

# Proračun otpornosti aluminijske konstrukcije na djelovanje požara

---

Milan, Duje

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:342542>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I**  
**GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Duje Milan**

**Split, 2021.**



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I**  
**GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Duje Milan**

**Split, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Duje Milan**

Proračun otpornosti aluminijske konstrukcije na djelovanje požara

**Diplomski rad**

**Split, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT:** Duje Milan

**JMBAG:** 0083218551

**KATEDRA:** **Katedra za metalne i drvene konstrukcije**

**PREDMET:** Metalne konstrukcije

### **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

**Tema: PRORAČUN OTPORNOSTI ALUMINIJSKE KONSTRUKCIJE NA  
DJELOVANJE POŽARA**

Opis zadatka: Za zadani nosivi sustav potrebno je izvršiti dimenzioniranje aluminijskih profila za atmosferske temperature. Nakon određivanja aluminijskih profila potrebno je izvršiti analizu djelovanja visokih – požarnih temperatura, za požarnu otpornost od 30 minuta (R30). Nosiva aluminijska konstrukcija je iz legure aluminija EN AW 6061 T6.

U Splitu, ožujak 2021.

Voditelji Diplomskog rada:

Prof. dr. sc. Ivica Boko

Predsjednik Povjerenstva

za završne i diplomske ispite:

Doc. dr. sc. Ivo Andrić

Izv. prof. dr. sc. Neno Torić

# **Proračun otpornosti aluminijske konstrukcije na djelovanje požara**

## ***Sažetak:***

U ovom diplomskom radu opisan je utjecaj požarnog opterećenja na aluminijske konstrukcije, te različiti sustavi zaštite koji sprječavaju otkazivanje nosivosti aluminijskih elemenata. Prikazan je i primjer proračuna potrebne debljine zaštite jednostavne nosive konstrukcije prema europskim normama i uz pomoć računalnog softwera SCIA Engineer 19.1. Za usporedbu, proračun je proveden za istu konstrukciju u čeličnoj (S235) i aluminijskoj (EN AW-6061 T6) varijanti.

## ***Ključne riječi:***

aluminij, požar, zaštita od požara

# **Resistance calculation of aluminium structure under fire load**

## ***Abstract***

This graduate thesis describes the influence of fire load on aluminium structures as well as different fire protection systems which prevent load bearing failure. It also presents an example of necessary fire protection thickness calculation for a simple structure, in accordance with European standards using computer software SCIA Engineer 19.1. For comparison, calculation is made for the same structure in steel (S235) and aluminium (EN AW-6061 T6) variant.

## ***Keywords:***

aluminium, fire, fire protection

# S a d r Ź a j

<b>1 Aluminij u građevinarstvu.....</b>	<b>1</b>
1.1 Proizvodnja aluminija.....	1
1.1.1 Očvršćavanje aluminija.....	2
1.2 Mehanička svojstva aluminija.....	5
1.2.1 Zona utjecaja topline (HAZ).....	6
1.3 Legure aluminija.....	7
1.3.1 Strukturalni aluminij prema Eurocode-u.....	9
<b>2 Djelovanje požara.....</b>	<b>11</b>
2.1 Postupak proračuna prema Eurocode-u.....	12
2.1.1 Mehanička svojstva aluminijevih legura.....	12
2.1.2 Modeliranje realnog požara.....	14
<b>3 Sustavi zaštite.....</b>	<b>16</b>
3.1 Aktivni sustavi zaštite.....	16
3.1.1 Uređaji za detekciju požara.....	16
3.1.2 Aparati za gašenje požara.....	17
3.1.3 Uređaji za ventilaciju.....	18
3.1.4 Podjela objekta na požarne odjeljke.....	18
3.1.5 Sprinkleri.....	19
3.2 Pasivni sustavi zaštite.....	20
3.2.1 Gips ploče.....	20
3.2.2 Ploče od kalcijevog silikata.....	23
3.2.3 Ekspandirajući premazi.....	25
3.2.4 Ploče od keramičkih vlakana.....	27

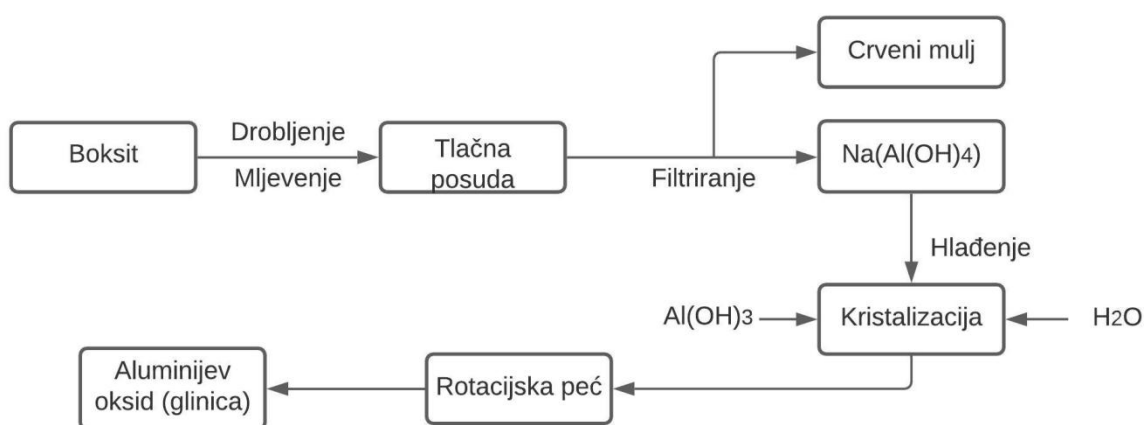


3.2.5 Prskane zaštite.....	29
<b>4 Numerički primjer.....</b>	<b>32</b>
4.1 Analiza opterećenja.....	32
4.1.1 Vlastita težina.....	32
4.1.2 Dodatno stalno opterećenje.....	32
4.1.3 Pokretno opterećenje.....	32
4.1.4 Snijeg.....	33
4.1.5 Vjetar.....	33
4.1.6 Promjena temperature.....	34
4.1.7 Požarno djelovanje.....	35
4.2 Dimenzioniranje.....	41
4.2.1 Požarne kombinacije.....	42
4.2.2 Provjera otpornosti i stabilnosti čeličnih elemenata na požarno djelovanje.....	43
4.2.2.1 Stup HEA260.....	43
4.2.2.2 Greda HEA240.....	49
4.2.3 Provjera otpornosti i stabilnosti aluminijskih elemenata na požarno djelovanje.....	55
4.2.3.1 Stup I gh (350; 300; 18; 10; 27; 27).....	55
4.2.3.2 Greda A I gh (250; 260; 13; 8; 24; 24).....	60
4.2.3.3 Greda B I gh (290; 280; 13; 8; 24; 24).....	65
<b>5 Zaključak.....</b>	<b>71</b>

# 1 ALUMINIJ U GRAĐEVINARSTVU

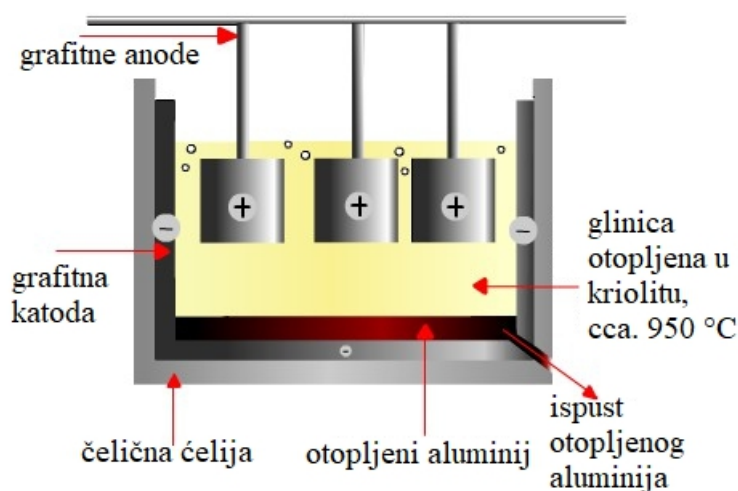
## 1.1 Proizvodnja aluminija

Aluminij tvori 8% Zemljine kore, te je treći najzastupljeniji element u Zemljinoj kori poslije kiska (47%) i silicija (28%). U prirodi ga nema u čistom obliku, već ga se nalazi u obliku oksida pomiješan s oksidima drugih metala, npr. željeza, silicija, vanadija itd. Primarni izvor aluminija za proizvodnju je boksit, ruda koja se sastoji od hidratiziranih oksida aluminija. Nalazišta boksita se najčešće nalaze u tropskim regijama. Boksit se nalazi blizu površine tako da ga se može vaditi iz otvorenih dubokih jama. Od 4 tone boksita dobije se 2 tone glinice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) od koje se daljnjom preradom dobije 1 tona čistog aluminija. Prerada boksita u glinicu radi se Bayerovim procesom, shematski prikazanim na slici 1.1. Boksitna ruda se prvo usitnjava na veličinu zrna od 10 mm. Tako usitnjena ruda se miješa s ugrijanom otopinom kaustične sode (natrijevog hidroksida). Mješavina se grije na  $270\text{ }^\circ\text{C}$  tvoreći superzasićenu otopinu natrijevog aluminata. Ostatci boksita potonu na dno, koji se zatim opere i filtrira prije odstranjivanja. Filtrirana tekućina se hladi i tretira sjemenskim kristalima, malim kristalima koji pomažu u kristalizaciji većih kristala aluminijevog hidroksida. Kristali aluminija se filtriraju iz kaustične otopine. Aluminijev hidroksid se grije na  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  kako bi se odstranile molekule vezane vode, te tako nastaje glinica (aluminijev oksid). Glinica je fini bijeli prah koji se dalje transportira u topionik. [1]



Slika 1.1 Dijagram tijekom Bayerovog procesa proizvodnje glinice [2]

Topljenje aluminija zahtijeva velike količine električne energije, pa nije neobično da se uz sama postrojenja za izradu aluminija nerijetko nalaze i elektrane. Glinica se pretvara u aluminij Hall-Héroutovim procesom, prikazanim na slici 1.2. Glinica se rastopi u kupki temeljenoj na rastaljenom kriolitu ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Tako nastaje elektrolit s ionima fluora i natrija. Elektrolizom se glinica reducira na aluminij i kisik. Aluminij se taloži na dnu ugljenog korita i s njim tvori katodu ćelije, a kisik izbija na ugljenoj anodi ćelije i tvori  $\text{CO}_2$  trošeći anodu. Glinica, otapanjem u kupki kriolita, formira različite aluminijske oksid-fluoridne ione koji se prenose na pozitivnu anodu i kao anodni plin izlaze iz ćelije. Anodni plin sadrži, između ostalih, i emisije fluorida iz kupke, pa se odvodi u sustav za čišćenje plinova, prije no što bude izbačen u atmosferu. [3]



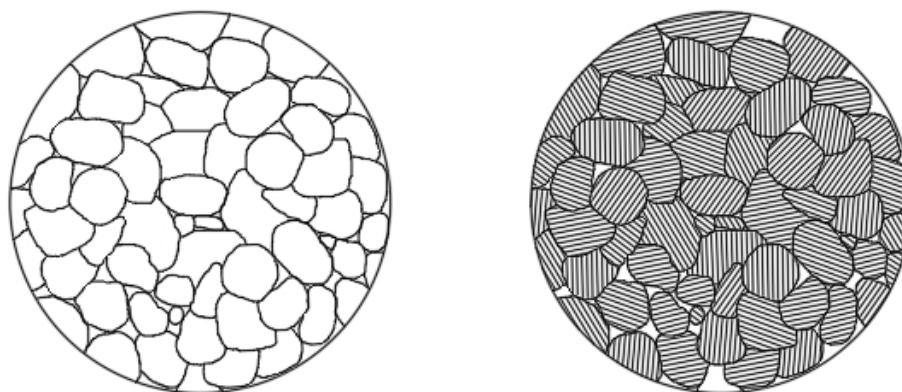
Slika 1.2 Shematski prikaz Hall-Héroutovog procesa [4]

Dobiveni čisti aluminij se dalje izljeva u kalupe ili se prvo legira s drugim elementima prije lijevanja. Legure aluminija se sastoje od aluminija kao osnovnog metala, legirnih elemenata: bakar (Cu), mangan (Mn), silicij (Si), magnezij (Mg) i cink (Zn), te od brojnih dodatnih elemenata kao što su: olovo (Pb), antimon (Sb), kositar (Sn), bizmut (Bi), kadmij (Cd), nikal (Ni), kobalt (Co), titanij (Ti), bor (B), berilij (Be), cirkonij (Zr), krom (Cr) i željezo (Fe) [5].

### 1.1.1 Očvršćavanje aluminija

Aluminij ima zrnatu mikrostrukturu. Svako zrno je ispunjeno mrežom kristala, odnosno jediničnih ćelija. Kristali se sastoje od atoma aluminija pravilno raspoređenih unutar kocke; po jedan na svakom uglu i na sredinama lica kocke, tvoreći kubičnu plošno centriranu kristalnu strukturu. Ti kristali tvore prostornu rešetku unutar koje su atomi raspoređeni na određenim razmacima unutar paralelnih ravnina. Te ravnine se nazivaju klizne ravnine i predstavljaju slabost unutar strukture jer po tim ravninama može doći do deformacije putem klizanja. Prije

tretiranja aluminija, svako zrno je nasumično orijentirano, a time se i klizne ravnine pružaju u različitim smjerovima. Primjenom opterećenja, aluminijeva zrnca se rotiraju i izdužuju u smjeru djelovanja vlaka ili okomito na djelovanje tlaka. Daljnja deformacija uzrokuje fragmentaciju i drobljenje zrna što uzrokuje povećanje čvrstoće i tvrdoće aluminija, no time se gubi dio duktilnosti. Jedno objašnjenje za to je da se deformacijom udžuž kliznih ravnina i granica zrna tvori amorfni materijal koji više nema kristalnu strukturu, a time ni slabih kliznih ravnina. Druga teorija je tzv. fragmentacijska teorija koja govori da se tijekom plastične deformacije odlamaju djelići kristala i padaju po kliznim ravninama i granicama zrna. Na taj način se povećava trenje na tim površinama povećavajući otpor daljnjem deformiranju. Treća teorija je teorija distorzije prostorne rešetke koja pretpostavlja da se tijekom plastične deformacije klizne ravnine deformiraju. Izvijanje kliznih ravnina, kao i granica zrna, povećava otpor daljnjem klizanju.

