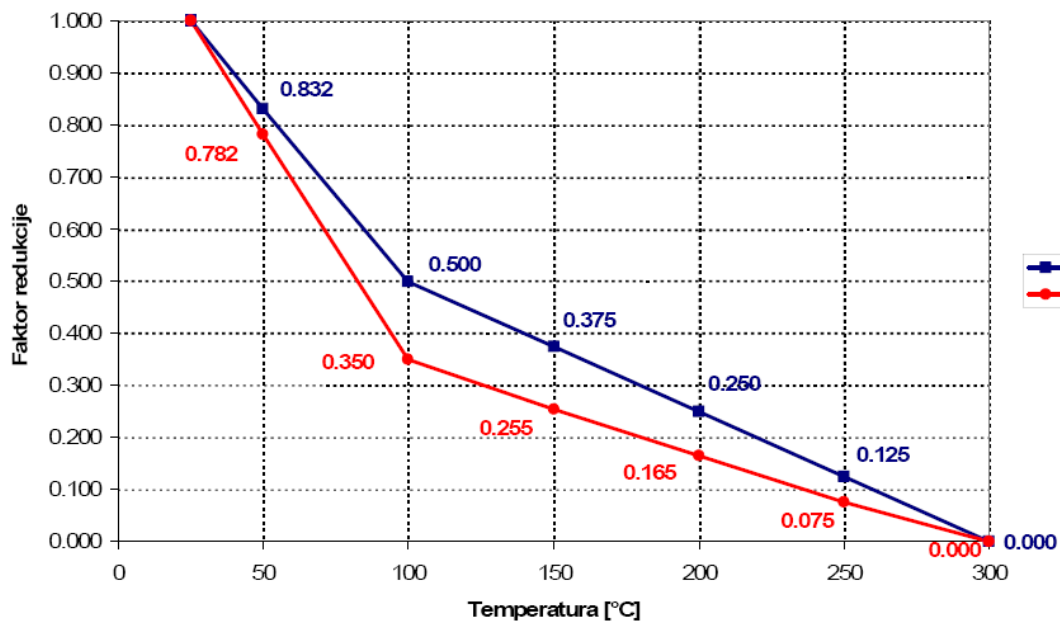
Tablica 3.3 Vrijednosti faktora redukcije  $k_{fi}$

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

Promjena mehaničkih svojstava drveta pod utjecajem temperaturnog djelovanja prikana je na sljedeća dva dijagrama koji prikazuju postotak smanjenja čvrstoće i modula elastičnosti pri povišenoj temperaturi.[5]



Slika 3.4 Smanjenje čvrstoće drva pod povećanjem temperature-predavanja



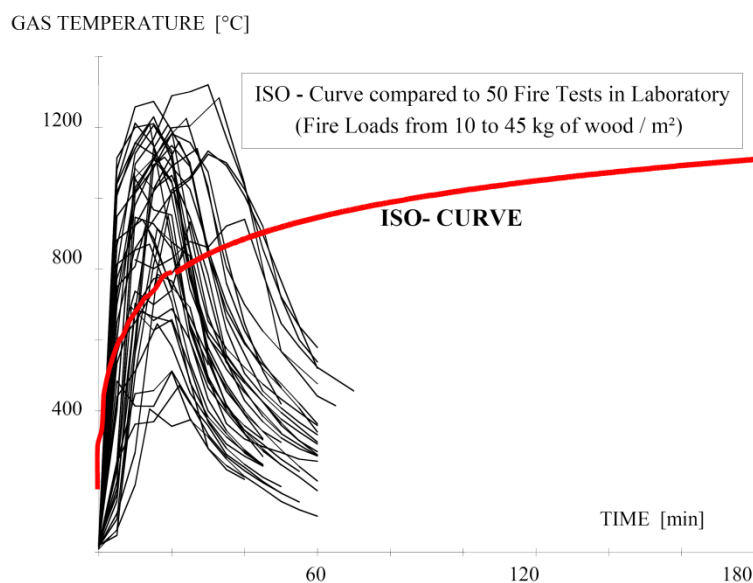
Slika 3.5 Smanjenje modula elastičnosti drva pod povećanjem temperature

### *3.3. Dubina pougljenja*

Usljed požarne situacije i požarnog djelovanja dolazi do smanjenja poprečnog presjeka drva što je posljedica pougljenja drva te se kao takva mora uzeti u obzir pri određivanju proračunskog poprečnog presjeka. Dubina pougljenja predstavlja udaljenost između ruba elementa u određenom trenutku tijekom požara i vanjskog ruba elementa neposredno prije djelovanja požara. Ta redukcija presjeka se mora uzeti u obzir pri proračunu svih drvenih površina i panela na osnovi drva koji su direktno izloženi požarnu kao i kod proračuna površina koje su prethodno zaštićene različitim protupožarnim oblogama.

#### 4. STARI PRISTUP

Do nedavno, zahtjevi otpornosti na požar određene građevine bili su neovisni od prisutnosti sustava za detekciju, izvlačenje dima ili sprinklera. Požarna otpornost građevine temeljila se na standardnoj ISO krivulji te jedina mogućnost za određivanje požarne otpornosti bilo je vršenje testova u laboratoriju. Na slici 4.1. prikazana je usporedba između mogućih prirodnih požarnih krivulja dobivenih realnim pokusima i standardne ISO požarne krivulje. [6]



Slika 4.1 Krivulje prirodnih (realnih) požara i standardna ISO požarna

Današnji zahtjevi za konstrukciju temeljeni na ISO krivulji ovise o visini građevine i njenoj popunjenosti (zaposjednutosti) korisnicima. Postoje četiri ISO krivulje, a koje se razlikuju po vremenskom dostizanju maksimuma (ISO krivulje s maksimumom na 30, 60, 90 i 120 minuta). Upotrebom jedne od četiri krivulje pokušavaju se fizički fenomeni i karakteristike (požar, ventilacija, podijeljenost na odjeljke, tip konstrukcijskog elementa, uvjeti evakuacije, sigurnost tima za spašavanje, aktivne mjere zaštite od požara) svesti na termin ISO trajanja požara. Standardna ISO krivulja koju koriste trenutni propisi je prejednostavna, nerealistična i vodi do neekonomičnih situacija bez garancije sigurnosti proporcionalne uloženom novcu. Kod ISO krivulje nema faze opadanja (hlađenja) požara, te u požarnom sektoru predviđa samo jednu temperaturu (model jedne zone).

Kao alternative određivanja otpornosti elementa u slučaju požara, predviđena je primjena parametarskih krivulja temperatura – vrijeme. Dakle za razvoj temperature plina u ovisnosti o

vremenu uvode se fizikalni parametri kao što su požarno opterećenje, geometrija požara, svojstva zidova požarnog sektora itd.

#### 4.1. Standardni požar

EN 1995-1-2[7] daje dvije vrijednosti brzine sagorijevanja,  $\beta_0$ , za izloženost samo jedne strane i  $\beta_n$  za višestranu izlaganje elementa požaru.

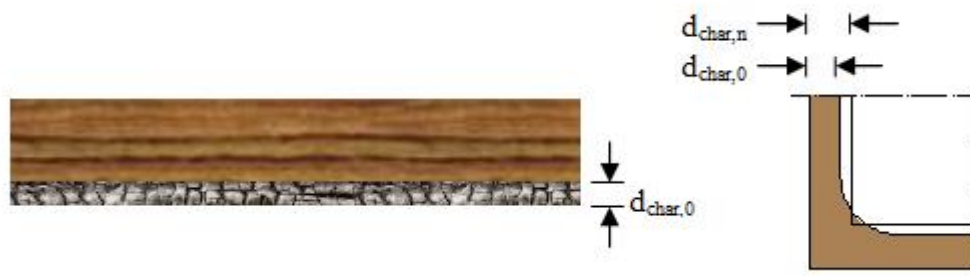
$$d_{char,n} = \beta_n \times t$$

gdje je:

$d_{char,n}$  dubina pougljenja (uzima u obzir i efekt zaobljenja rubova s radijusom zaobljenja koji je jednak dubini ugljena za izloženost požaru s jedne strane  $d_{char,0}$ )

$\beta_n$  brzina sagorijevanja prema tablici 3.1.

t vrijeme izlaganja požaru.



Slika 4.2 Eurokod razlikuje dvije vrste dubine pougljenja;  $d_{char,0}$  (dubinu pougljenja za jednodimenzionalno izgaranje) i  $d_{char,n}$  (dubinu pougljenja koja uzima u obzir i zaobljenje rubova pri izgaranju)

Tablica 4.1 Brzine sagorijevanja ovisno o klasi drva

Klasa drva		$\beta_0$	$\beta_n$
Meko drvo	lamelirano ( $\rho > 290 \text{ kg/m}^3$ )	0,65	0,7
	puno ( $\rho > 290 \text{ kg/m}^3$ )	0,65	0,8
Tvrdo drvo	puno ili lamelirano ( $\rho = 290 \text{ kg/m}^3$ )	0,65	0,7
	puno ili lamelirano ( $\rho > 450 \text{ kg/m}^3$ )	0,5	0,55

## 5. NOVI PRISTUP (REALNI ILI STVARNI POŽAR)

Novi pristup rješavanju problema požara, najčešće zvan „Globalni koncept sigurnosti od požara“ („Global Fire Safety Concept“) uzima u obzir parametre koji utječu na pojavu i širenje požara kao što su:[8]

- vjerojatnost pojave požara (širenje, trajanje, požarno opterećenje)
- uvjeti ventilacije (dovoljno kisika ili ne)
- požarni sektor (karakteristike, veličina, geometrija itd.)
- tip konstrukcijskog elementa
- uvjeti evakuacije
- sigurnost tima za spašavanje
- rizik za susjedne građevine
- aktivne mjere za suzbijanje
- utjecaj sprinklera

te razmatra sljedeće korake:

- kvantificira rizik početnog požarnog djelovanja, veličine razmatrane vatrene pregrade i njene popunjenosti i uzima u obzir utjecaj aktivnih protupožarnih mjera; ova analiza rizika temelji se na postojećim statističkim podacima realnih požara i probabilističkim metodama,
- iz prethodnog koraka odredi se projektna vrijednost glavnog parametra, tj. požarnog opterećenja,
- određivanje proračunske toplinske krivulje kao funkcije proračunskog požarnog opterećenja koji implicitno uzima u obzir rizik požara,
- simulira globalno ponašanje konstrukcije izložene proračunskoj toplinskoj krivulji u kombinaciji sa statičkim opterećenjem u slučaju požara,
- utvrđuje proračunske vremenske otpornosti na požar  $t_{fi,d}$ ; ona često može biti neograničena kada je konstrukcija u mogućnosti podnijeti statičko opterećenje i nakon prestanka prirodnog požara,
- provjerava sigurnost konstrukcije uspoređivanjem proračunske vremenske otpornosti na požar  $t_{fi,d}$  sa zahtijevanim vremenom  $t_{fi,requ}$  ovisno, kako o vremenu evakuacije



stanara, tako i o posljedicama otkazivanja; u većini slučajeva zahtijevano vrijeme  $t_{fi,requ}$  propisano je u normama od strane nacionalnih autoriteta.

### 5.1. Realni požar

Za razliku od standardnog požara gdje je brzina sagorijevanja konstantna, kod realnog požara uzimaju se u obzir za brzinu sagorijevanja karakteristike same prostorije u kojoj se nalazi element (površina otvora, podova, zidova, pregrada), gustoća požarnog opterećenja, te fizikalne karakteristike drvenog elementa. Postupak se provodi po niže navedenim izrazima koji se nalaze u normi HRN EN 1995-1-2 AneksA[7].

$$d_{char,n} = \beta_{par} \times t \quad \text{za } 0 \leq t \leq t_0$$

$$d_{char,n} = \beta_{par} \times (1,5t_0 - t^2/4t_0 - t_0/4) \quad \text{za } t_0 \leq t \leq 3t_0$$

$$d_{char,n} = 2\beta_{par} \times t_0 \quad \text{za } 3t_0 \leq t \leq 5t_0$$

gdje je:

$t$  vrijeme u minutama,

$t_0$  parametar koji daje vrijeme kad je izgaranje najveće, a ovisan je o karakteristikama požara i veličini odjeljaka,  $t_0 = 0,009 \times q_{t,d}/O$

$q_{t,d}$  gustoća požarnog opterećenja [MJ/m<sup>2</sup>],

$O$  faktor otvora [m<sup>0,5</sup>],  $O = A_v \sqrt{h_{eq}}/A_t$

$A_v$  površina otvora u vertikalnim zidovima,

$A_t$  površina podova, zidova i pregrada koji zatvaraju odjeljak,

$h_{eq}$  prosječna visina vertikalnih otvora,

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08}$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{\sqrt{\rho c \lambda}}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} \quad \text{koeficijent toplinskih karakteristika zidova i podova odjeljaka,}$$

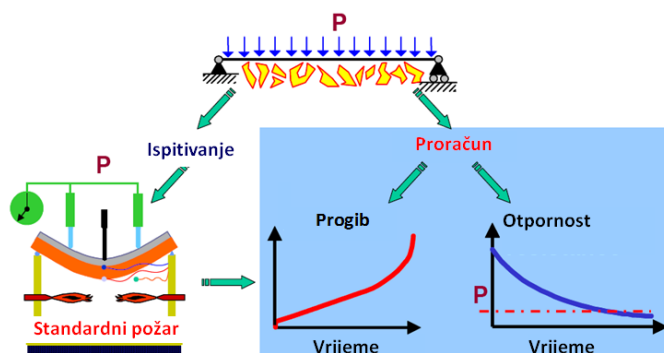
$\sqrt{\rho c \lambda}$  koeficijent apsorpcije.

Razvoj požara unutar građevine može se općenito podijeliti u nekoliko faza:

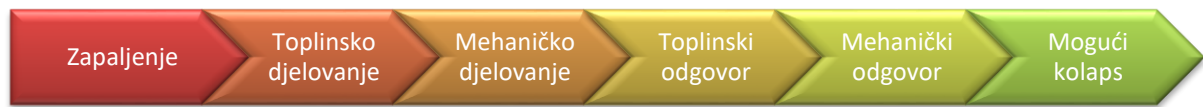
1. Zapaljenje (ignition) – temperatura plina je niska i nema utjecaja na konstrukciju
2. Širenje (propagation) – u fazi širenja požar može:
  - 2a) buknuti (flashover)
  - 2b) lokalizirati (localised) se
3. Potpuno razvijen požar – (fully developed)
4. Faza hlađenja – (cooling phase)

### 5.2. Događanja na konstrukciju izloženu požarnom djelovanju

Na primjeru mehaničkog odgovora konstrukcije kod požara najbolje se može uočiti razlika između starog i novog pristupa zaštiti konstrukcija od požara. Naime, kako smo požar okarakterizirali kao djelovanje na konstrukciju, tako on izaziva i njezine odgovore. Slijed događaja na konstrukciji pojavom požara prikazan je na slici 5.2. Nekad se otpornost konstrukcijskih elemenata na požar određivala na temelju ispitivanja elemenata u požarnoj komori koji su bili izloženi standardnom požaru koji je predstavljen ISO 834 požarnom krivuljom. Novi inženjerski pristup omogućava problem zaštite od požara obuhvatiti numeričkim postupkom.



Slika 5.1 Dva različita pristupa određivanja mehaničkog odgovora kod požara



Slika 5.2 Slijed događaja na konstrukciju pojavom požara

Obzirom na navedeno razmatranje mogu se rezimirati sljedeći pojmovi:

- Toplinsko djelovanje -povećanje temperature plina u požarnom sektoru, ono upravlja uvjetima prijenosa topline na površini konstrukcijskog elementa,
- Mehaničko djelovanje -djelovanje  $G$  (stalno) +  $Q$  (promjenjivo) u trenutku nastanka požara,
- Toplinski odgovor -rezultat toplinskog djelovanja, dovodi do povećanja temperature u elementu,
- Mehanički odgovor -izaziva toplinski odgovor u kombinaciji sa mehaničkim djelovanjem(moguć je kolaps)

Prvi korak u analizi konstrukcije u slučaju djelovanja požara je određivanje toplinskog djelovanja. Toplinsko djelovanje može se odrediti primjenom jedne od nominalnih krivulja požara ili provođenjem računske analize konstrukcije. Kako prva metoda nema ‘inženjerski’ karakter i projektanta svodi na pasivnu ulogu, razvijaju se brojne metode i pokušavaju naći najefikasniji načini računske analize.

Odabir i identifikacija scenarija požara predstavlja početak koncepta pouzdanosti konstrukcija kod prirodnog požara. Može se reći da procjena rizika i scenarij nastanka požara predstavlja presudan aspekt kod postupka dokaza pouzdanosti konstrukcija izloženih djelovanju požara.

### 5.3. Računska analiza

Računska analiza u slučaju požara treba obuhvatiti korake:

- odabir scenarija računskog požara

- određivanje računskog požara
- proračun temperature konstrukcijskog elementa
- proračun mehaničkog odgovora

Požar se smatra izvanrednim djelovanjem i to je fenomen silovitog zapaljenja, kojeg čovjek ne kontrolira, događa se na nepredvidivim lokacijama i prouzročen je slučajnim doprinosom energije. Vjerojatnost njegova pojavljivanja u kombinaciji sa zapaljivošću drva predstavlja najveću prepreku za primjenu ovog materijala u graditeljstvu (posebno u stanogradnji) što svakako zaslužuje posebno razmatranje. Obzirom na mehanička djelovanja, općenito je prihvaćena činjenica da je vjerojatnost pojave požara u građevini u kombinaciji s ekstremnim mehaničkim djelovanjima vrlo mala. Razina opterećenja kod otpornosti na požar koristi druge sigurnosne faktore od onih korištenih kod normalnog projektiranja građevine. Osnovna formula za proračun relevantnih efekata djelovanja sadržana je u EN 1990 i EN 1991-1-2 i glasi:

$$\Sigma G_{k,j} + (\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i} + \Sigma A_{d,t} \equiv \text{statičko djelovanje} + \text{izvanredno djelovanje}$$

gdje je:

$G_{k,j}$  – karakteristična vrijednost stalnog djelovanja

$Q_{k,1}$  – karakteristična vrijednost dominantnog promjenjivog djelovanja

$Q_{k,i}$  karakteristična vrijednost pratećeg promjenjivog djelovanja

$A_{d,t}$  karakteristična vrijednost izvanrednog djelovanja

### 5.3.1. Dvije metode proračuna drvenih konstrukcija na djelovanje požara

Čvrstoća i krutost za granično stanje nosivosti kod požara ne proračunavaju se za uobičajene 5% fraktile, već za 20% fraktile. Računske vrijednosti čvrstoće  $f_k$  i krutosti  $S_{05}$  množe se sa faktorom  $k_{fi}$  koji ima vrijednost 1,25 za tvrdo drvo i 1,15 za lamelirano.

Prva metoda proračuna koristi povećanje dubine pougljenja uslijed koje dolazi do smanjenja otpornosti elementa i poznata je kao "**metoda efektivnog presjeka**". Ova metoda

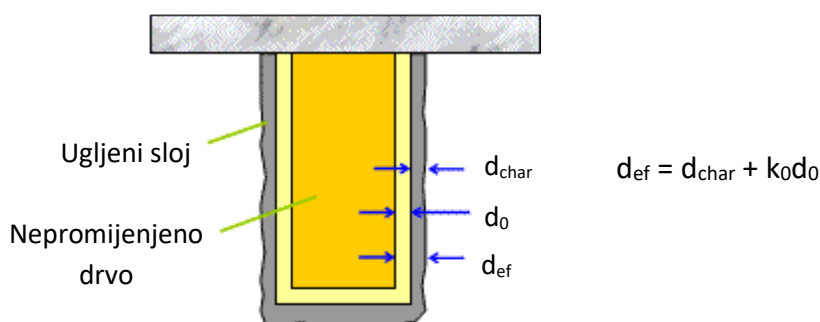
pretpostavlja da materijal uz samu granicu sa pougljenim dijelom presjeka  $k_{od0}$  nema čvrstoću niti krutost, dok su mehanička svojstva preostalog dijela poprečnog presjeka ostala ista. Efektivni poprečni presjek se izračuna na način da se od početnog poprečnog presjeka oduzme efektivna dubina redukcije. Efektivna dubina redukcije  $d_{ef}$  dana je kao zbroj  $d_{char,ni}$  dodatnog faktora  $k_{od0}$ :

$$d_{ef} = d_{char,ni} + k_{od0},$$

gdje je:  $d_0 = 7\text{mm}$ ,

$$k_0 = t/20 \quad (k_0 = 1 \text{ za } t > 20 \text{ min})$$

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$



Slika 5.3 Efektivna dubina redukcije  $d_{ef}$  kod metode efektivnog presjeka

Druga metoda uzima redukciju presjeka samo kao posljedicu sagorijevanja i znana je kao "metoda reducirane čvrstoće i krutosti"[7]. U njoj su čvrstoća i modul elastičnosti reducirani faktorom modifikacije  $k_{mod,fi}$  koji je dan posebno za čvrstoće na savijanje, tlak i vlak, te modul elastičnosti. Ova metoda najčešće se primjenjuje za meko drvo, pravokutnog ili kružnog poprečnog presjeka izloženo požaru sa tri ili četiri strane.

Za  $t > 20$  min,  $k_{mod,fi}$  za glasi:

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} * \frac{p}{A_r}, \quad \text{čvrstoća na savijanje}$$

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{330} * \frac{p}{A_r}, \quad \text{vlačna čvrstoća i modul elastičnosti}$$

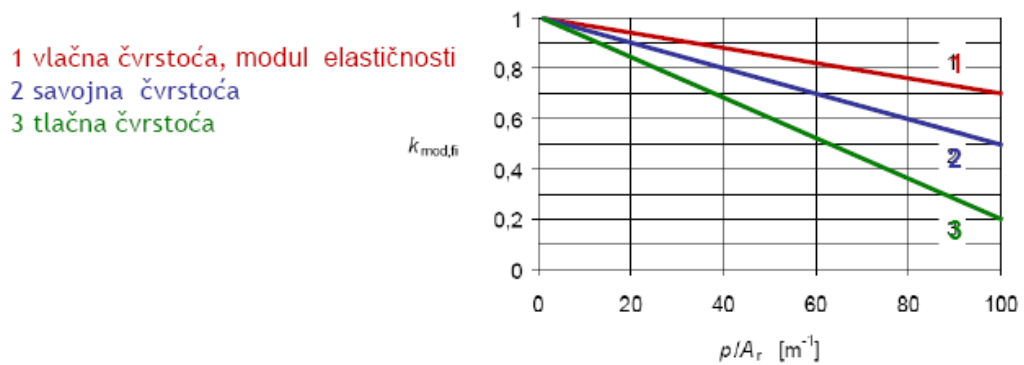
$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} * \frac{p}{A_r}, \quad \text{tlačna čvrstoća}$$

gdje je:

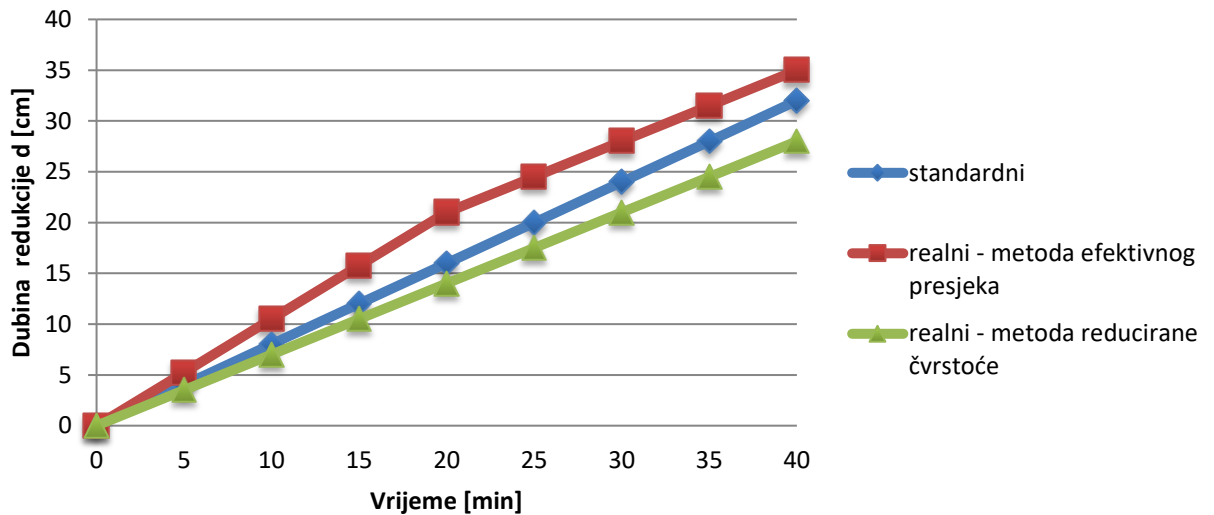
$p$  grijano područje (opseg reduciranog poprečnog presjeka),

$A_r$  površina reduciranog poprečnog presjeka.

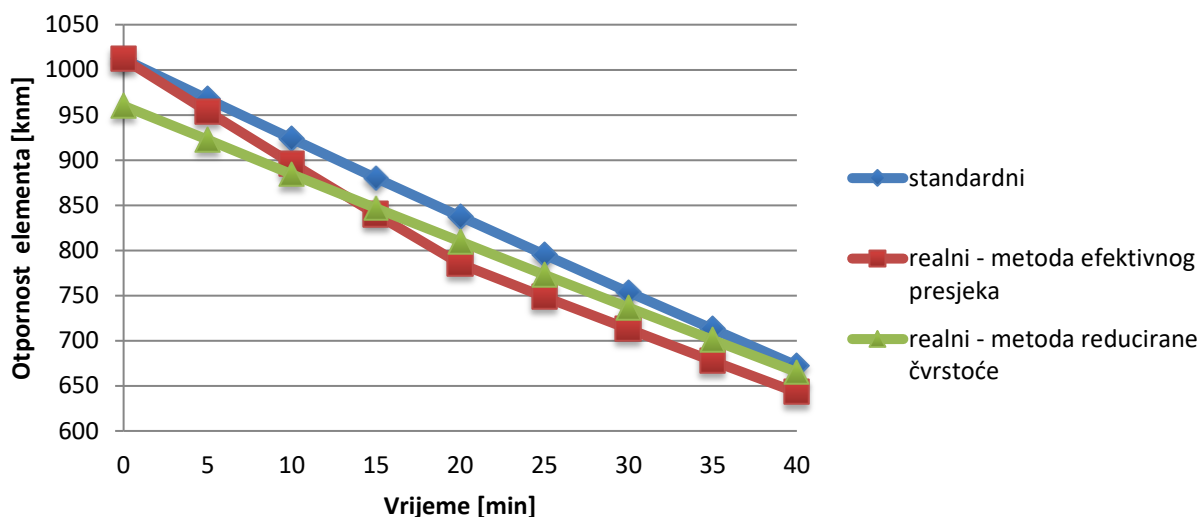
Za  $t < 20$  min  $k_{mod,fi}$  dobiva se linearnom interpolacijom između vrijednosti  $k_{mod,fi} = 1$  i one dobivene već navedenim izrazima.



Slika 5.4 Promjena  $k_{mod,fi}$  u ovisnosti o  $\rho/A_r$



Slika 5.5 Usporedba veličine redukcije poprečnog presjeka pri različitim proračunima požara (za primjer je uzet nosač dimenzija 220×1000mm, klase GL24k i faktora otvora  $O = 0,02636 m^{0,5}$ )



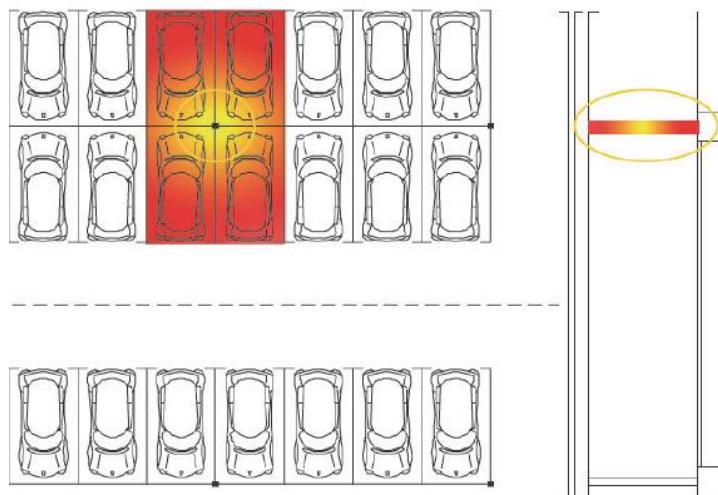
Slika 5.6 Usporedba promjene otpornosti poprečnog presjeka pri različitim pristupima proračunu požara (za primjer je uzet nosač dimenzija 220×1000mm, klase GL24k i faktora otvora  $O = 0,02636 \text{ m}^{0,5}$ )

Promatrajući *slike 5.5 i 5.6* dolazimo do zaključka da je otpornost elementa veća ako smo slučaj promatrali kao da na njega djeluje standardni požar. Uzimajući pak u obzir realni požar, dobivamo nešto manje, ali realističnije vrijednosti otpornosti elementa. Na slikama se također vidi i razlika između dvije različite metode proračuna kod realnog požara. U početnim minutama razvoja požara nešto veće vrijednosti otpornosti daje nam metoda efektivnog presjeka, dok metoda reducirane čvrstoće daje veće vrijednosti otpornosti kod dužeg trajanja požara.

### 5.3.2. Određivanje scenarija računskog požara

Identifikacija požarnog scenarija predstavlja početak definiranja koncepta pouzdanosti realnog požara. Da bi odredili izvanrednu proračunsku situaciju potrebno je odrediti proračunski požarni događaj i s njim povezni proračunski požar na temelju prosuđivanja požarnog rizika. Požarni scenarij opisuje se požarnim modelima različitih stupnjeva složenosti. Za najjednostavnije metode će vrijeme otpornosti na standardni požar biti definirano u normama, dok je kod složenijih metoda utjecaj realnog požara potrebno uzeti u obzir pristupom ekvivalentnog vremena otpornosti.

Scenarij računskog požara ovisit će o veličini i tipu izvora zapaljenja, raspodjeli i vrsti goriva, širenju požara, gustoći požarnog opterećenja, uvjetima ventilacije, veličini požarnog sektora, utjecaju požara na nosive elemente.



Slika 5.7 Određivanje požarnog scenarija

### 5.3.3. Dvije razine određivanja gustoće požarnog opterećenja

Obzirom na određivanje računске gustoće požarnog opterećenja,  $q_{f,d}$ , razlikuju se dvije razine:

- *Razina 1 – probabilistički pristup* [9]

$$q_{f,d} = \gamma_{q,f} \cdot q_{f,k} \text{ [MJ/m}^2\text{]}$$

gdje je:

$q_{f,k}$  – karakteristična vrijednost gustoće požarnog opterećenja koja se odnosi na površinu poda  $A_f$ ;

$\gamma_{q,f}$  – globalni faktor koji se raščlanjuje na parcijalne faktore.

- *Razina 2 – semiprobabilistički (normirani) pristup* [10]

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \text{ [MJ/m}^2\text{]}$$

gdje se globalni faktor zamjenjuje s više parcijalnih faktora;



$q_{f,k}$  – karakteristična vrijednost gustoće požarnog opterećenja koja se odnosi na površinu pod  $A_f$ ;

Tablica 5.1 Karakteristična gustoća požarnog opterećenja na jedinicu površine

Namjena	prosječno	s 80% fraktilom (Gumbel)
Stanovanje	780	948
Bolničke sobe	230	280
Hotelske sobe	310	377
Knjižnica	1500	182
Ured	420	511
Školska učionica	285	347
Trgovački centar	600	730
Kino, kazalište	300	365
Prijevoz	100	122

$m$  - faktor izgaranja (obično se uzima za celulozne materijale  $m=0,8$ );

$\delta_{q1}$  - faktor koji uzima u obzir rizik nastanka (aktiviranja) požara uslijed veličine odjeljka

Tablica 5.2 Faktor veličine odjeljka

$A_f$ (m <sup>2</sup> )	$\delta_{q1}$
25	1,10
250	1,50
2500	1,90
5000	2,00
10000	2,13

$\delta_{q2}$  - faktor koji uzima u obzir rizik nastanka (aktiviranja) požara uslijed namjene prostorije

Tablica 5.3 Faktor vezan uz namjenu

Namjena	$\delta_{q2}$
Galerija, muzej, bazen	0,78
Uredi, stanovanje, hotel, industrija papira	1,00
Proizvodnja strojeva i uređaja	1,22
Kemijski laboratorij, radionice za bojanje	1,44
Proizvodnja eksplozivnih tvari i boja	1,66

$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$  - faktor koji uzima u obzir različite aktivne mjere zaštite od požara

(ukoliko se te mjere ne mogu predvidjeti uzima se  $\delta_n = 1,5$ )

Razina 2 određivanja računskog požarnog opterećenja prikladna je za praksu i daje rješenje koje je na strani veće pouzdanosti. Pristup razine 2 određivanja računskog požarnog opterećenja usvojen je u EN 1991-1-2 (Annex E)[10].

#### 5.3.4. Računski požar

Računski požar predstavlja potanko opisani razvoj požara koji se usvaja radi proračuna konstrukcije u slučaju pojave požara. Da bi se odredio računski požar potrebno je u prvom redu odrediti požarno opterećenje  $Q_{fi}$ . Ovo se opterećenje definira kao zbroj toplinske energije koja se oslobađa izgaranjem gorivog materijala u prostoru građevine. Požarno opterećenje obično se definira kao statistička veličina. Obično se požarno opterećenje  $Q_{fi}$  izražava po jedinici površine poda, te se u tom slučaju naziva gustoća požarnog opterećenja koje se označava s  $q_f$ .

Karakteristično požarno opterećenje  $Q_{fi,k}$  definira se kako slijedi [10]:

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{u,i} \cdot \psi_i$$

gdje je:

$M_{k,i}$  - iznos karakteristične vrijednosti gorivog materijala  $i$  [kg];

$H_{u,i}$  - čista kalorična vrijednost gorivog materijala  $i$  [MJ/kg], tako na primjer drvo ima  $H_u=17,5$ , papir  $H_u=20,0$  itd.

$\psi_i$  - faktor opcije za procjenu zaštićenog požarnog opterećenja materijala  $i$ .

Na isti način mogu se odrediti utjecaji aktivne zaštite od požara. Svaka aktivna mjera smanjuje vjerojatnost da se početni požar razvije u potpuno razvijeni požar, pa se za svaku aktivnu mjeru može odrediti zasebni  $\delta_n$  koji je manji od 1.

Vrijednost karakteristične gustoće požarnog opterećenja dana je izrazom[10]:

$$q_{f,k} = \frac{Q_{fi,k}}{A} \text{ [MJ/m}^2\text{]}$$

gdje je:

$Q_{fi,k}$ - karakteristično požarno opterećenje;

A - površina poda u požarnom odjeljku ili referentni prostor ( $A_f$ ), ili unutrašnja površina požarnog odjeljka ( $A_T$ ) u što se uključuju podovi i zidovi.

### 5.3.5. Rata oslobodjenja topline

Kako bi definirali ratu kojom će požarno opterećenje izgarati moramo definirati ratu oslobodjenja topline Q. Rata oslobodjenja topline predstavlja snagu požara i izvor je porasta temperature te ima glavnu ulogu za rasprostiranje plina i dima. Maksimalna rata oslobodjenja topline po m<sup>2</sup>označava se sa RHR<sub>f</sub>.

$$Q = 10^6 \cdot \left( \frac{t}{t_\alpha} \right)^2, \text{ gdje je:}$$

Q- rata oslobodjenja topline požara za vrijeme njegova razvoja

t- vrijeme u sekundama

t<sub>α</sub>- vrijeme potrebno za dostizanje rate oslobodjenja topline Q od 1MW

Vrlo je važno za razumjeti da će se požarnim opterećenjem odrediti energija, a ratom oslobodjenja topline odredit će se temperatura plina.