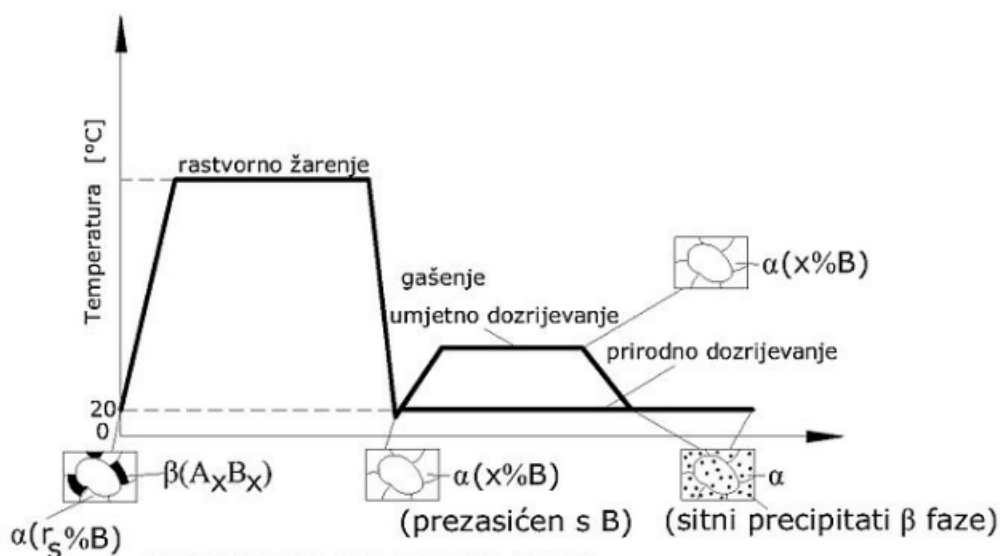


Slika 1.3 Shematski prikaz zrnate strukture aluminija i kliznih ravnina

Očvršćavanje i ukrućivanje aluminija hladnim postupkom može se umanjiti ili ukloniti postupkom žarenja. Cilj žarenja je vratiti materijalu duktilnost i žilavost. Nakon hladne obrade, aluminij se nalazi u napregnutom stanju, grijanjem se napreznja smanjuju. Veličina i oblik zrna se pritom ne mijenjaju. Kada temperatura dosegne temperaturu rekristalizacije (340-400 °C), nastaju nove jezgre zrna od komadića i zdrobljenih čestica originalnih zrna. Kako se materijal grije iznad temperature rekristalizacije, a ispod tališta, te nove jezgre rastu u jednakoosna zrna stapajući se s ostalim jezgrama. Na visokim temperaturama zrna postaju velika, te se materijal tada nalazi u žrenom ili mekom stanju.

Vruća obrada aluminijskih slitina obuhvaća daljnu disperziju čestica legirnih elemenata u aluminiju, te kemijsko spajanje aluminija i legirnih elemenata. Nekoherentni intermetalni spojevi se izlučuju u obliku submikroskopskih pahuljica u koherentnom obliku. Postupak očvršćavanja toplinskom obradom se naziva precipitacijsko očvršćavanje. Sastoji se od tri faze: rastvornog

žarenja, gašenja (naglog hlađenja) i prirodnog ili umjetnog dozrijevanja (starenja). U svrhu precipitacijskog očvršćavanja, leguru je potrebno zagrijati na temperaturu homogenizacije, zadržati na toj temperaturi dok se legura ne homogenizira u potpunosti i naglo hladiti (gasiti) na atmosfersku temperaturu. Postupak povišenja čvrstoće i tvrdoće držanjem legure na temperaturi okoline poznat je kao prirodno dozrijevanje. Ono traje od nekoliko dana, pa sve do nekoliko mjeseci. Budući da je osnova dozrijevanja difuzija koja se ubrzava povišenjem temperature, to se umjetnim dozrijevanjem može ostvariti veći porast čvrstoće i tvrdoće. Proces umjetnog dozrijevanja sastoji se od zagrijavanja na temperaturu dozrijevanja, zadržavanja na istoj nekoliko sati ili dana, te postupnog hlađenja na sobnu temperaturu. S druge strane hlađenjem legure na nisku temperaturu difuzijski se procesi usporavaju i na taj način sprječava dozrijevanje. [5]



Slika 1.4 Postupak toplinskog očvršćavanja [6]

## 1.2 Mehanička svojstva aluminija

Aluminij i njegove legure se koriste kao valjani, prešani (ekstrudirani) i lijevani materijali, poluproizvodi i proizvodi. Primjenjuju se u građevinarstvu, prehrambenoj industriji, kriogenoj tehnici, za izradu posuda pod tlakom u vojnoj tehnici, bijeloj tehnici, te za izradu ambalaže.

Tablica 1-1 Fizikalna svojstva aluminija [7]

Talište	660 °C
Gustoća pri 20 °C	2,70 g cm <sup>-3</sup>
Koeficijent linearnog istezanja, (0-100 °C)	23,5×10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Specifični toplinski kapacitet, (0-100 °C)	920 J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Toplinska vodljivost (0-100 °C)	240 J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
Specifični električni otpor, (20 °C)	0,269 Wmm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup>
Modul elastičnosti, (20 °C)	71 900 MPa

Ostala svojstva, odnosno, prednosti aluminija i njegovih legura:

- Oko 2,9 puta lakši od čelika.
- Prekidna čvrstoća, maksimalno do 700 MPa, uz dobru istezljivost.
- Dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama.
- Toplinska vodljivost 13 puta veća, nego kod nerđajućeg čelika, 4 puta veća od običnog čelika
- Elektrovodljivost bliska Cu, ali pri istoj težini dvostruko veća nego kod Cu
- Dobro reflektira svjetlost i toplinu.
- Dobra otpornost na koroziju i dekorativnost površine. Prirodno se zaštićuje slojem oksida čime se postiže samozaštita u normalnoj atmosferi. Anodizacijom i lakiranjem (eloksiranjem) se postiže izvanredan dekorativni efekt.
- Nije magnetičan.
- Dobro se obrađuju raznim načinima. Posebno je pogodan za proizvodnju prešanjem (ekstruzijom) složenih šupljih i punih presjeka. Pogodan je i za duboko vučenje i zavarivanje [7]

### 1.2.1 Zona utjecaja topline (HAZ)

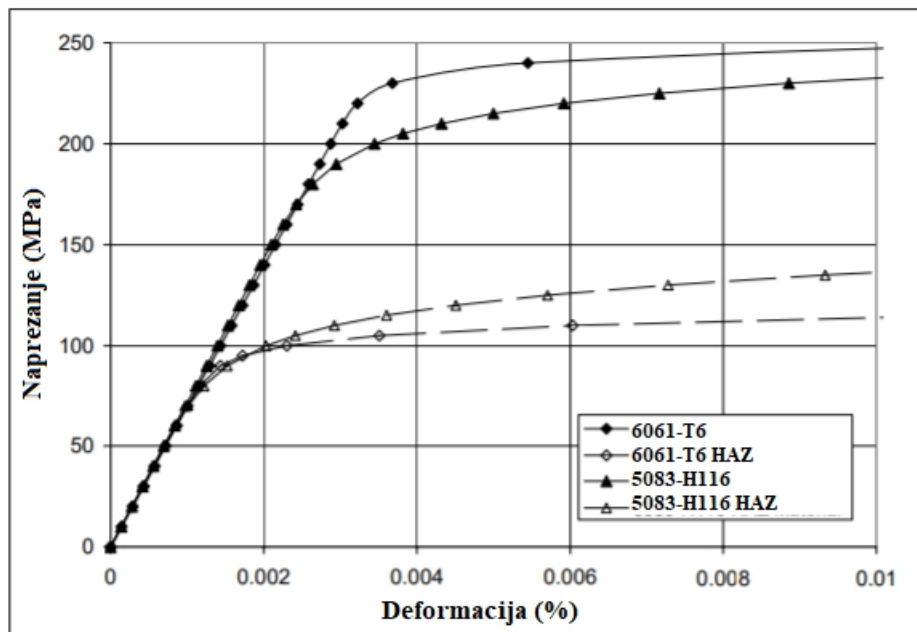
Za građevinarstvo, najbitnija svojstva aluminija su velika čvrstoća, mala vlastita težina, otpornost na koroziju i estetske karakteristike. Otpornost na koroziju aluminij postiže tankim slojem slojem oksida  $Al_2O_3$  na površini. Sloj je debljine 0,01 mm sa sljedećim svojstvima:

- Gustoća od  $3,2 \text{ g cm}^3$
- Talište od  $2050 \text{ }^\circ\text{C}$
- Bezbojnost
- Visoka tvrdoća i kemijska otpornost [7]

Zbog navedenih svojstava aluminij ima prirodnu zaštitu od korozije bez narušavanja svoje estetske vrijednosti. Međutim aluminijev oksid stvara velike probleme kod zavarivanja što je ujedno i najveća mana aluminija.

Aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ) ima visoku temperaturu taljenja i čini teškoće pri zavarivanju. Kao troska je teška i ulazi u talinu. Pri visokim temperaturama toplinske obrade ili zavarivanja krutog ili rastaljenog aluminija stvara se na površini deblji sloj oksida kao i na kapima metala, pa se ne može dobiti homogen zavareni ili lemljeni spoj zbog uključaka oksida. Kožica oksida se uključuje u zavareni spoj kao nemetalni uključak. Za uspješno zavarivanje potrebno je odstraniti ili razoriti oksidnu kožicu prije početka i za zavarivanja djelovanjem električnog luka u inertoj atmosferi (elektroda na "+" polu), prašcima za zavarivanje pri plinskom zavarivanju i lemljenju, kemijskim nagrizanjem površine osnovnog i dodatnog materijala ili mehaničkim odstranjivanjem. Kod elektrootpornog zavarivanja deblji sloj oksida predstavlja i izolator, pa je potrebno posebno čišćenje. Deblji sloj se javlja npr. pri toplinskoj obradi. [7]

Zbog drastične razlike u temperaturama tališta aluminija i aluminijevog oksida, pri zavarivanju se aluminij oslabljuje. Oko dijela koji se zavaruje se stvara zona u kojoj su, izlaganjem visokim temperaturama, smanjena svojstva materijala. To se naziva zona utjecaja topline (HAZ, eng. heat affected zone). Smanjenje čvrstoće u zoni utjecaja topline je do 50-60% u odnosu na bazni materijal, što je vidljivo na slici 1.5. Iz ovog razloga se pri projektiranju spojeva u aluminijskim konstrukcijama treba voditi računa o veličini zone utjecaja i adekvatno proračunavati čvrstoću spojeva.



Slika 1.5 Usporedba dijagrama naprezanja legura 6061-T6 i 5083-H116 u normalnom stanju i u području HAZ-a (crtkano) [8]

### 1.3 Legure aluminija

Čisti aluminij nema veliku čvrstoću, svega 90-190 MPa, ovisno o stanju u kojem se nalazi. Čvrstoća aluminija se osim hladnim deformiranjem i toplinskom obradom može povećati i legiranjem drugim metalima. Postoje dvije grupe legura aluminija:

1. Aluminijske legure bez strukturnog očvršćavanja (nekaljive legure). U njih spadaju legure Al-Mg, Al-Mn i Al-Mg-Mn
2. Aluminijske legure sa strukturnim očvršćavanjem (kaljive legure). U njih spadaju legure Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn,Mg, Al-Li-Cu-Zr, Al-Li-Cu-Mg-Zr

#### 1. Aluminij i njegove legure bez strukturnog očvršćavanja

Očvršćavanje se u ovom slučaju postiže kombinacijom efekata dodavanja legirajućih elemenata (Mg, Si, Mn, Fe i drugih), hladne plastične deformacije i žarenja. Postiže se cijela lepeza mehaničkih svojstava od mekog stanja s minimalnim mehaničkim vrijednostima i maksimalnom plastičnošću do tvrdih stanja s maksimalnom čvrstoćom i granicom razvlačenja, te minimalnom plastičnošću. U ovu grupu spadaju familije legura prema normama SAD: aluminij (1000), legure s manganom (3000), te legure s magnezijem (5000).

Nelegirani aluminij (1000) se razlikuje po čistoći, tj. po učešću pojedinih "nečistoća" Fe, Si u aluminiju. Posjeduje izvanrednu otpornost prema atmosferilijama, odličnu toplinsku i električnu vodljivost i izvanrednu plastičnost (sposobnost oblikovanja). Čvrstoća je mala. Primjena mu je



vrlo raširena (elektroindustrija, kemijska industrija, petrokemija, dekorativna upotreba, građevinarstvo). Zavarljivost je odlična.

Legura sa manganom (3000): Mangan je osnovni legirajući element u ovoj porodici Al-legura. Legura AlMn (3003) je najčešći i pravi predstavnik ove porodice. Ova legura ima izvrsnu plastičnost, otporna je na atmosferičke korozije, dobro je zavarljiva. Upotrebljava se za duboka vučenja, za izmjenjivače topline i sl. Često upotrebljiva legura iz ove porodice je Al Mg Mn (3004) iz koje se proizvode konzerve za piće (tzv. can stock) kao i za cijevi proizvedene iz trake zavarivanjem. Legure sa magnezijem (5000): U ovoj porodici osnovni legirajući element je magnezij, obično do 5 %, a ponekad se dodaje mangan i krom. Ove legure posjeduju osrednja mehanička svojstva, dobro se zavaruju i imaju znatno poboljšana mehanička svojstva pri niskim temperaturama. S većim sadržajem magnezija odlično se ponašaju u morskoj atmosferi. Oblikovljivost je dobra ali opada s porastom sadržaja magnezija. Primjena im je vrlo raznovrsna: građevinarstvo, brodogradnja, uređaji za desalinizaciju morske vode, posude, različite cisterne za transport. Zavarljivost je dobra.