### 5.3.6. Analiza temperature

Nakon definiranja toplinskog djelovanja možemo analizirati temperaturu konstrukcijskog elementa. Da bi proveli potrebnu analizu treba definirati položaj računskog požara u odnosu na element, te definirati položaj elementa u prostoru kao vanjski ili unutarnji.

### 5.3.7. Toplinsko djelovanje za analizu temperature

Toplinsko djelovanje za analizu temperature elementa određuje se računskim požarom te se može definirati:

- Općim pravilima prijenosa topline
- Nominalnim krivuljama temperatura-vrijeme
- Modelima prirodnog požara

#### 5.3.7.1. Opća pravila prijenosa topline

Prijenos topline uslijed temperaturnih djelovanja na konstrukciju definiran je Fourierovom diferencijalnom jednačinom.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + Q = \rho c_{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial t}$$

gdje je:

Q- temperatura T za x, y i z

$\rho$ -gustoća materijala

$c_{\Theta}$ - specifična toplina materijala

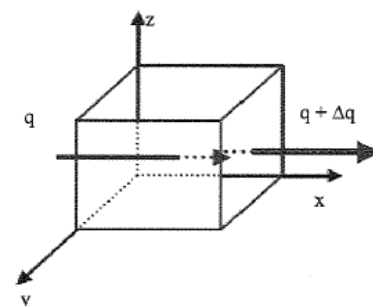
$\lambda_{\Theta}$ - toplinska provodljivost materijala

Q- unutarnji izvor topline (Q=0 za negorivi element)

t- vrijeme

U određenom vremenu (t) za vrijeme požara neto tok topline na površini može se odrediti uzimajući u obzir prijenos topline uslijed isijavanja i prenošenja.

$$h_{net} = h_{net,r} + h_{net,c}$$



Slika 5.8 Toplinski odgovor

Uz određena pojednostavljena, pretpostavke i definirane rubne uvjete moći ćemo odrediti i promjenu temperature u promatranom konstrukcijskom elementu. Ovakav postupak primjenjuju programi s konačnim elementima koji se koriste za detaljne analize u kojima su isprogramirane diferencijalne jednadžbe.

### 5.3.7.2. Nominalne krivulje temperatura-vrijeme

Nominalnim krivuljama temperatura-vrijeme definiraju se zakonitosti razvoja temperature u vremenu unutar konstrukcije ne uzimajući u obzir uvjete u samoj konstrukciji (požarno opterećenje, sustav ventilacije, sustav aktivne zaštite, itd.)

Razlikujemo tri krivulje:

- Krivulja standardnog požara

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

- Krivulja vanjskog požara

$$\Theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t}) + 20$$

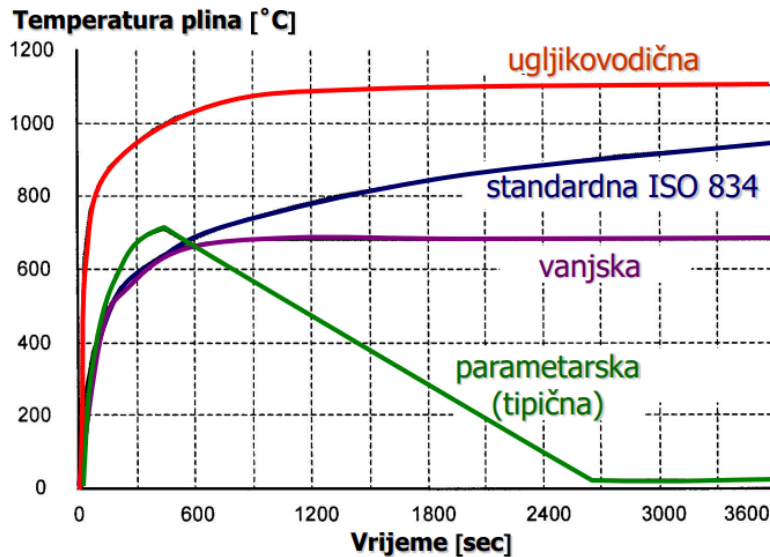
- Krivulja ugljikovodika

$$\Theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20$$

gdje je:

$\Theta_g$  - temperatura plina u požarnom odjeljku u °C

t- vrijeme u minutama



Slika 5.9 Nominalne krivulje

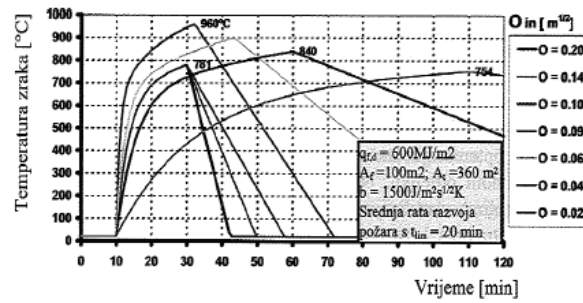
### 5.3.7.3. Modeli prirodnog požara

Modeli prirodnog požara pokrivaju razvoj požara koji je realan i za kojeg se očekuje da će se pojaviti. Tim modelima se uzimaju u obzir glavni parametri koji utječu na širenje požara (požarno opterećenje, veličina zgrade, sustav ventilacije, itd.). rezultat ovih analiza bit će realnije krivulje požara, ali nedostatak im je što su znatno skuplje.

Prema EN 1991-1-2 razlikujemo dvije skupine modela prirodnog požara

- 1) Pojednostavljeni modeli požara- jednostavni fizikalni modeli s ograničenim područjem primjene
  - Modeli požara u sektoru (zatvoren prostor)
  - Modeli ograničenih požara (lokalizirani požari)

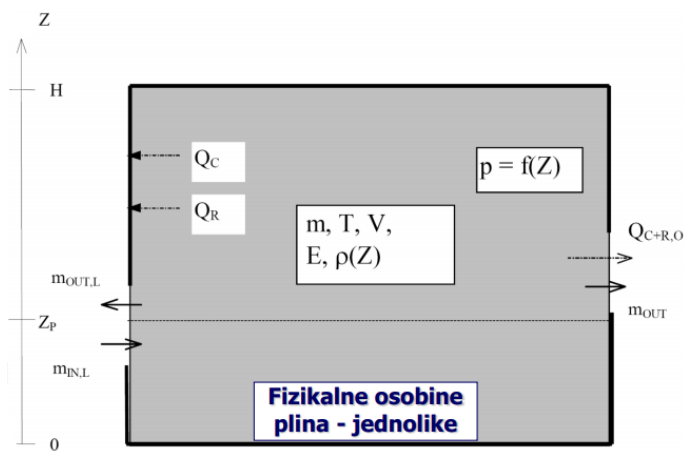
Krivulje prirodnog požara



Slika 5.10 Parametarske krivulje temperatura-vrijeme

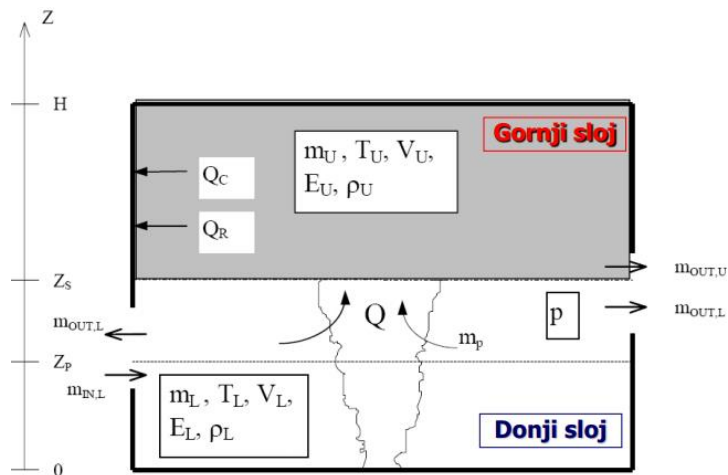
2) Napredni modeli požara- uzimaju u obzir karakteristike plina, izmjenu mase i izmjenu energije

- Modeli jedne zone- cjelokupnu prostoriju tretira jedinstven prostor te smatra da u odjeljku djeluje samo jedna jednolika krivulja temperatura-vrijeme. Ovi modeli primjenjivi su za simulacije potpuno razvijenog požara, nakon pojave vatrenog skoka, kao takvi rijetko se primjenjuju u praksi.



Slika 5.11 Model jedne zone

- Modeli dvije zone- cjelokupnu prostoriju promatraju kao dvije odvojene zone u kojima djeluju dvije krivulje temperatura-vrijeme (u gornjem i donjem dijelu), pri čemu donju zonu smatraju „hladnom“, a gornju „vrućom“.



Slika 5.12 Model dvije zone

- Modeli polja (CFD)- daju razvoj temperature u sektoru u potpunosti u ovisnosti o vremenu i prostoru. Područje interesa CFD modela dijeli se na niz sub-volumena, na koje se primjenjuju temeljni fizikalni zakoni očuvanja mase, količine gibanja i energije uz pripadajuće termodinamičke i dopunske relacije.

Pojednostavljeni modeli požara u sektoru pretpostavljaju jednoliku raspodjelu temperature u cijelom prostoru. Daju krivulje temperatura-vrijeme uzimajući u obzir požarno opterećenje i uvjete ventilacije na zidovima (vrata i prozori). Primjenjivi su za zatvorene prostore tlocrtna površina do 500 m<sup>2</sup> bez otvora na krovu i maksimalne visine stropa do 4 m. Glavna pretpostavka ovih modela je izgaranje cjelokupnog požarnog opterećenja. EN 1991-1-2 daje parametarsku krivulju koja je u fazi zagrijavanja dana sljedećim izrazom:

$$\Theta_g = 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7t^*} - 0,472 \cdot e^{-19t^*}) + 20$$

gdje je:

$\Theta_g$  - temperatura u požarnom odjeljku

$$t^* = t \cdot \Gamma; \text{ t-vrijeme; } \Gamma = 841 \cdot 10^6 \frac{O^2}{k\rho c}$$

$b = \sqrt{\rho c \lambda}$  uz ograničenje  $100 \leq b \leq 2200$  (vrijednost b faktora definira toplinske karakteristike zidova u odjeljku)

$\rho$  - gustoća granica zatvaranja prostora odjeljka



c- specifična toplina granica zatvaranja prostora odjeljka

$\lambda$  - toplinska provodljivost granica zatvaranja prostora odjeljka

O- faktor otvora;  $O = A_v \sqrt{h_{eq} / A_t}$

$A_v$ - ukupna površina vertikalnih otvora na zidu

$h_{eq}$ - srednja visina prozora na svim zidovima

$A_t$ - ukupna površina odjeljka

Vrijeme faze zagrijavanja se definira kao vrijeme trajanja požara,  $t_d$ , a to vrijeme odgovara vremenu kada temperatura plina postiže maksimalnu vrijednost,  $\Theta_{g,max}$ , i definira se kao:

$$t_d = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O}$$

gdje je:

$q_{t,d}$  - proračunska gustoća požarnog opterećenja koja se odnosi na ukupnu konstrukciju

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot \frac{A_f}{A_t}$$

gdje je:

$q_{f,d}$  - proračunska gustoća požarnog opterećenja

$A_f$ - površina podne plohe

Za fazu hlađenja potrebno je potrebno je proračunati izmijenjeno vrijeme trajanja požara  $t_d^*$ .

$$t_d^* = \Gamma \cdot t^*$$

Za fazu hlađenja krivulje temperatura-vrijeme dane su sljedećim izrazima koji su ovisni o modificiranom vremenu trajanja požara  $t_d^*$ .

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625(t^* - t_d^*) \text{ za } t_d^* \leq 0,5$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(3 - t_d^*)(t^* - t_d^*) \text{ za } 0,5 < t_d^* < 2,0$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(t^* - t_d^*) \text{ za } t_d^* \geq 2,0$$

Dubina pougljenja  $d_{char,par}$  za konstrukciju izloženu parametarskom požaru definirat će se prema sljedećim izrazima:

$$d_{char,par} = \beta_{par} t \quad \text{za } t \leq t_0$$

$$d_{char,par} = \beta_{par} \left( 1,5t_0 - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4} \right) \quad \text{za } t_0 \leq t \leq 3t_0$$

$$d_{char,par} = 2\beta_{par}t_0 \quad \text{za } 3t_0 \leq t \leq 5t_0$$

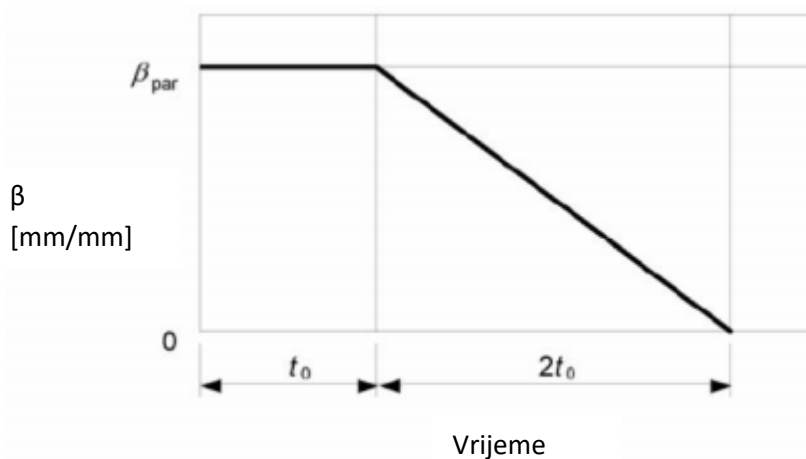
gdje je:

t- vrijeme izloženosti požaru

t<sub>0</sub>- vrijeme s konstantnom brzinom pougljenja

$$\beta_{par} \text{ je definiran kao: } \beta_{par} = 1,5 \cdot \beta_n \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16 \cdot \sqrt{\Gamma} - 0,08}$$

Na slici 5.11 prikazana je brzina sagorijevanja za parametarsku krivulju požara. U fazi zagrijavanja brzina izgaranja je konstantna, a u fazi hlađenja ta stopa se prepолоvila. Faza s konstantnom stopom izgaranja, t<sub>0</sub>, jednaka je kao t<sub>d</sub> korišten pri proračunu.[11]



Slika 5.13 Brzina pougljenja za parametarski požar po EC5

Napredni modeli požara jedne i dvije zone slijede glavnu pretpostavku o mogućnosti podjeljivanja prostora u određeni broj zona tako da svaka zona ima približno jednake karakteristike (masu, gustoću, temperaturu, tlak i unutarnju energiju). Modeliranje u zonama temelji se na sustavu diferencijalnih jednadžbi koji su izvedene koristeći zakon o očuvanja

masa (jednadžba kontinuiteta), zakon očuvanja energije (prvi zakon termodinamike) i zakon idealnih plinova. Zatvoreni prostor najčešće dijelimo u dvije zone:

- Gornja zona- zona vrućih plinova i dima- razvijaju se visoke temperature
- Donja zona- zona u kojoj se održava sobna temperatura i sobni tlak

### 5.3.8. Proračun temperature

Situacija kod drvenih elemenata nešto je jednostavnija obzirom da temperatura unutar drvenog elementa ovisi samo o brzini izgaranja (koja će definirati dubinu izgaranja), toplinskoj vodljivosti i temperaturi na granici između drva i pougljenog dijela. [12]

$$\frac{\Theta - \Theta_0}{\Theta_{cw} - \Theta_0} = \exp\left(\frac{\beta_0 x}{a_w}\right)$$

Dubina  $x$  mjeri se do granice između pougljenog i drvenog presjeka,  $\Theta_0$  je početna temperatura drvenog elementa koja se obično uzima kao  $20^\circ\text{C}$ ,  $\Theta_{cw} = 288^\circ\text{C}$  je temperatura na granici sa pougljenim dijelom presjeka,  $a_w$  je koeficijent toplinske provodljivosti koji pokazuje koliko brzo toplina prolazi presjekom i određuje se kao  $a_w = \frac{\lambda}{\rho c}$ , a  $\beta_0$  je brzina sagorijevanja i uzima se kao konstantna.

## 6. ZAHTJEVI NA KONSTRUKCIJU IZLOŽENU POŽARU

Kriterij kojim se određuje otpornost na požar za stupove i grede je početak plastičnih deformacija tih elemenata. Norma HR DIN 4102 dio 2, definira podjelu elemenata prema klasama požarne otpornosti.[13]

Tablica 6.1 Klase požarne otpornosti prema HR DIN 4102

Klasa otpornosti na požar	Trajanje otpornosti na požar u minutama
F30	≥ 30
F60	≥ 60
F90	≥ 90
F120	≥ 120
F180	≥ 180

Ista norma definira klasifikaciju materijala prema gorivosti, te razlikuje dvije klase građevinskih materijala:

1. Materijali klase A – negorivi
2. materijali klase B – gorivi

Tablica 6.2 Klase materijala prema gorivosti

Klasa "A"- negorivi materijali	
A1- bez organskih sastojaka	normirani materijali: gips, vapno, cement, beton, kamen, staklo, čelik, keramika
	nenormirani materijali kalcij-silikat ploče, određene mineralne protupožarne ploče i silikatne ploče (ovu skupinu treba dokazivati)
A2- s organskim sastojcima	gips-kartonske ploče, određeni mineralno-vlaknasti materijali
Klasa "B" gorivi materijali	
B1- teško zapaljivi plastični materijali u kombinaciji s materijalima klase A1 i A2	normirani: gips-kartonske ploče, lake građevinske ploče od drvene vune
	ostali: (treba ih dokazati) teško zapaljive šperploče, ploče od određene vrste tvrde pjenaste plastike, određeni PVC
B2- normalno zapaljivi	normirani materijali: drvo i drveni proizvodi debljine više od 2mm, normirani pokrovi
B3- lako zapaljivi	svi oni koji nisu u B2 kao: papir, drvena vuna, drvo debljine do 2mm, slama

Tablica 6.3 Usporedba klasa po DIN-u i EN-u

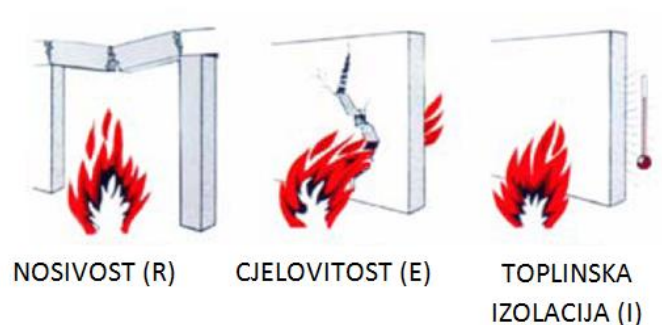
Doprinos požaru	DIN 4102-1	SIST EN 13501-1
Minimalan negoriv materijal	A1	A1
	A2	A2-s1, d0
Mali teško goriv materijal	B1	B-s3, d2
		C-s2, d2
Normalan normalno goriv	B2	D-s3, d2
		E-d2
Veliki lako goriv materijal	B3	F

Drvena konstrukcija se uvijek klasificira u B sa odgovarajućom otpornosti F (30,60,90)-B, jer je osnovni nosivi element konstrukcije drvo koje se goriv materijal i da bi ga mogli smatrati vatrootpornim potrebno ga je zaštititi odgovarajućom zaštitom. Drveni elementi nikad neće moći dobiti klasifikaciju A iz razloga što drvo ne može postati negorivo neovisno o zaštiti koja se primjenjuje.

Ispitivanje proizvoda na odgovarajuće zahtjeve glede vatrootpornosti vrši se prema normiranom ISO požaru. Obzirom da uvjeti u normiranim pećima i u stvarnim uvjetima nisu isti, nesigurnosti glede nosivosti pri prirodnom požaru pokrivaju se konzervativnom zahtjevima vatrootpornosti. Često se scenarij prirodnog požara primjenjuje kao alternativa normiranom požaru i iznimno je povoljan u slučajevima kad dijelovi konstrukcije izloženi neravnomjernom zagrijavanju. [14]

Temeljni kriterij kojim se opisuje vatrootpornost nekog elementa na požar definiraju se zahtjevima:

- Nosivosti (R)- nosiva funkcija je zadržana tijekom zahtijevane izloženosti požaru
- Toplinske izolacije (I)- povećanje temperature na izloženoj strani mora biti ograničeno na prosječno povećanje temperature ili maksimalno povećanje temperature u nekoj točki
- Cjelovitosti (E)- prolaz plamena i vrućih plinova kroz element je spriječen



Slika 6.1 Pasivne metode zaštite od požara

Klasu otpornosti na požar neke konstrukcije, sukladno Zakonu o zaštiti od požara, možemo odrediti:

- prema važećim hrvatskim propisima ovisno o namjeni konstrukcije
- prema inozemnim propisima koji se, u slučaju ne postojanja hrvatskih propisa za odgovarajuću namjenu konstrukcije, smiju prihvatiti

Sve konstrukcijski elementi razvrstavaju se u pet stupnjeva otpornosti na požar na temelju njihove otpornosti izražene u minutama. Ovu podjelu navodi HRN U.J1.240 koja je povučena, ali dok postoje pravilnici koji se na nju pozivaju ona je na snazi i može se pozvati na nju.

Tablica 6.4 Stupnjevi otpornosti na požar ovisno o vrsti konstrukcijskog elementa

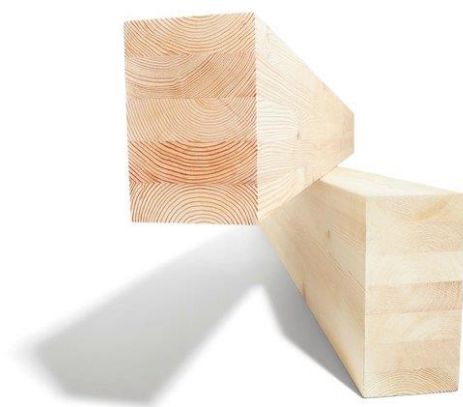
Vrsta građevinske konstrukcije	Stupanj otpornosti na požar (min)				
	I.	II.	III.	IV.	V.
	BEZ	MALA	SREDNJA	VEĆA	VELIKA
<b>UNUTAR POŽARNOG SEKTORA</b>					
NOSIVI ZIDOVI	-	30	60	120	180
NOSIVI STUPOVI	-	30	60	120	180
NOSIVE GREDE	-	30	60	120	180
MEĐUKATNE KONSTRUKCIJE	-	15	30	60	120
KROVNI POKRIVAČI	-	15	30	45	60
NENOSIVI ZIDOVI	-	15	15	15	15
KONSTRUKCIJE NA EVAKUACIJSKIM PUTOVIMA	15	30	60	120	180
<b>NA GRANICI POŽARNOG SEKTORA</b>					
ZIDOVI	60	60	90	120	120
MEĐUKATNE KONSTRUKCIJE	30	30	60	90	120
OTVORI	30	30	60	60	90

U prvi stupanj, koji se smatra bez otpornosti na požar, svrstavaju se gorive građevine (drvene i slične), negorive vatroneotporne građevine (nezaštićene čelične konstrukcije). Usporedno sa austrijskom klasifikacijom građevina po pitanju vatrootpornosti može se uočiti da stupnju jedan u koji spadaju drvene konstrukcije odgovara vatrootpornost niža od 30 minuta (<F30).

Sukladno navedenom, drveni elementi koji se svrstavaju u normalno goriv materijal, zabranjeni su za slobodnu primjenu u nosivim konstrukcijskim elementima, bez prethodne dozvole od nadležnog tijela.

## 7. LIJEPLJENO LAMELIRANO DRVO (LLD)

Pojam LLD označava građevinski proizvod na osnovi drva dobiven lijepljenjem lamela (dasaka) odgovarajuće visine i širine pod kontroliranim uvjetima. Vlažnost lamela tijekom postupka lijepljenja smije biti najviše 15%, a ljepila se nanose isključivo na dobro očišćenu površinu. Za izradu ovakvog elementa može se koristiti bilo koja vrsta drveta ali treba voditi računa da je drvo u I klasi kvalitete, zdravo i bez grešaka koje umanjuju čvrstoću i estetski dojam. Primarno se koriste četinari (jela, smreka, bor, ariš, itd.), dok se listari (hrast ili bukva) koriste samo u iznimnim situacijama zbog povećane mase, teže obradivosti i sušenja pri postupku proizvodnje. Ovaj proizvod unapređuje fizikalne i mehaničke osobine masivnog drva te se slobodno može nazvati oplemenjenim masivnim drvom uz uvjet da je izveden kvalitetno uz minimalne greške u strukturi drva. Upravo zbog mogućih grešaka u strukturi debljina lamela se ograničava na 10-40mm, a moguće je izvesti nosače ravne ili posebne geometrije (sedlaste, zakrivljene, trapezne) sa konstantnim ili promjenjivim poprečnim presjekom. Industrijska proizvodnja lijepljenih lameliranih nosača dovela je do velikog zaokreta u području drvenih konstrukcija sa mogućnošću svladavanja većih raspona i estetski zanimljivijih sustava.

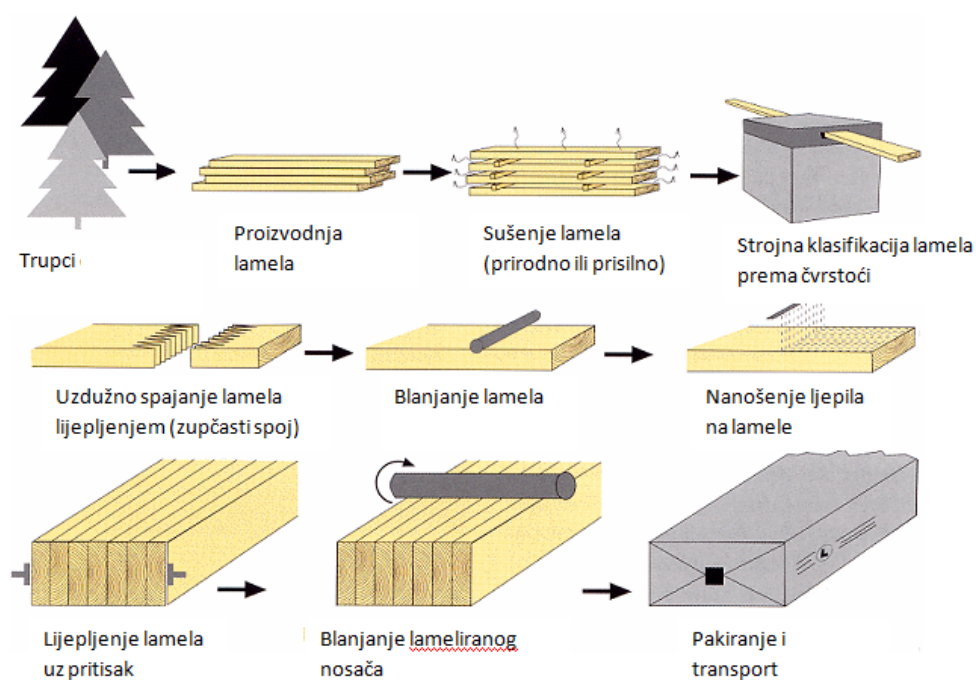


Slika 7.1 Proizvod dobiven lijepljenjem lamela (LLD)



## 7.1. Proizvodnja LLD elemenata

Proizvodnja ovakvih elemenata definirana je normom EN 14080:2013. Obzirom da tema rada nije objašnjavanje čitavog postupka proizvodnje lameliranih elemenata, navest će se samo osnovni zahtjevi i objasniti osnovni tijek proizvodnje. Zahtjevi koji se odnose na izvoditelja radova definiraju odgovarajuću opremu koju mora posjedovati te strukturu osposobljenih radnika za izvršenje ovakvog posla sa odgovarajućim iskustvom pri proizvodnji lameliranih nosača. Prostori u kojima se vrši proizvodnja moraju zadovoljiti sve osnovne zahtjeve proizvodnih hala, ali moraju zadovoljiti i dodatne zahtjeve koji se odnose na osiguravanje konstante temperature u proizvodnom prostoru (min.20°C), omogućiti relativnu vlažnost od oko 60%, opremiti radionicu odgovarajućom opremom te dodatno vlagomjerom i termometrom, dozatorima za količinu ljepljiva, uređaje za mjerenje pritiska u prešama i slično. Postupak proizvodnje prikazan je na slici 7.2.



Slika 7.2 Slijed proizvodnje lameliranog nosača sa odgovarajućim radovima

## 7.2. Mehanička svojstva

Vrijednosti čvrstoća koje proizvođač dodjeljuje svojim proizvodima temelje se na razredu čvrstoće vrste drva za proizvodnju LLD-a (HRN EN 338:2016- Konstrukcijsko drvo-Razredi čvrstoće). Danas se koristi 8 klasa lameliranog drva sa oznakama GLh kao homogeno ili svim lamelama jedne klase čvrstoće te GLk kao kombinirano, odnosno različitim klasama čvrstoće lamela unutar presjeka elementa. GLk se smatra ekonomičnijim i djelotvornijim sustavom zbog smanjenja čvrstoće lamela oko područja neutralne osi, a povećanje klase čvrstoće lamele na rubnim dijelovima.

Tablica 7.1 Mehanička svojstva LLD-a prema HRN EN 1194

Karakteristične vrijednosti čvrstoće i krutosti prema HRN EN 1194		Karakteristične čvrstoće (N/mm <sup>2</sup> )						Moduli (N/mm <sup>2</sup> )				Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )
		Savijanje	Vlak <sup>0</sup>	Vlak <sup>90</sup>	Tlak <sup>0</sup>	Tlak <sup>90</sup>	Posmik	Elastičnosti			Posmika	
		f <sub>m,k</sub>	f <sub>t,0,k</sub>	f <sub>t,90,k</sub>	f <sub>c,0,k</sub>	f <sub>c,90,k</sub>	f <sub>v,k</sub>	E <sub>0,mean</sub>	E <sub>0,05</sub>	E <sub>90,mean</sub>	G <sub>0,mean</sub>	
LLD homogeno	GL24h	24,0	16,5	0,4	24,0	2,7	2,7	11600	9400	390	720	380
	GL28h	28,0	<b>19,5</b>	0,45	26,5	3,0	3,2	12600	10200	420	780	410
	GL32h	32,0	22,5	0,5	29,0	3,3	3,8	13700	11100	460	850	430
	GL36h	36,0	26,0	0,6	31,0	3,6	4,3	14700	11900	490	910	450
LLD kombinirano	GL24k	24,0	14,0	0,4	21,0	2,4	2,2	1160	9400	320	590	350
	GL28k	28,0	16,5	0,4	24,0	2,7	2,7	12600	10200	390	720	380
	GL32k	32,0	19,5	0,45	26,5	3,0	3,2	13700	11100	420	780	410
	GL36k	36,0	22,5	0,5	29,0	3,3	3,8	14700	11900	460	850	430

Znanstvena istraživanja na području lijepljenih lameliranih konstrukcija najintenzivnija su i stalno donose nove rezultate koji se ugrađuju u propise. Posebno je to prisutno u rješavanju problema klasifikacije građe, koja se danas sve više obavlja strojno pa je moguće dostići i veću klasu od one koja se do sada vrednovala kao klasa I. Današnji postupak dimenzioniranja dopušta uporabu dviju klasa (klasa I i klasa II), što je posljedica primjene strojne klasifikacije građe i mogućnosti određivanja modula elastičnosti tim postupkom, naspram prijašnje vizualne klasifikacije na temelju grešaka u strukturi drva[15].

## 7.3. Ponašanje LLD-a pod utjecajem požara

Lamelirano drvo je poznato po svojoj iznimnoj otpornosti na djelovanje požara. Sustavi sa lameliranim drvom definitivno predstavljaju sigurne sustave za primjenu kod javnih zgrada. Takvi sustavi će omogućiti evakuaciju ljudi, što je osnovna zadaća projektiranja prema EC-u, te će omogućiti vatrogascima pristup središtu požara kako bi se spriječilo daljnje oštećivanje elemenata. Protupožarna otpornost konstrukcija okarakterizirana je s dva kriterija i to

zapaljivošću materijala i ponašanjem materijala pod djelovanjem požara. Bitno je naglasiti da drveni nosači neće popustiti pod povećanjem temperature, mehanička svojstva tog nosača ostat će nepromijenjena, što je kvalitativna razlika u odnosu na beton i čelik. Pri kritičnim požarnim temperaturama drvo se pokazala kao stabilan materijal. Masa unutar poprečnog presjeka ostat će neporemećena zbog stvaranja pougljenog sloja koji štiti unutrašnje slojeve od utjecaja topline. Iz tih razloga, objekti od lameliranog drva mogu se smatrati sigurnijima u eksploataciji od objekata od drugih materijala.



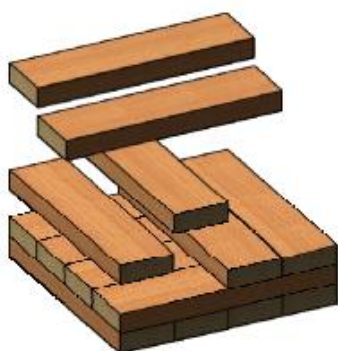
Slika 7.3 Drveni nosač izložen požarnim temperaturama za vrijeme od 1 sata izgubio je 4 cm po svom opsegu[16]

Tablica 7.2 Toplinska svojstva LLD-a prema DIN 4102-4: B 2

Brzina pougljenja	0,7mm/min
Diferencijalno skupljanje	okomito na vlakanca: 0,24% / 1% promjene vlage
Toplinska provodljivost $\lambda$	paralelno s ljepljenim lamelama: 0,13 W/(mK)
	okomito na ljepljene lamele: 0,15 W/(mK)

## 8. KRIŽNO LAMELIRANO DRVO (CLT)

Križno lamelirano drvo (CLT; eng. Cross-laminated timber) predstavlja novu generaciju građevinskih proizvoda razvijenu 90tih godina u Europi, točnije zemljama njemačkog govornog područja, a koja s vremenom popularnost primjene dobiva u cijelom svijetu. Danas postoje brojne visoke, srednje i niske zgrade izgrađene sa ovim elementima. Ovaj proizvod konkurentan je po pitanju i cijene i svojstava za izgradnju svih vrsta konstrukcija u kojima su pretežno prevladavali betonski, zidani ili čelični elementi. CLT sustavi su masivni sustavi za tešku gradnju poput betona, tipičnu za višetažnu stambenu gradnju i najčešće se koriste za izvedbu nosivih zidova i ploča[17]. Proizvodnja panela se vrši po HRN EN 1635, a ovakvi elementi imaju problem sa građevinskom dozvolom jer ne postoje zvanični propisi za proračun unutar Eurokoda 5. Dopuštena je primjena austrijskih nacionalnih aneksa, ali ih također treba priznati kod revizije. Obično se paneli izvode sa 3 do 7 slojeva križno uslojenih lamela (dasaka) povezanih ljepilom ili mehaničkim spojnim sredstvima (čavli ili trnovi). U posebnim slučajevima mogu se izvoditi i sustavi sa uzastopnim parom lamela u jednom smjeru za postizanje potrebnih svojstava u promatranom smjeru. Debljine lamela se kreću od 16 mm do 51 mm, te širinom od 60 mm do 240 mm. CLT paneli mogu biti duljine 5-6 m bez nastavljanja ili sa nastavljanjem do 16,5m, širine 2m do max. 3 m, a debljine do 0,5 m.