## 2. Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem ("kaljive legure")

Ova grupa Al-legura sadrži bakar (Cu), silicij (Si), magnezij (Mg), litij (Li), cink (Zn) i skandij (Sc). Ima mogućnost strukturnog očvršćavanja. To očvršćavanje se postiže određenim toplinskim postupkom. Prvu etapu toplinskog postupka predstavlja rastopno žarenje (solution treatment) koje ima za cilj da na povišenim temperaturama (450 - 550 °C) rastopi barem jedan od legirajućih elemenata u čvrstoj otopini aluminijske legure. Slijedeću fazu toplinskog procesa predstavlja naglo hlađenje zvano gašenje (Quenching) najčešće uranjanjem u hladnu vodu. Gašenjem se omogućava zadržavanje na okolišnoj temperaturi one strukture koju metal ima u zagrijanom stanju u kojem su legirajući elementi "zarobljeni" u prezasićenoj čvrstoj otopini precipitata (izlučevina). Naglo hlađeni metal je u nestabilnom stanju i teži stabilnijem stanju pri sobnim temperaturama. Metal postepeno dozrijeva. Ova pojava popraćena sa značajnim povećanjem čvrstoće nazvana je strukturno očvršćavanje. Treća faza toplinskog procesa može se odvijati pri normalnim (sobnim) temperaturama i tada se radi o prirodnom dozrijevanju (natural ageing) metala, a može se odvijati i pri nešto povišenim temperaturama i tada je riječ o umjetnom dozrijevanju (artificial ageing). Ovu grupu predstavljaju tri porodice legura: legure s bakrom (2000), legure sa silicijem i magnezijem (6000) te legure sa cinkom i magnezijem (7000).

Legure s bakrom (2000): Bakar je glavni legirajući element u ovoj porodici čije mehaničke vrijednosti dostižu one kod mekih čelika. Inače, porodica je poznata po popularnom i

tradicionalnom nazivu - durali. Upotrebljava se najčešće za radne - nosive dijelove. Nema dobra antikorozivna svojstva i u pravilu se loše zavaruju. Ova legura često se oblaže (platira, plakira) čistim aluminijem radi antikorozivne zaštite. Masovno se upotrebljava u avioindustriji, naoružanju i mehaničkim dijelovima (zakovice, vijci).

Legure sa silicijem i magnezijem (6000): Legirajući elementi u ovoj familiji su silicij (Si) i magnezij (Mg) koji tvore očvršćavajući spoj  $Mg_2Si$ . Posjeduju osrednje mehaničke vrijednosti. Izvanredno dobro se oblikuju. Dobro se zavaruju i posjeduju dobra antikorozivna svojstva.

Legure se mogu podijeliti na dva dijela:

a) bogatije na sadržaju silicija i magnezija uz dodatak mangana, kroma, cirkonija. Imaju bolja (veća) mehanička svojstva. Upotrebljavaju se u nosivim elementima.

b) siromašnije u sadržaju silicija i magnezija, što im omogućuje velike brzine prešanja i odličnu oblikovljivost uz nešto lošija mehanička svojstva. Ova familija ima široku primjenu kao na primjer za dekoracije, prozore, vrata, fasade, zavarene dijelove, cijevi, transportnu opremu, karoserije, za vagona vlakova i za metro jarbole i sl.

Legure sa cinkom i magnezijem (7000): Cink zajedno s magnezijem glavni je legirajući element ove familije čiji predstavnici kad im je još dodan bakar posjeduju najveću čvrstoću od svih Al-legura. Konstruktali je njihov popularni naziv. Legure se dijele na dvije grupe ovisno od toga da li sadrže ili ne sadrže bakar:

a) legure sa bakrom posjeduju najveću čvrstoću. Zavarivati se mogu jedino u specijalnim uvjetima. Loša su im antikorozivna svojstva. Najčešće se upotrebljavaju u avio i svemirskoj tehnici, naoružanju.

b) legure bez bakra posjeduju nešto lošija mehanička svojstva od prethodne grupe. U pravilu su otpornije na koroziju od legura s bakrom. Upotreba u naoružanju, za nosive elemente (npr, potporanj u rudnicima) i sl.[7]

### 1.3.1 Strukturalni aluminij prema Eurocode-u

Označavanje glavnih aluminijevih legura definirano je normama. Prikaz oznaka glavnih skupina aluminijevih kovkih legura dan je u tablici 1-2. Skupina 1xxx označava aluminij s minimalnom čistoćom od 99.00 %. Drugi broj označava promjene u granicama dopuštenih nečistoća. Ako je drugi broj 0, riječ je o nelegiranom aluminiju s udjelom nečistoća u granicama prirodnih koncentracija. Ako je drugi broj različit od 0, tada taj broj označava potrebu posebne

kontrole koncentracije jednog ili više onečišćenja ili legirnog elementa. Zadnja dva broja označavaju minimalni propisani postotak aluminijskog elementa iznad 99,00 % (npr. 50 znači da je min. 99,50 % aluminijskog). [9]

Tablica 1-2 Označavanje glavnih skupina aluminijskih legura [9]

Glavni legirni element	Brojčana oznaka
Aluminij (Al)	EN AW 1xxx
Bakar (Cu)	EN AW 2xxx
Mangan (Mn)	EN AW 3xxx
Silicij (Si)	EN AW 4xxx
Magnezij (Mg)	EN AW 5xxx
Silicij i magnezij (Mg i Si)	EN AW 6xxx
Cink (Zn)	EN AW 7xxx
Ostali elementi	EN AW 8xxx

Aluminijske ljevanje legure ispred brojčane oznake imaju prefiks EN (oznaka europske norme), iza kojeg odvojeno praznim mjestom stoji oznaka A (aluminij). Iza slova A slova X označava oblik proizvoda koji može biti:

- B: legirni aluminijski ingot namijenjen pretaljivanju,
- C: odljevci,
- M: glavne legure [9]

Tablica 1-3 Označavanje najučestalijih glavnih skupina ljevanih aluminijskih legura [9]

Glavni legirni element	Brojčana oznaka
Bakar (Cu)	EN AX 2xxx
Silicij (Si)	EN AX 4xxx
Magnezij (Mg)	EN AX 5xxx
Cink (Zn)	EN AX 7xxx

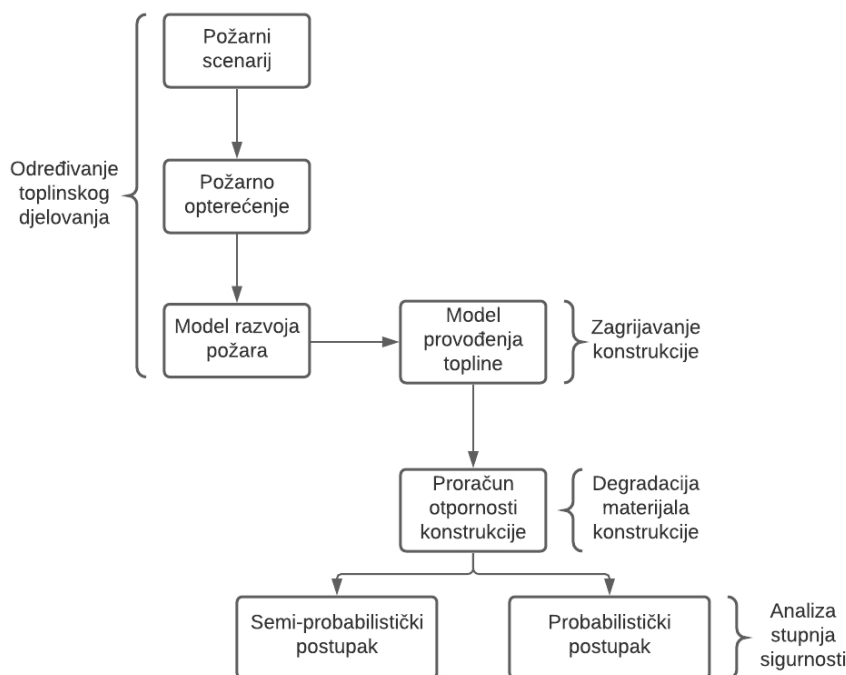
## 2 DJELOVANJE POŽARA

U Zakonu o zaštiti od požara («Narodne novine» br. 92/10) propisani su sljedeći zahtjevi:

- očuvati nosivost konstrukcije tijekom određenog vremena utvrđena posebnim propisom,
- spriječiti širenje vatre i dima unutar građevine,
- spriječiti širenje vatre na susjedne građevine,
- omogućiti da osobe mogu neozlijeđene napustiti građevinu, odnosno da se omogući njihovo spašavanje,
- omogućiti zaštitu spašavatelja. [11]

Prema Eurocode-u EN 1991-1-2:2002, analiza požarnog djelovanja na konstrukciju treba obuhvatiti:

- Odabir relevantnog scenarija požara
- Određivanje odgovarajućeg požarnog djelovanja
- Proračun porasta temperature unutar konstruktivnih elemenata
- Proračun mehaničkog ponašanja objekta izloženog požaru [12]



Slika 2.1 Globalni koncept sigurnosti konstrukcija u požaru [13]

## 2.1 Postupak proračuna prema Eurocode-u

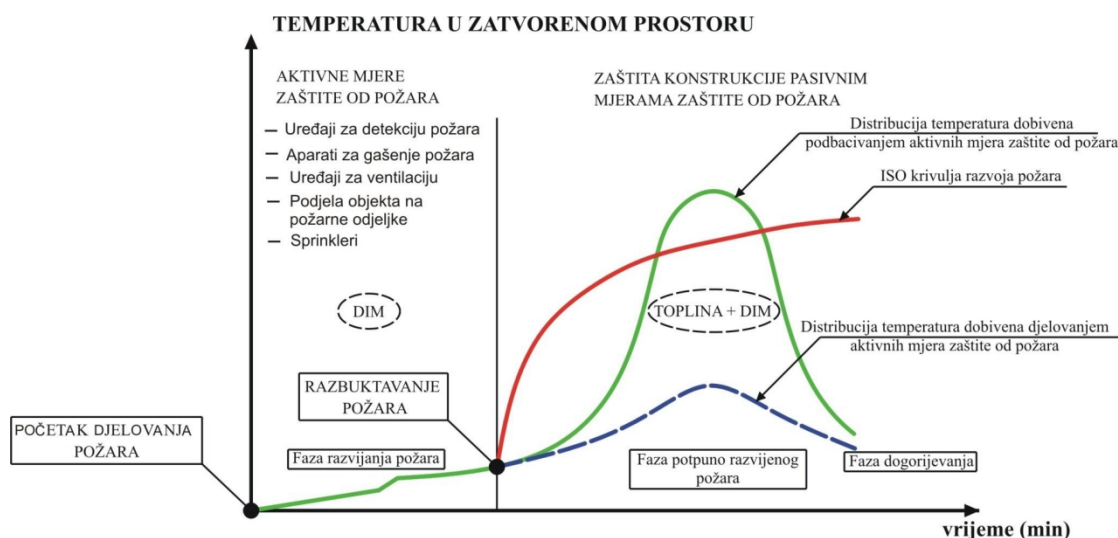
U Eurocodeu EN 1999-1-2:2007 su propisani kriteriji koje objekt mora zadovoljavati u slučaju požara. Aluminijske strukture trebaju biti dizajnirane i izvedene na način da zadrže svoju funkciju nošenja opterećenja tijekom relevantnog izlaganja djelovanju požara - kriterij R. Gdje je potrebna podjela na odjeljke, elementi trebaju biti dizajnirani i izvedeni na način da sačuvaju svoju funkciju razdvajanja tijekom relevantnog izlaganja djelovanju požara, odnosno:

- Ne dolazi do otkazivanja zbog pukotina, rupa ili drugih otvora koji su dovoljno veliki da uzorkuju penetraciju vrućih plinova ili plamena - kriterij E;
- Ne dolazi do otkazivanja izolacije zbog premašivanja temperature zapaljenja neizložene površine - kriterij I.

Kriterij I može se smatrati ispunjenim ako srednja temperatura neizložene površine ne premašuje  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  i maksimalna temperatura u bilo kojoj točki ne premašuje  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Elementi moraju biti u skladu s kriterijima R, E, I kako slijedi:

- Razdjeljni elementi: E i I
- Nosivi elementi: R
- Kombinirano razdjeljni i nosivi elementi: R, E i I [14]



Slika 2.2 Krivulje porasta temperature u zatvorenom prostoru [13]

### 2.1.1 Mehanička svojstva aluminijskih legura

Za izlaganja povišenim temperaturama do 2 sata, čvrstoća kod 0,2%-tne zaostale deformacije aluminijskih legura dana je u tablici, a slijedi iz "(1)".[14]

$$f_{o,\theta} = k_{o,\theta} \cdot f_o \quad (1)$$

Tablica 2-1 Omjeri čvrstoće pri 0,2% zaostaljoj deformaciji  $k_{o,\theta}$  za aluminijeve legure pri povišenim temperaturama do 2 sata izlaganja [14]