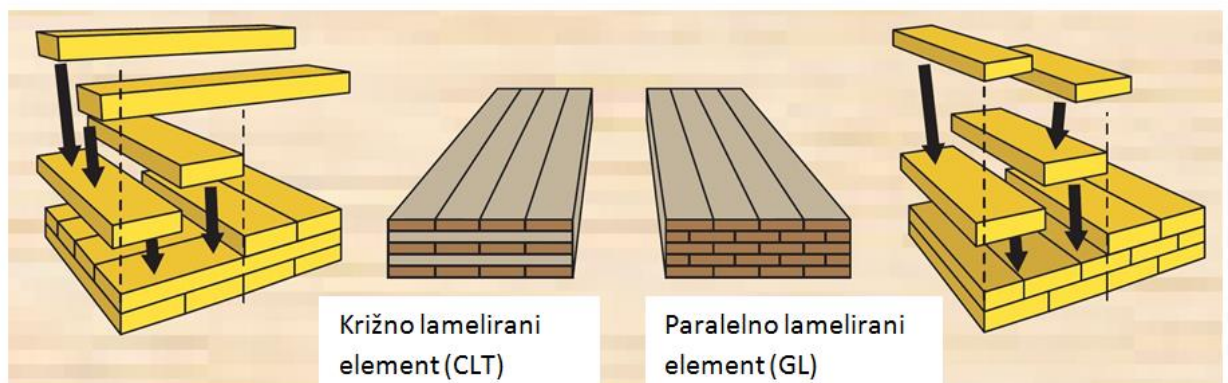
Slika 8.1 Koncept i stvarni CLT panel

Vrsta drva koja se koristi za izradu lamela za CLT panele je obično smreka, ali mogu se koristiti i bilo koje druge vrste poput jele, bora, ariša i slično, pri čemu treba voditi računa izvodi li se element za nosivi ili samo pregradni dio konstrukcije. Funkcija CLT panela je vrlo raznovrsna. Koriste se kao nosivi i ukružujući elementi koji ne zahtijevaju dodatnu stabilizaciju, a sukladno tome im je i područje primjene iznimno široko. Tako se mogu naći

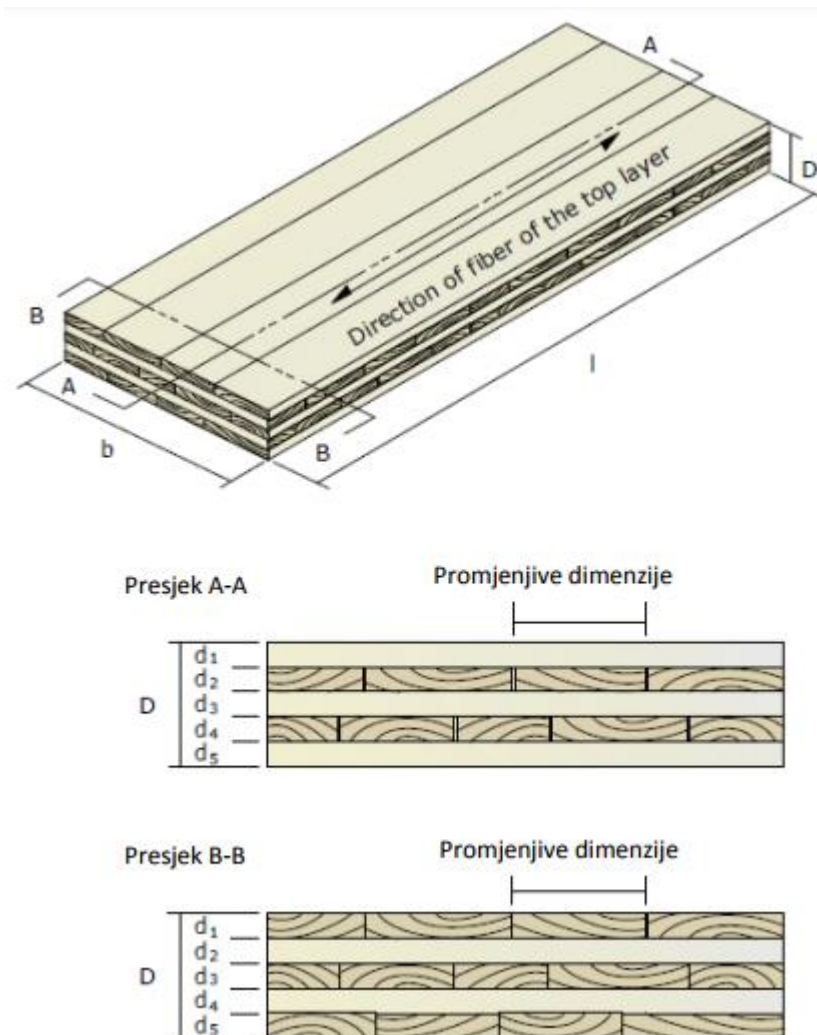
kao vidljivi elementi krovišta, zidova, stropova, mogu se kombinirati i s drugim građevinskim materijalima poput betona[18]. Danas su postali popularni sustavi kombinacije CLT panela sa betonom koji mu daje dodatnu ukrutnu funkciju smanjujući problem vibracija drvenog sustava. Jednostavna i brza izvedba sa predgotovljenim elementima, dobra toplinska i zvučna izolacija i dobro ponašanje pod utjecajem požara su velike prednosti ovih sustava. Obzirom na dominantan smjer prenošenja opterećenja CLT paneli mogu biti nosivi u jednom ili dva međusobno okomita smjera.



Slika 8.2 Mogući poprečni presjeci CLT panela



Slika 8.3 Razlika između paralelno i križno lameliranih elemenata



Slika 8.4 Prikaz CLT panela u prostoru i sa dva karakteristična presjeka

### 8.1. *Proizvodnja CLT elemenata*

Proizvodnja CLT elemenata sastoji se temeljnih radnji i to: selekcija lamela, grupiranje, obrada i postavljanje lamela, zupčasto spajanje, primjena ljepila, polaganje panela i pritiskanje, rezanje panela, površinska obrada, označavanje i spremanje proizvoda.[19] Lamelle se prije samog postupka suše na sadržaj vlage  $u = (12 \pm 2)\%$ . Zatim se provodi vizualni pregled u svrhu uočavanja oštećenja te strojno ispitivanje u svrhu određivanja mehaničkih svojstava (krutosti). To se provodi prema EN 14081-1 ili DIN 4074-1. Iznimno je važno da su sve lamelle u jednom smjeru jednake kvalitete. Vrijednosti čvrstoća koje se dodjeljuju CLT proizvodima temelje se na razredu čvrstoće vrste drva za proizvodnju CLT-a i to prema EN 338[19].



Slika 8.5 Postupak proizvodnje CLT panela

## 8.2. Mehanička svojstva CLT-a

Koeficijent modifikacije  $k_{mod}$  koji uvelike ovise o razredu vlažnosti i razredu trajanja djelovanja za CLT bit će približno jednaki kao kod LLD-a.

Tablica 8.1 Vrijednost koeficijenta modifikacije za LLD i CLT

Materijal	Norma	Razred vlažnosti	Razred trajanja djelovanja				
			Stalno	Dugotrajno	Srednjetrojno	Kratkotrajno	Trenutno
LLD	EN 14081-1	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	EN	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
CLT	EN1635	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1

Pri određivanju koeficijenta deformacije  $k_{def}$  treba uzeti u obzir utjecaj puzanja elementa. Kako sami element može biti izveden s različitim brojem lamela, ovisno o tom broju trebat će se korigirati koeficijent modifikacije. Za CLT sa sedam ili manje lamela koeficijent deformacije  $k_{def}$  treba povećati za cca. 10%[20].

Tablica 8.2 Vrijednost koeficijenta deformacije za LLD i CLT

Materijal	Norma		Razred vlažnosti		
			1	2	3
LLD	EN 14081-1 EN		0,6	0,8	2
CLT	EN 636	>7 slojeva	0,8	1	-
		≤7 slojeva	0,85	1,1	-

Vrijednosti čvrstoće, krutosti i gustoće određuju se eksperimentalno. Za klasu CLT CL24h i CL28h prikazat će se tablično, eksperimentalno dobivena mehanička svojstva[20].



Tablica 8.3 Mehanička svojstva CLT-a

Osnovni materijal		T14	
CV[ $f_{t,0,1}$ ]		25 % ± 5%	35 % ± 5%
CLT klasa			
Svojstva	Oznaka	CL 24h	CL 28h
Savijanje	$f_{m,CLT,k}$	24	28
Vlak	$f_{t,0,CLT,net,k}$	16	18
	$f_{t,90,CLT,net,k}$	0,5	
Tlak	$f_{c,0,CLT,net,k}$	24	28
	$f_{c,90,CLT,net,k}$	2,85	
Posmik u ravnini	$f_{v,CLT,IP,k}$	5	
	$f_{T,node,k}$	2,5	
Posmik van ravnine	$f_{v,CLT,OP,k}$	3	
	$f_{r,CLT,k-b/t \geq 4:1}$	1,25	
	$f_{r,CLT,k-b/t < 4:1}$	0,7	
Modul elastičnosti	$E_{0,CLT,mean}$	11	
	$E_{0,CLT,05}$	9,167	
	$E_{90,CLT,mean}$	300	
	$E_{90,CLT,05}$	250	
	$E_{c,90,CLT,mean}$	450	
	$E_{c,90,CLT,05}$	375	
Modul posmika	$G_{CLT,mean}$	650	
	$G_{CLT,05}$	540	
	$G_{r,CLT,mean}$	65	
	$G_{r,CLT,05}$	54	
Gustoća	$\rho_{CLT,k}$	350	
	$\rho_{CLT,mean}$	385	

Vrijednosti u tablici 8.3 za čvrstoću i krutost dane su u  $N/mm^2$ , a vrijednosti gustoće dane su u  $kg/m^3$ .

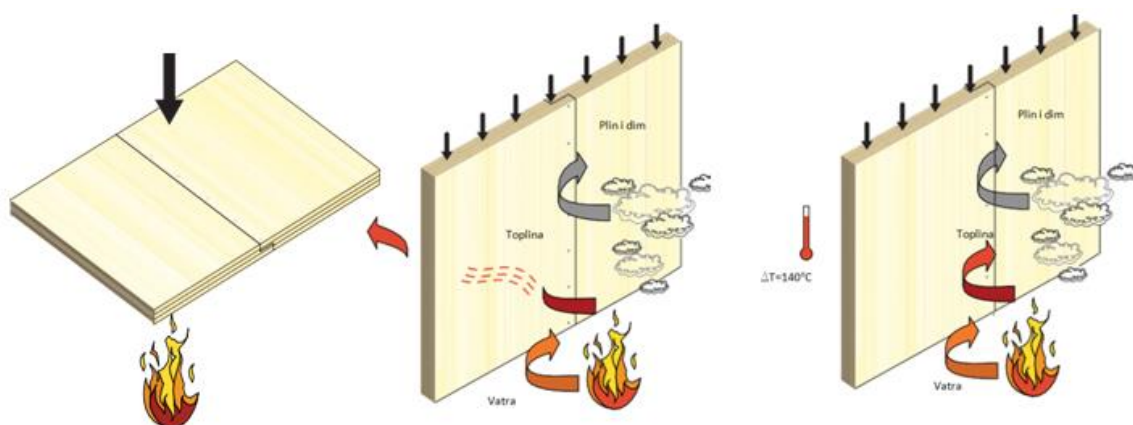
### 8.3. Toplinska svojstva CLT-a

Ponašanje CLT elemenata pod djelovanjem požara ispituje se laboratorijski. Komponente sa visokom otpornošću na požar mogu se dobiti korištenjem višeslojnih CLT elemenata. Troslojni CLT element zadovoljit će sam po sebi potrebnu otpornost REI 60, dok dodavanjem jednog zaštitnog sloja ta otpornost će još i narasti na REI 90[21]. Požarnu otpornost ovakvih elementa povećava:

- veći broj lamela
- veća debljina lamela
- dodavanje odgovarajuće obloge

CLT paneli se izvrsno ponašaju pod djelovanjem požara što je posljedica sporog izgaranja drva i predvidivog načina izgaranja. Standardnim ispitivanjem požarne otpornosti treba se zadovoljiti tri kriterija:

- Mehanička otpornost-pri čemu se element mora oduprijeti odgovarajućim djelovanjima unutar određenog vremena
- Cjelovitost- pri čemu element treba spriječiti prolaz plamena ili plinova u susjedne odsječke
- Izolacija- element mora spriječiti povećanje temperature na odsječcima koji nisu direktno izloženi požaru iznad  $180^{\circ}\text{C}$



Slika 8.6 Kriteriji pri ispitivanju požara

Vrijeme u kojem element više ne zadovoljava jedan od zahtijevanih kriterija definira otpornost elementa na djelovanje požara. Važan kriterij pri projektiranju zgrade od CLT zidova je sama funkcija tog zida. Ako se je zid isključivo pregradne funkcije, kao takav treba zadovoljiti samo svojstva cjelovitosti i izolacije[22].

Ključni faktori pri definiranju CLT toplinskih svojstava i učinkovitosti su U-vrijednost (koeficijent prolaska topline) i R-vrijednost (otpor prolaska topline). Obje vrijednosti su u ovisnosti o debljini panela. Deblji paneli imat će niže U-vrijednosti, bolji su izolatori i stoga zahtijevaju manje izolacije. Za postizanje toplinskog otpora od  $1,25\text{m}^2\text{K/W}$  potrebna debljina drvenog elementa bit će oko 16,2 cm. Najčešće korištena vrijednost otpora prolasku topline koja se koristi u Americi je 1,25 po inch-u debljine elementa. Tako da za CLT ploče sa 7 inch-eva R vrijednost raste na 8,75[23].

#### 8.4. Ispitivanje CLT-a na požar

Različite države provode različite testove ispitivanja elemenata na požar. Sjedinjene Američke Države provode ASTM E119 ili UL 263 ispitivanja, Kanada provodi ULC S101 i ISO 834. Međutim svi ti testovi imaju mnogo toga zajedničkog.



a) CLT neposredno prije testa    b) Neizložena strana tijekom testa    c) Izložena strana nakon testa

Slika 8.7 CLT požarno ispitivanje stropnih ploča, NRCC, Ottawa (Canada)

Za nosive elemente, prilikom ispitivanja požarne otpornosti, potrebno je te elemente opteretiti maksimalnim očekivanim opterećenjem kako bi dobivena ocjena otpornosti na požar bila prikladna za uporabu u svim jednakim ili slabijim stanjima opterećenja elementa. Međutim,

rijetko će konstrukcija od CLT-a biti opterećena vrijednostima koje će dosežati granične kapacitete nosivosti konstrukcije, obično ona nosi opterećenja ispod 20% vrijednosti na koje bi mogla biti dimenzionirana zbog, graničnih stanja uporabivosti. Osim toga, većina ispitnih laboratorija nemaju mogućnosti za opterećivanje CLT elemenata da maksimalnih kapaciteta nosivosti, stoga racionalna metoda proračuna otpornosti na požar, temelji se na principima brzine sagorijevanja, smanjenju poprečnog presjeka i mehaničkih svojstava. Ove metode bit će učinkovitije i ekonomičnije pri projektiranju zgrade od CLT elemenata.

### 8.5. Proračun CLT-a na požar

Efektivna brzina sagorijevanja i efektivna dubina pougljenog sloja mogu se procijeniti iz prema objavljenim podacima preko izraza.

$$\beta_{eff} = \frac{1.2\beta_n}{t^{0.187}}$$

$$d_{char} = \beta_{eff} \cdot t = 1.2 \cdot \beta_n \cdot t^{0.813}$$

pri čemu je  $\beta_{eff}$  efektivna brzina sagorijevanja, a  $\beta_n$  je nominalna linearna brzina sagorijevanja temeljena na jedno-satnoj izloženosti,  $t$  je vrijeme izloženosti požaru, a  $d_{char}$  je efektivna dubina pougljenog sloja. Brzina sagorijevanja (vidljivo prema izrazu) je nelinearnog oblika i stoga varira kao funkcija vremena. Vrijednost 1,2 predstavlja faktor koji uključuje sve slojeve nulte čvrstoće unutar efektivne brzine sagorijevanja. Obično se predviđa uobičajna brzina sagorijevanja od 0,635 mm/min. Ovakav proračun pogodan je za vrijeme izloženosti do 2 sata. Preko tog vremena potrebno je prilagođavanje samog modela, te odstupanja od modela linearne brzine sagorijevanja postaju sve izraženija.

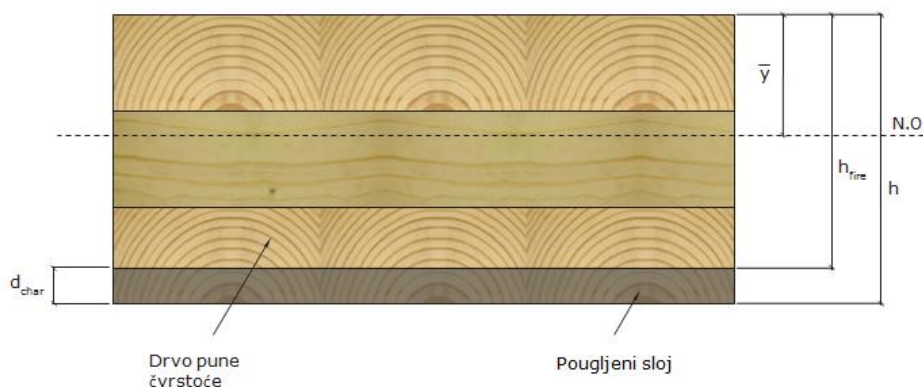
Kada je određen kapacitet CLT elementa korištenjem izraza za dubinu pougljenog sloja, mogu se odrediti efektivne čvrstoće za isti taj element (prema NDS postupcima koji se primjenjuju u SAD-u, obzirom da Eurocode još nema jasno definirane propise za mehanički proračun CLT-a, a samim time ni za proračun na požar.)

$$L + D \leq KR_{ASD}$$

Pri čemu  $L+D$  predstavlja zbroj opterećenja od stalnog i uporabnog opterećenja, a  $KR_{ASD}$  predstavlja dopušteni kapacitet koji odgovara prosječnom krajnjem kapacitetu za promatrani element.

### 8.6. Proračun CLT ploča izloženih ASTft E119 požaru

Ovaj postupak primjenjuje se samo na CLT ploče izložene zahtjevima prema ASTft E119 standardnoj požarnoj otpornosti. Proračun vremenske otpornosti provodi se u nekoliko koraka. Vrijeme u kojem CLT element izgubi zahtijevanu otpornost smatra se graničnom otpornošću tog elementa na požar. Kako je već naglašeno u radu, ASTft E119 test koji se provodi u SAD-u pokazuje velike sličnosti sa testovima ISO 834, te prema tome, kako Eurocode ne definira nikakav postupak proračuna, može poslužiti kao test metoda za buduće postupke proračuna.



Slika 8.8 Element izložen požaru

Proračun potrebnog vremena nosivosti treba uzeti u obzir i utjecaj ljepila između pojedinih lamela.

$$t_{f0} = \left( \frac{h_{lam}}{\beta_n} \right)^{1.23}$$

pri čemu:

$t_{f0}$  označava vrijeme potrebno za izgaranje do sloja ljepila

$h_{lam}$  označava debljinu lamela

$\beta_n$  označava nominalnu brzinu izgaranja od 0,635mm/min

Broj lamela koje mogu otkazati (rezultat se zaokružuje na najniži cijeli broj) određuje se izrazom:

$$n_{lam} = INT \left( \frac{t}{t_{f0}} \right)$$

gdje je:

$n_{lam}$  označava broj lamela kojima se dopušta otkazivanje

$t$  označava zahtijevano vrijeme požarne otpornosti

Izračun djelotvorne dubine pougljenja na temelju broja lamela kojima je dopušteno raslojavanje može se odrediti korištenjem izraza:

$$d_{char} = 1.2 \left[ n_{lam} \cdot h_{lam} + \beta_n \left( t - (n_{lam} \cdot t_{f0}) \right)^{0.813} \right]$$

Preostali dio presjeka koji sudjeluje u otpornosti može se odrediti izrazom:

$$h_{fire} = h - d_{char}$$

gdje:

$h_{fire}$  označava efektivnu visinu poprečnog presjeka

$h$  označava početnu visinu poprečnog presjeka

Određivanje položaja neutralne osi kod sustava CLT elemenata koji nemaju jednak modul elastičnosti u jednom promatranom smjeru određuje se izrazom:

$$\bar{y} = \frac{\sum_i \tilde{y}_i h_i E_i}{\sum_i h_i E_i}$$

gdje:

$\bar{y}$  označava udaljenost od neizložene strane elementa do neutralne osi

$\tilde{y}_i$  označava udaljenost od neizložene strane elementa središta promatrane lamele

$h_i$  označava debljinu promatrane lamele

$E_i$  označava modul elastičnosti promatrane lamele u smjeru glavne osi

Potrebno je naglasiti da modul elastičnosti lamela okomito na smjer opterećenja ( $E_{90}$ ) moći će se uzeti kao  $E/30$ . Međutim pri projektiranju elementa na požar, ova vrijednost konzervativno se može pretpostaviti da je jednaka nuli pri čemu se pri određivanju neutralne osi i svojstava presjeka koristi klasična teorija kompozita drvenih elemenata.

Krutost ovakvog presjeka može se odrediti izrazom:

$$EI_{eff} = \sum_i \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_i b_i h_i d_i^2 E_i$$

pri čemu:

$EI_{eff}$  označava efektivnu krutost na savijanje

$d_i$  označava udaljenost od neutralne osi do središta promatrane lamele

$b_i$  označava širinu elementa

Određivanje otpornosti elementa provodi se kroz dva koraka. Prvo je prikazan postupak određivanja otpornosti na naprezanja uzrokovana savijanjem, a zatim naprezanja uzrokovana tlakom. Potrebno je odrediti djelotvorni modul elastičnosti pojedine lamele izrazom

$$S_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E(h_{fire} - \bar{y})}$$

pri čemu se modul elastičnosti  $E$  može uzeti onoj vrijednosti koja će odgovarati lameli s najvećim vlačnim naprežanjem.

Faktor veličine ( $C_F$ ), faktor volumena ( $C_V$ ) i faktor bočne stabilnosti ( $C_L$ ) za CLT ploče trebaju biti ujednačeni. Na taj način otpornost elementa određuje se preko dopuštenih naprezanja na efektivnom poprečnom presjeku.

$$M' = K F_b S_{eff} = 2.85 F_b S_{eff} \geq M$$

pri čemu:

$M'$  označava moment otpornosti u požarnoj situaciji

K označava faktor prilagodbe prema tablici 8.4

Tablica 8.4 Koeficijenti prilagodbe

	Faktor prilagodbe	Faktor veličine	Faktor volumena	Faktor bočne stabilnosti
Čvrstoća	(K)	-1	-1	-2
Savijanje (F <sub>b</sub> )	2,85	C <sub>F</sub>	C <sub>V</sub>	C <sub>L</sub>
Vlak (F <sub>t</sub> )	2,85	C <sub>F</sub>	-	-
Tlak(F <sub>c</sub> )	2,58	C <sub>F</sub>	-	-
Izvijanje (F <sub>bE</sub> )	2,03	-	-	-

F<sub>b</sub> označava naprezanje uzrokovano savijanjem

S<sub>eff</sub> označava djelotvorni modul elastičnosti pojedine lamele

Određivanje otpornosti elementa uslijed naprezanja uzrokovanih tlačnom silom provodi se na način da se odredi koeficijent vitkosti:

$$\lambda = \frac{l_e}{\sqrt{\frac{12I_{eff}}{A_{eff}}}}$$

gdje:

l<sub>eff</sub> označava efektivnu duljinu, obično jednaku visini zidnog sklopa

I<sub>eff</sub> označava moment tromosti efektivnog poprečnog presjeka

A<sub>eff</sub> označava površinu efektivnog poprečnog presjeka

CLT faktor stabilnosti zida izračunava se na sljedeći način:

$$C_P = \frac{1 + (P_{cE} / P_c^*)}{2c} - \sqrt{\left[ \frac{1 + (P_{cE} / P_c^*)}{2c} \right]^2 - \frac{P_{cE} / P_c^*}{c}}$$



gdje:

$C_P$  označava faktor stabilnosti

$P_{cE}$  označava graničnu vrijednost otpora naprezanju uslijed savijanja u požarnoj situaciji

$$P_{cE} = \frac{\pi^2 EI'_{\min}}{l_e^2}$$

$$P_c^* = KF_c^* A_{eff} = 2,58F_c^* A_{eff}$$

$$EI'_{\min} = E'_{\min} I_{eff}$$

$$E'_{\min} = KE_{\min} = 2,03E_{\min}$$

$$E_{\min} = E[1 - 1,645COV_E] \cdot 1,03 / 1,66 = 0,518E$$

$$COV_E = 0,10$$

$$c = 0,9$$

Za određivanje faktora veličine ( $C_F$ ) za CLT ploče koristi se teorija graničnih naprezanja na efektivnim poprečnim presjecima.

$$P' = KF_c A_{eff} C_P = 2,58F_c A_{eff} \geq P_{load}$$

gdje:

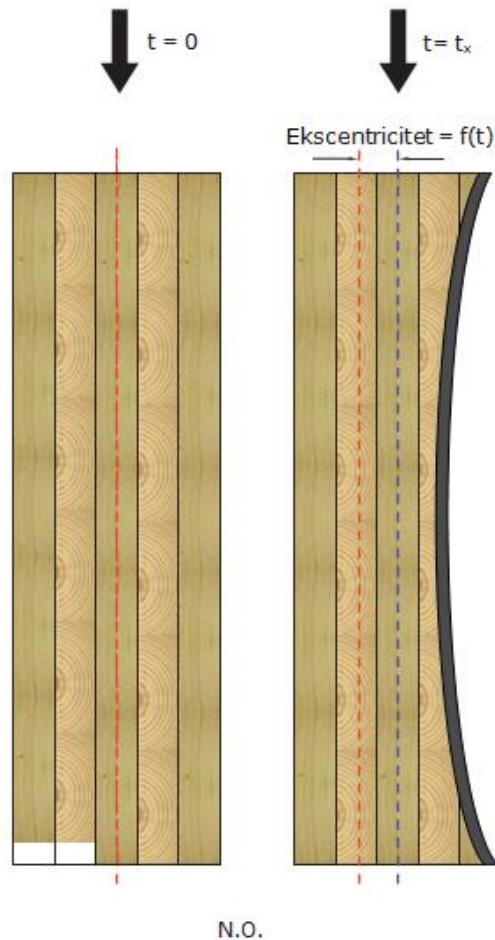
$P'$  označava graničnu vrijednost aksijalne otpornosti

$K$  označava faktor prilagodbe za tlak

$F_c$  označava aksijalnu vrijednost tlačnog naprezanja drva

$A_{eff}$  označava djelotvornu površinu

$P_{load}$  označava aksijalno tlačno opterećenje



Slika 8.9 CLT zid izložen tlačnoj sili i savijanju

CLT zid kad je izložen požaru, izložen je učincima drugog reda (P-Δ učincima). Poprečni presjek se reducira kao funkcija ovisna o vremenu što uzrokuje pomicanje neutralne osi prema dijelu koji nije izravno izložen požaru.

Za CLT zidove izložene tlačnoj sili i savijanju vrijedi:

$$\left(\frac{P}{P'}\right)^2 + \frac{M + P\Delta \left(1 + 0.234 \frac{P}{P_{cE}}\right)}{F_b' S_{eff} \left(1 - \frac{P}{P_{cE}}\right)} \leq 1.0$$

gdje:

P označava aksijalnu tlačnu silu

P' označava otpornost na tlačnu silu

M označava maksimalni inducirani moment

$P_{cE}$  označava graničnu vrijednost otpora naprezanju uslijed savijanja u požarnoj situaciji

$$P_{cE} = \frac{\pi^2 EI'_{\min}}{l_e^2}$$

$$P_c^* = KF_c^* A_{eff} = 2,58F_c^* A_{eff}$$

$$EI'_{\min} = E'_{\min} I_{eff}$$

$$E'_{\min} = KE_{\min} = 2,03E_{\min}$$

$$E_{\min} = E[1 - 1,645COV_E] \cdot 1,03 / 1,66 = 0,518E$$

$$COV_E = 0,10$$

$$c = 0,9$$

$\Delta$  označava progib izvan ravnine, uzimajući u obzir udaljenost udaljenost od neutralne osi do točke unosa opterećenja

$F'_b$  označava otpornost na naprezanje uzrokovano savijanjem

$S_{eff}$  označava djelotvorni modul elastičnosti pojedine lamele[22]



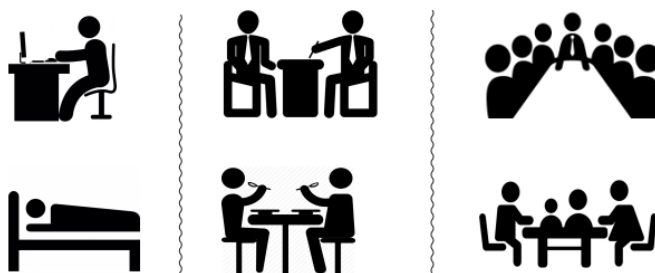
Slika 8.10 CLT ploča nakon ispitivanja

Element prikazan na slici 8.10 rezultat je ispitivanja CLT ploče. Forest Products Laboratory proveo je ispitivanje u kojem je utvrđeno da je ploča izdržala standardizirani požar preko 100

minuta pri čemu je ostvarena temperatura bila približno 1000°C. Tijekom cijeloga testa temperatura izložene strane ploče nije prešla 50°C [24].

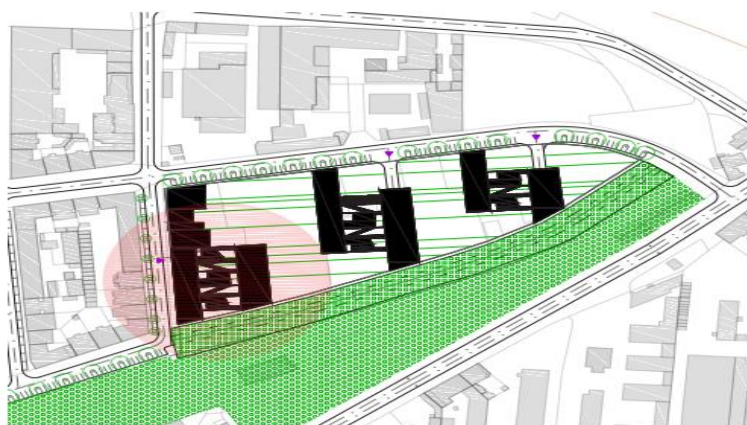
## 9. OPIS KONSTRUKCIJE KAO POKAZNOG PRIMJERA

Konstrukcija je arhitektonski zamišljena i projektirana kao hostel na području Trešnjevke, na križanju ulica Petračićeve i A. Žaje. Kao takva uklopljena je u urbanistički plan definiranog područja. Konstrukcija se nalazi u sklopu hibridne zgrade sastavljene od poslovnog dijela i hostela međusobno povezanih platformama u svrhu ostvarenja komunikacije između ta dva razdvojena područja. Ideja je povezati urbani i ubrzani način života, sa učestalim promjenama lokacija mladih ljudi, u skladu s njihovim poslovnim i stambenim aspektima života.



Slika 9.1 Prikaz namjene prostora u konstrukciji

Hostel se sastoji od prizemlja + pet etaža sa šest odvojenih stambenih jedinica po svakoj etaži.



Slika 9.2 Lokacija konstrukcije

Objekt se sastoji od konstrukcije dviju zgrada međusobno povezanih platformom tlocrtnih dimenzija 42,0x14,7m; 56,0x12,7m; 20x11,2m . Izrađen je od drva klase GL32h. Nosivi sustav čine krovna ploča sa rebrima, katne ploče bez rebara i sustav greda i stupova. Sve veze elemenata su zglobne, kao takve su modelirane i kao takve će se izvoditi. Sustav greda koji se koristi je za krovne grede b/h=36/44 cm na razmacima od 5,6m, raspona 8,5m i 4,2m, stropnih greda b/h=26x36cm, stupovi b/h=40x40cm koji su kontinuirani u odnosu na grede

među njima, stabilizacijskog veza  $b/h=26 \times 26$  cm, krovne ploče debljine 14 cm sa rebrima  $18 \times 18$  cm na 100 cm, stropne ploče bez rebara debljine 16 cm. Svi elementi su izrađeni od drva klase GL32h.

Stabilizacija sustava ostvarena je drvenim spregovima  $b/h=26 \times 26$  cm, koji se spajaju na drvene stupove preko utisnutih limova i vijaka M20. Dodatni stabilizacijski element na jednoj od konstrukcija je CLT zid, koji predstavlja jezgru konstrukcije, dok na drugoj građevini postoje dva veza. Horizontalna stabilnost postignuta je korištenjem CLT ploča koje ostvaruju dovoljno krutost i stabilnost u tom smjeru.

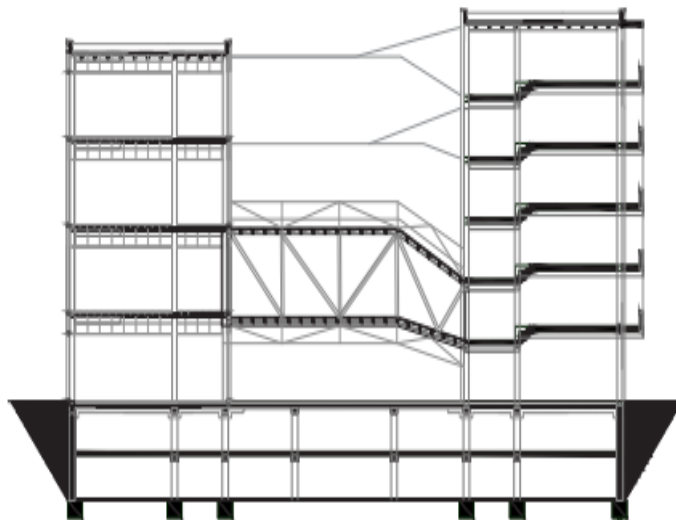
Platforma među dvije lamele je izvedena kao izlomljena rešetka visine 5 m, te je kao takva planirana tvornička izrada. Za osiguranje dodatne stabilnosti postavljena je čelična rešetka visine 80 cm u uzdužnom smjeru ispod ploče platforme, koja je dodatno stabilizirana prostornim elementima. Stabilnost u horizontalnoj ravnini je osigurana pločama od CLT-a. Ispuna rešetke je drvena. Svi elementi su izrađeni od drva klase GL32h. Predviđena je izvedba fasade od nenosivog stakla, debljine 16 mm. Staklo će biti oslonjeno na stupove i ploču pomoću hvataljki. Svi ti elementi su uzeti u proračunu vlastitog opterećenja.