Legura	Temperiranje	Temperatura aluminijeve legure °C							
		20	100	150	200	250	300	350	550
EN AW-3003	O	1,00	1,00	0,90	0,79	0,64	0,46	0,38	0,00
EN AW-3003	H14	1,00	1,00	0,76	0,51	0,26	0,16	0,10	0,00
EN AW-3004	H34	1,00	1,00	0,98	0,57	0,31	0,19	0,13	0,00
EN AW-3004	H38	1,00	1,00	0,88	0,46	0,25	0,16	0,10	0,00
EN AW-5005	O	1,00	1,00	1,00	1,00	0,82	0,58	0,39	0,00
EN AW-5005	H14	1,00	0,93	0,87	0,66	0,37	0,19	0,10	0,00
EN AW-5005	H18	1,00	0,92	0,85	0,60	0,32	0,15	0,08	0,00
EN AW-5052	O	1,00	1,00	1,00	0,85	0,63	0,46	0,28	0,00
EN AW-5052	H34	1,00	1,00	0,92	0,52	0,29	0,20	0,12	0,00
EN AW-5052	H38	1,00	0,98	0,80	0,44	0,24	0,16	0,10	0,00
EN AW-5083	O	1,00	1,00	0,98	0,90	0,75	0,40	0,22	0,00
EN AW-5083	H12	1,00	1,00	0,80	0,60	0,31	0,16	0,10	0,00
EN AW-5086	O	1,00	1,00	0,96	0,91	0,70	0,46	0,30	0,00
EN AW-5086	H34	1,00	1,00	0,85	0,58	0,34	0,24	0,15	0,00
EN AW-5154	O	1,00	1,00	0,96	0,92	0,70	0,50	0,30	0,00
EN AW-5154	H34	1,00	1,00	0,89	0,61	0,37	0,26	0,16	0,00
EN AW-5454	O	1,00	1,00	0,96	0,88	0,50	0,32	0,21	0,00
EN AW-5454	H32	1,00	1,00	0,92	0,78	0,36	0,23	0,14	0,00
EN AW-5454	H34	1,00	1,00	0,85	0,58	0,34	0,24	0,15	0,00
EN AW-6005	T5	1,00	0,93	0,81	0,66	0,42	0,23	0,11	0,00
EN AW-6061	T6	1,00	0,95	0,91	0,79	0,55	0,31	0,10	0,00
EN AW-6063	T5	1,00	0,92	0,87	0,76	0,49	0,29	0,14	0,00
EN AW-6063	T6	1,00	0,91	0,84	0,71	0,38	0,19	0,09	0,00
EN AW-6082	T4	1,00	1,00	0,84	0,77	0,77	0,34	0,19	0,00
EN AW-6082	T6	1,00	0,90	0,79	0,65	0,38	0,20	0,11	0,00

Modul elastičnosti za sve aluminijske legure nakon 2 sata izlaganja termalnom djelovanju povišenih temperatura prikazan je u tablici:

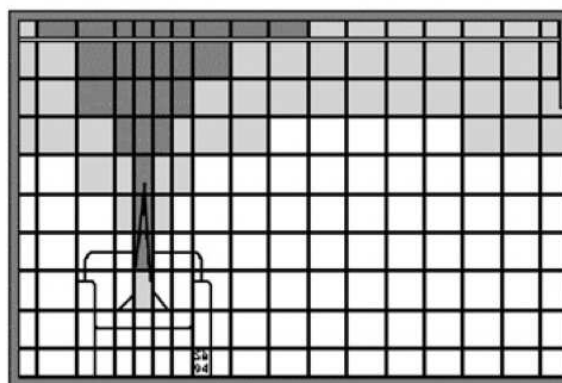
Tablica 2-2 Ovisnost modula elastičnosti aluminijskih legura o temperaturi [14]

Temperatura aluminijske legure, $\theta$ (°C)	Modul elastičnosti, $E_{al,\theta}$ (N mm <sup>-2</sup> )
20	70 000
50	69 300
100	67 900
150	65 100
200	60 200
250	54 600
300	47 600
350	37 800
400	28 000
550	0

### 2.1.2 Modeliranje realnog požara

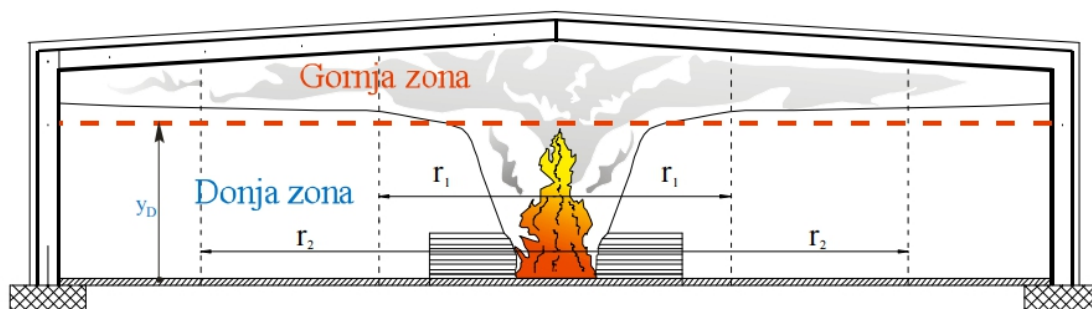
Realni požar se može modelirati na dva temeljno različita pristupa. Prvi je korištenjem poznatih fizikalno-kemijskih zakonitosti - deterministički modeli, a drugi je predviđanjem razvoja požara na temelju zakona vjerojatnosti - probabilistički modeli.

Deterministički modeli mogu biti modeli polja ili modeli zona. Za proračun preko modela polja koristi se računalna dinamika fluida (CFD). Proračun se temelji na metodi konačnih volumena. Domena se dijeli na niz sub-volumena kojima se pridružuju rubni uvjeti. Oni se sastoje od temeljnih zakona očuvanja mase, količine gibanja i energije, te pripadajućih konstitutivnih relacija (jednadžba idealnog plina, Fourierov zakon itd.). Matematički model se svodi na zatvoreni skup diferencijalnih jednadžbi i konstitutivnih relacija koje uz početne i rubne uvjete opisuju konkretni fizikalni problem. Problem se zbog složenosti ne rješava analitički, već samo približno, nekom od numeričkih metoda. Izuzetno je važno kod primjene CFD modela prethodno utvrditi vjerodostojnost modela ispitivanjem u stvarnosti. [15]



Slika 2.3 Podjela domene na sub-volumene [15]

Modeli zona se koriste uglavnom za velike zatvorene prostore npr. hale. Za proračun temperatura u zatvorenoj prostoriji uslijed djelovanja požara polazi se od pretpostavke da se zatvoreni prostor može podijeliti u određeni broj zona tako da svaka zona ima približno jednake fizikalne karakteristike (masu, gustoću, temperaturu, tlak i unutarnju energiju) jer je realno simuliranje veoma složena zadaća kod numeričkog modeliranja, pa se zato uvode određena pojednostavljenja. Modeliranje požara u zonama je veliki izazov i trenutno se, na ovoj razini, provode istraživanja i u poznatim svjetskim institutima od kojih je najznačajniji NIST – National Institute of Standards and Tehnology. Modeliranje u zonama polazi od sustava diferencijalnih jednadžbi koje su izvedene koristeći zakon održanja mase (jednadžba kontinuiteta), zakon održanja energije (prvi zakon termodinamike) i zakon idealnih plinova. Ovi zakoni se postavljaju za svaku pojedinu zonu. Najčešće se prostor dijeli u dvije zone: gornju - zona vrućih plinova i dima, te donju - zona u kojoj se zadržava sobna temperatura i sobni tlak. Podjela na zone prikazana je niže na slici 2.4. Na kontaktu zona dolazi do međudjelovanja što je posljedica izmjene mase i energije. U ovakvom modeliranju specifični toplinski kapaciteti se uzimaju konstantni i primjenjuje se zakon idealnih plinova. [15]



Slika 2.4 Podjela objekta na gornju i donju zonu [13]



### 3 SUSTAVI ZAŠTITE

U prethodnom poglavlju prikazana je degradacija svojstava aluminijskih legura pri povišenim temperaturama, poglavito modula elastičnosti koji je u direktnoj vezi s čvrstoćom. Kako bi se osigurala trajnost aluminijskih elemenata (objekata) potrebno je predvidjeti i dizajnirati adekvatnu zaštitu od požara. Sustavi zaštite se dijele na aktivne i pasivne.

#### 3.1 Aktivni sustavi zaštite

Aktivna zaštita od požara uključuje metode koje zahtijevaju određeno djelovanje i reakciju kako bi se ugasio požar. U aktivne sustave zaštite spadaju:

- Uređaji za detekciju požara
- Aparati za gašenje požara
- Uređaji za ventilaciju
- Podjela objekta na požarne odjeljke
- Sprinkleri

##### 3.1.1 Uređaji za detekciju požara

Vatrodjavni sustavi su automatski sustavi koji se sastoje od detektora požara, uređaja za dojavljivanje i uzbunjivanje. Služe za ranu detekciju požara, evakuaciju i dojavu vatrogasnim službama. Uređaji za detekciju požara rade na fizikalnim principima koji su vezani za karakteristične fenomene požara (npr. temperatura, dim, svjetlost...). Dije se na:

- stropni detektori dima
- detektori temperature
- ručni detektori
- multisenzorski (kombinirani) detektori
- video sustavi za detektiranje dima
- aspiracijski detektori
- detektori požarnih plinova
- detektori plamena

- IC temperaturni detektori
- linijski detektori
- temperaturni kablovi











### 3.1.2 Aparati za gašenje požara

Svaki početni požar se u pravilu može uspješno ugasiti ručnim vatrogasnim aparatima ukoliko mu se pristupi odmah u ranim fazama razvoja, osim ako je požar nastao kao posljedica eksplozije. Kada je požar u svojim ranim fazama moguće ga je ugasiti malom količinom sredstava za gašenje koju vatrogasni aparati i pružaju. Upravo zbog te male količine sredstava za gašenje koju sadržavaju, vatrogasne aparate treba ravnomjerno rasporediti unutar objekta. Kako bi oni bili dostupni u slučaju nastanka alarmantne situacije, uvijek se postavljaju na mjestima koja imaju veću mogućnost nastanka požara, tako da aparati nisu udaljeni više od 20 m jedan od drugog a ručka aparata je na visini do 1,5 m. [16]

Postoji 5 glavnih tipova aparata za gašenje požara:

- Aparati s vodom ili vodenom maglom
- Aparati sa sprej pjenom
- Aparati sa suhim prahom
- Aparati s CO<sub>2</sub>
- Aparati s vlažnom kemikalijom [17]

Svaki od navedenih tipova aparata ima svoje područje primjene obzirom na vrstu požara, prikazano niže na slici 3.1.

Simboli na aparatima za gašenje požara						
		Voda	Sprej pjena	ABC prah	Ugljikov dioksid	Vlažna kemikalija
drvo, papir i tekstil 		✓	✓	✓	✗	✓
Zapaljive tekućine 		✗	✓	✓	✓	✗
Zapaljivi plinovi 		✗	✗	✓	✗	✗
Električna oprema 		✗	✗	✓	✓	✗
Ulja i masti za kuhanje 		✗	✗	✗	✗	✓

Slika 3.1 Područje primjene pojedine vrste protupožarnih aparata [17]

### 3.1.3 Uređaji za ventilaciju

U uređaje za ventilaciju spadaju kanali za odvodnju dima i topline i ventilacijski kanali. Kanali za odvodnju dima i topline služe za uklanjanje dima iz objekta kako bi se omogućila hitna evakuacija ljudi, te učinkovito protupožarno djelovanje i sprječavanje brzog širenja vatre. Od protupožarnih kanalnih sustava zahtijeva se odvodnja dima izvan objekta, čak i uz pomoć sustava potpomognutih ventilatorima. Ako su kanali za odvodnju dima i topline u potpunosti u požarnom odjeljku, takav sustav mora biti sposoban oduprijeti se predviđenim temperaturama koje požar proizvede.

Ventilacijski kanali upotrebljavaju se kako bi se zajamčilo odvajanje požarnih odjeljaka. Točnije, ventilacijski kanali mogu spriječiti širenje vatre i topline između dvaju požarnih odjeljaka. Zidovi i stropovi moraju imati određenu vatrootpornost, što znači da izvedbeni kriteriji veličine opterećenja (stabilnosti), integriteta i izolacije moraju biti ispunjeni u trajanju od 30 do 240 minuta. Stoga je iznimno važno da se na mjestima gdje kroz pregrade odjeljaka prolaze instalacije kriteriji požarne razdiobe za elemente prodora zadrže i osobito da kanali ne postanu vodovi kroz koje se požar ili vrući dim može širiti na druga područja.

### 3.1.4 Podjela objekta na požarne odjeljke

U slučaju požara jedna od najbitnijih stavki je spriječiti širenje vatre i dima, odnosno lokalizirati požar. Pravilnim projektiranjem moguće je osigurati lokalizaciju požara i prije nego on nastane podjelom objekta na požarne odjeljke. Požarni odjeljak je dio građevine koji je

odijeljen od ostalih dijelova građevine pregradnom konstrukcijom i elementima određene otpornosti na požar. Objekt se dijeli na odjeljke postavljanjem požarnih zidova. Požarni zid je posebna vrsta pregradnih konstrukcija otpornosti na požar najmanje REI-M 90 i izveden je od negorivih građevnih proizvoda (reakcije na požar najmanje A2 po HRN EN 13501-1:2010) koji presijeca konstrukciju građevine od temelja do krova s posebno izvedenim krovnim završetkom koji onemogućuje prijenos požara. Požarni zid mora tražena svojstva REI osigurati i u slučaju mehaničkih udara (M) zbog eventualnog padanja okolnih konstrukcija pa se minimalna otpornost na požar označava kombinacijom oznaka i vremena: REI-M 90. Požarni zid sprječava prijenos vatre i dima na druge građevine i/ili požarne odjeljke u istoj građevini.[19]

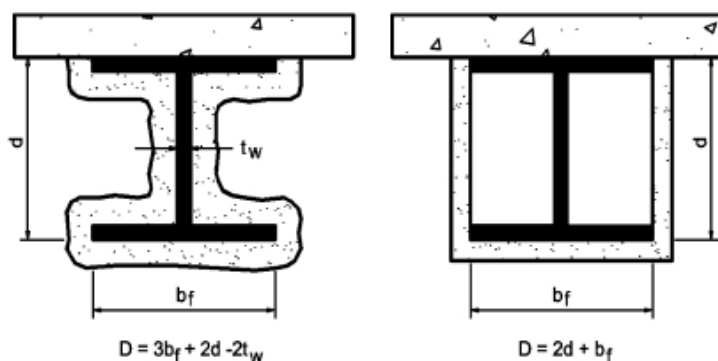
### 3.1.5 Sprinkleri

Sprinkleri su uređaji koji svojim aktiviranjem istovremeno vrše gašenje i automatsku dojavu požara. Razlikuju se dvije vrste sustava, ovisno o temperaturi i vrsti prostora u koji se ugrađuju: mokri i suhi. Mokri sprinkler sustav se koristi u prostorima gdje nema opasnosti od zamrzavanja ili isparavanja vode. Suhi sprinkler sustav se koristi u prostorima s vrlo niskim ili visokim temperaturama. Prednosti sprinkler uređaja :

- jednostavno održavanje, visoka efikasnost gašenja i nepostojanje lažnih alarma
- gotovo eliminiraju smrtnu slučajevu prilikom požara u objektima.
- smanjuju ozljede i gubitak imovine uzrokovane požarom
- prilikom aktivacije sustava uvelike se smanjuje korištenje vode, ali i šteta nastala u procesu gašenja požara u usporedbi sa gašenjem požara od strane vatrogasne službe
- ne reagiraju na dim i kuhinjske pare, te se aktiviraju samo u slučaju požara
- u slučaju požara aktiviraju se samo one mlaznice koje se nalaze u dijelu prostora koji je zahvaćen požarom, tako da su minimalne štete od djelovanja vode.[20]

### 3.2 Pasivni sustavi zaštite

Pasivni sustavi zaštite funkcioniraju kao termoizolacija elemenata izloženih djelovanju požara. Mogu se postavljati na dva načina. Jedan način je da materijal prati konturu elementa, a drugi da tvori kutiju oko elementa.