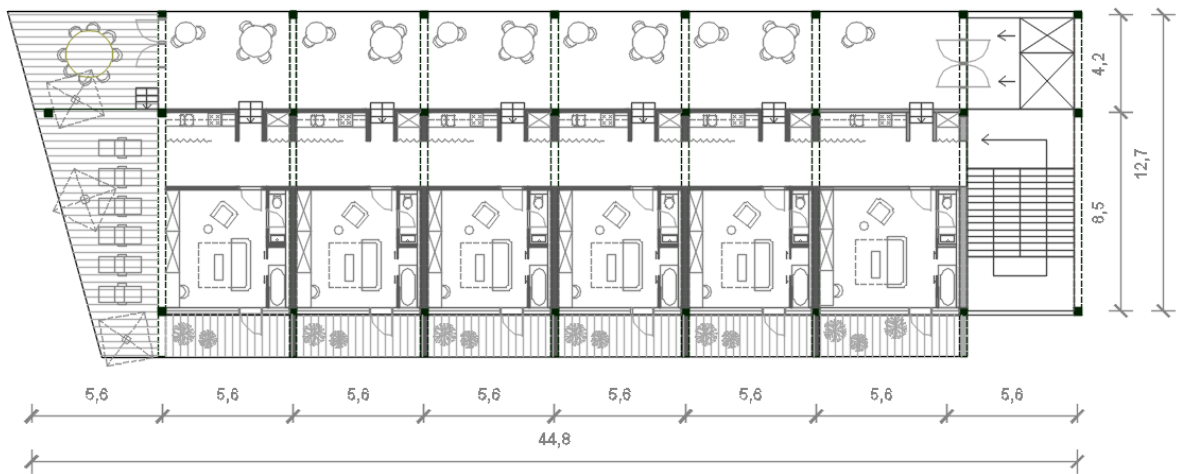
Slika 9.3 Pogledi na konstrukciju



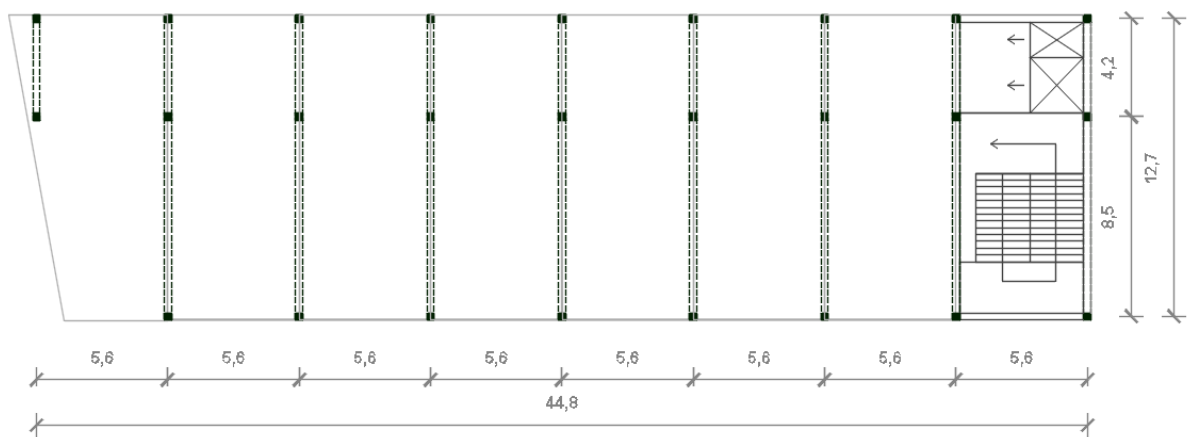
Slika 9.4 Tlocrtni pogled na konstrukciju- arhitektonski nacrt



Slika 9.5 Presjek konstrukcije- arhitektonski nacrt



Slika 9.6 Tlocrtni prikaz samo stambenog dijela- hostela



Slika 9.7 Prikaz nosivih elemenata, greda, stupova i jezgre



### 9.1. Opis proračuna

Proračun unutarnjih sila, momenata savijanja i dimenzioniranje elemenata drvene konstrukcije provedeno je u skladu s Eurocodom za djelovanja sljedećih opterećenja:

- vlastita težina
- dodatna stalna djelovanja (pokrovni slojevi, zeleni krov, opterećenje od platforme i stakla preko hvataljki)
- vjetar
- snijeg

Opterećenja su uzeta u obzir prema važećim hrvatskim normama za opterećenja. Karakteristična djelovanja uvrštena su u kombinacije za granično stanje nosivosti na osnovu čega su dobivena proračunska djelovanja na konstrukciju. Za ta ista djelovanja provjereni su progibi konstrukcije po odgovarajućim kombinacijama. Čitav proračun rađen je u kombinaciji ručnoga proračuna i rezultata dobivenih iz softverske analize u programu *Robot*, dok se proračun CLT ploča kao i proračun požara provodio korištenjem softverskog programa *Stora Enso*. Proračunom su dobivene potrebne dimenzije glavnih nosača, stupova, stabilizacijskih vezova te spojnih sredstava.

Opterećenje vjetrom uzeto je u obzir po normi EN 1991-1-4. Referentna brzina vjetra za zonu u kojoj se gradi objekt iznosi 20m/s. Norma nam daje četiri površine djelovanja vjetra na konstrukciju pravokutnoga oblika za ravne krovove, a proračun je proveden s mjerodavnom kombinacijom opterećenja.

Opterećenje snijegom uzeto je u obzir po normi EN 1991-1-3. Karakteristična vrijednost opterećenja snijegom za područje grada Zagreba (zona III), za nadmorsku visinu od +122 metra nad more, iznosi 0,88 kN/m<sup>2</sup>. Snijeg je uzet u obzir preko izraza za opterećenje snijegom na ravne krovove.

Opterećenje od zelenog krova, uzeto je u obzir kao stalno djelovanje na konstrukciju, te kao takvo modelirano. Predviđeni sloj zemlje je 30cm gustoće  $\rho=1300\text{kg/m}^3$ . Opterećenje stakla je određeno kao koncentrirano opterećenje na pojedine čvorove u kojima će se ostvarivat veza stakla sa konstrukcijom.

Za izradu konstrukcije predviđena je uporaba drva, betona, stakla i čelika. Stupovi, grede, spregovi, rešetka izrađeni su od drveta klase GL32h (lijepljeno lamelirano drvo), međukatne konstrukcije izrađene su od CLT elemenata. Dodatna rešetka je izrađena od čelika kvalitete S355, a temelji od betona klase C25/30. Fasada konstrukcije izvedena je od nenosivog stakla debljine 16mm.

## 10. STATIČKI PRORAČUN-BEZ POŽARA

### 10.1. Analiza opterećenja

#### Opći podaci

Vanjski gabariti (širina × dužina) = 44,8 m × 12,7 m

Nagib krovne konstrukcije = (ravni krov)

Visina zidne plohe = 21 m

Visina građevine do sljemena = 21 m

Nadmorska visina = 122,00 m.n.m.

Lokacija građevine = Zagreb, Hrvatska

#### 10.1.1. Stalno opterećenje

##### Stalno opterećenje (po krovu):

##### - Vlastita težina elemenata

-Uključena u pojedine statičke proračune.

##### - Stalno opterećenje od krovne konstrukcije

-Pokrov (1):

Zaštitna membrana	g =	0,75 kN/m <sup>2</sup>
Kamena vuna	g =	0,05 kN/m <sup>2</sup>
Parna brana	g =	0,05 kN/m <sup>2</sup>
Termoizolacija (25cm)	g =	0,3 kN/m <sup>2</sup>
Pokrov (bez PVC)	g =	0,3 kN/m <sup>2</sup>
Drvena oplata	g =	0,11 kN/m <sup>2</sup>
- Ostalo stalno opterećenje(instalacije,..)	g =	0,15 kN/m <sup>2</sup>

**Ukupno stalno opterećenje 1:**

**G1 =**

**1,7 kN/m<sup>2</sup>**

Pod stalno opterećenje dodat ćemo težinu zelenog pokrova koju nanosimo na površinu krova, težinu stalka koju ćemo kao koncentrirane sile nanijeti na četvrtinama raspona po ploči (hvataljkama) te po stupu, te koncentrirane sile od platforme.

-Zeleni pokrov

$$g = (\rho \cdot d \cdot g) / 1000 = (1300 \cdot 0,3 \cdot 9,81) / 1000 = 3,82 \text{ kN/m}^2$$

. -Staklo (nenosivo)

$$g = (\rho \cdot V \cdot g) / 1000 = (5,6 \cdot 3 \cdot 0,1 \cdot 2500 \cdot 9,81) / 1000 = 4,2 \text{ kN}$$

kad to raspodjelimo na 12 čvorova unutar promatranog raspona, sila po čvoru će biti

**G=0,35kN**

-Platforma

\*NAPOMENA: platforma kao opterećenje konstrukcije se zadaje u vidu koncentriranih sila na mjestu oslanjanja na konstrukciju. Ova konstrukcija je posebno proračunata i njezine reakcije su nanesene.

### *10.1.2. Uporabno opterećenje*

**Uporabno opterećenje**

balkon  $q = 4,0 \text{ kN/m}^2$

sve ostale površine  $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$

### *10.1.3. Opterećenje snijegom*

Opterećenje snijegom na krovu dobiva se prema izrazu:  $s = s_k \times \mu_i \times C_e \times C_t$

$s_k$  -karakteristično opterećenje snijegom na tlu prema geografskoj lokaciji i nadmorskoj visini  
- za područje III i nadmorsku visinu do 100 m:  $s_k=1,0 \text{ kN/m}^2$

$\mu_i$  - koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu prema tipu krova; za  $\alpha = 2^\circ \rightarrow \mu_i = 0,8$

$C_e$  - koeficijent izloženosti ( $C_e = 1$ )

$C_t$  - toplinski koeficijent zbog zagrijavanja zgrade ( $C_t = 1$ )

$$s = s_k \cdot \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t = 1,0 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

#### 10.1.4. Opterećenje vjetrom

Konstrukciju ćemo aproksimirati pravokutnim oblikom, obzirom na malo zasijecanje oblika, tako da ćemo promatrati tlocrtnu dimenziju 42m x 12,7m

Osnovna brzina vjetra:  $v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$ , gdje je:

$c_{dir}$  koeficijent smjera vjetra,  $c_{dir} = 1$

$c_{season}$  koeficijent godišnjeg doba,  $c_{season} = 1$

$v_{b,0}$  temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra, određuje se iz karte vjetrova

$$v_{b,0} = 20 \text{ m/s}$$

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 20 = 20 \text{ m/s}$$

Tlak pri osnovnoj brzini vjetra:

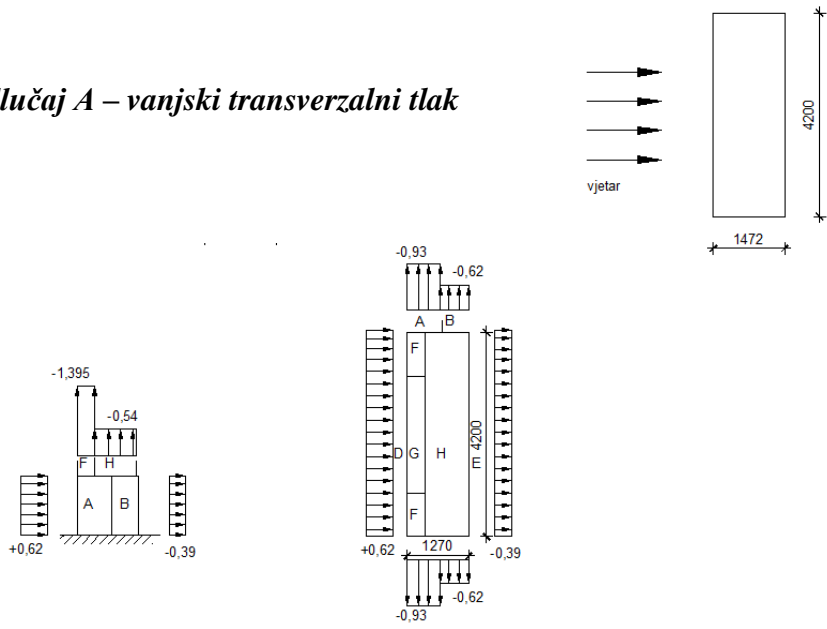
$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$\rho$  - gustoća zraka,  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

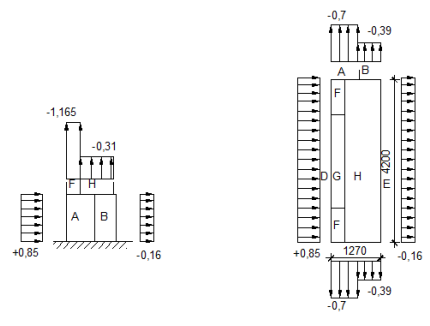
$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 20^2 = 250 \text{ N/m}^2$$

$$q_b = 0,250 \text{ kN/m}^2$$

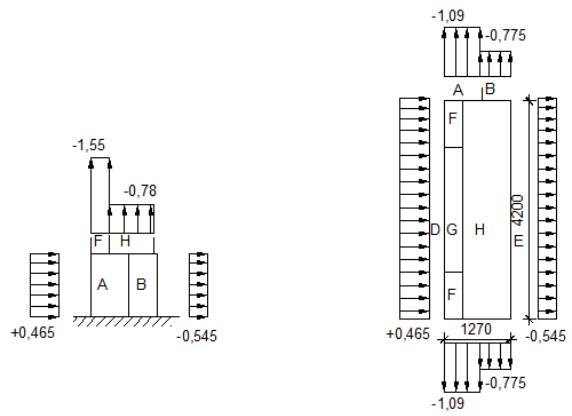
**Slučaj A – vanjski transversalni tlak**



**Opterećenje vjetrom [kN/m<sup>2</sup>]: Slučaj 1 – transversalni pritisak, „vrata zatvorena“**

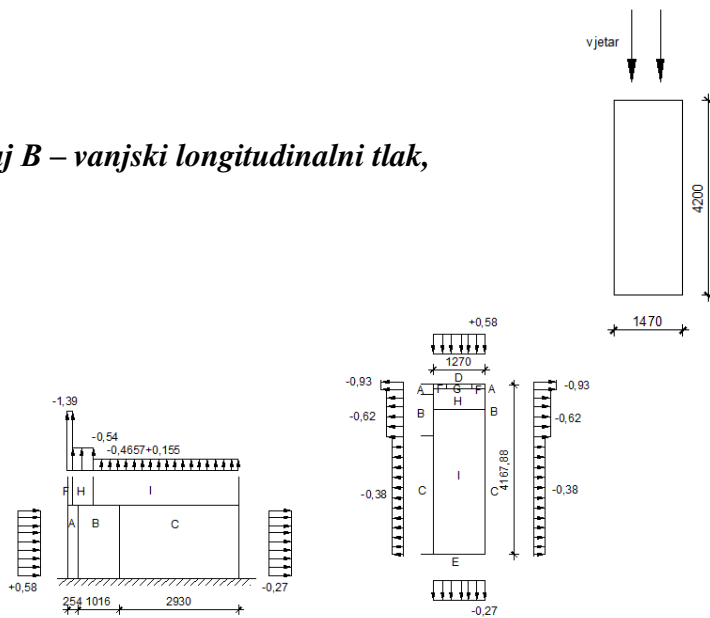


**Opterećenje vjetrom [kN/m<sup>2</sup>]: Slučaj 2 – transversalni pritisak, „vrata otvorena“**

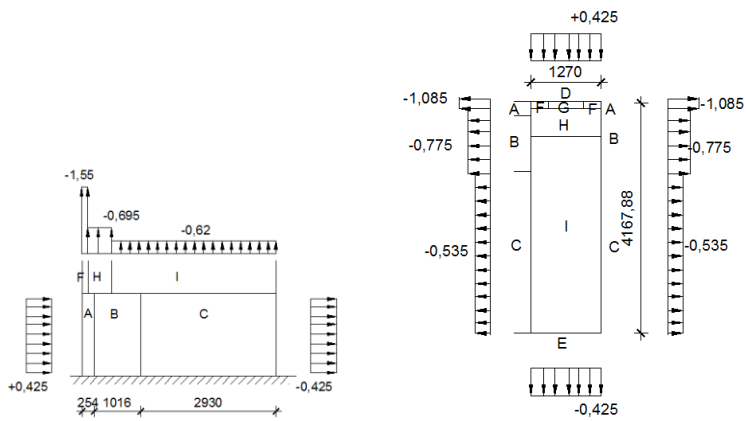


**Opterećenje vjetrom [kN/m<sup>2</sup>]: Slučaj 3 – transversalni pritisak, „vrata otvorena“**

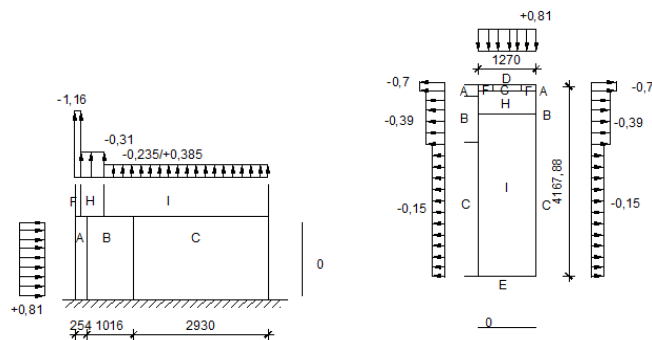
**Slučaj B – vanjski longitudinalni tlak,**



Opterećenje vjetrom [kN/m<sup>2</sup>]: Slučaj 4 – longitudinalni pritisak, „vrata zatvorena“



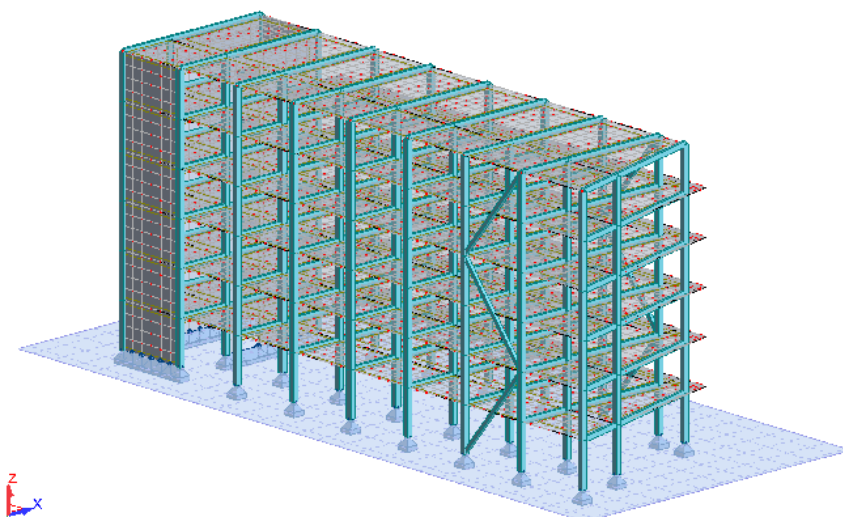
Opterećenje vjetrom [kN/m<sup>2</sup>]: Slučaj 5 – longitudinalni pritisak, „vrata otvorena“



Opterećenje vjetrom [kN/m<sup>2</sup>]: Slučaj 6 – longitudinalni pritisak, vrata otvorena

## 10.2. Statički sustav i model konstrukcije

Model je izrađen u programskom paketu Autodesk – Robot 2017. Konstrukcija je sastavljena od sustava greda i stupova, jezgre od drvenih zidova i stabilizacijskog veza.



Slika 10.1 Model konstrukcije u Robot-u

### 10.2.1. Karakteristike poprečnih presjeka i materijala

Odabrana klasa gradiva: **GL32h**

Na konstrukciju djeluje stalno opterećenje, opterećenje snijegom te opterećenje vjetrom. Opterećenje vjetrom je kratkotrajno, a klasa uporabivosti iznosi 2. Drvo je klase GL32h te stoga čimbenik modifikacije iznosi:  $k_{\text{mod}} = 0,9$ .



**Čvrstoće:                      Karakteristična                      Proračunska**

Savijanje                       $f_{m,k} = 32,0 \text{ N / mm}^2$                        $f_{m,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{32,0}{1,25} = 23,04$

Vlak II                       $f_{t,0,k} = 22,5 \text{ N / mm}^2$                        $f_{t,0,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{22,5}{1,25} = 16,2$

Tlak II                       $f_{c,0,k} = 29,0 \text{ N / mm}^2$                        $f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{29,0}{1,25} = 20,88$

Tlak  $\perp$                        $f_{c,90,k} = 3,3 \text{ N / mm}^2$                        $f_{c,90,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{3,3}{1,25} = 2,376$

Posmik                       $f_{v,k} = 3,8 \text{ N / mm}^2$                        $f_{v,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{3,8}{1,25} = 2,736$

**Moduli:**

Srednji E modul II:                       $E_{0,mean} = 13700 \text{ N / mm}^2$

Karakteristični E modul II:                       $E_{0,05} = 11100 \text{ N / mm}^2$

Srednji E modul  $\perp$  :                       $E_{90,mean} = 460 \text{ N / mm}^2$

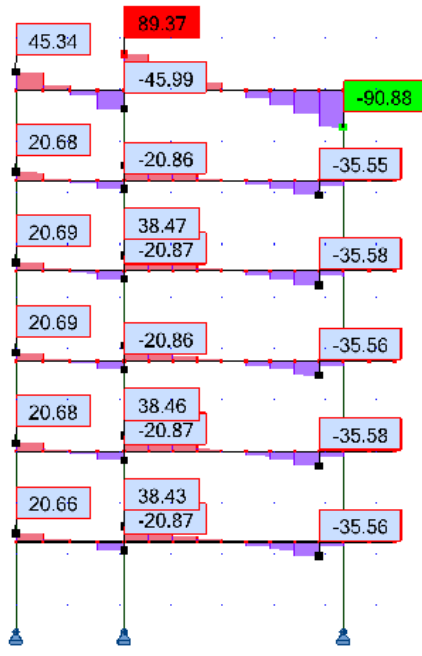
Srednji modul posmika:                       $G_{mean} = 850 \text{ N / mm}^2$



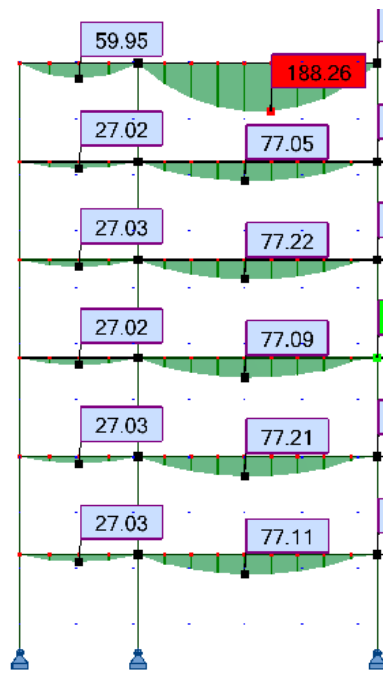
**Gustoća:**                       $\rho_k = 430 \text{ kg / m}^3$

### 10.3. DIMENZIONIRANJE GLAVNIH NOSAČA

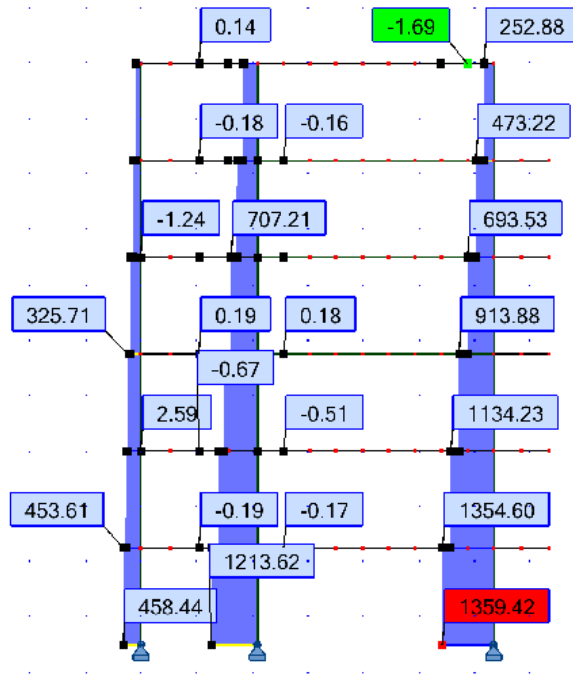
Mjerodavne vrijednosti sila i momenata u glavnim nosačima



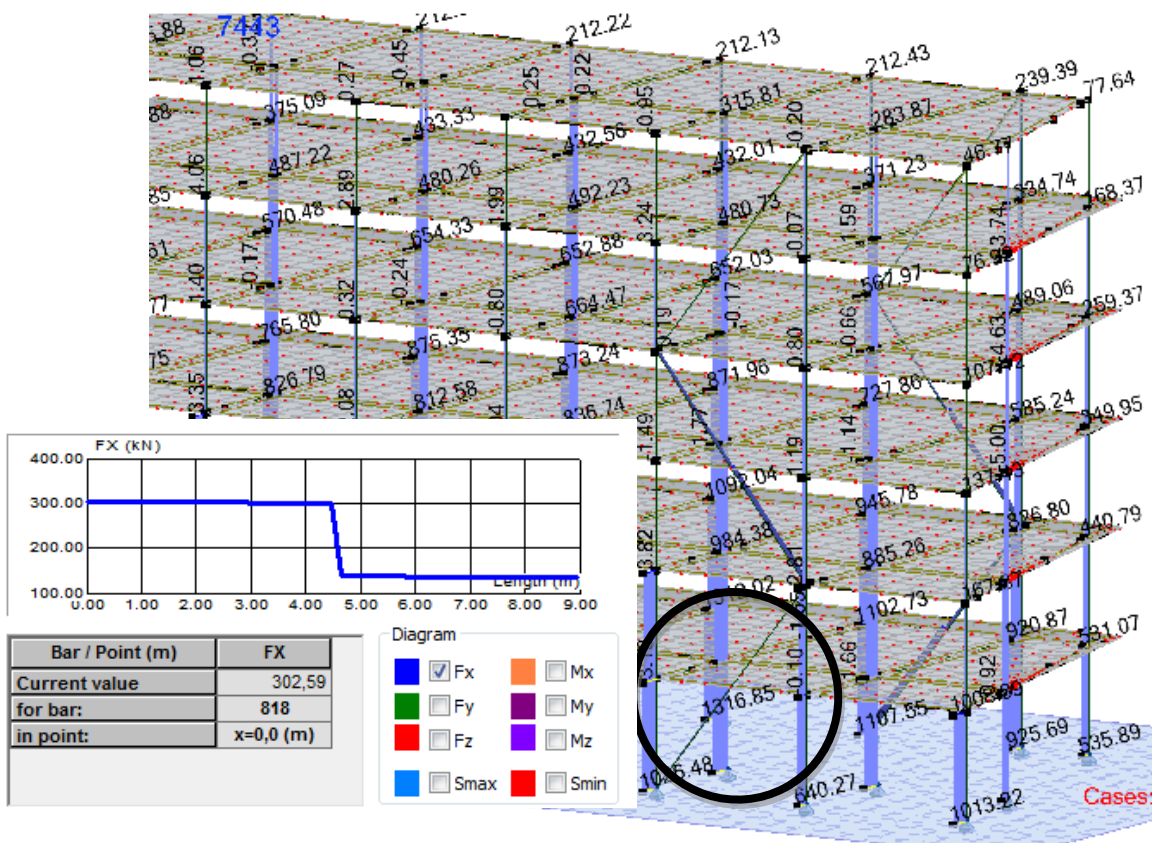
Slika 10.2 Prikaz mjerodavnih unutarnjih poprečnih sila



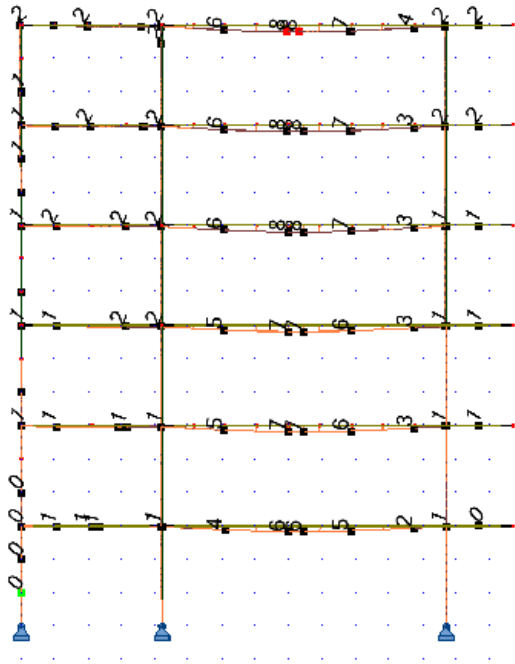
Slika 10.3 Prikaz mjerodavnih unutarnjih momenata savijanja



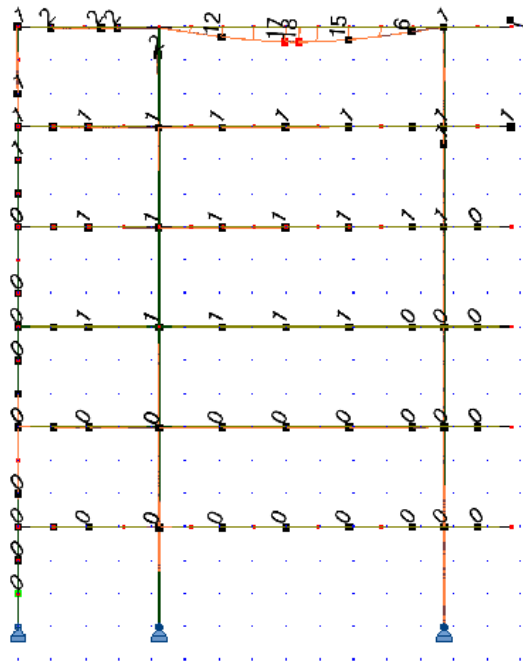
Slika 10.4 Prikaz mjerodavnih unutarnjih uzdužnih sila



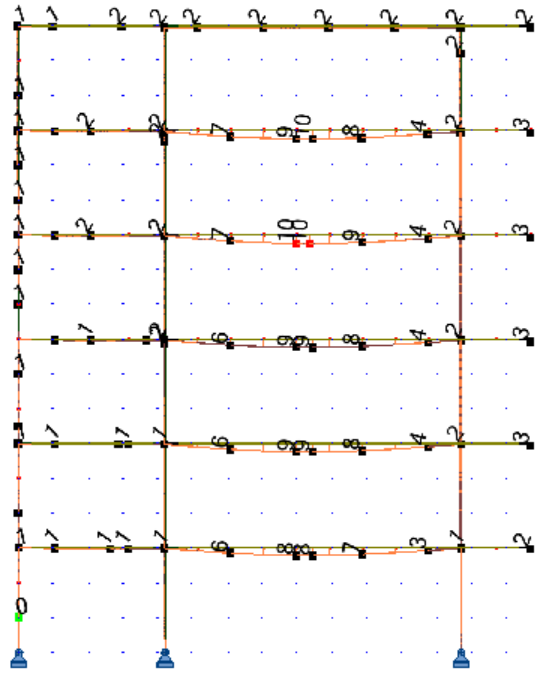
Slika 10.5 Prikaz unutarnjih sila za treći slučaj (KGS8)



Slika 10.6 Progib grede uslijed stalnih opterećenja



Slika 10.7 Progib grede uslijed stalnih opterećenja 2



Slika 10.8 Progib grede uslijed uporabnog opterećenja

### 10.3.1. Provjera graničnog stanja nosivosti

#### 10.3.1.1. Proračun stupova

##### 10.3.1.1.1. Tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem

Geometrijske veličine presjeka:

$$A = b \cdot h = 40 \cdot 40 \text{ cm}^2 = 1600 \text{ cm}^2$$

Projektna vrijednost naprezanja od uzdužne sile:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{1359000}{160000} = 8,5 \text{ N / mm}^2$$

$$l_{i,y} = l_{i,z} = 900 \text{ cm}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{i,y}}{\sqrt{\frac{I_y}{A_b}}} = \frac{900}{\sqrt{\frac{40 \cdot 40^3}{12}}} = 77,94$$

$$\lambda_z = \frac{l_{i,z}}{\sqrt{\frac{I_z}{A_b}}} = \frac{900}{\sqrt{\frac{40 \times 40^3}{12}}} = 77,94$$

Relativne vitkosti elementa u y i z smjeru:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_y \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 77,94 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,27$$

$$\lambda_{rel,z} = \lambda_z \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 77,94 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,27$$

Koeficijenti izvijanja:

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,27 - 0,3) + 1,27^2) = 1,35$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,27 - 0,3) + 1,27^2) = 1,35$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,35 + \sqrt{1,35^2 - 1,27^2}} = 0,55$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,35 + \sqrt{1,35^2 - 1,27^2}} = 0,55$$

$$\sigma_{c,0,d} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{29}{1,25} = 20,88 \text{ N/mm}^2$$

$$8,5 \text{ N/mm}^2 < 0,55 \times 20,88 = 11,5 \text{ N/mm}^2$$

*Poprečni presjek stupa b/h= 40/40 cm (GL32h) zadovoljava provjeru nosivosti na tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem sa iskoristivošću od 75%.*

### 10.3.1.2. Proračun grede-ispod krovne ploče

#### 10.3.1.2.1. Provjera na posmik

$$\tau_{v,d} \leq k_v \cdot f_{v,d}$$

$$\tau_{v,d} = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h}$$

$$\tau_{v,d} = 1,5 \cdot \frac{79170}{360 \cdot 440} = 0,75 \text{ N / mm}^2$$

$$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{3,8}{1,25} = 2,74 \text{ N / mm}^2$$

$$0,75 \leq 2,74 \text{ N / mm}^2$$

Poprečni presjek grede  $b/h = 36/44 \text{ cm}$  (GL32h) zadovoljava provjeru nosivosti na posmik sa iskoristivošću od 30%.

#### 10.3.1.2.2. Provjera savijanja s bočnim izvijanjem u sredini raspona grede

$$M_{y,d} = 188 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{\text{crit},y} \cdot f_{m,y,d}$$

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{360 \cdot 440^2}{6} = 11616000 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{188 \cdot 10^6}{11616000} = 16,18 \text{ N / mm}^2$$

$$l_{ef} = 8,5 \text{ m} = 8500 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,\text{crit},y} = \frac{\pi \cdot b^2 \cdot E_{0,05}}{l_{ef} \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{G_{0,\text{mean}}}{E_{0,\text{mean}}}} = \frac{\pi \cdot 360^2 \cdot 11100}{8500 \cdot 440} \cdot \sqrt{\frac{850}{13700}} = 300,99 \text{ N / mm}^2$$

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,\text{crit},y}}} = \sqrt{\frac{32}{300,99}} = 0,32$$

$$k_{\text{crit}} = \begin{cases} 1; & \lambda_{\text{rel},m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{\text{rel},m}; & 0,75 \leq \lambda_{\text{rel},m} \leq 1,4 \\ 1/\lambda_{\text{rel},m}^2; & \lambda_{\text{rel},m} > 1,4 \end{cases}$$

$$k_{\text{crit}} = 1$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{\text{crit}} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{16,18}{1 \cdot 23,04} \leq 1$$

$$0,70 \leq 1$$

Poprečni presjek 36/44 cm zadovoljava provjeru savijanja s bočnim izvijanjem sa iskoristivošću od 70%.

### 10.3.1.2.3. Provjera tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem

Geometrijske veličine presjeka:

$$A = b \cdot h = 360 \cdot 440 = 158400 \text{ mm}^2$$

Projektna vrijednost naprezanja od uzdužne sile:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{2000}{158400} = 0,012 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{i,y} = l_{i,z} = 850 \text{ cm} = 8500 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{i,y}}{\sqrt{\frac{I_y}{A_b}}} = \frac{8500}{\sqrt{\frac{360 \cdot 440^3}{12 \cdot 360 \cdot 440}}} = 66,92$$

$$\lambda_z = \frac{l_{i,z}}{\sqrt{\frac{I_z}{A_b}}} = \frac{8500}{\sqrt{\frac{440 \times 360^3}{12 \cdot 360 \times 440}}} = 81,79$$

Relative vitkosti elementa u y i z smjeru:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_y \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 66,92 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,09$$

$$\lambda_{rel,z} = \lambda_z \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 81,79 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,33$$

Koeficijenti izvijanja:

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,09 - 0,3) + 1,09^2) = 1,13$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,33 - 0,3) + 1,33^2) = 1,44$$



$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{1,13 + \sqrt{1,13^2 - 1,09^2}} = 0,7$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{1,44 + \sqrt{1,44^2 - 1,33^2}} = 0,5$$

$$\sigma_{c,0,d} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{29}{1,25} = 20,88 \text{ N/mm}^2$$

$$0,012 \text{ N/mm}^2 < 0,7 \cdot 20,88 = 14,62 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} < k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$$

$$0,012 \text{ N/mm}^2 < 0,5 \cdot 20,88 = 10,44 \text{ N/mm}^2$$

10.3.1.2.4. Nosivost na savijanje s bočnim izvijanjem + tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,012}{14,62} + \frac{16,18}{23,04} \leq 1$$

$$0,7 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,012}{10,44} + 0,7 \cdot \frac{16,18}{23,04} \leq 1$$

$$0,5 \leq 1$$

Poprečni presjek grede  $b/h = 36/44 \text{ cm}$  (GL32h) zadovoljava provjeru nosivosti na savijanje s bočnim izvijanjem i na tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem sa iskoristivošću od 70%.

### 10.3.1.3. Proračun grede-kat

#### 10.3.1.3.1. Provjera na posmik

$$\tau_{v,d} \leq k_v \cdot f_{v,d}$$

$$\tau_{v,d} = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h}$$

$$\tau_{v,d} = 1,5 \cdot \frac{36000}{260 \cdot 360} = 0,6 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{3,8}{1,25} = 2,74 \text{ N/mm}^2$$

$$0,6 \leq 2,74 \text{ N/mm}^2$$

Poprečni presjek grede  $b/h = 26/36 \text{ cm}$  (GL32h) zadovoljava provjeru nosivosti na posmik.

#### 10.3.1.3.2. Provjera savijanja s bočnim izvijanjem u sredini raspona grede

$$M_{y,d} = 77 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{\text{crit},y} \cdot f_{m,y,d}$$

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{260 \cdot 360^2}{6} = 5616000 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{77 \cdot 10^6}{5616000} = 13,71 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{ef} = 8,5 \text{ m} = 8500 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,\text{crit},y} = \frac{\pi \cdot b^2 \cdot E_{0,05}}{l_{ef} \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{G_{0,\text{mean}}}{E_{0,\text{mean}}}} = \frac{\pi \cdot 260^2 \cdot 11100}{8500 \cdot 360} \cdot \sqrt{\frac{850}{11100}} = 213,18 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,\text{crit},y}}} = \sqrt{\frac{32}{213,18}} = 0,38$$

$$k_{\text{crit}} = \begin{cases} 1; & \lambda_{\text{rel},m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{\text{rel},m}; & 0,75 \leq \lambda_{\text{rel},m} \leq 1,4 \\ 1/\lambda_{\text{rel},m}^2; & \lambda_{\text{rel},m} > 1,4 \end{cases}$$

$$k_{\text{crit}} = 1$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{\text{crit}} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{13,71}{1 \cdot 23,04} \leq 1$$

$$0,6 \leq 1$$

Poprečni presjek 26/36 cm zadovoljava provjeru savijanja s bočnim izvijanjem sa iskoristivošću od 60%.

### 10.3.1.3.3. Provjera tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem

Geometrijske veličine presjeka:

$$A = b \cdot h = 260 \cdot 360 = 93600 \text{ mm}^2$$

Projektna vrijednost naprezanja od uzdužne sile:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{1000}{93600} = 0,011 \text{ N / mm}^2$$

$$l_{i,y} = l_{i,z} = 850 \text{ cm} = 8500 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{i,y}}{\sqrt{\frac{I_y}{A_b}}} = \frac{8500}{\sqrt{\frac{260 \cdot 360^3}{12 \cdot 260 \cdot 360}}} = 81,79$$

$$\lambda_z = \frac{l_{i,z}}{\sqrt{\frac{I_z}{A_b}}} = \frac{8500}{\sqrt{\frac{360 \times 260^3}{12 \cdot 360 \times 260}}} = 113,25$$

Relativne vitkosti elementa u y i z smjeru:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_y \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 81,79 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,33$$

$$\lambda_{rel,z} = \lambda_z \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 113,25 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,84$$

Koeficijenti izvijanja:

$$k_y = 0,5 \cdot \left(1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2\right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot (1,33 - 0,3) + 1,33^2\right) = 1,43$$

$$k_z = 0,5 \cdot \left(1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2\right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot (1,84 - 0,3) + 1,84^2\right) = 2,27$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{1,43 + \sqrt{1,43^2 - 1,33^2}} = 0,51$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{2,27 + \sqrt{2,27^2 - 1,84^2}} = 0,28$$

$$\sigma_{c,0,d} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{29}{1,25} = 20,88 \text{ N/mm}^2$$

$$0,011 \text{ N/mm}^2 < 0,51 \times 20,88 = 10,44 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} < k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$$

$$0,011 \text{ N/mm}^2 < 0,28 \times 20,88 = 5,85 \text{ N/mm}^2$$

#### 10.3.1.3.4. Nosivost na savijanje s bočnim izvijanjem + tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,011}{10,44} + \frac{13,71}{23,04} \leq 1$$

$$0,60 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,011}{5,85} + 0,7 \cdot \frac{13,71}{23,04} \leq 1$$

$$0,42 \leq 1$$

Poprečni presjek grede  $b/h = 26/36 \text{ cm}$  (GL32h) zadovoljava provjeru nosivosti na savijanje s bočnim izvijanjem i na tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem sa iskoristivošću od 60%.

### 10.3.1.4. Proračun spregova

#### 10.3.1.4.1. Provjera tlak paralelno s vlakancima s izvijanjem

Geometrijske veličine presjeka:

$$A = b \cdot h = 260 \cdot 260 = 67600 \text{ cm}^2$$

Projektna vrijednost naprezanja od uzdužne sile:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{303000}{67600} = 4,48 \text{ N / mm}^2$$

$$l_{i,y} = l_{i,z} = 820 \text{ cm} = 8200 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{i,y}}{\sqrt{\frac{I_y}{A_b}}} = \frac{8200}{\sqrt{\frac{260 \cdot 260^3}{12}}} = 109,25$$

$$\lambda_z = \frac{l_{i,y}}{\sqrt{\frac{I_y}{A_b}}} = \frac{8200}{\sqrt{\frac{260 \cdot 260^3}{12}}} = 109,25$$

Relativne vitkosti elementa u y i z smjeru:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_y \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 109,25 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,78$$

$$\lambda_{rel,z} = \lambda_z \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\pi^2 \cdot E_{0,05}}} = 109,25 \cdot \sqrt{\frac{29}{\pi^2 \cdot 11100}} = 1,78$$

Koeficijenti izvijanja:

$$k_y = 0,5 \cdot \left( 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,1 \cdot (1,78 - 0,3) + 1,78^2 \right) = 2,16$$

$$k_z = 0,5 \cdot \left( 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,1 \cdot (1,78 - 0,3) + 1,78^2 \right) = 2,16$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{2,16 + \sqrt{2,16^2 - 1,78^2}} = 0,3$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,16 + \sqrt{2,16^2 - 1,78^2}} = 0,3$$

$$\sigma_{c,0,d} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{29}{1,25} = 20,88 \text{ N/mm}^2$$

$$4,48 \text{ N/mm}^2 < 0,3 \cdot 20,88 = 6,26 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} < k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$$

$$4,48 \text{ N/mm}^2 < 0,3 \cdot 20,88 = 6,26 \text{ N/mm}^2$$

*Drveni spregovi poprečnog presjeka 26x26 cm, GL36h, izvedeni kroz dvije etaže zadovoljavaju sa iskoristivošću od 72 %.*

### 10.3.2. Provjera graničnog stanja uporabljivosti

Početni progib od stalnog djelovanja:

$$u_{inst,y}^{G_k} = 1,5 \text{ cm}$$

Početni progib od korisnog opterećenja:

$$u_{inst,y}^{Q_k} = 1,0 \text{ cm}$$

Projektne vrijednosti konstanti elastičnosti za drvo GL32h:

$$E_{0,mean} = 13700 \text{ N/mm}^2 = 1370 \text{ kN/cm}^2$$

$$G_{0,mean} = 850 \text{ N/mm}^2 = 85 \text{ kN/cm}^2$$

Koeficijenti deformacije i opterećenja:

$$k_{def,G} = 0,60 \quad (\text{stalno djelovanje})$$

$$k_{def,Q} = 0,25 \quad (\text{srednjetrajno promjenjivo djelovanje})$$

$$k_{def,Q} = 0,00 \quad (\text{kratkotrajno promjenjivo djelovanje})$$

$$\gamma_G = 1,0, \quad \gamma_Q = 1,0$$

### KONAČNE VRIJEDNOSTI KOMPONENTI PROGIBA OD POJEDINAČNIH DJELOVANJA

Stalno djelovanje:

$$u_{fin,y}^{G_k} = u_{inst,y}^{G_k} \cdot (1 + k_{def,G}) = 1,5 \cdot (1 + 0,6) = 2,4 \text{ cm}$$

Promjenjivo djelovanje snijega srednjeg razdoblja trajanja:

$$u_{fin,y}^{G_k} = u_{inst,y}^{G_k} \cdot (1 + k_{def,G}) = 1,0 \cdot (1 + 0,25) = 1,25 \text{ cm}$$

Konačni progib od ukupnog djelovanja:

$$u_{net,fin} = u_{fin,y}^{G_k} + u_{fin,y}^{Q_k} = 2,4 + 1,25 = 3,65 \text{ cm}$$

### PROVJERA GRANIČNIH VRIJEDNOSTI PROGIBA

1.) Ograničenje trenutnog progiba prouzročenog promjenjivim djelovanjem

$$u_{2,inst} = u_{inst}^{Q_k} < L / 300$$

$$1 \text{ cm} < 2,83 \text{ cm}$$

2.) Ograničenje konačnog progiba prouzročenog promjenjivim djelovanjem

$$u_{2,fin} = u_{fin}^{Q_k} < L / 200$$

$$1,25 \text{ cm} < 4,25 \text{ cm}$$

3.) Ograničenje konačnog progiba prouzročenog ukupnim djelovanjem

$$u_{net,fin} < L / 200$$

$$3,65 \text{ cm} < 4,25 \text{ cm}$$

*Granično stanje progiba je zadovoljeno sa iskoristivošću od 85%.*

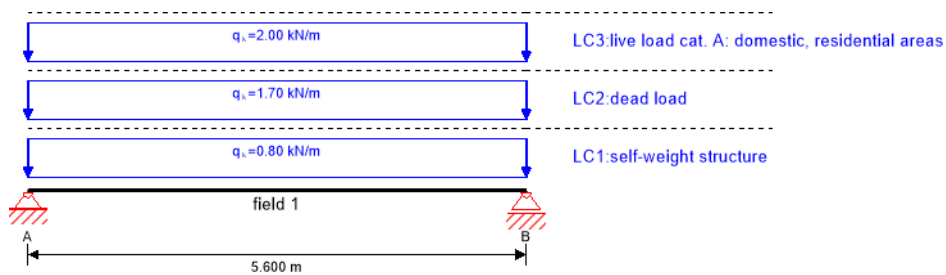


## 10.4. DIMENZIONIRANJE CLT PLOČA

Za proračun CLT ploča koristi se software Stora Enso. Proračunom se provjerava granično stanje nosivosti i uporabljivosti, te granično stanje nosivosti u požarnoj situaciji. Karakteristična ploča kata je CLT 160 L5s, a krovna ploča je CLT 140 L5s sa rebrima 18x18cm.

### 10.4.1. Provjera graničnog stanja nosivosti

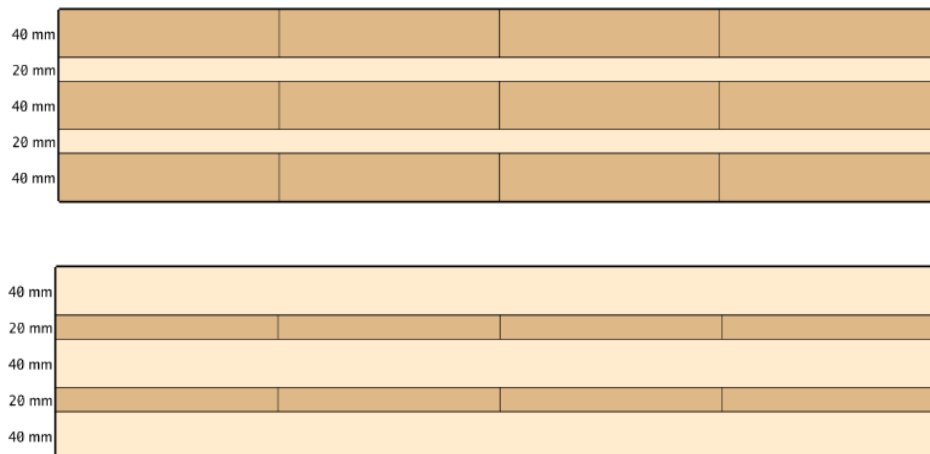
#### 10.4.1.1. Proračun ploče kata



Slika 10.9 Statički sustav ploče sa zadanim opterećenjima

Tablica 10.1 Prikaz poprečnog presjeka

Poprečni presjek: CLT 160 L5s				
	layer	debljina	orijentacija	materijal
	1	40.0 mm	0°	C24
	2	20.0 mm	90°	C24
	3	40.0 mm	0°	C24
	4	20.0 mm	90°	C24
	5	40.0 mm	0°	C24
tCLT		<b>160.0 mm</b>		



Slika 10.10 Poprečni presjek katne ploče

Tablica 10.2 Materijalne karakteristike

Materijalne karakteristike										
Materijal	$f_{m,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$	$f_{r,k \min}$	$E_{0,mean}$	$G_{mean}$	$G_{r,mean}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
C24	24.00	14.00	0.12	21.00	2.50	4.00	1.25	12,500.00	460.00	50.00

Tablica 10.3 Grupe opterećenja

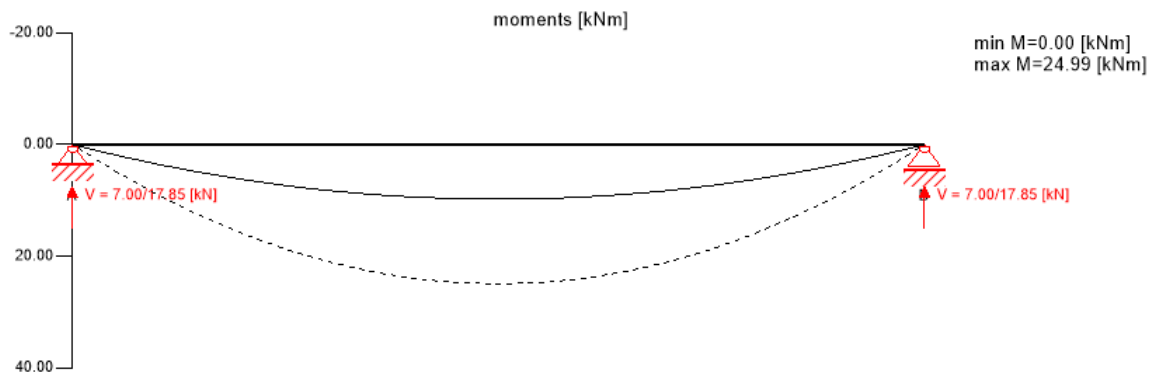
Grupe opterećenja										
	load case category	Vrsta	Trajanje	Kmod	$\gamma_{inf}$	$\gamma_{sup}$	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$	
LC1	self-weight structure	G	Trajno	0.6	1	1.35	1	1	1	
LC2	dead load	G	Trajno	0.6	1	1.35	1	1	1	
LC3	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	Srednje-trajno	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3	

Tablica 10.4 Kombinacije za GSN

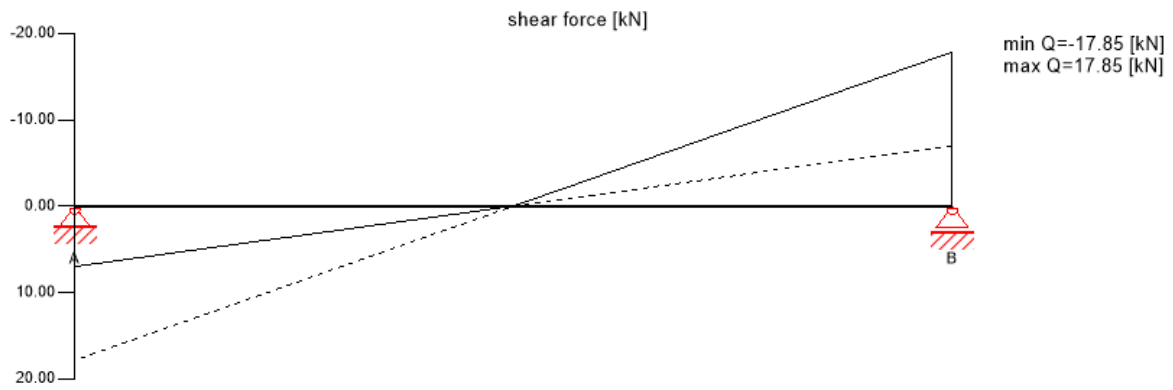
GSN kombinacije	
	zapis
LCO1	$1.35/1.00 * LC1 + 1.35/1.00 * LC2$
LCO2	$1.35/1.00 * LC1 + 1.35/1.00 * LC2 + 1.50/0.00 * LC3$

Tablica 10.5 Reakcije na osloncima

Reakcije na osloncima			
load case category	$k_{mod}$	$A_v$	$B_v$
		[kN]	
self-weight structure	0.6	2.24	2.24
		2.24	2.24
dead load	0.6	4.76	4.76
		4.76	4.76
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	5.60	5.60



Slika 10.11 GSN- moment savijanja



Slika 10.12 GSN- posmik

Tablica 10.6 Proračun na savijanje

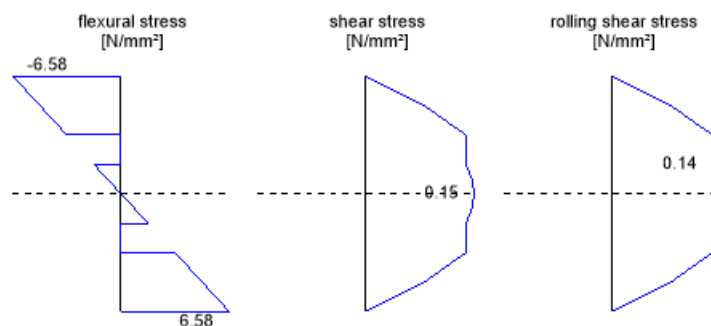
GSN- savijanje										
field	dist.	$f_{m,k}$	$\gamma_m$	$k_{mod}$	$k_{sys}$	$f_{m,d}$	$M_d$	$\sigma_{m,d}$	iskoristivost	
	[m]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kNm]	[N/mm <sup>2</sup> ]		
1	2.8	24.00	1.25	0.80	1.10	16.90	24.99	6.58	39 %	LCO2

Tablica 10.7 Proračun na posmik

GSN- posmik										
field	dist.	$f_{v,k}$	$\gamma_m$	$k_{mod}$	$f_{v,d}$	$V_d$	$\tau_{v,d}$	iskoristivost		
	[m]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]			
1	5.6	4.00	1.25	0.80	2.56	17.85	0.15	6 %		LCO2

Tablica 10.8 Proračun na rolling shear

GSN- rolling shear										
field	dist.	$f_{r,k}$	$\gamma_m$	$k_{mod}$	$f_{r,d}$	$V_d$	$\tau_{r,d}$	iskoristivost		
	[m]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]			
1	5.6	1.25	1.25	0.80	0.80	17.85	0.14	18 %		LCO2



Slika 10.13 Naprezanje u poprečnom presjeku (GSN)

Tablica 10.9 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje					
$M_d = 24.99$	kNm			$f_{m,k} = 24.00$	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m = 1.25$	
				$k_{mod} = 0.80$	
				$k_{sys} = 1.10$	
$\sigma_{m,d} = 6.58$	N/mm <sup>2</sup>	<		$f_{m,d} = 16.90$	N/mm <sup>2</sup> ✓
<b>iskoristivost</b>					<b>39 %</b>

Tablica 10.10 Otpornost na posmik

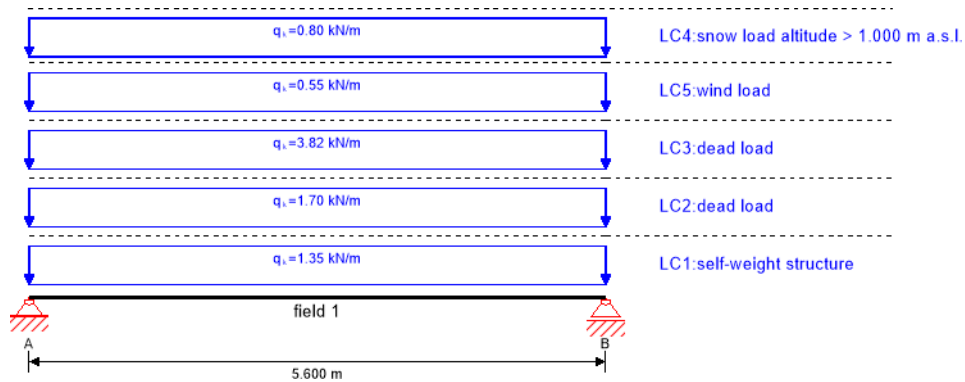
Otpornost na posmik					
$V_d = 17.85$	kN			$f_{v,k} = 4.00$	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m = 1.25$	
				$k_{mod} = 0.80$	
$\tau_{v,d} = 0.15$	N/mm <sup>2</sup>	<		$f_{v,d} = 2.56$	N/mm <sup>2</sup> ✓
<b>iskoristivost</b>					<b>6 %</b>

Tablica 10.11 Otpornost na rolling shear

Otpornost na rolling shear					
$V_d = 17.85$	kN			$f_{r,k} = 1.25$	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m = 1.25$	
				$k_{mod} = 0.80$	
$\tau_{r,d} = 0.14$	N/mm <sup>2</sup>	<		$f_{r,d} = 0.80$	N/mm <sup>2</sup> ✓
<b>iskoristivost</b>					<b>18 %</b>

Ploča CLT 160 L5s zadovoljava granično stanje nosivosti sa iskoristivošću od 39%.

### 10.4.1.2. Proračun krovne ploče



Slika 10.14 Statički sustav ploče sa zadanim opterećenjima

Tablica 10.12 Prikaz poprečnog presjeka

Poprečni presjek: CLT 140 L5s					
	layer	debljina [mm]	širina [mm]	orijentacija	materijal
	1	40.0	241.0	0°	C24
	2	20.0	241.0	90°	C24
	3	20.0	241.0	0°	C24
	4	20.0	241.0	90°	C24
	5	40.0	241.0	0°	C24
6	180.0	180.0	0°	C24	
	t <sub>CLT</sub>	<b>320.0 mm</b>			

Tablica 10.13 Materijalne karakteristike

Materijalne karakteristike										
material	$f_{m,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$	$f_{r,k \min}$	$E_{0,mean}$	$G_{mean}$	$G_{r,mean}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
C24	24.00	14.00	0.12	21.00	2.50	4.00	1.25	12,500.00	460.00	50.00

Tablica 10.14 Grupe opterećenja

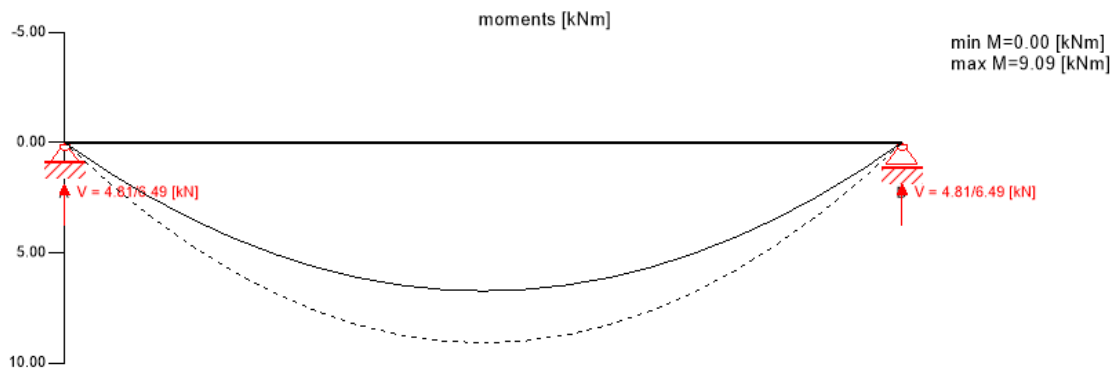
Grupe opterećenja										
	load case category	Vrsta	Trajanje	K <sub>mod</sub>	$\gamma_{inf}$	$\gamma_{sup}$	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$	
LC1	self-weight structure	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1	1
LC2	dead load	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1	1
LC3	dead load	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1	1
LC4	snow load altitude > 1.000 m a.s.l.	Q	Srednje-trajno	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.2	
LC5	wind load	Q	Kratko-trajno	0.9	0	1.5	0.6	0.2	0	

Tablica 10.15 Kombinacije za GSN

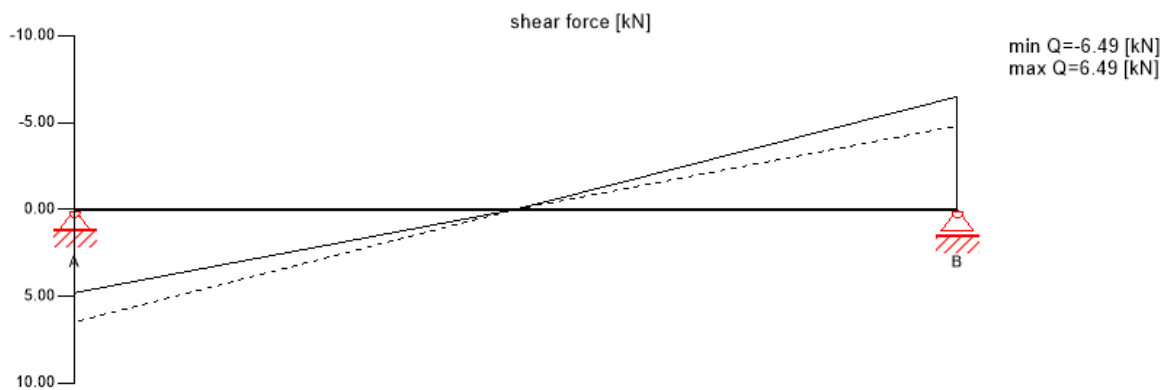
GSN kombinacije	
	zapis
LCO1	$1.35/1.00 * LC1 + 1.35/1.00 * LC2 + 1.35/1.00 * LC3$
LCO2	$1.35/1.00 * LC1 + 1.35/1.00 * LC2 + 1.35/1.00 * LC3 + 1.50/0.00 * LC4$
LCO3	$1.35/1.00 * LC1 + 1.35/1.00 * LC2 + 1.35/1.00 * LC3 + 1.50/0.00 * LC4 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC5$
LCO4	$1.35/1.00 * LC1 + 1.35/1.00 * LC2 + 1.35/1.00 * LC3 + 1.50/0.00 * LC5$
LCO5	$1.35/1.00 * LC1 + 1.35/1.00 * LC2 + 1.35/1.00 * LC3 + 1.50/0.00 * LC5 + 1.50/0.00 * 0.70 * LC4$

Tablica 10.16 Reakcije na osloncima

Reakcije na osloncima			
load case category	$k_{mod}$	$A_V$	$B_V$
		[kN]	
self-weight structure	0.6	0.94	0.94
		0.94	0.94
dead load	0.6	1.19	1.19
		1.19	1.19
dead load	0.6	2.67	2.67
		2.67	2.67
snow load altitude > 1.000 m a.s.l.	0.8	0.56	0.56
		0.00	0.00
wind load	0.9	0.38	0.38
		0.00	0.00



Slika 10.15 GSN- moment savijanja



Slika 10.16 GSN- posmik

Tablica 10.17 Proračun na savijanje

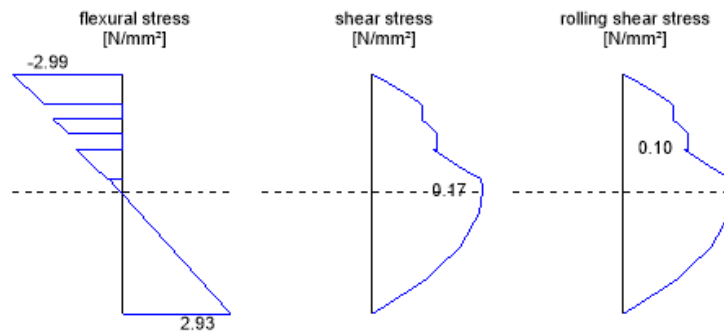
GSN- savijanje								
field	dist.	$\gamma_m$	$k_{mod}$	$k_{sys}$	$f_{m,k}$	$f_{m,d}$	$f_{t,d}$	$f_{c,d}$
	[m]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	2.8	1.30	0.60	1.00	24.00	11.08	6.46	9.69
field	$M_d$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	iskoristivost	
	[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]		
1	9.09	0.00	0.00	2.93	0.00	0.00	26 %	LCO1

Tablica 10.18 Proračun na posmik

GSN- posmik										
field	dist.	$f_{v,k}$	$\gamma_m$	$k_{mod}$	$k_{cr}$	$f_{v,d}$	$V_d$	$\tau_{v,d}$	iskoristivost	
	[m]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]		
1	0.0	2.30	1.30	0.60	1.000	1.06	6.49	0.17	16 %	LCO1

Tablica 10.19 Proračun na rolling shear

GSN-rolling shear									
field	dist.	$f_{r,k}$	$\gamma_m$	$k_{mod}$	$f_{r,d}$	$V_d$	$\tau_{r,d}$	iskoristivost	
	[m]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]		
1	0.0	1.25	1.25	0.60	0.60	6.49	0.10	16 %	LCO1



Slika 10.17 Dijagrami naprezanja u poprečnom presjeku (GSN)

Tablica 10.20 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje			
$M_d =$	9.09	kNm	$f_{m,k} =$ 24.00 N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d} =$	0.00	kN	$\gamma_m =$ 1.30
			$k_{mod} =$ 0.60
			$k_{sys} =$ 1.00
$\sigma_{t,c} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,c} =$ 6.46 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,d} =$	2.93	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,d} =$ 11.08 N/mm <sup>2</sup>
iskoristivost			26 % ✓

Tablica 10.21 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik					
$V_d =$	6.49	kN		$f_{v,k} =$	2.30 N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.30
				$k_{mod} =$	0.60
				$k_{cr} =$	1.000
$\tau_{v,d} =$	0.17	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d} =$	1.06 N/mm <sup>2</sup> ✓
<b>iskoristivost</b>					<b>16 %</b>

Tablica 10.22 Otpornost na rolling shear

Otpornost na rolling shear					
$V_d =$	6.49	kN		$f_{r,k} =$	1.25 N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.25
				$k_{mod} =$	0.60
$\tau_{r,d} =$	0.10	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{r,d} =$	0.60 N/mm <sup>2</sup> ✓
<b>iskoristivost</b>					<b>16 %</b>

Tablica 10.23 Otpornost na izvijanje

Otpornost na izvijanje (rebro)					
$M_{y,d} =$	9.09	kNm		$f_{m,k} =$	24.00 N/mm <sup>2</sup>
$N_{e,d} =$	0.00	kN		$\gamma_m =$	1.30 -
				$k_{mod} =$	0.60 -
				$k_{sys,y} =$	1.00 -
$\sigma_{e,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>		$f_{e,d} =$	9.69 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d} =$	2.99	N/mm <sup>2</sup>		$f_{m,y,d} =$	11.08 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{m,z,d} =$	0.00 N/mm <sup>2</sup> ✓
<b>iskoristivost</b>					<b>27 %</b>

Ploča CLT 140 L5s s rebrima 18x18 cm zadovoljava granično stanje nosivosti sa iskoristivošću od 27%.