Slika 3.2 Načini postavljanja zaštite na profil [21]

Bitna razlika kod postavljanja zaštite konturno i kutijasto je da se kod kutijastog postavljanja smanjuje izložena površina. To znači da se manje topline može prenijeti radijacijom. Međutim kod konturnog postavljanja nanosi se više izolacijskog materijala, samim time potrebna je i veća količina topline da se on zagrije.

Postoji nekoliko različitih vrsta pasivne zaštite:

- Gips ploče
- Ploče od kalcijevog silikata
- Ekspandirajući premazi
- Ploče od keramičkih vlakana
- Prskane zaštite

#### 3.2.1 Gips ploče

Gips ploče se sastoje od kalcijevog sulfata u formi dihidrata, odnosno sadre. Moguće je dodavanje različitih aditiva u svrhu povećavanja požarne otpornosti, kao što su staklena vlakna ili vermikulit. Kada su gips ploče izložene temperaturi preko 100 °C, dolazi do kalcinacije. Kemijski vezana voda isparava iz gipsa i on se reducira na kalcinirani gips, odnosno poluhidrat, prikazano formulom:



Kad je gips ploča izložena požaru, proces kalcinacije se širi postepeno kroz debljinu ploče, trošeći termalnu energiju i na taj način ograničava temperaturu na drugoj strani ploče na cca. 120 °C. Bitan faktor kod požarne otpornosti gips ploča je gustoća i inicijalna vlažnost. Staklena vlakna i vermikulit pomažu usporiti skupljanje i popratno formiranje pukotina. [22]

Gipskartonske ploče se sastoje od gipsa, papira i aditiva. Postoje brojni tipovi gipskartonskih ploča koji su u skladu s EN 520.

Tip A - regularna ploča s jezgrom od poroznog gipsa i bez ojačanja osim površine od lameliranog papira.

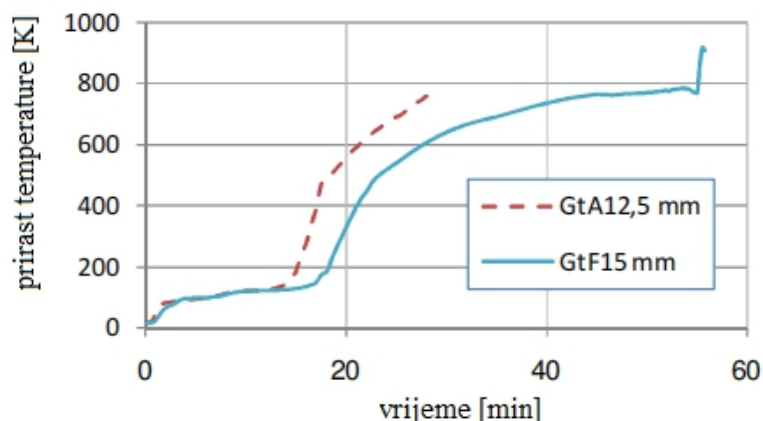
Tip F - ploče za zaštitu od vatre s unaprijeđenom kohezijom jezgre na visokim temperaturama. U sjevernoj Americi se nazivaju tip X.

Gips ploče za zaštitu od vatre sadrže staklena vlakna koja kontroliraju skupljanje tvoreći labirint sitnih pukotina umjesto manjeg broja velikih pukotina što može inicirati ranije otkazivanje kod običnih ploča tipa A. Jedan od najkritičnijih aspekata otpornosti na vatru kod ovih ploča je do koje mjere mogu staklena vlakna držati ploču cjelovitom. Njihova zadaća je, nakon što gips dehidrira i počne se skupljati, zaustaviti odvajanje ploče od spojnih sredstava. Obično dolaze u veličinama 9-30 mm.

Vlknaste gips ploče su ploče visokih performansi armirane celulozom, u skladu s EN 15283-2. Mogu biti korištene kao alternativa gipskartonskim pločama. Vlknaste gips ploče se sastoje od 80-85 % recikliranog gipsa (gips iz desulfurizacijskih postrojenja) i 15-20% vlakana celuloze (reciklirani novinski papir). Impregniraju se sa škrobom i silikonom.

Gips je nezapaljiv materijal što znači da ne doprinosi gorenju. U principu funkcionira kao ugrađeni sprinkler; u jednom kvadratnom metru ploče debljine 12,5 mm, gips ploča sadrži cca. 2 litre vode. Visoki sadržaj vode doprinosi i do 90% ukupne otpornosti gips ploče na vatru. Proces kalcinacije kreće na temperaturama preko 80 °C, a voda koja isparava sprječava vatru da prodre dublje u ploču. Proces kalcinacije je uglavnom završen kad ploča dosegne temperaturu od 125 °C i postane anhidrat,  $\text{CaSO}_4$ . Ovaj proces zahtijeva puno energije i vremena. [23]

Na slici 3.3 prikazana je usporedba rasta temperature na stražnjoj strani 12,5 mm debeloj gipskartonskoj ploči tipa A i 15 mm debeloj ploči tipa F. Faza kalcinacije je lako uočljiva. Prvo temperatura raste dok na stražnjoj strani ne dosegne 80-100 °C. Voda počinje isparavati i to se očituje stagnacijom na grafu. Vrijeme isparavanja ovisi o debljini ploče. Nakon što proces isparavanja završi, temperatura ponovo raste.



Slika 3.3 Prirast temperature na stražnjoj strani ploče tipa A (GtA) i tipa F (GtF) u standardnom požaru [23]

Mehanička svojstva samih gips ploča ispitana su u eksperimentu s pločom tipa X debljine 15,9 mm (5/8"). Svrha istraživanja je bila pronaći inženjerske podatke za modeliranje gipsa u računalnoj strukturalnoj analizi. Rezultati testa su dani u tablici:

Tablica 3-1 Inženjerska svojstva gips ploče tipa X debljine 15,9 mm [22]

Temperatura neizložene strane gips ploče (°C)	Gustoća (kg m <sup>-3</sup> )	Modul elastičnosti (GPa)		Čvrstoća na savijanje (MPa)		Koefficient temperaturnog širenja (mm mm <sup>-1</sup> °C)	
		Uzduž panela	Poprijeko panela	Uzduž panela	Poprijeko panela	Uzduž panela	Poprijeko panela
23	700	2,5	1,75	3,79	2,25	-	-
100	680	1,41	1,15	3,76	1,64	2,6×10 <sup>-6</sup>	3,9×10 <sup>-6</sup>
200	590	0,94	0,48	2,37	1,09	-5,1×10 <sup>-6</sup>	-6,2×10 <sup>-6</sup>
300	570	0,58	0,54	0,93	0,66	-3,2×10 <sup>-6</sup>	-5,4×10 <sup>-6</sup>
400	545	0,47	0,52	0,26	0,14	-1,6×10 <sup>-6</sup>	-1,9×10 <sup>-6</sup>

Trajnost lakih konstrukcija od drva ili metala sa zaštitom od požara u obliku gips ploča ovisi o zadržavanju gips ploča na elementima koje štite. Prema Cramer, S.M.; Friday, O.M.; White, R.H.; Sriprutkiat (2003) trajnost i integritet membrane od gips ploča je funkcija naprezanja i čvrstoće gipsa. Gips ploče nisu izolirani i neovisni dio, već integralni dio nosive konstrukcije. Ispitivanja su pokazala potpun gubitak vode (kalcinacija) prije 60 minuta izloženosti temperaturi od 400 °C. Najveći gubitak mase i skupljanje je uočeno između 100 °C i

200 °C. Savojna čvrstoća se smanjuje gotovo linearno kako temperatura raste od 0 °C do 400 °C. Modul elastičnosti se najviše smanjio između 100 °C i 200 °C dok se odvijala kalcinacija.

### 3.2.2 Ploče od kalcijevog silikata

U novije vrijeme, umjesto gips ploča, sve se više koriste ploče od kalcijevog silikata zbog njihovih boljih fizikalnih i toplinskih svojstava. Uz to su i lagane, isplative i otporne na vlagu i udarce. Prema gustoći se dijele u 3 skupine:

Ploče niske gustoće (200 - 500 kg m<sup>-3</sup>)

Ploče srednje gustoće (500 - 1000 kg m<sup>-3</sup>)

Ploče visoke gustoće (1000 - 1800 kg m<sup>-3</sup>)

Ovisno o uvjetima hidrotermalne sinteze, mogu se sintetizirati različite faze kalcijevog silikata. Ovi produkti se mogu razlikovati po kristalnoj strukturi i kemijski vezanoj vodi.

- Tobermorit  $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Ksonolit  $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$
- Vulastonit  $\text{CaSiO}_3$  [24]

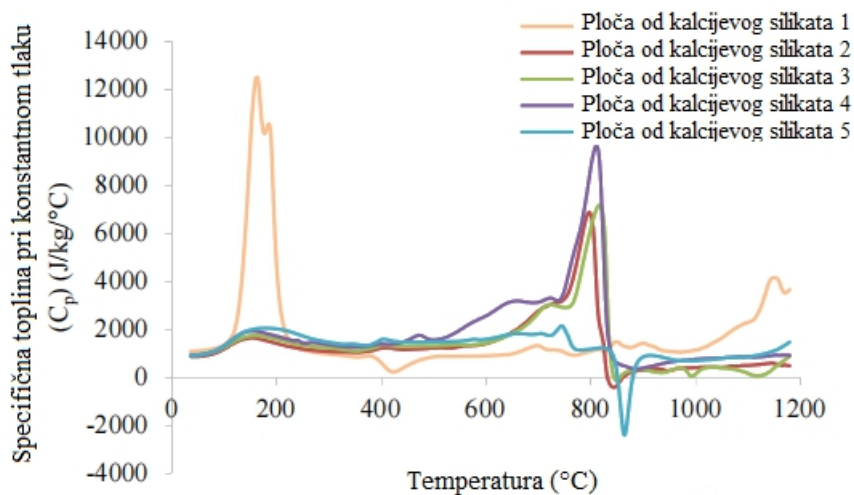
Dehidracija ovih minerala tijekom povećanja temperatura dovodi do promjena u mineralnoj strukturi i posljedično do toplinskog skupljanja materijala. Na temperaturi od 1100 °C kalcijev silikat počinje sinterirati što znači da je ograničen na primjene ispod 1100 °C. To ga čini prikladnim materijalom za široko područje primjene, od izoliranja elemenata u građevinarstvu do izoliranja peći u proizvodnji aluminijske legure.

Kako bi se utvrdila inženjerska svojstva ploča od kalcijevog silikata za modeliranje u računalnim analizama provedeno je istraživanje s 5 različitih komercijalno dostupnih ploča čiji su sastavi prikazani u tablici 3-2, a rezultati istraživanja na slikama 3.4, 3.5 i 3.6.

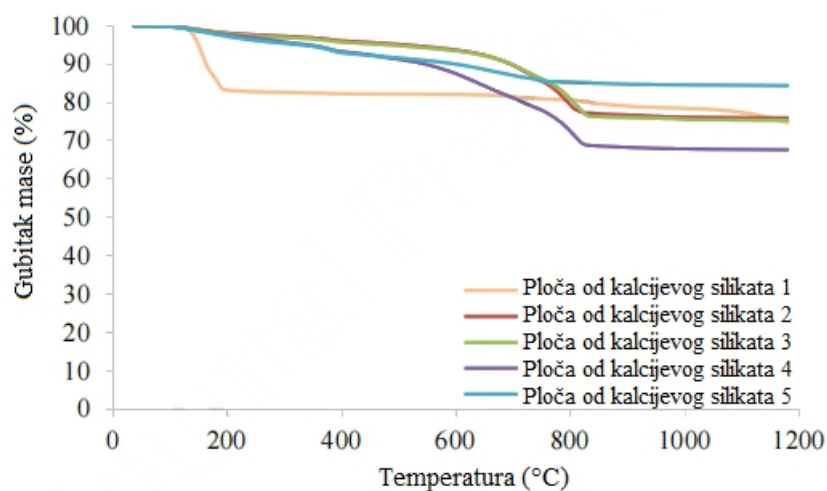


Tablica 3-2 Sastav ploča od kalcijevog silikata [24]

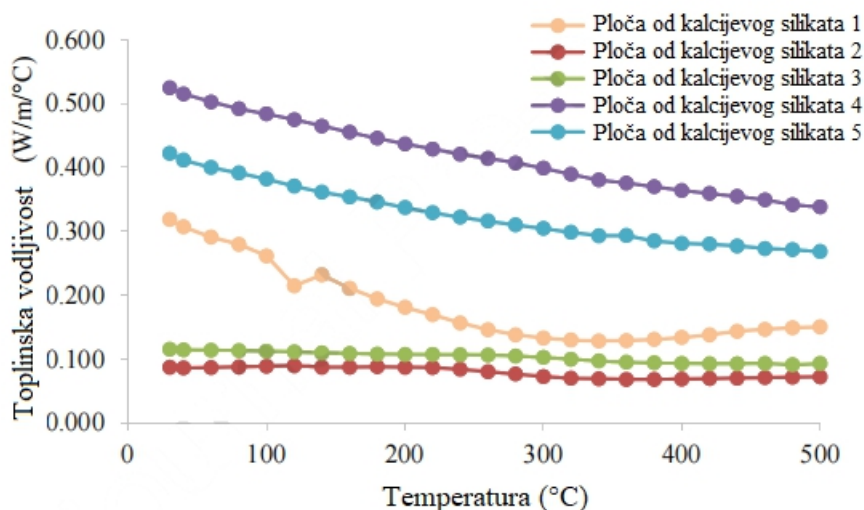
Sastav (%)									
Redni broj ploče	Kalcijev silikat	Kvarc	Portland cement	Celuloza	Amorfni pijesak	Staklena vlakna	Punilo/a	Vezivno sredstvo	Aditiv(i)
1	>60	<1						6-30	Ostatak
2	>60	<1		<10		<10			
3	<90	<1						<6	Ostatak
4			5-50	5-50					
5	15-25		15-25	<10	15-25		<40		



Slika 3.4 Promjena specifične topline u ovisnosti o temperaturi uzorka [24]



Slika 3.5 Gubitak mase u ovisnosti o promjeni temperature uzorka [24]



Slika 3.6 Toplinska vodljivost u ovisnosti o promjeni temperature uzorka [24]

Visoki vrhovi na grafu specifičnog toplinskog kapaciteta (slika 3.4) uzrokovani su dekompozicijom kalcijevog sulfata dihidrata. To se može uočiti i kod gips ploča. Kasnija dekompozicija uočena kod ploča 2,3 i 4 pripisuje se prisutstvu ksonolita koji se sintetizira tijekom procesa hidrotermalne sinteze.[24]

### 3.2.3 Ekspandirajući premazi

Protupožarni (ekspandirajući) premazi ili intumescentne boje spadaju u reaktivne sustave aktivne zaštite. To su materijali koji pri izlaganju visokim temperaturama ekspandiraju (slika 3.7) i na taj način tvore izolacijski sloj koji štiti element od prodiranja topline. U dodiru s toplinom premazi bubre i tvore pjenastu izolirajuću strukturu. Nastala kemijska i fizikalna reakcija je nepovratna. Taj proces bubrenja je endotermnog karaktera što znači da i sam proces potroši dio topline i na taj način pridonosi zaštiti elementa od grijanja.