## 10.4.2. Provjera graničnog stanja uporabljivosti

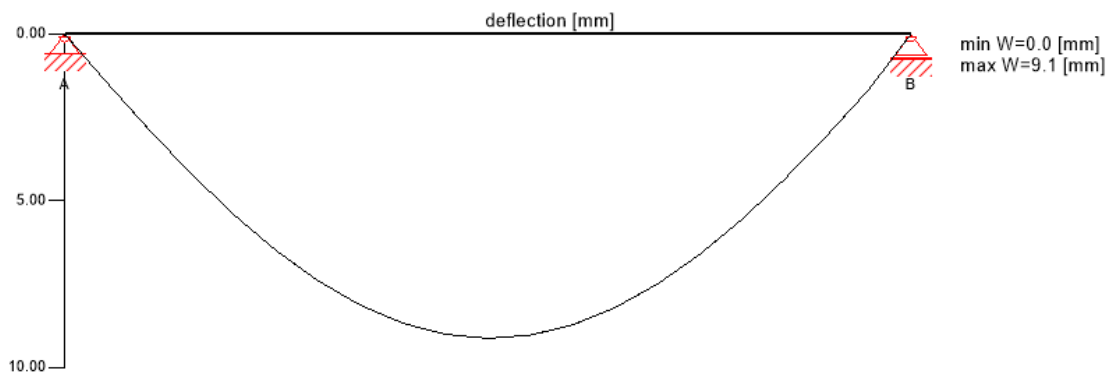
### 10.4.2.1. Proračun ploče kata

Tablica 10.24 Kombinacije za GSU

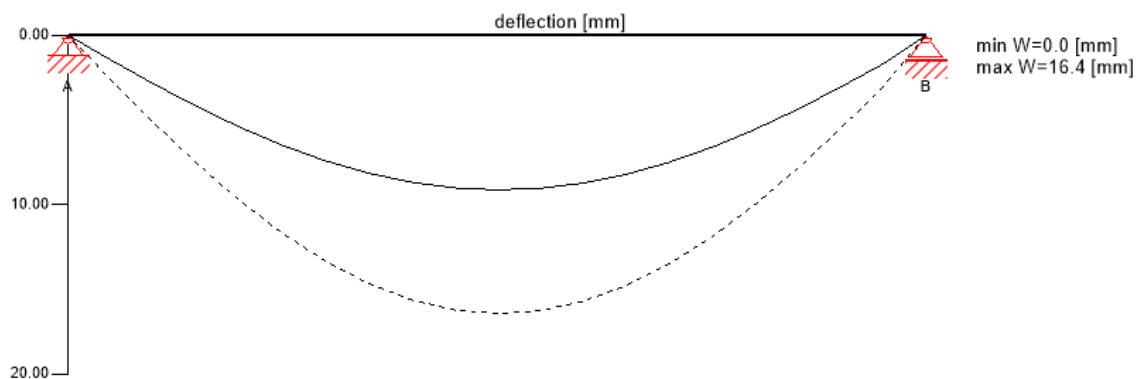
GSU karakteristična kombinacija	
	zapis
LCO1	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2$
LCO2	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * LC3$

Tablica 10.25 Kombinacije za GSU

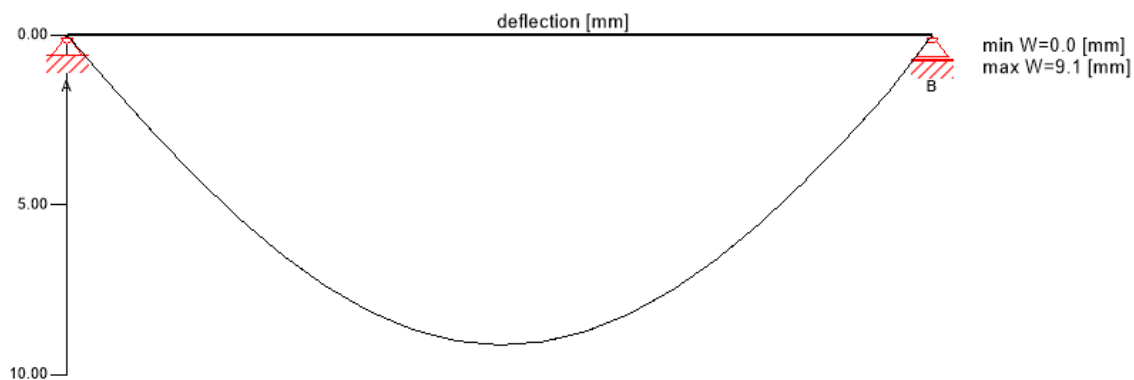
GSU nazovi-stalna kombinacija	
	zapis
LCO3	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2$
LCO4	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3$



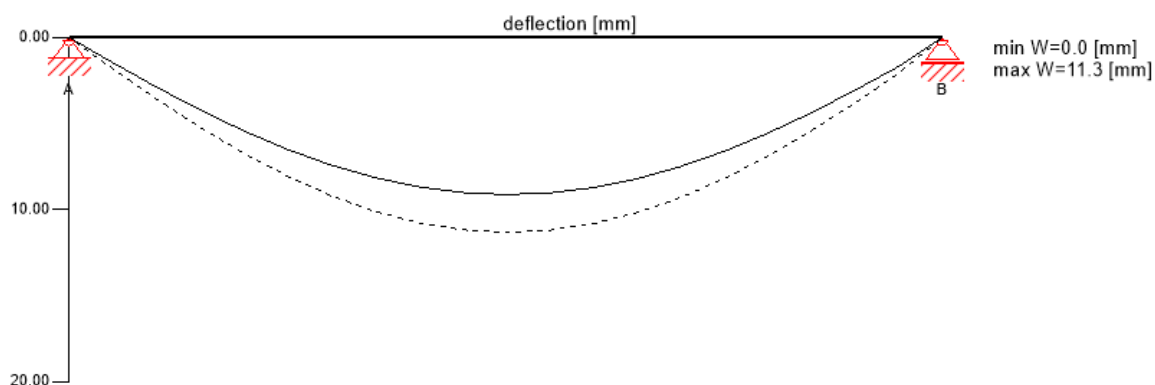
Slika 10.18 Progibi za LCO1



Slika 10.19 Progib za LCO2



Slika 10.20 Progib za LCO3



Slika 10.21 Progib za LCO4

Tablica 10.26 Početni progib LCO2

Početni progib [ $w_{char}$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.8	1/300	18.7	16.4	88 %	LCO2

Tablica 10.27 Konačni progib LCO4

Konačni progib [ $w_{char} + w_{q.p.} * k_{def}$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.8	1/200	28.0	27.8	99 %	LCO4

Tablica 10.28 Konačna vrijednost progiba LCO4

Konačna vrijednost progiba [ $w_{q.p.} * (1 + k_{def})$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.8	1/200	28.0	22.6	81 %	LCO4

Tablica 10.29 Analiza vibracija

Analiza vibracija				
<b>general</b>				
total mass		12.13	[t]	
tributary width		3.0	[m]	
stiffness longitudinal direction		3800.0	[kNm <sup>2</sup> ]	
stiffness cross direction		466.7	[kNm <sup>2</sup> ]	
modal damping		50.0	[%]	
$\alpha$		0.1	[-]	
man weight		700.0	[N]	
modal mass		6058.9	[kg]	
<b>analysis</b>				
critierion	calc.	class II	class II	cl. II
frequency criterion min	6.118 [Hz]	4.5 [Hz]	74 %	✓
frequency criterion	6.118 [Hz]	6.0 [Hz]	98 %	✓
acceleration criterion	0.004 [m/s <sup>2</sup> ]	0.1 [m/s <sup>2</sup> ]	4 %	✓
stiffness criterion	0.319 [mm]	0.5 [mm]	64 %	✓

Ploča CLT 160 L5s zadovoljava granično stanje uporabljivosti sa iskoristivošću od 99%.

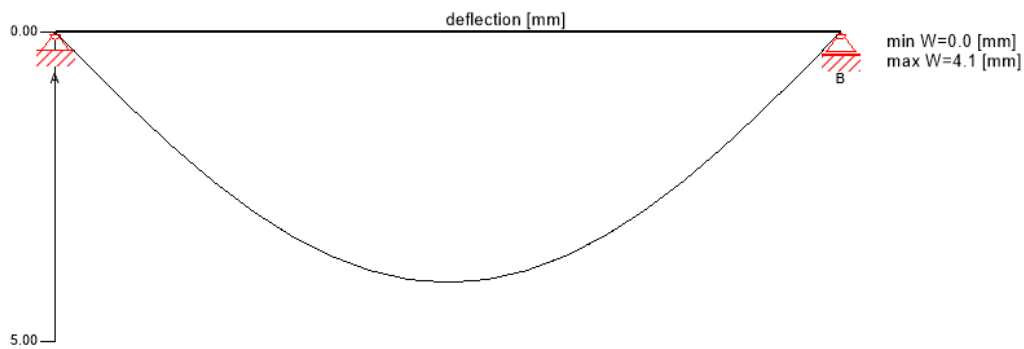
### 10.4.2.2. Proračun krovne ploče

Tablica 10.30 Kombinacije za GSU

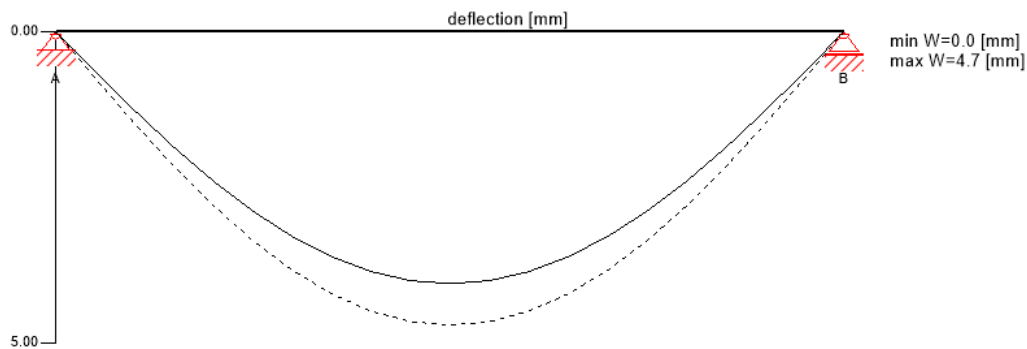
GSU karakteristična kombinacija	
	zapis
LCO1	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3$
LCO2	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.60 * LC5$
LCO3	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * LC5 + 1.00/0.00 * 0.70 * LC4$

Tablica 10.31 Kombinacije za GSU

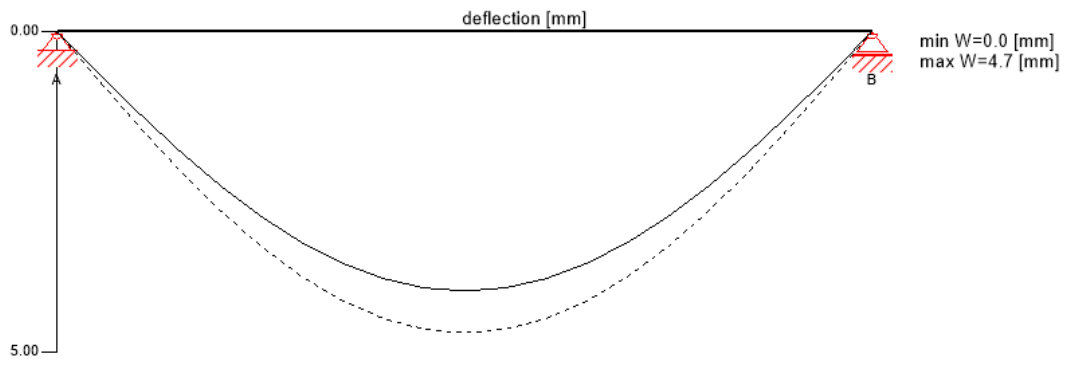
GSU nazovi-stalna kombinacija	
	zapis
LCO4	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3$
LCO5	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC5$
LCO6	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC5 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC4$



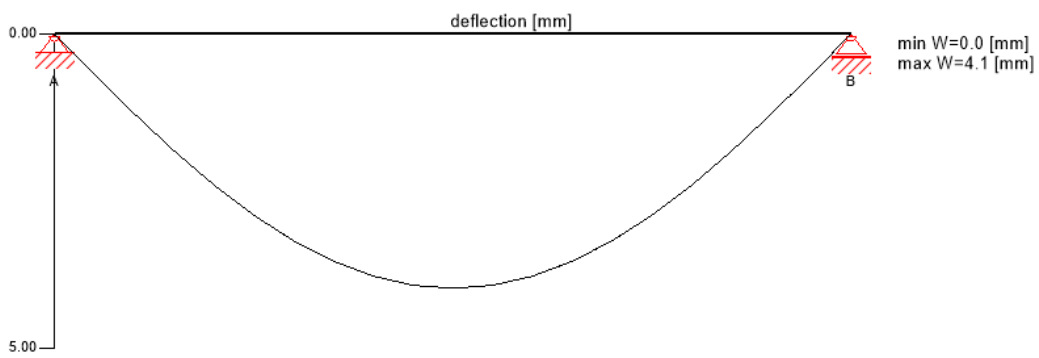
Slika 10.17 Progib za LCO1



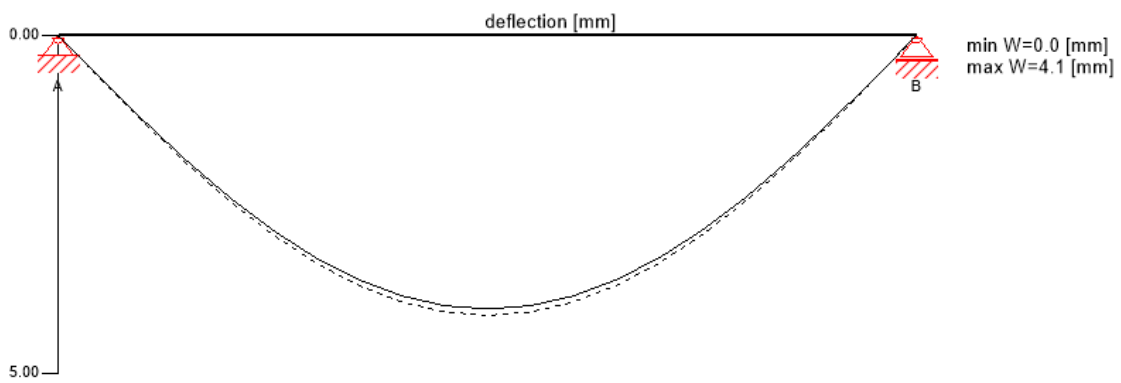
Slika 10.18 Progib za LCO2



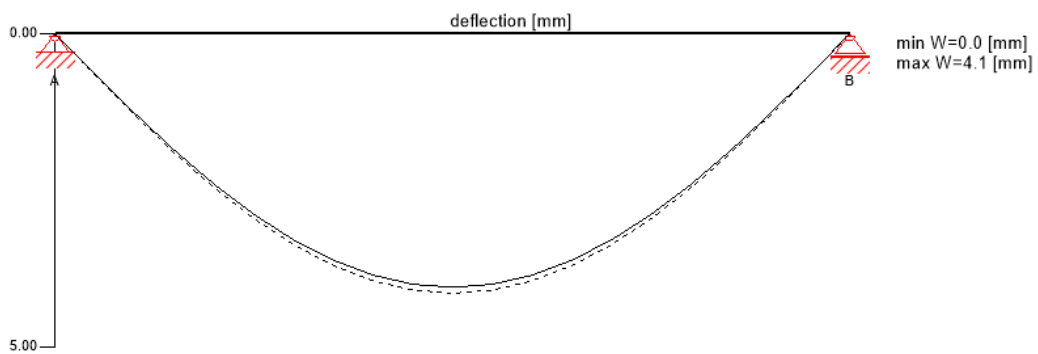
Slika 10.19 Progib za LCO3



Slika 10.20 Progib za LCO4



Slika 10.21 Progib za LCO5



Slika 10.22 Progib za LCO6

Tablica 10.32 Početni progib

Početni progib [ $w_{char}$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.8	1/300	18.7	4.7	25 %	LCO2

Tablica 10.33 Konačni progib

Konačni progib [ $w_{char} + w_{q,p} * k_{def}$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.8	1/200	28.0	8.0	29 %	LCO5

Tablica 10.34 Konačna vrijednost progiba

Konačna vrijednost progiba [ $w_{q,p} * (1 + k_{def})$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[m]	[mm]		
1	2.8	1/200	28.0	7.5	27 %	LCO5

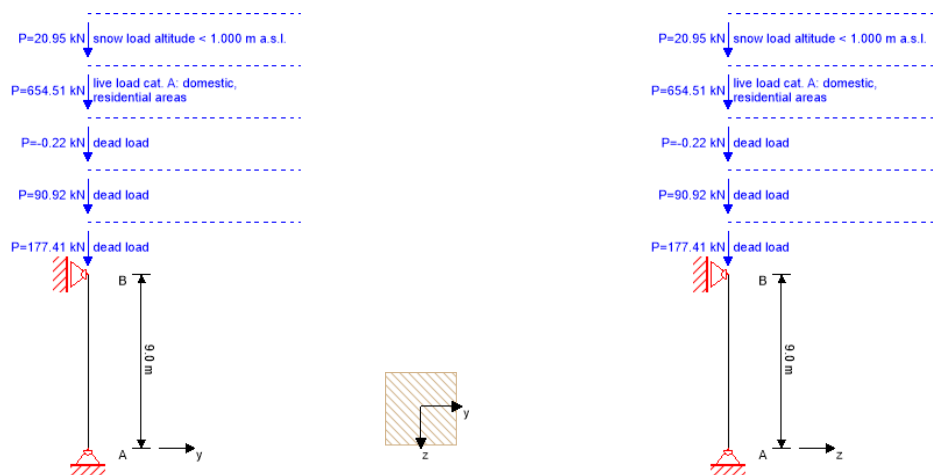
Tablica 10.35 Analiza vibracija

Analiza vibracija								
general								
total mass				33.32	[t]			
tributary width				3.3	[m]			
stiffness longitudinal direction				5427.6	[kNm <sup>2</sup> ]			
stiffness cross direction				957.9	[kNm <sup>2</sup> ]			
modal damping				1.0	[%]			
$\alpha$				0.0	[-]			
man weight				700.0	[N]			
modal mass				16645.1	[kg]			
analysis								
crit. I	crit. II	calc.	class I	class II	class I	class II	cl. I	cl. II
frequency criterion min		8.823 [Hz]	4.5 [Hz]	4.5 [Hz]	51 %	51 %	✓	✓
frequency criterion		8.823 [Hz]	8.0 [Hz]	6.0 [Hz]	91 %	68 %	✓	✓
acceleration criterion		0.025 [m/s <sup>2</sup> ]	0.05 [m/s <sup>2</sup> ]	0.1 [m/s <sup>2</sup> ]	49 %	25 %	✓	✓
stiffness criterion		0.204 [mm]	0.25 [mm]	0.5 [mm]	82 %	41 %	✓	✓

Ploča CLT 140 L5s s rebrima 18x18 cm zadovoljava granično stanje uporabljivosti sa iskoristivošću od 91%.

## 11. STATIČKI PRORAČUN U POŽARNOJ SITUACIJI

### 11.1. Proračun stupova u požarnoj situaciji



Slika 11.1 Statički sustav sa odgovarajućim opterećenjima

Iz programskog paketa Robot izvučene su vrijednosti uzdužnih sila na kritični stup od svakog pojedinog djelovanja i kao takve zadane u software-u Stora Enso za proračun učinka djelovanja požara na stup.

Tablica 11.1 Grupe opterećenja

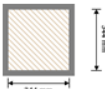
Grupe opterećenja										
	load case category	Vrsta	trajanje	Kmod	$\gamma_{inf}$	$\gamma_{sup}$	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$	
LC2	dead load	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1	
LC3	dead load	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1	
LC4	dead load	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1	
LC5	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	Srednje-trajno	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3	
LC1	snow load altitude < 1.000 m a.s.l.	Q	Kratko-trajno	0.9	0	1.5	0.5	0.2	0	

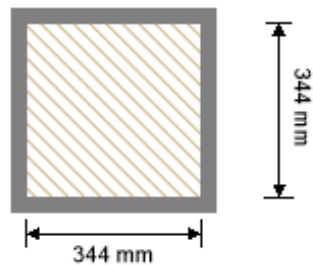
Tablica 11.2 Kombinacije za GSN- požar

GSN kombinacije- požar	
	zapis
LCO1	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/1.00 * LC4
LCO2	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/1.00 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC5
LCO3	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/1.00 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC5 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1
LCO4	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/1.00 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC1
LCO5	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/1.00 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC5

### 11.1.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta

Tablica 11.3 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa sve 4 strane

Poprečni presjek: 40/40						
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$	
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
	34.4	34.4	118,336	1,166,951,000	1,166,951,000	
Požarna otpornost: <b>R 30</b>	vrijeme		<b>30 min</b>			
Bez zaštitnih obloga	$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$	$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$
	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	1	7	21.0	56.0	21.0	56.0



Slika 11.1 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta

Tablica 11.4 Otpornost na izvijanje

Otpornost na izvijanje- požar						
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$	32.00	N/mm <sup>2</sup>	
$N_{c,d} =$	-595.37	kN	$\gamma_m =$	1.00	-	
			$k_{mod} =$	1.00	-	
			$k_{sys,y} =$	1.00	-	
			$k_{fi} =$	1.15	-	
$\sigma_{c,d} =$	5.03	N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,d} =$	36.80	N/mm <sup>2</sup>	
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,y,d} =$	38.91	N/mm <sup>2</sup>	
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,z,d} =$	38.91	N/mm <sup>2</sup>	✓
<b>iskoristivost</b>					<b>34 %</b>	

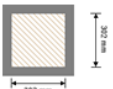
Stup presjeka 40/40cm nakon izlaganja požaru od 30 minuta doseže presjek od 34,4/34,4cm.

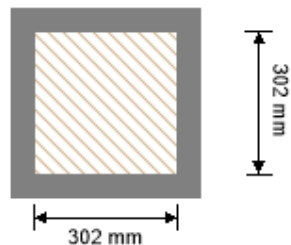
Iskoristivost presjeka na GSN je 34%.



### 11.1.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta

Tablica 11.5 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa sve 4 strane

Poprečni presjek: 40/40						
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$	
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
	30.2	30.2	91,204	693,180,700	693,180,700	
Požarna otpornost: R 60			vrijeme	60 min		
Bez zaštitnih obloga			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	42.0	98.0
				$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$	
				[mm]	[mm]	
				42.0	98.0	



Slika 11.2 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta

Tablica 11.6 Otpornost na izvijanje

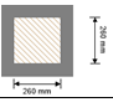
Otpornost na izvijanje- požar			
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$ 32.00 N/mm <sup>2</sup>
$N_{c,d} =$	-1343.79	kN	$\gamma_m =$ 1.25 -
			$k_{mod} =$ 0.80 -
			$k_{sys,y} =$ 1.00 -
$\sigma_{c,d} =$	8.40	N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,d} =$ 20.48 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,y,d} =$ 21.33 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,z,d} =$ 21.33 N/mm <sup>2</sup>
iskoristivost			77 % ✓

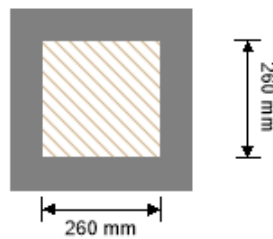
Stup presjeka 40,0/40,0cm nakon izlaganja požaru od 30 minuta doseže presjek od 30,2/30,2cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 77%.

### 11.1.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta

Tablica 11.7 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa sve 4 strane

Poprečni presjek: 40/40						
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$	
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
	26	26	67,600	380,813,500	380,813,500	
Požarna otpornost: <b>R 90</b>			vrijeme	<b>90 min</b>		
Bez zaštitnih slojeva			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	63.0	140.0
				$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$	
				[mm]	[mm]	
				63.0	140.0	



Slika 11.3 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta

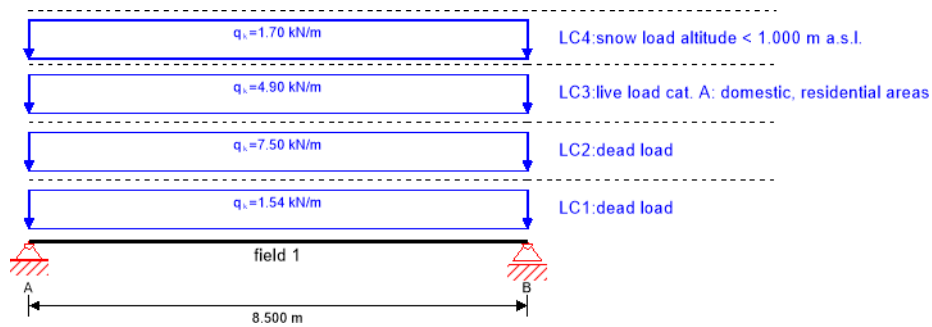
Tablica 11.8 Otpornost na izvijanje

Otpornost na izvijanje- požar						
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$	32.00	N/mm <sup>2</sup>	
$N_{c,d} =$	-595.37	kN	$\gamma_m =$	1.00	-	
			$k_{mod} =$	1.00	-	
			$k_{sys,y} =$	1.00	-	
			$k_{ft} =$	1.15	-	
$\sigma_{c,d} =$	8.81	N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,d} =$	36.80	N/mm <sup>2</sup>	
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,y,d} =$	40.01	N/mm <sup>2</sup>	
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,z,d} =$	40.01	N/mm <sup>2</sup>	
		<				✓
iskoristivost					100 %	

Stup presjeka 40,0/40,0cm nakon izlaganja požaru od 30 minuta doseže presjek od 26,0/26,0cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 100%.

## 11.2. Proračun grede ispod krovne ploče u požarnoj situaciji



Slika 11.4 Statički sustav sa odgovarajućim opterećenjima

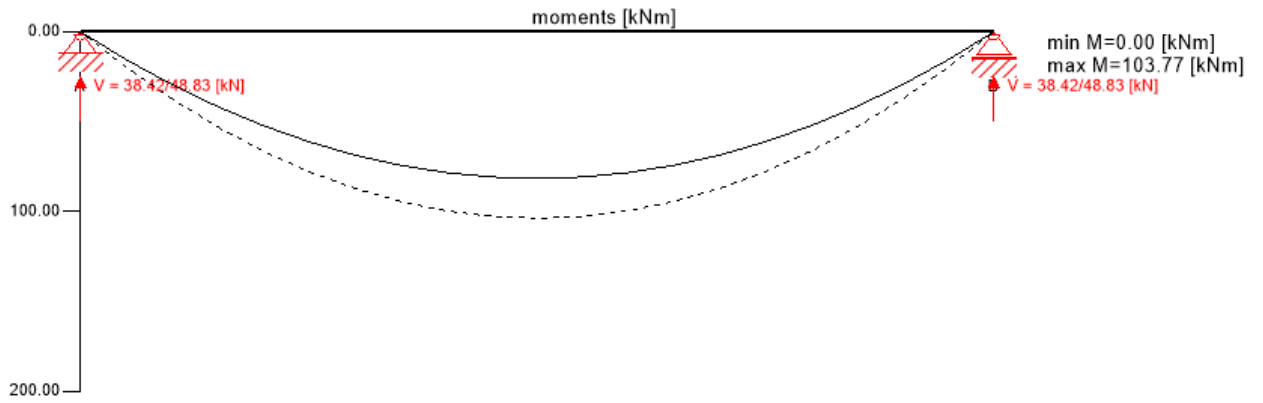
Iz programskog paketa Robot izvučene su vrijednosti uzdužnih i poprečnih sila te momenata savijanja na kritičnoj gredi od svakog pojedinog djelovanja i kao takve zadane u software-u Stora Enso za proračun učinka djelovanja požara na gredu.

Tablica 11.9 Grupe opterećenja

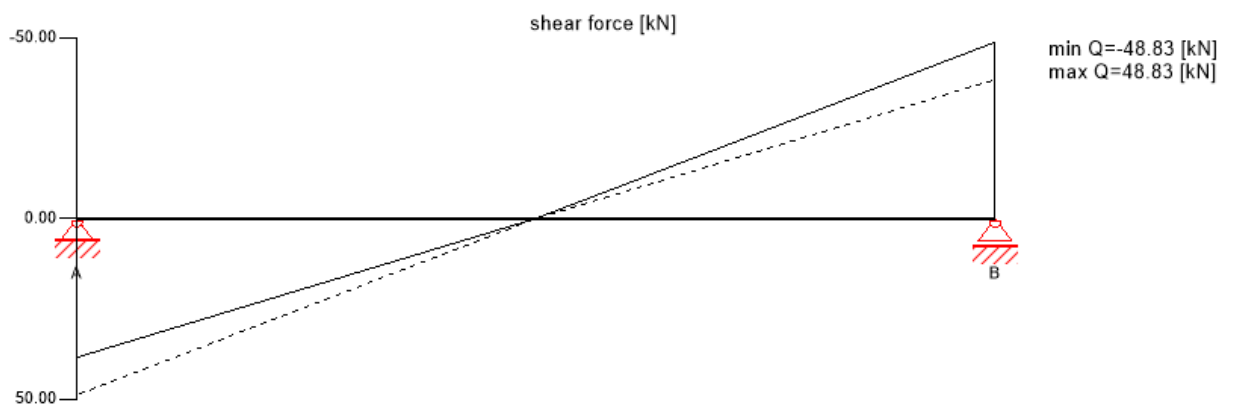
Grupe opterećenja									
	load case category	Vrsta	Trajanje	Kmod	$\gamma_{inf}$	$\gamma_{sup}$	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
LC1	deadload	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1
LC2	deadload	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1
LC3	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	Srednje-trajno	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3
LC4	snowload altitude < 1.000 m a.s.l.	Q	Kratko-trajno	0.9	0	1.5	0.5	0.2	0

Tablica 11.10 Kombinacije opterećenja za GSN- požar

GSN kombinacije- požar	
	zapis
LCO1	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2$
LCO2	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC3$
LCO3	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC4$
LCO4	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC4$
LCO5	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3$




Slika 11.5 Dijagram momenata savijanja

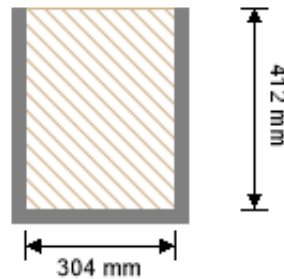


Slika 11.6 Dijagram poprečnih sila

### 11.2.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta

Tablica 11.11 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa 3 strane

Poprečni presjek: 36/44								
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$			
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]			
	30.4	41.2	125,248	1,771,675,000	964,576,800			
Požarna otpornost: <b>R 30</b>			vrijeme	<b>30 min</b>				
Bez zaštitnih slojeva			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$	$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	21.0	28.0	21.0	56.0



Slika 11.7 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta

Tablica 11.12 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar					
$M_{y,d} =$	103.77	kNm	$f_{m,k} =$	32.00	N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d} =$	0.00	kN	$\gamma_m =$	1.00	-
			$k_{mod} =$	1.00	-
			$k_{sys,y} =$	1.00	-
			$k_{fi} =$	1.15	-
$\sigma_{t,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,d} =$	31.51	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d} =$	12.07	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,y,d} =$	38.21	N/mm <sup>2</sup>
		<			✓
iskoristivost					32 %

Tablica 11.13 Otpornost na posmik


Otpornost na posmik					
$V_d =$	44.10	kN	$f_{v,k} =$	2.50	N/mm <sup>2</sup>
			$\gamma_m =$	1.00	-
			$k_{mod} =$	1.00	-
			$k_{fi} =$	1.15	-
$\tau_{v,d} =$	0.53	N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,d} =$	2.88	N/mm <sup>2</sup>
		<			✓
iskoristivost					18 %

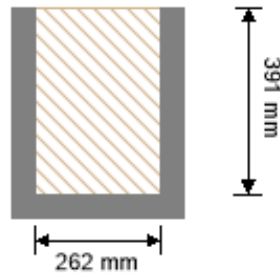
Greda presjeka 36,0/44,0cm nakon izlaganja požaru od 30 minuta doseže presjek od 30,4/41,2cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 32%.

### 11.2.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta

Tablica 11.14 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa 3 strane

Poprečni presjek: 36/44								
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$			
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]			
	26.2	39.1	102,442	1,305,119,000	586,002,300			
Požarna otpornost: <b>R 60</b>			vrijeme	<b>60 min</b>				
Bez zaštitnih slojeva			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{def,h}$	$d_{char,0,v}$	$d_{def,v}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	42.0	49.0	42.0	98.0



Slika 11.5 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta

Tablica 11.15 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar			
$M_{y,d} =$	103.77	kNm	
$N_{t,d} =$	0.00	kN	
			$f_{m,k} =$ 32.00 N/mm <sup>2</sup>
			$\gamma_m =$ 1.00 -
			$k_{mod} =$ 1.00 -
			$k_{sys,y} =$ 1.00 -
			$k_{fi} =$ 1.15 -
$\sigma_{t,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,d} =$ 31.98 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d} =$	15.54	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,y,d} =$ 38.41 N/mm <sup>2</sup>
		<	
iskoristivost			40 %

Tablica 11.16 Otpornost na posmik


Otpornost na posmik- požar			
$V_d =$	44.34	kN	
			$f_{v,k} =$ 2.50 N/mm <sup>2</sup>
			$\gamma_m =$ 1.00 -
			$k_{mod} =$ 1.00 -
			$k_{fi} =$ 1.15 -
$\tau_{v,d} =$	0.65	N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,d} =$ 2.88 N/mm <sup>2</sup>
		<	
iskoristivost			23 %

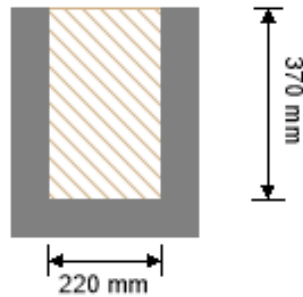
Greda presjeka 36,0/44,0cm nakon izlaganja požaru od 60 minuta doseže presjek od 26,2/39,1cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 40%.

### 11.2.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta

Tablica 11.17 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa 3 strane

Poprečni presjek: 36/44								
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$			
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]			
	22	37	81,400	928,638,500	328,313,400			
Požarna otpornost: <b>R 90</b>			vrijeme	<b>90 min</b>				
Bez zaštitnih slojeva			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$	$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	63.0	70.0	63.0	140.0



Slika 11.6 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta

Tablica 11.18 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar			
$M_{y,d} =$	103.77 kNm	$f_{m,k} =$	32.00 N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d} =$	0.00 kN	$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{sys,y} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.15 -
$\sigma_{t,d} =$	0.00 N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,d} =$	32.38 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d} =$	20.67 N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,y,d} =$	38.62 N/mm <sup>2</sup> ✓
iskoristivost			54 %

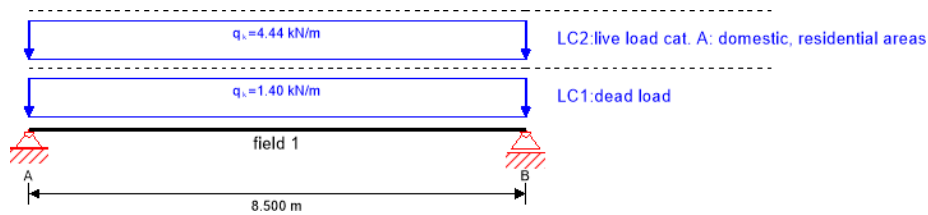
Tablica 11.19 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik			
$V_d =$	44.58 kN	$f_{v,k} =$	2.50 N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.15 -
$\tau_{v,d} =$	0.82 N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,d} =$	2.88 N/mm <sup>2</sup> ✓
iskoristivost			29 %

Greda presjeka 36,0/44,0cm nakon izlaganja požaru od 90 minuta doseže presjek od 22,0/37,0cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 54%.

### 11.3. Proračun katne grede u požarnoj situaciji



Slika 11.7 Statički sustav sa odgovarajućim opterećenjima

Iz programskog paketa Robot izvučene su vrijednosti uzdužnih i poprečnih sila te momenata savijanja na kritičnoj gredi od svakog pojedinog djelovanja i kao takve zadane u software-u Stora Enso za proračun učinka djelovanja požara na gredu.