Slika 3.7 Ekspandirajući premaz prije (lijevo) i nakon (desno) djelovanja požara [25]

Pri projektiranju važno je odrediti potrebnu debljinu suhog filma boje (DFT). Ona ovisi o:

- Faktoru mase - omjer između površine elementa izloženog požaru i debljine profila. Što je faktor mase veći, profil se brže zagrijava te je potrebna veća debljina protupožarnog materijala.
- Izloženosti - broj strana izloženih požaru
- Kritičnoj temperaturi - ograničavajuća temperatura kao funkcija stanja uporabe
- Razini potrebne zaštite - R30, R60, R90, itd. [26]

Tijekom primjene potrebno je često kontrolirati debljinu mokrog filma (WFT). Time se kontrolira tehnika nanošenja, a vrši se uređajem “WFT Gauge” (češalj). Potrebna debljina mokrog filma dobije se množeći potrebnu debljinu suhog filma umanjujućim faktorom koji uzima u obzir volumni sadržaj suhe tvari i ovisi vrsti proizvoda. Debljine suhog filma svakog sloja kontroliraju se najčešće svaka 24 sata nakon otvrdnjavanja premaza elektronskim mjeračima tipa “Elcometer 456”. [27]

Teoretska potrošnja (TP) boje u određenoj debljini suhog filma na glatkoj površini izračunava se prema izrazu “(2)”:

$$TP (l) = \text{površina (m}^2\text{)} \cdot \text{DSF } (\mu\text{m}) / \text{VSS\%} \cdot 10 \quad (2)$$

$$TP (\text{kg}) = \text{površina (m}^2\text{)} \cdot \text{DSF } (\mu\text{m}) \cdot \text{gustoća boje (kg dm}^{-3}\text{)} / \text{VSS\%} \cdot 10$$

Praktična potrošnja (PP) boje izračunava se množenjem teoretskog utroška s odgovarajućim faktorom gubitka prema izrazu “(3)”:

$$PP \text{ (l ili kg)} = \text{površina (m}^2\text{)} \cdot TP \text{ (l ili kg)} \cdot (100 + \text{faktor gubitka (\%)})/100 \quad (3)$$

VSS% - volumna suha tvar (%)

Sljedeće kategorije uporabe definirane su za protupožarne proizvode u skladu sa smjernicama ETAG 018:

- Tip X: Reaktivni sustav premaza namijenjen svim uvjetima uporabe (unutarnja, poluizložena i izložena)
- Tip Y: Reaktivni sustav premaza namijenjen unutarnjoj i poluizloženoj uporabi. Ova posljednja uključuje temperature ispod 0 °C, ali ne i izloženost kiši, međutim uključuje ograničenu izloženost UV zračenju (koja nije procijenjena)
- Tip Z1: Reaktivni sustav premaza namijenjen unutarnjoj uporabi (isključujući temperature ispod 0 °C) s vrlo visokom vlažnosti zraka.
- Tip Z2: Reaktivni sustav premaza namijenjen unutarnjoj uporabi (isključujući temperature ispod nule) s razredima vlažnosti koji se razlikuju od Z1.

S obzirom na vrstu požara postoje i različiti premazi. Za požar uzrokovan gorenjem tvari na bazi celuloze koriste se jednokomponentni tankoslojni premazi na bazi akrila. Nanose se bezzračnim raspršivanjem ili valjkom u debljini suhog filma od 0,2-5 mm. Pri djelovanju požara povećavaju svoj volumen 40-60 puta.

Za požar uzrokovan gorenjem ugljikovodika se koriste dvokomponentni debeloslojni premazi na bazi epoksida. Nanose se raspršivačem za više komponenti, a nakon toga i lopaticom. Debljina suhog filma se kreće 2-4 mm, a pri djelovanju požara povećavaju svoj volumen 4-10 puta.[26]

### 3.2.4 Ploče od keramičkih vlakana

Ove ploče se koriste zbog svoje male vlastite težine, termalne, mehaničke i kemijske stabilnosti i niske toplinske provodljivosti. Uglavnom se proizvode od visoko porozne vlaknaste ili mikroporozne matrice od keramike kao što je glinica ili silicijev dioksid. Visoki stupanj poroznosti svodi toplinsku provodljivost materijala na red veličine toplinske provodljivosti plina koji ispunjava šupljine. Za strukturalnu primjenu mogu se dodati punila kako bi se povećala krutost ploča. [28]

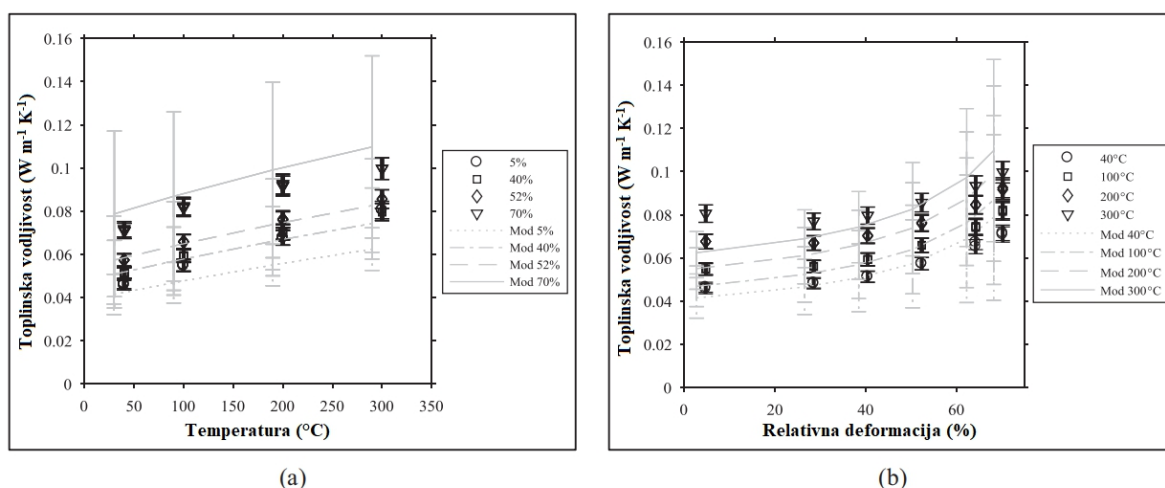
Kako bi se pobliže ispitala svojstva izolacije od keramičkih vlakana provedeno je istraživanje s dva različita komercijalno dostupna proizvoda istog proizvođača. Prvi je Fiberfrax

970-H, vunasti materijal niske gustoće, a drugi Fiberfrax T-30LR kruta ploča od vlakana s punilom. Prije ispitivanja materijali su osušeni na 600 °C 4 sata. Maseni sastav materijala je dan u tablici:

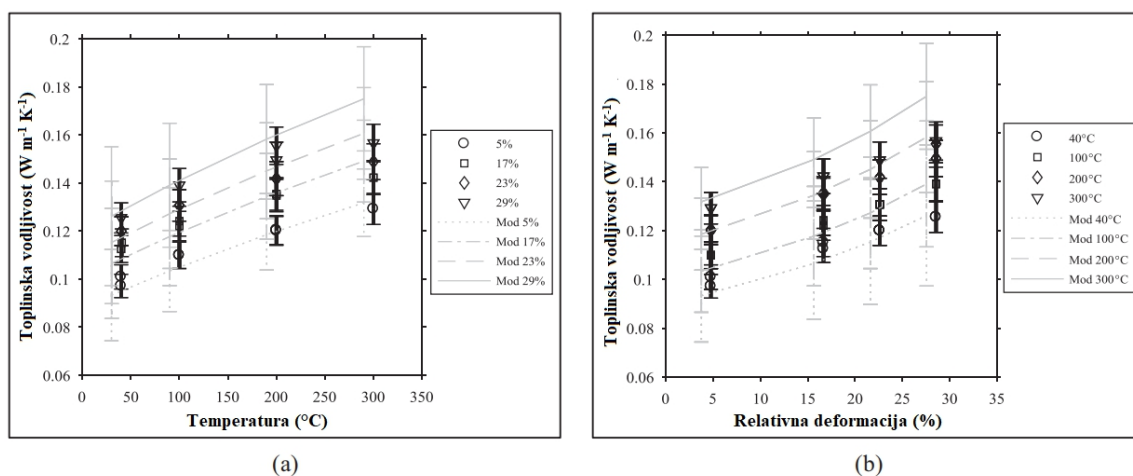
Tablica 3-3: Maseni sastav ispitanih materijala [28]

Materijal	Nominalna gustoća (g cm <sup>-3</sup> )	Maseni sastav
Fiberfrax T-30LR	0,8	51,7% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /47,6% SiO <sub>2</sub> + punilo
Fiberfrax 970-H	0,16	51,7% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /47,6% SiO <sub>2</sub> + punilo

U eksperimentu je mjerena toplinska vodljivost pri različitim temperaturama i stupnjevima kompresije. Generalno se toplinska vodljivost povećava s rastom temperature i stlačenosti. Rezultati eksperimenta prikazani su na slikama 3.8 i 3.9:



Slika 3.8 Toplinska vodljivost Fiberfrax 970-H, mjereni i modelirani rezultati u odnosu na (a) temperaturu (pri odabranoj kompresiji), (b) tlak [28]



Slika 3.9 Toplinska vodljivost Fiberfrax T-30LR, mjereni i modelirani rezultati u odnosu na (a) temperaturu (pri odabranoj kompresiji), (b) tlak [28]

### 3.2.5 Prskane zaštite

Prskane zaštite tvore na površini elementa ne-reaktivnu prevlaku. Primijenjeni materijal djeluje kao izolacijski sloj kad je element izložen visokim temperaturama. Ovisno o području primjene, poglavito klimatskim uvjetima, postoje dvije grupe prskanih zaštita:

- Sprejevi na bazi gipsa (interna primjena)
- Sprejevi na bazi cementa (polu-izložena ili eksterna primjena)

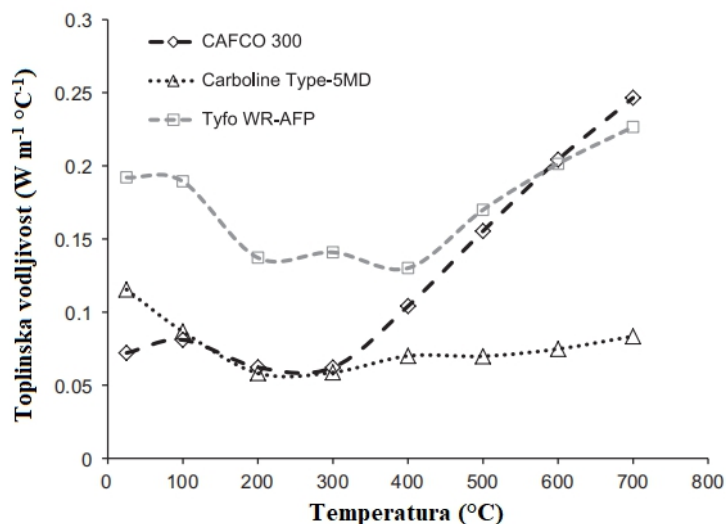
Kao i kod ekspandirajućih premaza debljina suhog filma ovisi o faktoru mase, izloženosti, kritičnoj temperaturi i razini potrebne zaštite. Debljina mokrog filma se također određuje na isti način, te je potrebno redovito mjeriti debljinu za vrijeme nanošenja. [29]

U svrhu određivanja inženjerskih podataka o prskanim zaštitama za potrebe preciznijeg modeliranja proveden je eksperiment s 3 različita komercijalno dostupna proizvoda. Svrha ispitivanja je bila odrediti kako se mijenjaju svojstva materijala s porastom temperature u rasponu 20-1000 °C. Ispitani materijali i njihovi sastavi prikazani su u tablici 3-4.