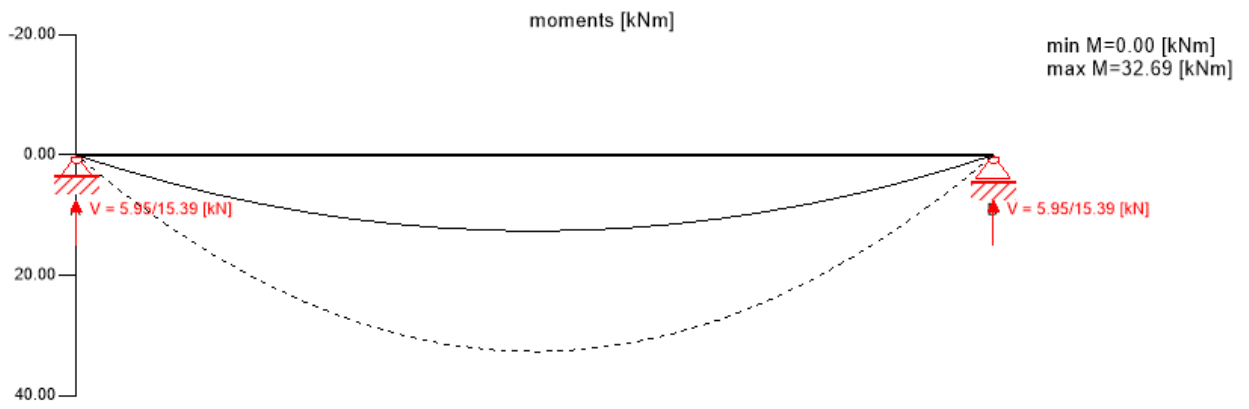
Tablica 11.20 Grupe opterećenja

Grupe opterećenja									
	load case category	Vrsta	Trajanje	Kmod	$\gamma_{inf}$	$\gamma_{sup}$	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
LC1	dead load	G	stalno	0.6	1	1.35	1	1	1
LC2	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	Srednje-trajno	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3

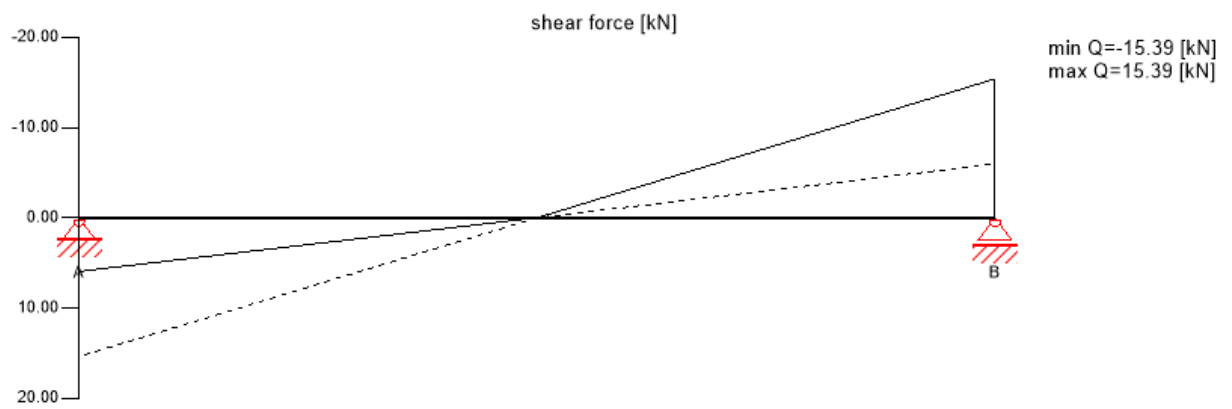
Tablica 11.21 Kombinacije opterećenja za GSN- požar

GSN kombinacije- požar	
	zapis
LCO1	$1.00/1.00 * LC1$
LCO2	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC2$






Slika 11.8 Dijagram momenata savijanja

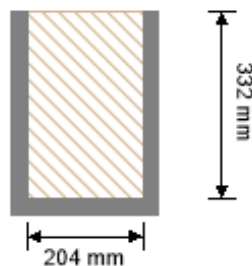


Slika 11.9 Dijagram poprečnih sila

### 11.3.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta

Tablica 11.22 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa 3 strane

Poprečni presjek: 26/36								
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$			
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]			
	20.4	33.2	67,728	622,104,300	234,880,700			
Požarna otpornost: <b>R 30</b>			vrijeme	<b>30 min</b>				
Bez zaštitnih slojeva			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$	$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	21.0	28.0	21.0	56.0



Slika 11.10 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta

Tablica 11.23 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar						
$M_{y,d} =$	32.69	kNm		$f_{m,k} =$	32.00	N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d} =$	0.00	kN		$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{sys,y} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$\sigma_{t,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>		$f_{t,d} =$	32.38	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d} =$	8.72	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{m,y,d} =$	39.04	N/mm <sup>2</sup>
iskoristivost						22 %

Tablica 11.24 Otpornost na posmik


Otpornost na posmik						
$V_d =$	14.18	kN		$f_{v,k} =$	2.50	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$\tau_{v,d} =$	0.31	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d} =$	2.88	N/mm <sup>2</sup>
iskoristivost						11 %

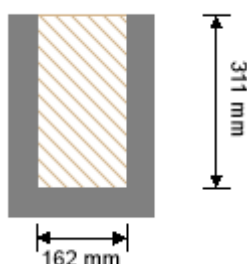
Greda presjeka 26,0/36,0cm nakon izlaganja požaru od 30 minuta doseže presjek od 20,4/33,2cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 22%.

### 11.3.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta

Tablica 11.25 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa 3 strane

Poprečni presjek: 26/36						
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$	
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
	16.2	31.1	50,382	406,083,000	110,185,400	
Požarna otpornost: <b>R 60</b>			vrijeme		<b>60 min</b>	
Bez zaštitnih slojeva			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	42.0	49.0
					$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$
					[mm]	[mm]
					42.0	98.0



Slika 11.11 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta

Tablica 11.26 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar						
$M_{y,d}$	32.69	kNm		$f_{m,k}$	32.00	N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d}$	0.00	kN		$\gamma_m$	1.00	-
				$k_{mod}$	1.00	-
				$k_{sys,y}$	1.00	-
				$k_{fi}$	1.15	-
$\sigma_{t,d}$	0.00	N/mm <sup>2</sup>		$f_{t,d}$	32.38	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d}$	12.52	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{m,y,d}$	39.30	N/mm <sup>2</sup>
iskoristivost						32 %

Tablica 11.27 Otpornost na posmik


Otpornost na posmik- požar						
$V_d$	14.26	kN		$f_{v,k}$	2.50	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m$	1.00	-
				$k_{mod}$	1.00	-
				$k_{fi}$	1.15	-
$\tau_{v,d}$	0.42	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d}$	2.88	N/mm <sup>2</sup>
iskoristivost						15 %

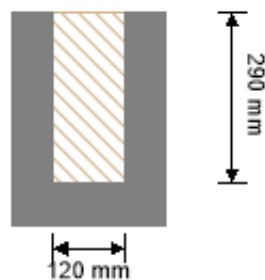
Greda presjeka 26,0/36,0cm nakon izlaganja požaru od 60 minuta doseže presjek od 16,2/31,1cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 32%.

### 11.3.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta

Tablica 11.28 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa 3 strane

Poprečni presjek: 26/36						
	širina	visina	površina	$I_y$	$I_z$	
	[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
	12	29	34,800	243,890,000	41,760,020	
Požarna otpornost: <b>R 90</b>			vrijeme	<b>90 min</b>		
Bez zaštitnih slojeva			$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$
			[-]	[mm]	[mm]	[mm]
			1	7	63.0	70.0
					$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$
					[mm]	[mm]
					63.0	140.0



Slika 11.12 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta

Tablica 11.29 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar						
$M_{y,d} =$	32.69	kNm		$f_{m,k} =$	32.00	N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d} =$	0.00	kN		$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{sys,y} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$\sigma_{t,d} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>		$f_{t,d} =$	32.38	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,y,d} =$	19.44	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{m,y,d} =$	39.58	N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>						<b>49 %</b>

Tablica 11.30 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik						
$V_d =$	14.34	kN		$f_{v,k} =$	2.50	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$\tau_{v,d} =$	0.62	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d} =$	2.88	N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>						<b>21 %</b>

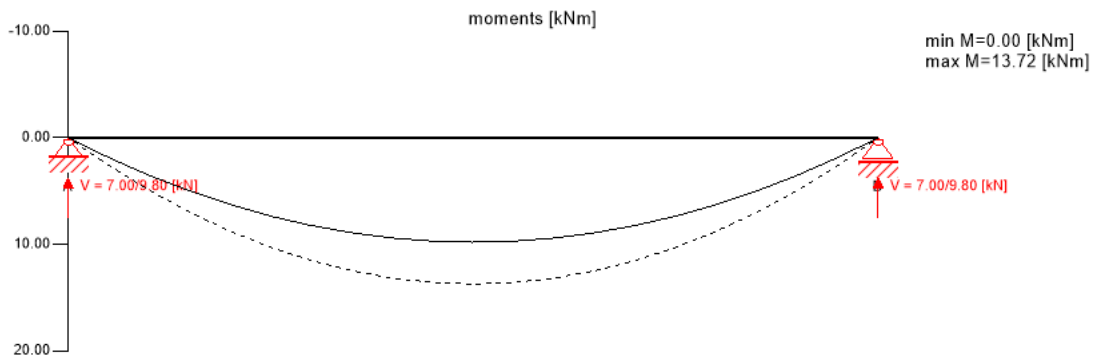
Greda presjeka 26,0/36,0cm nakon izlaganja požaru od 90 minuta doseže presjek od 12,0/29,0cm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 49%.

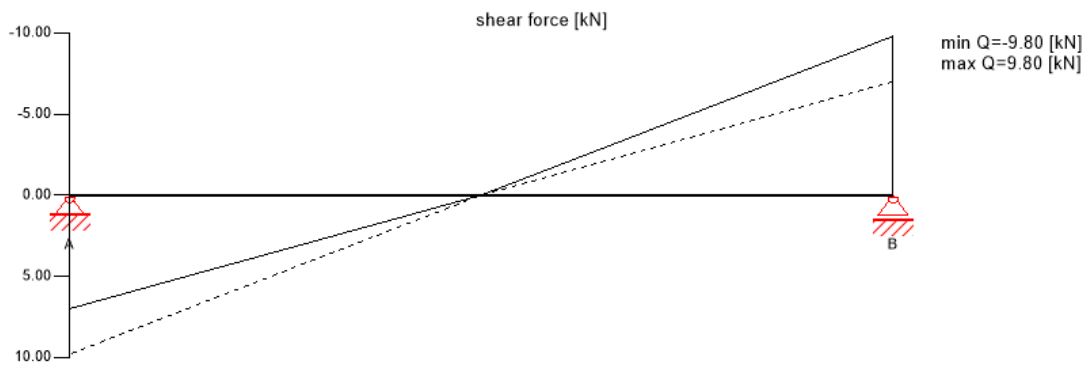
## 11.4. Proračun katne ploče u požarnoj situaciji

Tablica 11.31 Kombinacije opterećenja za GSN- požar

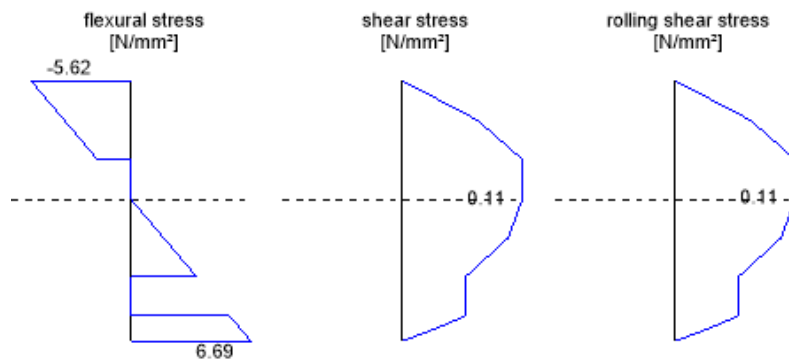
GSN kombinacije- požar	
	zapis
LCO1	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2$
LCO2	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC3$



Slika 11.13 Dijagram momenata savijanja



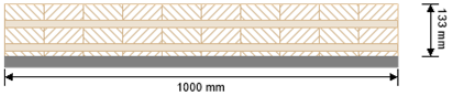
Slika 11.14 Dijagram poprečnih sila

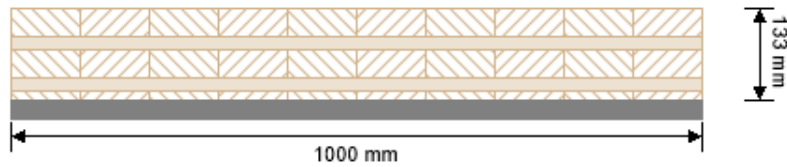


Slika 11.15 Naprezanja u poprečnom presjeku (GSN- požar)

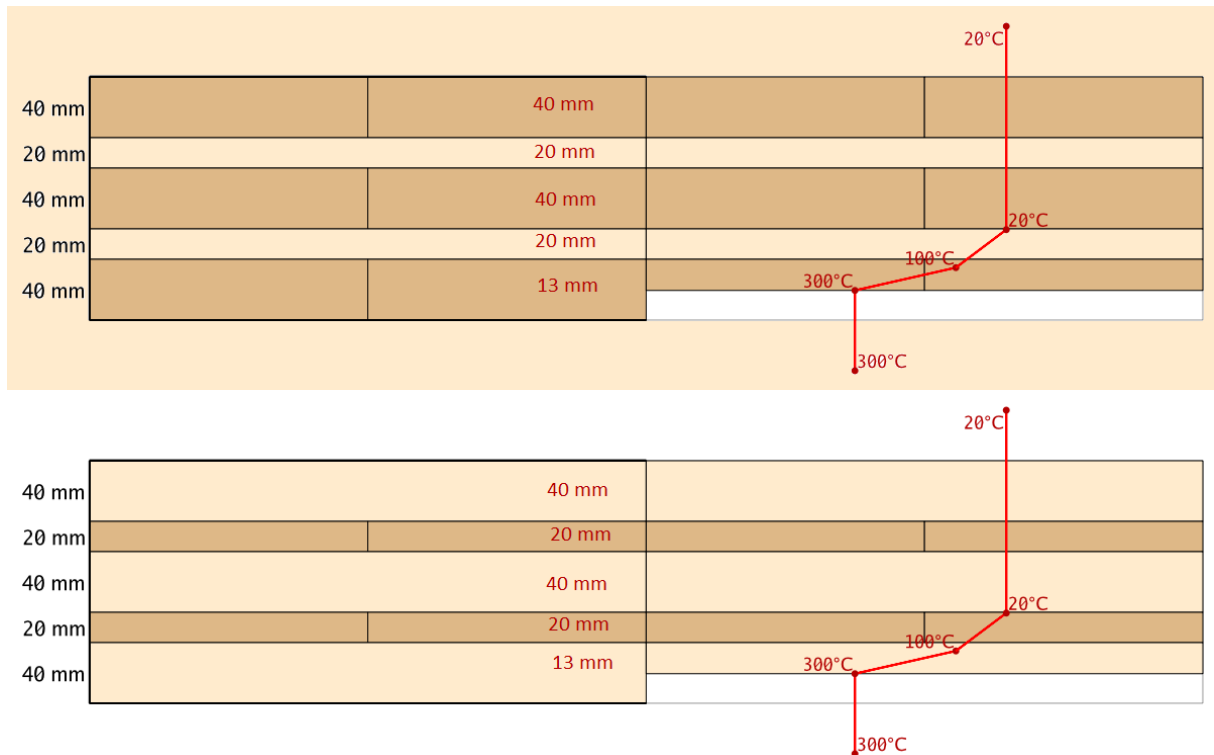
### 11.4.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta

Tablica 11.32 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa jedne strane

Poprečni presjek: CLT 160 L5s						
	layer	debljina		orijentacija		materijal
	1	40.0 mm		0°		C24
	2	20.0 mm		90°		C24
	3	40.0 mm		0°		C24
	4	20.0 mm		90°		C24
	5	13.0 mm		0°		C24
	$t_{CLT}$	133.0 mm				
Požarna otpornost: <b>R 30</b>	vrijeme	30 min				
Bez zaštitnih slojeva	$k_0$	$d_0$	$d_{char,0,h}$	$d_{ef,h}$	$d_{char,0,v}$	$d_{ef,v}$
	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	1	7	20.0	27.0	0.0	0.0



Slika 11.16 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta



Slika 11.17 Razvoj temperature i smanjenje slojeva CLT ploče

Tablica 11.33 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar					
$M_d = 13.72$	kNm		$f_{m,k} = 24.00$	N/mm <sup>2</sup>	
			$\gamma_m = 1.00$		
			$k_{mod} = 1.00$		
			$k_{sys} = 1.10$		
			$k_{fi} = 1.15$		
$\sigma_{m,d} = 6.15$	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{m,d} = 30.36$	N/mm <sup>2</sup>	✓
iskoristivost					20 %

Tablica 11.34 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik- požar					
$V_d = 9.80$	kN		$f_{v,k} = 4.00$	N/mm <sup>2</sup>	
			$\gamma_m = 1.00$		
			$k_{mod} = 1.00$		
			$k_{fi} = 1.15$		
$\tau_{v,d} = 0.11$	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d} = 4.60$	N/mm <sup>2</sup>	✓
iskoristivost					2 %

Tablica 11.35 Otpornost na rolling shear

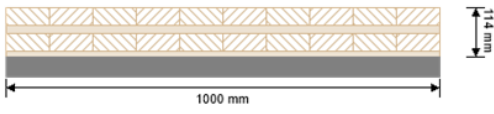
Otpornost na srolling shear					
$V_d = 9.80$	kN		$f_{r,k} = 1.25$	N/mm <sup>2</sup>	
			$\gamma_m = 1.00$		
			$k_{mod} = 1.00$		
			$k_{fi} = 1.15$		
$\tau_{r,d} = 0.11$	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{r,d} = 1.44$	N/mm <sup>2</sup>	✓
iskoristivost					7 %

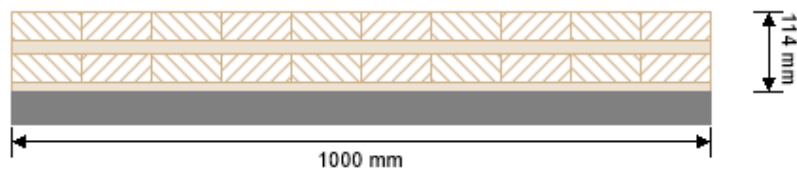
CLT ploča (CLT 160 5Ls) nakon izlaganja požaru od 30 minuta doseže debljinu presjeka od 133mm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 20%.

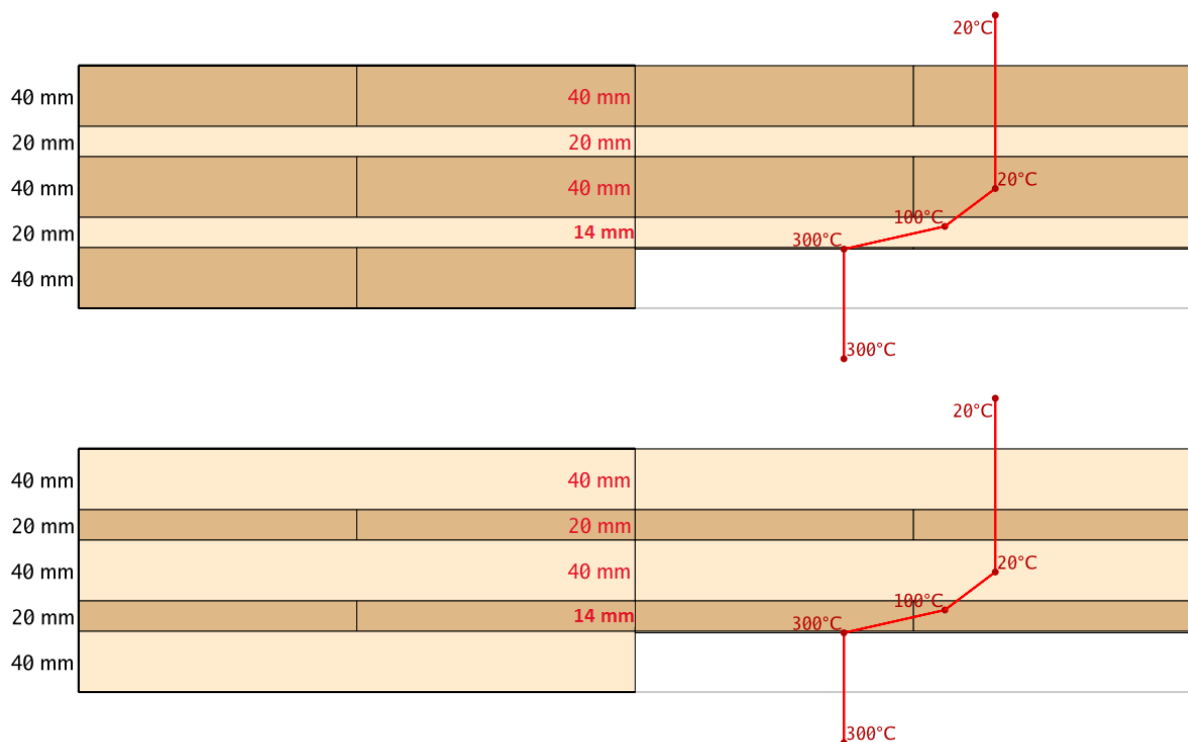
### 11.4.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta

Tablica 11.36 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa jedne strane

Poprečni presjek- požar: CLT 160 L5s						
	layer	debljina	orijentacija	materijal		
	1	40.0 mm	0°	C24		
	2	20.0 mm	90°	C24		
	3	40.0 mm	0°	C24		
	4	14.0 mm	90°	C24		
tCLT		114.0 mm				
Razred požarne otpornosti: <b>R 60</b>		vrijeme		60 min		
Bez dodatnih zaštita		k <sub>0</sub>	d <sub>0</sub>	d <sub>char,0,h</sub>	d <sub>ef,h</sub>	d <sub>char,0,v</sub>
		[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
		1	7	39.0	46.0	0.0



Slika 11.18 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta



Slika 11.19 Razvoj temperature i smanjenje slojeva CLT ploče



Tablica 11.37 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar					
$M_d = 13.72$	kNm			$f_{m,k} = 24.00$	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m = 1.00$	
				$k_{mod} = 1.00$	
				$k_{sys} = 1.10$	
				$k_{fi} = 1.15$	
$\sigma_{m,d} = 8.30$	N/mm <sup>2</sup>	<		$f_{m,d} = 30.36$	N/mm <sup>2</sup> ✓
iskoristivost					27 %

Tablica 11.38 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik- požar					
$V_d = 9.80$	kN			$f_{v,k} = 4.00$	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m = 1.00$	
				$k_{mod} = 1.00$	
				$k_{fi} = 1.15$	
$\tau_{v,d} = 0.14$	N/mm <sup>2</sup>	<		$f_{v,d} = 4.60$	N/mm <sup>2</sup> ✓
iskoristivost					3 %

Tablica 11.39 Otpornost na rolling shear

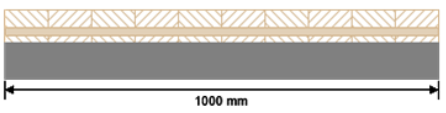
Otpornost na rolling shear					
$V_d = 9.80$	kN			$f_{r,k} = 1.25$	N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m = 1.00$	
				$k_{mod} = 1.00$	
				$k_{fi} = 1.15$	
$\tau_{r,d} = 0.14$	N/mm <sup>2</sup>	<		$f_{r,d} = 1.44$	N/mm <sup>2</sup> ✓
iskoristivost					10 %

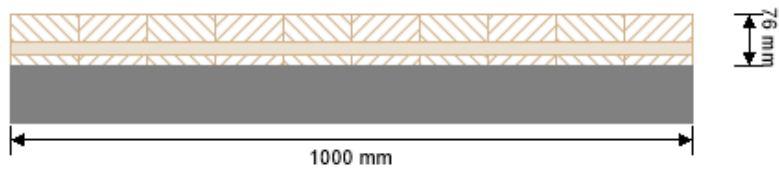
CLT ploča (CLT 160 5Ls) nakon izlaganja požaru od 60 minuta doseže debljinu presjeka od 114mm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 27%.

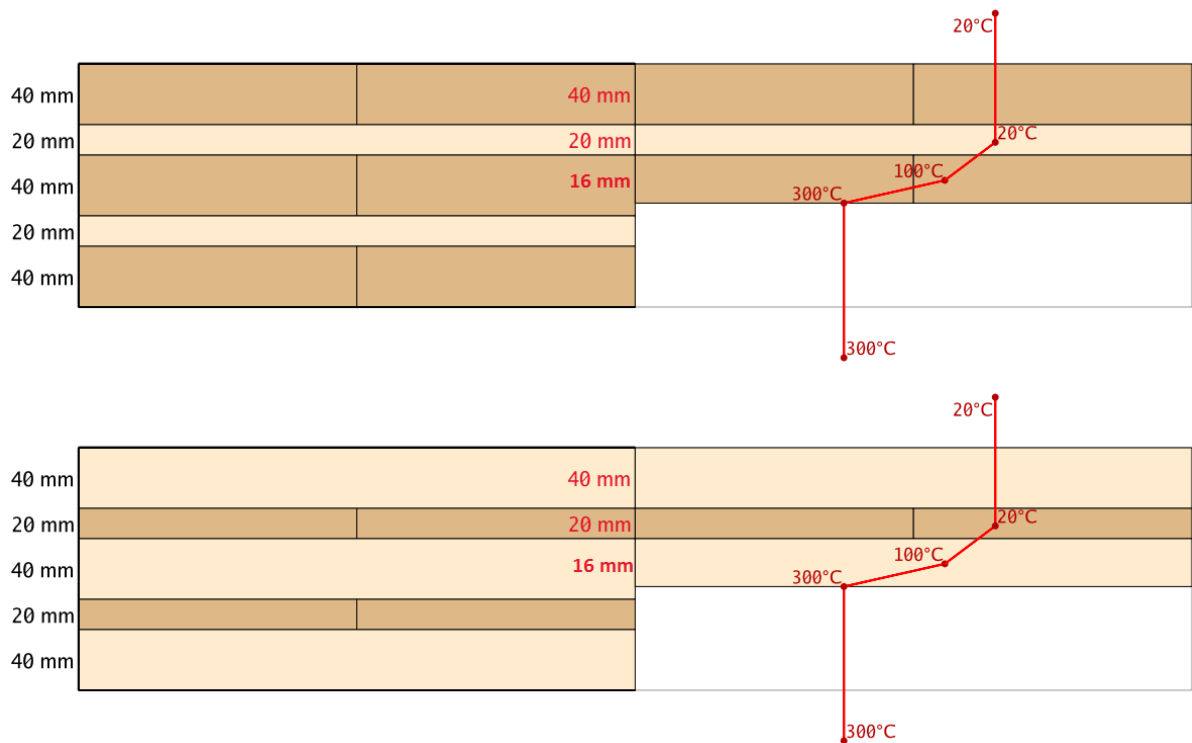
### 11.4.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta

Tablica 11.40 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa jedne strane

Poprečni presjek: CLT 160 L5s						
	layer	debljina	orijentacija	material		
	1	40.0 mm	0°	C24		
	2	20.0 mm	90°	C24		
	3	16.0 mm	0°	C24		
	t <sub>CLT</sub>	76.0 mm				
Požarna otpornost: <b>R 90</b> Bez zaštitnog sloja	vrijeme	<b>90 min</b>				
	k <sub>0</sub>	d <sub>0</sub>	d <sub>char,0,h</sub>	d <sub>ef,h</sub>	d <sub>char,0,v</sub>	d <sub>ef,v</sub>
	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	1	7	77.0	84.0	0.0	0.0



Slika 11.20 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta



Slika 11.21 Razvoj temperature i smanjenje slojeva CLT ploče

Tablica 11.41 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje- požar					
$M_d = 13.72$	kNm		$f_{m,k} = 24.00$	N/mm <sup>2</sup>	
			$\gamma_m = 1.00$		
			$k_{mod} = 1.00$		
			$k_{sys} = 1.10$		
			$k_{fi} = 1.15$		
$\sigma_{m,d} = 16.29$	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{m,d} = 30.36$	N/mm <sup>2</sup>	✓
iskoristivost					54 %

Tablica 11.42 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik					
$V_d = 9.80$	kN		$f_{v,k} = 4.00$	N/mm <sup>2</sup>	
			$\gamma_m = 1.00$		
			$k_{mod} = 1.00$		
			$k_{fi} = 1.15$		
$\tau_{v,d} = 0.17$	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d} = 4.60$	N/mm <sup>2</sup>	✓
iskoristivost					4 %

Tablica 11.43 Otpornost na rolling shear

Otpornost na rolling shear					
$V_d = 9.80$	kN		$f_{r,k} = 1.25$	N/mm <sup>2</sup>	
			$\gamma_m = 1.00$		
			$k_{mod} = 1.00$		
			$k_{fi} = 1.15$		
$\tau_{r,d} = 0.17$	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{r,d} = 1.44$	N/mm <sup>2</sup>	✓
iskoristivost					12 %

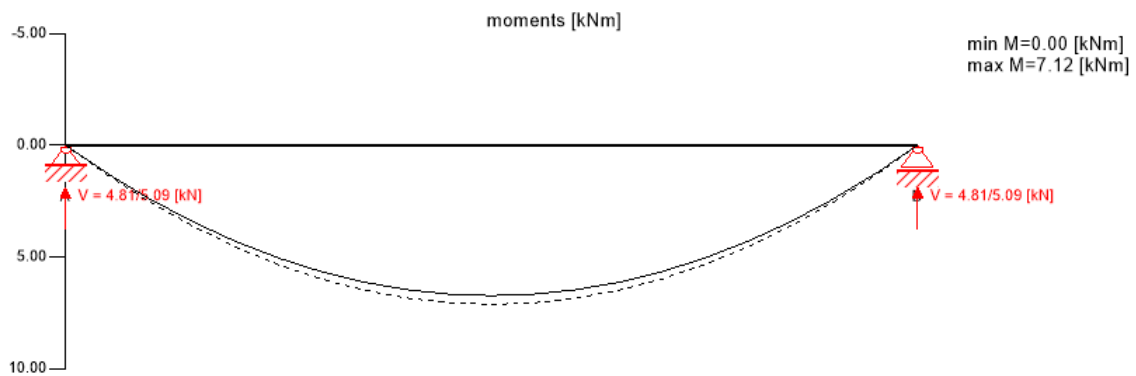
CLT ploča (CLT 160 5Ls) nakon izlaganja požaru od 90 minuta doseže debljinu presjeka od 76mm.

Iskoristivost presjeka na GSN je 54%.

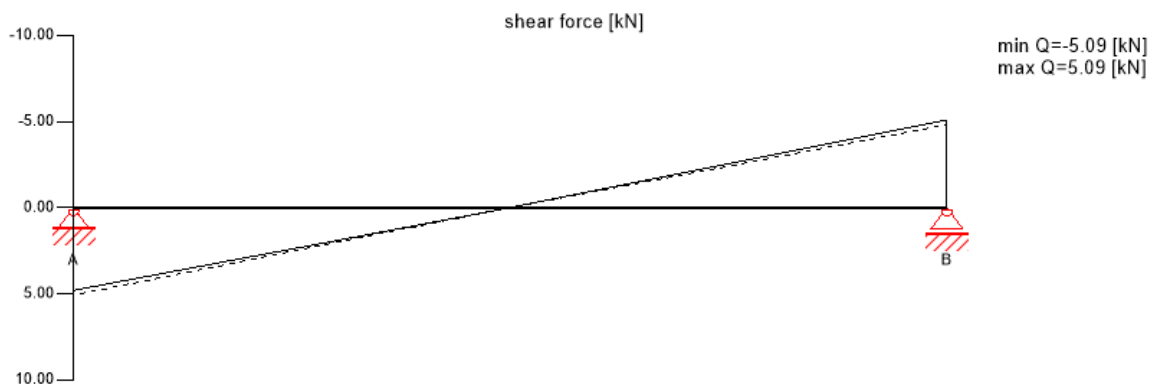
## 11.5. Proračun krovne ploče u požarnoj situaciji

Tablica 11.44 Kombinacije opterećenja za GSN- požar

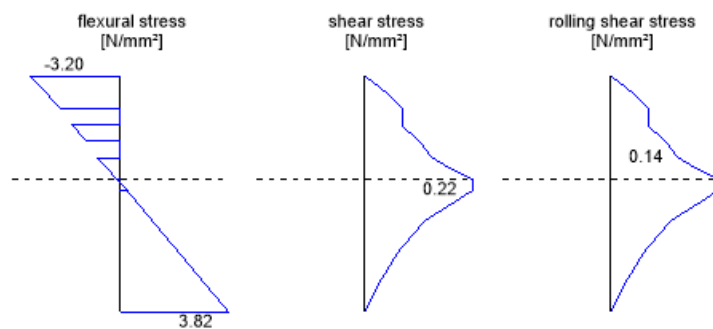
GSN kombinacije- požar	
	zapis
LCO1	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3$
LCO2	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC4$
LCO3	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.50 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC5$
LCO4	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC5$
LCO5	$1.00/1.00 * LC1 + 1.00/1.00 * LC2 + 1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC5 + 1.00/0.00 * 0.20 * LC4$



Slika 11.22 Dijagram momenata savijanja



Slika 11.23 Dijagram poprečnih sila

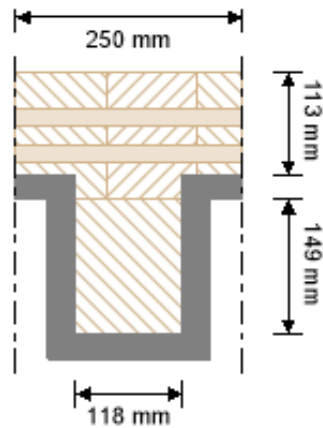
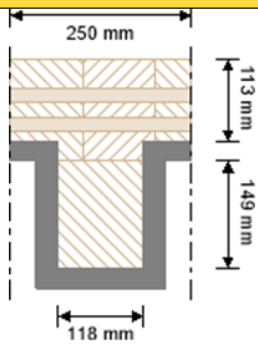


Slika 11.24 Naprezanja u poprečnom presjeku (GSN- požar)

### 11.5.1. Vrijeme izloženosti 30 minuta

Tablica 11.45 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta

Poprečni presjek: CLT 140 L5s				
layer	debljina [mm]	širina [mm]	orijentacija	materijal
1	40.0	241.0	0°	C24
2	20.0	241.0	90°	C24
3	20.0	241.0	0°	C24
4	20.0	241.0	90°	C24
5	27.0	241.0	0°	C24
6	13.0	118.0	0°	C24
7	149.0	118.0	0°	C24
t <sub>CLT</sub>		<b>289.0 mm</b>		
Požarna otpornost: <b>R 30</b>		vrijeme	<b>30 min</b>	
Bez zaštitnih slojeva		k <sub>0</sub>	d <sub>0</sub>	d <sub>char,0,h</sub>
		[-]	[mm]	[mm]
		0	0	0.0



Slika 11.25 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta

Tablica 11.46 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje					
$M_d =$	7.12	kNm		$f_{m,k} =$	24.00 N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d} =$	0.00	kN		$\gamma_m =$	1.00
				$k_{mod} =$	1.00
				$k_{sys} =$	1.00
				$k_{fi} =$	1.25
$\sigma_{t,c} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>		$f_{t,c} =$	18.36 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,d} =$	3.82	N/mm <sup>2</sup>		$f_{m,d} =$	30.04 N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>					<b>13 %</b>

Tablica 11.47 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik					
$V_d =$	5.09	kN		$f_{v,k} =$	2.30 N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.00
				$k_{mod} =$	1.00
				$k_{cr} =$	1.000
				$k_{fi} =$	1.25
$\tau_{v,d} =$	0.22	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d} =$	2.88 N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>					<b>7 %</b>

Tablica 11.48 Otpornost na rolling shear

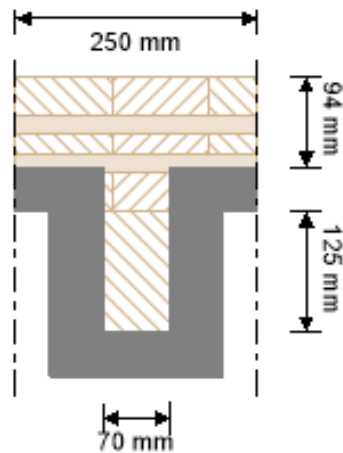
Otpornost na rolling shear					
$V_d =$	5.09	kN		$f_{r,k} =$	1.25 N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.00
				$k_{mod} =$	1.00
				$k_{fi} =$	1.15
$\tau_{r,d} =$	0.14	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{r,d} =$	1.44 N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>					<b>9 %</b>

CLT ploča (CLT 140 5Ls s rebrima 18/18cm) nakon izlaganja požaru od 30 minuta doseže debljinu presjeka od 113mm između rebara, a rebra se reduciraju na presjek 11,8/14,9cm. Iskoristivost presjeka na GSN je 13%.