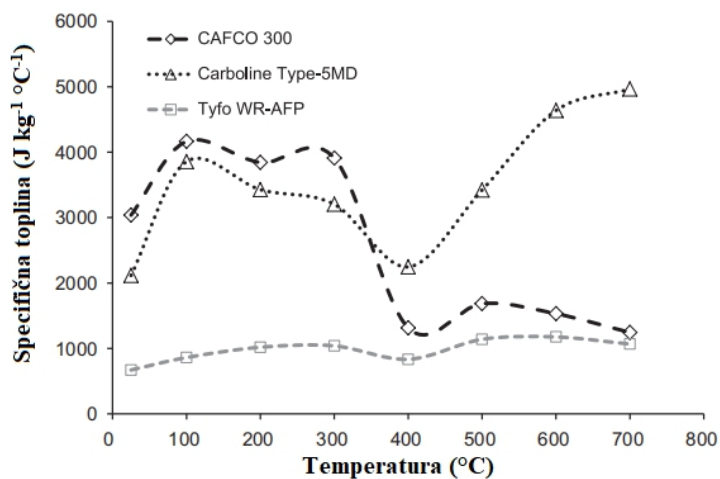
Tablica 3-4 Sastav ispitanih materijala [30]

CAFCO 300		Carboline type-5MD		Tyfo WR-AFP	
Sastav	Maseni udio (%) (max.)	Sastav	Maseni udio (%) (max.)	Sastav	Maseni udio (%) (max.)
Gips	50-75	Gips	70	Gips	30-40
Vermikulit	15-35	Vermikulit	30	Vermikulit	25-35
Celuloza	1-10	Celuloza	5	Celuloza i aditivi	>10
Kalcijev karbonat	1-10	Vapnenac	5	Portland cement	30-40
Kvarc	0-5	Mikrokristalni silicijev dioksid	0,7	Keramička vlakna	10

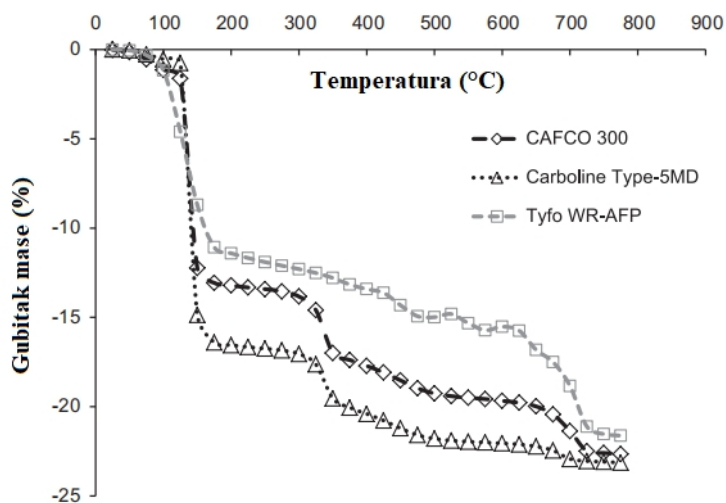
Rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 3.10, 3.11 i 3.12.



Slika 3.10 Promjena toplinske vodljivosti s obzirom na porast temperature [30]



Slika 3.11 Promjena specifične topline s obzirom na porast temperature [30]



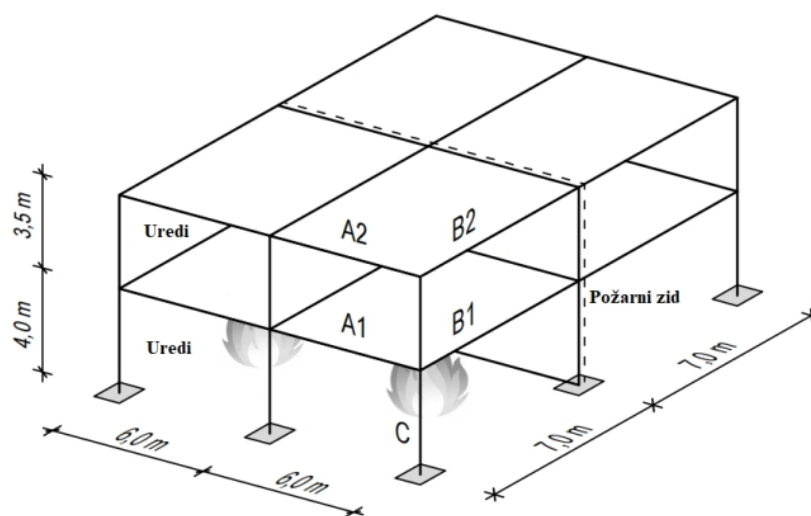
Slika 3.12 Gubitak mase s obzirom na porast temperature [30]

Specifična toplina je povezana s masom, odnosno gustoćom; što je manja gustoća, veća je specifična toplina. Porast pri temperaturi  $\sim 100$  °C može se pripisati evaporaciji vode i posljedično tome, smanjenju mase. Nakon toga specifična toplina je otprilike konstantna do 300 °C, nakon čega opada do 400 °C zbog završetka evaporacije vode. Nakon 400 °C uočava se rast koji je uzrok ispuštanju kemijski vezane vode prisutne u sastojcima prskane zaštite.[30]



## 4 NUMERIČKI PRIMJER

Zadan je objekt, prikazan na slici 4.1., izložen izvanrednom djelovanju požara. Potrebno je odrediti djelovanja na konstrukciju prema Eurocode-u, kombinaciju za izvanredni slučaj, te dizajnirati zaštitu od požara da objekt zadovolji klasu R30. Objekt se sastoji od ureda u prizemlju i na katu, neprohodnog ravnog krova i požarnog zida koji objekt dijeli na požarne odjeljke. Lokacija objekta je na području Splita, na nadmorskoj visini od 100 m. Nosivi sustav se sastoji od aluminijskih (EN AW-6061 T6) stupova i greda, te betonskih ploča. Za usporedbu će se provesti i analiza identičnog objekta s nosivim sustavom od čelika (S235).



Slika 4.1 Dimenzije zadanog objekta

### 4.1 Analiza opterećenja

#### 4.1.1 Vlastita težina

Vlastita težina objekta bit će uključena unutar software-a SCIA Engineer 19.1.

#### 4.1.2 Dodatno stalno opterećenje

Dodatno stalno opterećenje za prizemlje neće se uzeti u obzir budući da se podna ploča neće proračunavati. Za ostale ploče odabrano je opterećenje od  $2,5 \text{ kN m}^{-2}$ . Opterećenje od težine fasade odabrano je  $1,0 \text{ kN m}^{-2}$  i raspoređeno na stupove.

#### 4.1.3 Pokretno opterećenje

Pokretno opterećenje za prizemlje neće se uzeti u obzir budući da se podna ploča neće proračunavati.

Za urede, prema EN 1991 1-1, pokretno opterećenje se uzima 2-3 kN m<sup>-2</sup>. Za ovaj zadatak odabrano je preporučenih 3,0 kN m<sup>-2</sup>.

Za neprohodne krovove uzima se vrijednost 0-1 kN m<sup>-2</sup>, a u ovom zadatku uzeta je preporučena vrijednost od 0,4 kN m<sup>-2</sup>. [31]

#### 4.1.4 Snijeg

Opterećenje snijegom određuje se prema (4):

$$s = \mu_i C_e C_t s_k [\text{kN m}^{-2}] \quad (4)$$

$\mu_i$  - koeficijent oblika za opterećenje snijegom, za ravne krovove iznosi 0,8

$C_e$  - koeficijent izloženosti koji obično ima vrijednost 1.0

$C_t$  - toplinski koeficijent koji obično ima vrijednost 1.0

$s_k$  - karakteristična vrijednost opterećenja na tlu u kN m<sup>-2</sup>, za područje Splita i nadmorsku visinu od 100 m iznosi 0,5 kN m<sup>-2</sup> [32]

$$s = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,5 = 0,4 \text{ kN m}^{-2}$$

#### 4.1.5 Vjetar

Osnovna brzina vjetra  $v_b$  određuje se prema (5):

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} [m s^{-1}] \quad (5)$$

$v_{b,0}$  - fundamentalna vrijednost osnovne brzine vjetra, za područje Splita 25 m s<sup>-1</sup>

$c_{dir}$  - faktor smjera vjetra koji obično ima vrijednost 1,0

$c_{season}$  - faktor doba godine koji obično ima vrijednost 1,0

$$v_b = 1,0 \times 1,0 \times 25 = 25 \text{ m s}^{-1}$$

Osnovni pritisak vjetra  $q_b$  određuje se prema (6):

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 [kN m^{-2}] \quad (6)$$

$\rho$  - gustoća zraka, iznosi 1,25 kg m<sup>-3</sup>

$$q_b = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 25^2 = 390,625 \text{ N m}^{-2} = 0,391 \text{ kN m}^{-2}$$

Pritisak brzine vjetra pri udaru  $q_p(z)$  računa se prema (7):

$$q_p(z) = c_e(z) q_b \quad (7)$$

$c_e(z)$  - faktor izloženosti i odnosi se na pritisak te ovisi o visini iznad terena  $z$  i kategoriji terena, za visinu od 7,5 m i kategoriju terena III, iznosi 2,2

$$q_p(z) = 2,2 \times 0,391 = 0,860 \text{ kN m}^{-2}$$

Pritisak vjetra na vanjske površine  $w_e$  računa se prema (8):

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe} \quad (8)$$

Tablica 4-1 Pritisak vjetra na vanjske površine

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$C_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,3	-1,8	-1,2	-0,7	$\pm 0,2$
$q_p$ [kN m <sup>-2</sup> ]	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
$w_e$ [kN m <sup>-2</sup> ]	-1,032	-0,688	-0,43	0,688	-0,258	-1,548	-1,032	-0,602	$\pm 0,172$

Pritisak vjetra na unutarnje površine računa se na isti način samo su koeficijenti za sva područja jednaki +0,2 ili -0,3.

Tablica 4-2 Pritisak vjetra na unutarnje površine

$C_{pi}$	0,2	-0,3
$q_p$ [kN m <sup>-2</sup> ]	0,86	0,86
$w_i$ [kN m <sup>-2</sup> ]	0,172	-0,258

Predznak “+” označava vjetar koje djeluje prema plohi, a “-” vjetar koje djeluje od plohe. Kako bi se dobio ukupan utjecaj vjetra na plohe potrebno je kombinirati vanjski i unutarnji pritisak. [33]

Tablica 4-3 Ukupno djelovanje vjetra

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$w_1$ [kN m <sup>-2</sup> ]	-1,204	-0,86	-0,602	0,516	-0,43	-1,72	-1,204	-0,774	-0,344
$w_2$ [kN m <sup>-2</sup> ]	-0,774	-0,43	-0,172	0,946	0	-1,29	-0,774	-0,344	0,43

U ovom slučaju predznak “+” označava pritiskajući vjetar gledano s vanjske strane objekta, a “-” odižujući.

#### 4.1.6 Promjena temperature

Promjena temperature s obzirom na temperaturu ugradnje i prosječne temperature za ljetu i zimu propisana je Eurocodeom i određuje se prema (9), (10) i (11):

$$T = \frac{T_{out} - T_{in}}{2} \quad (9)$$

$$\Delta T = T - T_0 \quad (10)$$

$$T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

a) Ljeto

$$T_{\text{out}} = 0,7 \cdot (T_{\text{max}} + T_4) = 0,7 \cdot (40 + 30) = 49 \text{ }^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$T_{\text{in}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = \frac{49 + 20}{2} = 34,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 34,5 - 20 = 14,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

b) Zima

$$T_{\text{out}} = T_{\text{min}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{in}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = \frac{-5 + 25}{2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 10 - 25 = -15 \text{ }^\circ\text{C} \quad [34]$$

#### 4.1.7 Požarno djelovanje

Za provjeru otpornosti na djelovanje požara potrebno je odrediti temperature u elementima nakon djelovanja od 30 minuta. Povišena temperatura djeluje na elemente na dva načina: utjecaj toplinskog širenja uzrokuje unutarnje sile zbog ograničenosti slobode gibanja, te smanjenje fizikalnih svojstava materijala, odnosno opadanje modula elastičnosti. Određivanje temperature u elementima propisano je Eurocodeom.

Za ekvivalentnu jednoliku raspodjelu temperature unutar poprečnog presjeka, porast temperature  $\Delta\theta_{\text{al}(t)}$  u nezaštićenom elementu tijekom vremenskog intervala  $\Delta t$  određuje se prema (13):

$$\Delta\theta_{\text{al}(t)} = k_{\text{sh}} \frac{1}{c_{\text{al}} \rho_{\text{al}}} \frac{A_m}{V} h_{\text{net}} \Delta t \quad (13)$$

gdje je:

$k_{\text{sh}}$  korekcijski faktor zasjenjenja

$A_m/V$  faktor poprečnog presjeka za nezaštićeni aluminijski element ( $\text{m}^{-1}$ )

$h_{\text{net}}$  računski vrijednost neto toka topline po jedinici površine

Za I-profile pod djelovanjem nominalnih požarnih djelovanja, određuje se korekcijski faktor učinka sjene prema (14):

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V} \quad (14)$$

gdje je:

$(A_m/V)_b$  vrijednost okvira faktora presjeka

Ignoriranje faktora zasjenjenja vodi ka konzervativnijim rješenjima.

Vrijednost  $\Delta t$  ne bi se trebala uzimati manja od 5 s, a vrijednost  $A_m/V$  u izrazu (13) ne bi trebala biti manja od  $10 \text{ m}^{-1}$ . Vrijednost  $h_{net,d}$  uzima se iz EN 1991-1-2 uvrštavajući  $\varepsilon_f=1,0$  i  $\varepsilon_m$  prema normi.[14]

Neto toplinski tok treba odrediti uzimajući u obzir prelazak topline strujanjem i zračenjem, prema (15):

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} [W \text{ m}^{-2}] \quad (15)$$

gdje je:

$h_{net,c}$  prelazak topline uzrokovan strujanjem, dan izrazom (16)

$h_{net,r}$  prelazak topline uzrokovan zračenjem, dan izrazom (17)

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) [W \text{ m}^{-2}] \quad (16)$$

$\alpha_c$  koeficijent prelaska topline strujanjem [ $W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ]

$\theta_g$  temperatura plina u blizini elementa izloženog požaru [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_m$  temperatura na površini elementa [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Koeficijent  $\alpha_c$  ovisi o nazivnoj krivulji temperatura - vrijeme.