### 11.5.2. Vrijeme izloženosti 60 minuta

Tablica 11.49 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta

Poprečni presjek: CLT 140 L5s					
layer	debljina [mm]	širina [mm]	orijentacija	materijal	
1	40.0	241.0	0°	C24	
2	20.0	241.0	90°	C24	
3	20.0	241.0	0°	C24	
4	20.0	70.0	90°	C24	
5	40.0	70.0	0°	C24	
6	125.0	70.0	0°	C24	
t <sub>CLT</sub>		265.0 mm			
Požarna otpornost: <b>R 60</b>		vrijeme	60 min		
Bez dodatnih zaštitnih slojeva		k <sub>0</sub>	d <sub>0</sub>	d <sub>char,0,h</sub>	d <sub>ef,h</sub>
		[-]	[mm]	[mm]	[mm]
		0	0	0.0	0.0



Slika 11.26 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta

Tablica 11.50 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje					
$M_d =$	7.12	kNm		$f_{m,k} =$	24.00 N/mm <sup>2</sup>
$N_{t,d} =$	0.00	kN		$\gamma_m =$	1.00
				$k_{mod} =$	1.00
				$k_{sys} =$	1.00
				$k_{fi} =$	1.25
$\sigma_{t,c} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>		$f_{t,c} =$	20.38 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,d} =$	6.92	N/mm <sup>2</sup>		$f_{m,d} =$	31.11 N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>					<b>22 %</b>

Tablica 11.51 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik					
$V_d =$	5.09	kN		$f_{v,k} =$	2.30 N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.00
				$k_{mod} =$	1.00
				$k_{cr} =$	1.000
				$k_{fi} =$	1.25
$\tau_{v,d} =$	0.37	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{v,d} =$	2.88 N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>					<b>13 %</b>

Tablica 11.52 Otpornost na rolling shear

Otpornost na rolling shear					
$V_d =$	5.09	kN		$f_{r,k} =$	1.25 N/mm <sup>2</sup>
				$\gamma_m =$	1.00
				$k_{mod} =$	1.00
				$k_{fi} =$	1.15
$\tau_{r,d} =$	0.39	N/mm <sup>2</sup>	<	$f_{r,d} =$	1.44 N/mm <sup>2</sup>
<b>iskoristivost</b>					<b>27 %</b>

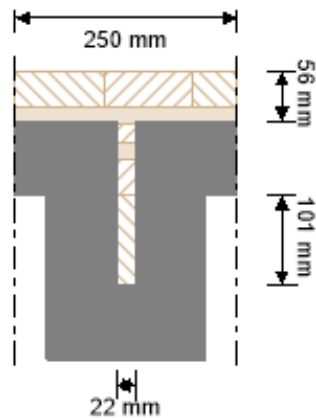
CLT ploča (CLT 140 5Ls s rebrima 18/18cm) nakon izlaganja požaru od 60 minuta doseže debljinu presjeka od 94mm između rebara, a rebra se reduciraju na presjek 7,0/12,5cm. Iskoristivost presjeka na GSN je 22%.



### 11.5.3. Vrijeme izloženosti 90 minuta

Tablica 11.53 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta

Poprečni presjek: CLT 140 L5s					
layer	debljina [mm]	širina [mm]	orijentacija	materijal	
2	20.0	22.0	90°	C24	
3	20.0	22.0	0°	C24	
4	20.0	22.0	90°	C24	
5	40.0	22.0	0°	C24	
6	101.0	22.0	0°	C24	
t <sub>CLT</sub>		<b>241.0 mm</b>			
Požarna otpornost: <b>R 90</b> Bez dodatnih zaštitnih slojeva		vrijeme	<b>90 min</b>		
		k <sub>0</sub>	d <sub>0</sub>	d <sub>char,0,h</sub>	d <sub>ef,h</sub>
		[-]	[mm]	[mm]	[mm]
		0	0	0.0	0.0



Slika 11.27 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta

Tablica 11.54 Otpornost na savijanje

Otpornost na savijanje			
$M_d =$	7.12	kNm	
$N_{t,d} =$	0.00	kN	
			$f_{m,k} = 24.00$ N/mm <sup>2</sup>
			$\gamma_m = 1.00$
			$k_{mod} = 1.00$
			$k_{sys} = 1.00$
			$k_{fi} = 1.25$
$\sigma_{t,e} =$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,e} = 22.75$ N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{m,d} =$	23.27	N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,d} = 32.47$ N/mm <sup>2</sup> ✓
iskoristivost			72 %

Tablica 11.55 Otpornost na posmik

Otpornost na posmik			
$V_d =$	5.09	kN	
			$f_{v,k} = 2.30$ N/mm <sup>2</sup>
			$\gamma_m = 1.00$
			$k_{mod} = 1.00$
			$k_{cr} = 1.000$
			$k_{fi} = 1.25$
$\tau_{v,d} =$	1.15	N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,d} = 2.88$ N/mm <sup>2</sup> ✓
		<	
iskoristivost			40 %

Tablica 11.56 Otpornost na rolling shear

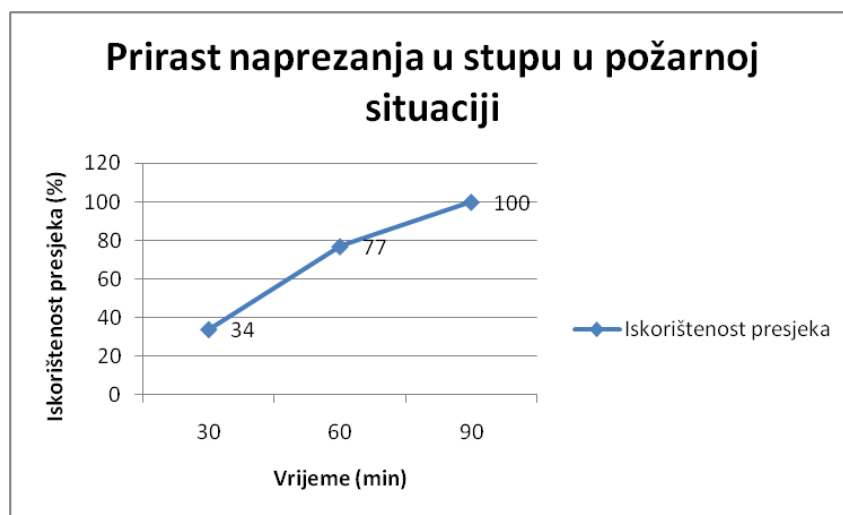
Otpornost na rolling shear			
$V_d =$	5.09	kN	
			$f_{r,k} = 1.25$ N/mm <sup>2</sup>
			$\gamma_m = 1.00$
			$k_{mod} = 1.00$
			$k_{fi} = 1.15$
$\tau_{r,d} =$	1.35	N/mm <sup>2</sup>	$f_{r,d} = 1.44$ N/mm <sup>2</sup> ✓
		<	
iskoristivost			94 %

CLT ploča (CLT 140 5Ls s rebrima 18/18cm) nakon izlaganja požaru od 90 minuta doseže debljinu presjeka od 56mm između rebara, a rebra se reduciraju na presjek 2,2/10,1cm. Iskoristivost presjeka na GSN je 94%.

## 12.USPOREDBA REZULTATA

Tablica 12.1 Usporedba iskoristivosti za stup

	ISKORISTIVOST PRESJEKA			
	GSN	GSN-POŽAR-30	GSN-POŽAR-60	GSN-POŽAR-90
Stup	75%	34%	77%	100%



Slika 12.1 Prirast naprezanja u stupu

Tablica 12.2 Usporedba iskoristivosti za katnu gredu

	ISKORISTIVOST PRESJEKA			
	GSN	GSN-POŽAR-30	GSN-POŽAR-60	GSN-POŽAR-90
Greda-kat	60%	22%	32%	49%



Slika 12.2 Prirast naprezanja u katnoj gredi

Tablica 12.3 Usporedba iskoristivosti za krovnu gredu

ISKORISTIVOST PRESJEKA				
	GSN	GSN-POŽAR-30	GSN-POŽAR-60	GSN-POŽAR-90
Greda-krov	70%	32%	40%	54%



Slika 12.3 Prirast naprezanja u krovnoj gredi

Tablica 12.4 Usporedba iskoristivosti za katnu ploču

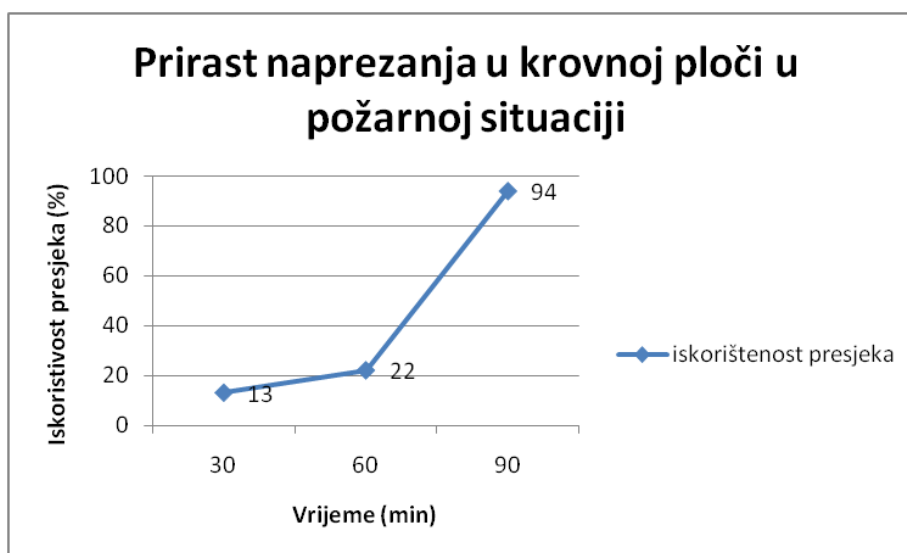
ISKORISTIVOST PRESJEKA						
	GSN	GSU		GSN-POŽAR-30	GSN-POŽAR-60	GSN-POŽAR-90
		progib	vibracije			
Ploča kata	39%	99%	98%	20%	27%	54%



Slika 12.4 Prirast naprezanja u katnoj ploči

Tablica 12.5 Usporedba iskoristivosti za krovnu ploču

ISKORISTIVOST PRESJEKA						
Krovna ploča	GSN	GSU		GSN-POŽAR-30	GSN-POŽAR-60	GSN-POŽAR-90
		progib	vibracije			
	27%	29%	91%	13%	22%	94%



Slika 12.5 Prirast naprezanja u katnoj ploči

### 13. ZAKLJUČAK

Drvene konstrukcije postaju sve popularnije u svijetu čemu je pridonio razvoj novih sustava i materijala poput križno lameliranog drva. Takvi sustavi pogodni su za izvedbu nosivih zidova i ploča, dok se za grede i stupove primjenjuje lijepljeno lamelirano drvo. Brza i „čista“ gradnja, ekonomski prihvatljiva i ekološki pogodna, izvrsna mehanička svojstva i pogodno arhitektonsko oblikovanje samo su neke od kvaliteta drvenih sustava.

Popularna percepcija da drvo gori iznimno brzo i da drvene zgrade spadaju pod skupinu visoko-rizičnih i nesigurnih u požaru je pogrešna. Drveni elementi malih dimenzija imaju relativno male požarne otpornosti, ali za masivne drvene elemente, u koje spadaju CLT zidovi i ploče, potrebno je duže vrijeme za njihovo zapaljenje, a kad se to dogodi elementi se prirodno štite stvaranjem pougljenog sloja preko lica presjeka. Također drveni elementi u požarnoj situaciji ne mijenjaju svoja mehanička svojstva i dok god je očuvana jezgra presjeka sustav neće izgubiti svoju nosivost.

Do danas u Hrvatskoj ne postoje sređeni propisi za korištenje CLT elemenata, a niti su provedena ispitivanja takvih sustava na požar. U Europi su provedena brojna ispitivanja, ali nedovoljan broj je onih na realnim konstrukcijama u mjerilu 1:1.

Rezultati ovog rada pokazali su da drveni elementi imaju veće probleme kako bi zadovoljili zahtjeve graničnog stanja uporabljivosti (progibe i vibracije) nego zahtjeve vezane uz granično stanje nosivosti u požarnoj situaciji i to bez ikakvog zaštitnog sloja. Za gredu zahtjev na koji se dimenzionirala proizašao je iz progiba te grede, a kao takva iskorištenost u požarnoj situaciji joj je izračunata tek oko 50% na 90 minuta standardnog požara. Također za krovnu ploču dominantan zahtjev za dimenzioniranje su bile vibracije (koje je zadovoljila 91%), a iskorištenost presjeka na 90 minuta standardnog požara je bila 94%. Stup na granično stanje nosivosti smo iskoristili 75% i kao takav proračunato je da može izdržati standardni požar punih 90 minuta. Na pločastim elementima uočen je blagi prirast naprezanja u požarnoj situaciji u periodu od 30-60 minuta, stoga za preliminarni proračun ako se zahtjeva požarna otpornost do F60, može se usvojiti da će ona biti zadovoljena iskorištavanjem presjeka u graničnom stanju nosivosti od oko 80%. Nakon 60 minuta požara iskorištenost presjeka nešto ubrzano raste.

Sukladno svemu navedenom treba navesti da propisi Republike Hrvatske, u pogledu požarne otpornosti, nisu korektni jer eliminiraju korištenje drva u konstrukcijama bez prethodno

izdane dozvole od nadležnog tijela. Drvo se u određenim situacijama ponaša bolje od npr. čelika, a pogotovo aluminijska i sličnih materijala s velikim koeficijentom toplinske provodljivosti.

Europske zemlje su prihvatile koncept Eurokoda 5 (EN 1995-1-2), tj. koncept realne otpornosti koja se može isprojektirati za zadani nivo požarne otpornosti u kojem se navodi da se otpornost drvenih konstrukcijskih elemenata postiže pasivnom zaštitom povećanjem dimenzija presjeka.

Drvo nije negoriv materijal, niti može postati negoriv materijal, ali presjeci mogu postići iznimno visoke nivoe požarne otpornosti naročito kod primjene novih materijala na osnovi drva npr. CLT ili LVL, ili primjenom određenih protupožarnih zaštita.

Za daljnja istraživanja u ovom području predlaže se ispitivanje ponašanja spojnih sredstava u kombinaciji sa masivnim drvenim elementima u požarnoj situaciji, ispitivanje različitih vrsta protupožarne zaštite drvenih CLT elemenata.

## SAŽETAK

Filip Knežević

### ANALIZA OTPORNOSTI DRVENE ZGRADE OD LLD I CLT ELEMENATA IZLOŽENE POŽARNOM DJEOVANJU

Provedena je analiza drvene zgrade od lijepljeno lameliranog (LLD) i križno lameliranog drva (CLT). Glavni cilj rada je pokazati neispravnost hrvatskih propisa jer eliminiraju korištenje drvenih elemenata smatrajući ih izrazito nepovoljnim u požarnoj situaciji unatoč poznatoj činjenici da se oni u određenim situacijama ponašaju bolje od npr. čelika, aluminijske ili sličnih materijala sa velikim koeficijentom toplinske provodljivosti. Drugi cilj je pokazati da se novim sustavima npr. CLT ili LVL mogu postići iznimno visoke razine požarne otpornosti. Iz analize je utvrđeno da je veći problem zadovoljiti zahtjeve vibracija na CLT pločama, nego samu požarnu otpornost, te da ograničavanjem iskorištenosti presjeka za GSN i GSU na oko 80% možemo zadovoljiti zahtjeve za požarnu otpornost.

Ključne riječi: Križno lamelirano drvo (CLT), lijepljeno lamelirano drvo (LLD), drvene zgrade, požarna situacija, požarna otpornost

### FIRE RESISTANCE ANALYSIS OF TIMBER BUILDING USING GLT AND CLT ELEMENTS

The analysis of a timber building made of glued laminated (GL) and cross laminated timber (CLT) was carried out. The main aim of the work is to demonstrate the incorrectness of Croatian regulations by eliminating the usage of timber elements, considering them extremely unfavorable in the fire situation, despite the fact that they, in certain situations, behave better than steel, aluminum or similar materials with a high thermal conductivity coefficient. Another aim is to show that new systems such as CLT or LVL can achieve extremely high levels of fire resistance. From the analysis, it was found that the bigger problem is to meet the vibration requirements on CLT deck rather than the fire resistance itself, and that limiting the coverage of ULS and SLS to about 80% can meet fire resistance requirements.

Key words: Cross laminated timber (CLT), glued laminated timber (GLT), timber buildings, fire situation, fire resistance



## **ZAHVALE**

Mentorici prof. dr. sc. Vlatki Rajčić, dipl. ing. građ., na neumornoj pomoći, trudu i vremenu uloženom u izradu ovog rada.

Dr.sc. Mislavu Stepincu, dipl. ing. građ., na vrijednim savjetima i pomoći pri pisanju rada.

## Literatura

- [1] A. Bjelanović, "Ponašanje drva i drvenih konstrukcija u požaru i otpornost na djelovanje požara Adriana," 2011.
- [2] R. M. Rowell, "Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press." 2005.
- [3] L. E. Beramendi-Orosco, M. Castro-Díaz, C. E. Snape, C. H. Vane, and D. J. Large, "Application of catalytic hydrolysis for the rapid preparation of lignin concentrates from wood," 2004.
- [4] "HRN EN 1995-1-2:2013 Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija- Proračun konstrukcija na djelovanje požara."
- [5] B. Peroš and I. Boko, "Otpornost konstrukcija na požar," 2009.
- [6] I. Androić, B.; Dujmović, D.; Džeba, *Čelične konstrukcije 1*. Zagreb: IA Projektiranje, 2007.
- [7] EN 1995-1-2, *Design of timber structures: Structural fire design*. Brussels: European Committee for standardization, 2004.
- [8] Leonardo Da Vinci Pilot Project, *Handbook 5 – Design of buildings for the fire situations*. 2005.
- [9] Research Profil ARBED, "Competitive steel buildings through natural fire safety concept."
- [10] EN 1991-1-2, *Actions on structures – Actions on structures exposed to fire*. Brussels: European Committee for standardization.
- [11] I. Andersson and N. Ek, "Temperature distribution and charring penetrations in timber assemblies exposed to parametric fire curves penetrations in timber assemblies exposed to parametric fire curves Comparisons between tests and TASEF predictions," 2017.
- [12] E. L. Schaffer, "An approach to the mathematical prediction of temperature rise within a semi-infinite wood slab subjected to high temperature conditions." 1965.
- [13] *HRN DIN 4102- Fire behaviour of building materials and elements*. .
- [14] L. Kopričanec-Matijevac, "Otpornost građevinskih konstrukcija na požar."
- [15] A. Bjelanović and V. Rajčić, *Drvene konstrukcije prema europskim normama*, Drugo izda. 2007.
- [16] "Drvene konstrukcije." [Online]. Available: <http://drvene-konstrukcije.hr/karakteristike-ld/>.
- [17] M. Mohammad, S. Gagnon, B. Douglas, and L. Podesto, "Introduction to Cross Laminated Timber," *A J. Contemporary Wood Eng.*, pp. 3–12, 2012.
- [18] C. Varga, O. Horx-strathern, and G. Guntschnig, "The future of Timber Construction: CLT – Cross Laminated Timber," p. 108, 2017.

- [19] R. Brandner, "Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report," *Focus Solid Timber Solut. - Eur. Conf. Cross Laminated Timber*, no. May 2013, pp. 3–36, 2014.
- [20] H. Unterwieser and G. Schickhofer, "Characteristic Values and Test Configurations of CLT with Focus on selected Properties," *Focus Solid Timber Solut. - Eur. Conf. Cross Laminated Timber*, pp. 35–65, 2014.
- [21] Storaenso, "CLT - Cross Laminated Timber Fire Protection," 2012.
- [22] E. Karacabeyli and D. Brad, *CLT Handbook*. 2013.
- [23] K. M. GmbH, "Cross - laminated timber," p. 20, 2012.
- [24] T. Owens, "Building Better Boards: Increasing the Fire Resistance of Cross Laminated Timber." [Online]. Available: <https://www.fpl.fs.fed.us/labnotes/?p=24850>.

## Popis slika

Slika 1.1 Prve nastambe- drveni kolci.....	1
Slika 1.2 Sojenica.....	1
Slika 1.3 Drvena kapela Sv. Jurja-Turopolje .....	2
Slika 1.4 Drvena kuća-kanatni sustav .....	3
Slika 1.5 Udaljenost između industrijskih i stambenih zona .....	5
Slika 2.1 Krivulja stvarnog požara .....	6
Slika 2.2 Početni požar-zapaljenje .....	7
Slika 2.3 Početni požar-širenje.....	7
Slika 2.4 Faza vatrenog skoka.....	8
Slika 2.5 Faza potpuno razvijenog požara.....	9
Slika 2.6 Prikaz oštećenja uslijed a) požarnog djelovanja b) napada gljivica.....	10
Slika 2.7 Smanjenje nosivog dijela presjeka pod utjecajem požara.....	11
Slika 3.1 Očitavanje faktora redukcije $\eta_{fi}$ u ovisnosti o faktoru kombinacije $\Psi_{fi}$ i o omjeru $Q_{k,1}/G_k$ .....	12
Slika 3.2 Rezultati termogravimetrijske analize drva hrasta, čiste celuloze i lignina[3] .....	13
Slika 3.3 Promjena toplinske provodljivosti drva obzirom na promjenu temperature[4] .....	13
Slika 3.4 Smanjenje čvrstoće drva pod povećanjem temperature-predavanja .....	15
Slika 3.5 Smanjenje modula elastičnosti drva pod povećanjem temperature .....	15
Slika 4.1 Krivulje prirodnih (realnih) požara i standardna ISO požarna.....	17
Slika 4.2 Eurokod razlikuje dvije vrste dubine pougljenja; $d_{char,0}$ (dubinu pougljenja za jednodimenzionalno izgaranje) i $d_{char,n}$ (dubinu pougljenja koja uzima u obzir i zaobljenje rubova pri izgaranju)	18
Slika 5.1 Dva različita pristupa određivanja mehaničkog odgovora kod požara .....	21
Slika 5.2 Slijed događaja na konstrukciju pojavom požara.....	22
Slika 5.3 Efektivna dubina redukcije $def$ kod metode efektivnog presjeka .....	24
Slika 5.4 Promjena $k_{mod,fi}$ u ovisnosti o $p/A_f$ .....	25
Slika 5.5 Usporedba veličine redukcije poprečnog presjeka pri različitim proračunima požara (za primjer je uzet nosač dimenzija 220×1000mm, klase GL24k i faktora otvora $O = 0,02636 m_{0,5}$ ) .....	25
Slika 5.6 Usporedba promjene otpornosti poprečnog presjeka pri različitim pristupima proračunu požara (za primjer je uzet nosač dimenzija 220×1000mm, klase GL24k i faktora otvora $O = 0,02636 m_{0,5}$ ) .....	26
Slika 5.7 Određivanje požarnog scenarija.....	27
Slika 5.8 Toplinski odgovor .....	31
Slika 5.9 Nominalne krivulje .....	33
Slika 5.10 Parametarske krivulje temperatura-vrijeme .....	34
Slika 5.11 Model jedne zone .....	34
Slika 5.12 Model dvije zone.....	35
Slika 5.13 Brzina pougljenja za parametarski požar po EC5 .....	37
Slika 6.1 Pasivne metode zaštite od požara.....	41
Slika 7.1 Proizvod dobiven lijepljenjem lamela (LLD) .....	43
Slika 7.2 Slijed proizvodnje lameliranog nosača sa odgovarajućim radovima.....	44

Slika 7.3 Drveni nosač izložen požarnim temperaturama za vrijeme od 1 sata izgubio je 4 cm po svom opsegu[16] .....	46
Slika 8.1 Koncept i stvarni CLT panel .....	47
Slika 8.2 Mogući poprečni presjeci CLT panela .....	48
Slika 8.3 Razlika između paralelno i križno lameliranih elemenata .....	48
Slika 8.4 Prikaz CLT panela u prostoru i sa dva karakteristična presjeka .....	49
Slika 8.5 Postupak proizvodnje CLT panela .....	50
Slika 8.6 Kriteriji pri ispitivanju požara .....	53
Slika 8.7 CLT požarno ispitivanje stropnih ploča, NRCC, Ottawa (Canada).....	54
Slika 8.8 Element izložen požaru .....	56
Slika 8.9 CLT zid izložen tlačnoj sili i savijanju .....	61
Slika 8.10 CLT ploča nakon ispitivanja .....	62
Slika 9.1 Prikaz namjene prostora u konstrukciji .....	64
Slika 9.2 Lokacija konstrukcije .....	64
Slika 9.3 Pogledi na konstrukciju.....	65
Slika 9.4 Tlocrtni pogled na konstrukciju- arhitektonski nacrt .....	66
Slika 9.5 Presjek konstrukcije- arhitektonski nacrt .....	66
Slika 9.6 Tlocrtni prikaz samo stambenog dijela- hostela .....	67
Slika 9.7 Prikaz nosivih elemenata, greda, stupova i jezgre .....	67
Slika 10.1 Model konstrukcije u Robot-u .....	75
Slika 10.2 Prikaz mjerodavnih unutarnjih poprečnih sila .....	77
Slika 10.3 Prikaz mjerodavnih unutarnjih momenata savijanja .....	77
Slika 10.4 Prikaz mjerodavnih unutarnjih uzdužnih sila.....	78
Slika 10.5 Prikaz unutarnjih sila za treći slučaj (KGS8).....	78
Slika 10.6 Progib grede uslijed stalnih opterećenja .....	79
Slika 10.7 Progib grede uslijed stalnih opterećenja 2 .....	79
Slika 10.8 Progib grede uslijed uporabnog opterećenja .....	80
Slika 10.9 Statički sustav ploče sa zadanim opterećenjima .....	92
Slika 10.10 Poprečni presjek katne ploče.....	92
Slika 10.11 GSN- moment savijanja .....	93
Slika 10.12 GSN- posmik.....	94
Slika 10.13 Naprezanje u poprečnom presjeku (GSN) .....	94
Slika 10.14 Statički sustav ploče sa zadanim opterećenjima .....	96
Slika 10.15 GSN- moment savijanja .....	97
Slika 10.16 GSN- posmik.....	97
Slika 10.17 Progib za LCO1 .....	103
Slika 10.18 Progib za LCO2 .....	103
Slika 10.19 Progib za LCO3 .....	104
Slika 10.20 Progib za LCO4 .....	104
Slika 10.21 Progib za LCO5 .....	104
Slika 10.22 Progib za LCO6 .....	104
Slika 11.1 Statički sustav sa odgovarajućim opterećenjima .....	106
Slika 11.2 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta.....	108
Slika 11.3 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta.....	109

Slika 11.4 Statički sustav sa odgovarajućim opterećenjima .....	110
Slika 11.5 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta.....	113
Slika 11.6 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta.....	114
Slika 11.7 Statički sustav sa odgovarajućim opterećenjima .....	115
Slika 11.8 Dijagram momenata savijanja.....	116
Slika 11.9 Dijagram poprečnih sila .....	116
Slika 11.10 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta.....	117
Slika 11.11 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta.....	118
Slika 11.12 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta.....	119
Slika 11.13 Dijagram momenata savijanja.....	120
Slika 11.14 Dijagram poprečnih sila .....	120
Slika 11.15 Naprezanja u poprečnom presjeku (GSN- požar).....	120
Slika 11.16 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta.....	121
Slika 11.17 Razvoj temperature i smanjenje slojeva CLT ploče .....	121
Slika 11.18 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta.....	123
Slika 11.19 Razvoj temperature i smanjenje slojeva CLT ploče .....	123
Slika 11.20 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta.....	125
Slika 11.21 Razvoj temperature i smanjenje slojeva CLT ploče .....	125
Slika 11.22 Dijagram momenata savijanja.....	127
Slika 11.23 Dijagram poprečnih sila .....	127
Slika 11.24 Naprezanja u poprečnom presjeku (GSN- požar).....	127
Slika 11.25 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta.....	128
Slika 11.26 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta.....	130
Slika 11.27 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta.....	132
Slika 12.1 Prirast naprezanja u stupu .....	134
Slika 12.2 Prirast naprezanja u katnoj gredi.....	134
Slika 12.3 Prirast naprezanja u krovnoj gredi .....	135
Slika 12.4 Prirast naprezanja u katnoj ploči .....	135
Slika 12.5 Prirast naprezanja u katnoj ploči .....	136

## **Popis tablica**

Tablica 3.1 Toplinska vodljivost i srednji specif. topl. kapacitet drva i drvenog ugljena.....	14
Tablica 3.2 Usporedba vrijednost toplinske vodljivosti između različitih vrsta drva .....	14
Tablica 3.3 Vrijednosti faktora redukcije kfi .....	14
Tablica 4.1 Brzine sagorijevanja ovisno o klasi drva.....	18
Tablica 5.1 Karakteristična gustoća požarnog opterećenja na jedinicu površine.....	28
Tablica 5.2 Faktor veličine odjeljka .....	28
Tablica 5.3 Faktor vezan uz namjenu.....	28
Tablica 6.1 Klase požarne otpornosti prema HR DIN 4102 .....	39
Tablica 6.2 Klase materijala prema gorivosti.....	39
Tablica 6.3 Usporedba klasa po DIN-u i EN-u .....	40
Tablica 6.4 Stupnjevi otpornosti na požar ovisno o vrsti konstrukcijskog elementa .....	41
Tablica 7.1 Mehanička svojstva LLD-a prema HRN EN 1194 .....	45
Tablica 7.2 Toplinska svojstva LLD-a prema DIN 4102-4: B 2.....	46
Tablica 8.1 Vrijednost koeficijenta modifikacije za LLD i CLT .....	51
Tablica 8.2 Vrijednost koeficijenta deformacije za LLD i CLT .....	51
Tablica 8.3 Mehanička svojstva CLT-a .....	52
Tablica 8.4 Koeficijenti prilagodbe.....	59
Tablica 10.1 Prikaz poprečnog presjeka .....	92
Tablica 10.2 Materijalne karakteristike.....	93
Tablica 10.3 Grupe opterećenja.....	93
Tablica 10.4 Kombinacije za GSN.....	93
Tablica 10.5 Reakcije na osloncima.....	93
Tablica 10.6 Proračun na savijanje.....	94
Tablica 10.7 Proračun na posmik .....	94
Tablica 10.8 Proračun na rolling shear.....	94
Tablica 10.9 Otpornost na savijanje .....	95
Tablica 10.10 Otpornost na posmik .....	95
Tablica 10.11 Otpornost na rolling shear .....	95
Tablica 10.12 Prikaz poprečnog presjeka.....	96
Tablica 10.13 Materijalne karakteristike.....	96
Tablica 10.14 Grupe opterećenja .....	96
Tablica 10.15 Kombinacije za GSN.....	97
Tablica 10.16 Reakcije na osloncima.....	97
Tablica 10.17 Proračun na savijanje .....	98
Tablica 10.18 Proračun na posmik.....	98
Tablica 10.19 Proračun na rolling shear.....	98
Tablica 10.20 Otpornost na savijanje .....	98
Tablica 10.21 Otpornost na posmik .....	99
Tablica 10.22 Otpornost na rolling shear .....	99
Tablica 10.23 Otpornost na izvijanje .....	99
Tablica 10.24 Kombinacije za GSU.....	100
Tablica 10.25 Kombinacije za GSU.....	100

Tablica 10.26 Početni progib LCO2 .....	101
Tablica 10.27 Konačni progib LCO4 .....	101
Tablica 10.28 Konačna vrijednost progiba LCO4.....	101
Tablica 10.29 Analiza vibracija .....	102
Tablica 10.30 Kombinacije za GSU.....	103
Tablica 10.31 Kombinacije za GSU.....	103
Tablica 10.32 Početni progib .....	105
Tablica 10.33 Konačni progib .....	105
Tablica 10.34 Konačna vrijednost progiba.....	105
Tablica 10.35 Analiza vibracija .....	105
Tablica 11.1 Grupe opterećenja.....	106
Tablica 11.2 Kombinacije za GSN- požar .....	106
Tablica 11.3 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa sve 4 strane.....	107
Tablica 11.4 Otpornost na izvijanje .....	107
Tablica 11.5 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa sve 4 strane.....	108
Tablica 11.6 Otpornost na izvijanje .....	108
Tablica 11.7 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa sve 4 strane.....	109
Tablica 11.8 Otpornost na izvijanje .....	109
Tablica 11.9 Grupe opterećenja.....	110
Tablica 11.10 Kombinacije opterećenja za GSN- požar .....	110
Tablica 11.11 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa 3 strane .....	112
Tablica 11.12 Otpornost na savijanje .....	112
Tablica 11.13 Otpornost na posmik .....	112
Tablica 11.14 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa 3 strane .....	113
Tablica 11.15 Otpornost na savijanje .....	113
Tablica 11.16 Otpornost na posmik .....	113
Tablica 11.17 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa 3 strane .....	114
Tablica 11.18 Otpornost na savijanje .....	114
Tablica 11.19 Otpornost na posmik .....	114
Tablica 11.20 Grupe opterećenja .....	115
Tablica 11.21 Kombinacije opterećenja za GSN- požar .....	115
Tablica 11.22 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa 3 strane .....	117
Tablica 11.23 Otpornost na savijanje .....	117
Tablica 11.24 Otpornost na posmik .....	117
Tablica 11.25 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa 3 strane .....	118
Tablica 11.26 Otpornost na savijanje .....	118
Tablica 11.27 Otpornost na posmik .....	118
Tablica 11.28 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa 3 strane .....	119
Tablica 11.29 Otpornost na savijanje .....	119
Tablica 11.30 Otpornost na posmik .....	119
Tablica 11.31 Kombinacije opterećenja za GSN- požar .....	120
Tablica 11.32 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta sa jedne strane .....	121
Tablica 11.33 Otpornost na savijanje .....	122
Tablica 11.34 Otpornost na posmik .....	122



Tablica 11.35 Otpornost na rolling shear .....	122
Tablica 11.36 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta sa jedne strane .....	123
Tablica 11.37 Otpornost na savijanje .....	124
Tablica 11.38 Otpornost na posmik .....	124
Tablica 11.39 Otpornost na rolling shear .....	124
Tablica 11.40 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta sa jedne strane .....	125
Tablica 11.41 Otpornost na savijanje .....	126
Tablica 11.42 Otpornost na posmik .....	126
Tablica 11.43 Otpornost na rolling shear .....	126
Tablica 11.44 Kombinacije opterećenja za GSN- požar .....	127
Tablica 11.45 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 30 minuta .....	128
Tablica 11.46 Otpornost na savijanje .....	129
Tablica 11.47 Otpornost na posmik .....	129
Tablica 11.48 Otpornost na rolling shear .....	129
Tablica 11.49 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 60 minuta .....	130
Tablica 11.50 Otpornost na savijanje .....	131
Tablica 11.51 Otpornost na posmik .....	131
Tablica 11.52 Otpornost na rolling shear .....	131
Tablica 11.53 Poprečni presjek nakon izlaganja požaru 90 minuta .....	132
Tablica 11.54 Otpornost na savijanje .....	133
Tablica 11.55 Otpornost na posmik .....	133
Tablica 11.56 Otpornost na rolling shear .....	133
Tablica 12.1 Usporedba iskoristivosti za stup .....	134
Tablica 12.2 Usporedba iskoristivosti za katnu gredu .....	134
Tablica 12.3 Usporedba iskoristivosti za krovnu gredu .....	135
Tablica 12.4 Usporedba iskoristivosti za katnu ploču .....	135
Tablica 12.5 Usporedba iskoristivosti za krovnu ploču .....	136

## ***ŽIVOTOPIS***

Filip Knežević rođen je 2. svibnja 1994. godine u Mostaru. Nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja u Gimnaziji Metković, 2013. godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Preddiplomski studij završava 2016. godine uz pohvalu nastavnčkog vijeća. 2017. godine sudjeluje na projektu „Master Class“-internacionalnoj radionici u suradnji sa TU Graz, Univerze v Ljubljani te Građevinskog i Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod organizacijom proHolza-a iz Austrije. 2018.godine sudjeluje kao student-suradnik na projektu „Influence of concrete damage on reinforcement corrosion- computer simulation and in service performance of bridges“, pod vodstvom dr. sc. Marije Kušter Marić, financiranom od strane Fonda „Jedinstvo uz pomoć znanja“.