Dio neto toka topline po jedinici ploštine površine zbog zračenja određuje se prema (17):

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] [W \text{ m}^{-2}] \quad (17)$$

gdje je:

$\Phi$  faktor oblika, uglavnom se uzima vrijednost 1,0

$\varepsilon_m$  koeficijent emisije površine elementa, uzima se vrijednost 0,7

$\varepsilon_f$  koeficijent emisije požara, uzima se vrijednost 1,0

$\sigma$  Stephan-Boltzmannova konstanta ( $5,56 \times 10^{-8}$  [W m<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>])

$\Theta_r$  efektivna temperatura zračenja u okolišu požara [°C]

$\Theta_m$  temperatura na površini elementa [°C]

Temperatura plina  $\Theta_g$  uzima se kao nazivna krivulja temperatura - vrijeme.

Normirana krivulja temperatura - vrijeme (ISO-834) dana je izrazom (18):

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (18)$$

gdje je:

$\Theta_g$  temperatura plina u požarnom odjeljku [°C]

t vrijeme [min]

Koeficijent prelaska topline strujanjem iznosi:

$$\alpha_c = 25 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1} \text{ [12]}$$

Za jednoliku raspodjelu temperature unutar poprečnog presjeka, porast temperature  $\Delta\theta_{al(t)}$  u zaštićenom elementu tijekom vremenskog intervala  $\Delta t$  određuje se prema (19):

$$\Delta\theta_{al(t)} = \frac{\lambda_p/d_p A_p}{c_{al}\rho_{al} V} \left[ \frac{1}{1+\phi/3} \right] (\theta_{(t)} - \theta_{al(t)})\Delta t - (e^{\phi/10} - 1)\Delta\theta_{(t)} \quad (19)$$

ali  $\Delta\theta_{al(t)} \geq 0$

gdje je:

$$\phi = \frac{c_p\rho_p}{c_{al}\rho_{al}} d_p \frac{A_p}{V} \quad (20)$$

$A_p/V$  faktor presjeka za aluminijski element izoliran protupožarnom zaštitom (m<sup>-1</sup>)

$\theta_{(t)}$  temperatura okolnog plina u vremenu t (°C)

$\theta_{al(t)}$  temperatura aluminija u vremenu t

$\Delta\theta_{(t)}$  porast okolne temperature tijekom vremenskog intervala  $\Delta t$  (°C)

$d_p$  debljina zaštite

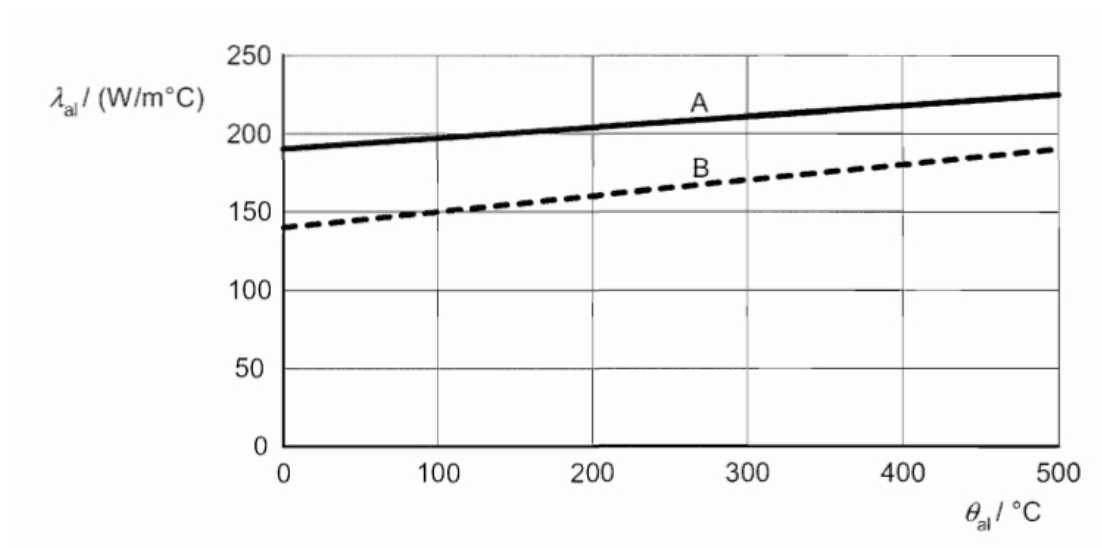
Proračun temperatura za čelične elemente istovjetan je proračunu za aluminij, samo se trebaju koristiti odgovarajuće karakteristike materijala.

Odabrana legura EN AW-6061 T6 ima sljedeća svojstva:

Gustoća  $\rho_{al} = 2700 \text{ kg m}^{-3}$

Toplinska vodljivost  $\lambda_{al}$  za legure 3xxx i 6xxx propisana je Eurocodeom kao (21) i prikazana na slici 4.2.

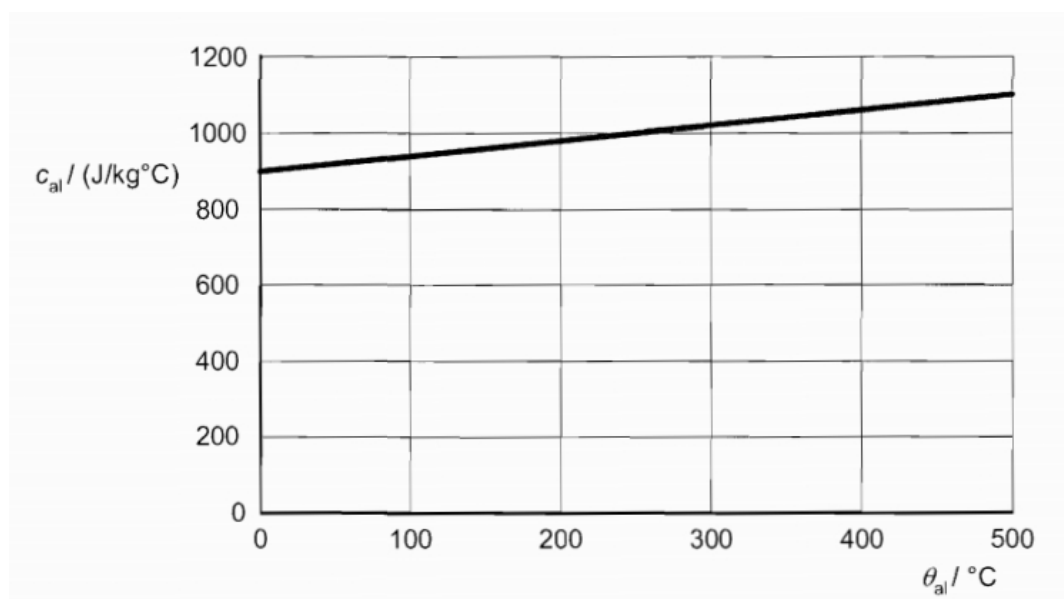
$$\lambda_{al} = 0,07\theta_{al} + 140 [\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}] \quad (21)$$



Slika 4.2 Krivulja toplinska vodljivost - temperatura za legure 3xxx i 6xxx (A), te 5xxx i 7xxx (B)

Specifični toplinski kapacitet  $c_{al}$  dan je u Eurocodeu i određuje se prema (22), te je prikazan na slici 4.3.

$$c_{al} = 0,41\theta_{al} + 903 [\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}], 0\text{°C} < \theta_{al} < 500\text{°C} \quad (22)$$



Slika 4.3 Krivulja specifični toplinski kapacitet - temperatura

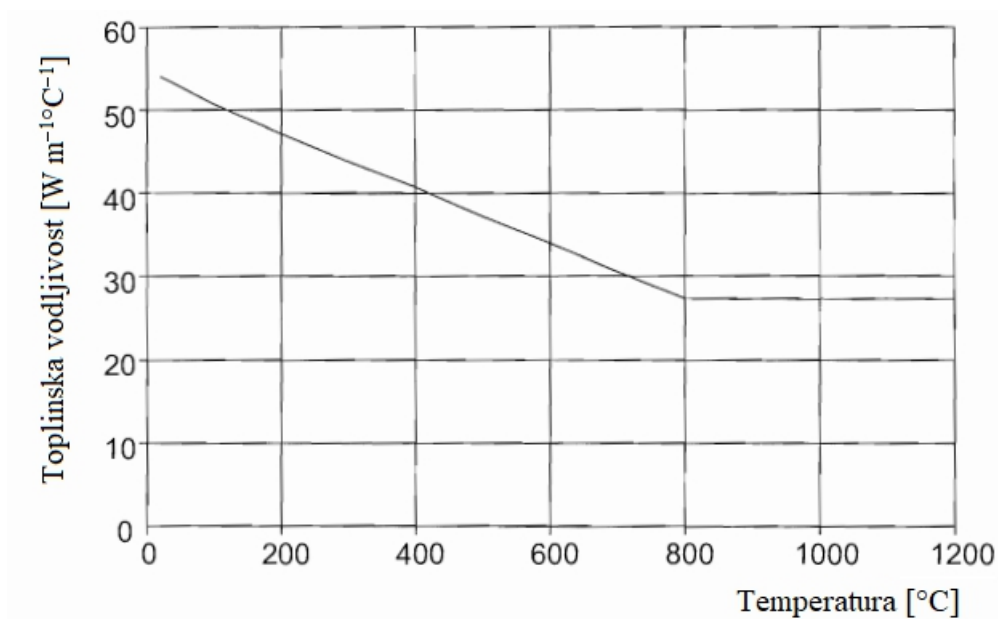
Odabrani čelik S235 ima sljedeća svojstva:

Gustoća  $\rho_{\text{čel}} = 7850 \text{ kg m}^{-3}$

Toplinska vodljivost  $\lambda_{\text{čel}}$  za čelik S235 propisana je Eurocodeom kao (23a i 23b) i prikazana na slici 4.4.

$$\lambda_{\text{čel}} = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_{\text{čel}} [\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}], 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{čel}} < 800^{\circ}\text{C} \quad (23a)$$

$$\lambda_{\text{čel}} = 27,3 [\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}], 800^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{čel}} \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (23b)$$



Slika 4.4 Krivulja toplinska vodljivost - temperatura za S235

Specifični toplinski kapacitet  $c_{\text{čel}}$  dan je u Eurocodeu i određuje se prema (24a, 24b, 24c i 24d), te je prikazan na slici 4.5.

Za  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{čel}} < 600^{\circ}\text{C}$

$$c_{\text{čel}} = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_{\text{čel}} - 1,69 \times 10^{-3} \theta_{\text{čel}}^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_{\text{čel}}^3 [\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}] \quad (24a)$$

Za  $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{čel}} < 735^{\circ}\text{C}$

$$c_{\text{čel}} = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_{\text{čel}}} [\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}] \quad (24b)$$

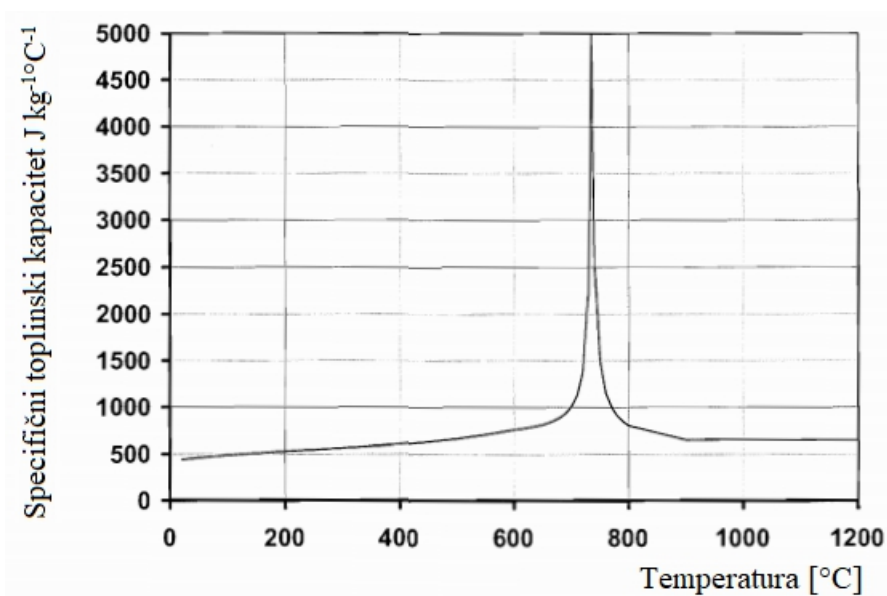
Za  $735^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{čel}} < 900^{\circ}\text{C}$

$$c_{\text{čel}} = 545 + \frac{17820}{\theta_{\text{čel}} - 731} [\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}] \quad (24c)$$



Za  $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{čel}} \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$c_{\text{čel}} = 650 \text{ [J kg}^{-1}\text{C}^{-1}] \quad (24d)$$



Slika 4.5 Krivulja specifični toplinski kapacitet - temperatura za S235

Za zaštitu od požara odabrane su gips ploče sa sljedećim svojstvima

$$\rho_p = 800 \text{ kg m}^{-3}$$

$$c_p = 1700 \text{ J kg}^{-1}\text{C}^{-1}$$

Proračun temperatura elemenata proveden je pomoću računalnog programa 1DHEAT (autor dr. sc. Neno Torić) koji radi u skladu s formulama iz europskih normi prethodno navedenih. Elementi su zaštićeni gips pločama na kutijsati način. Grede su izložene požaru s 3 strane jer je iznad njih ploča, vanjski stupovi su izloženi s 4 strane, a središnji stupovi s 3 strane jer ih s jedne strane štiti požarni zid.

## 4.2 Dimenzioniranje

Elementi su prvo dimenzionirani na uobičajne kombinacije djelovanja stalnih i promjenjivih opterećenja. Korištene su sljedeće kombinacije:

GSN:

$$K1: 1,35(G+\Delta G)+1,5Q$$

$$K2: 1,35(G+\Delta G)+1,5W+1,05Q+1,05S+1,05T^-$$

$$K3: 1,35(G+\Delta G)+1,5Q+1,05W+1,05S+1,05T^-$$

$$K4: 1,00(G+\Delta G)+1,5W+1,05T^+$$

$$K5: 1,00(G+\Delta G)+1,5T^++1,05W$$

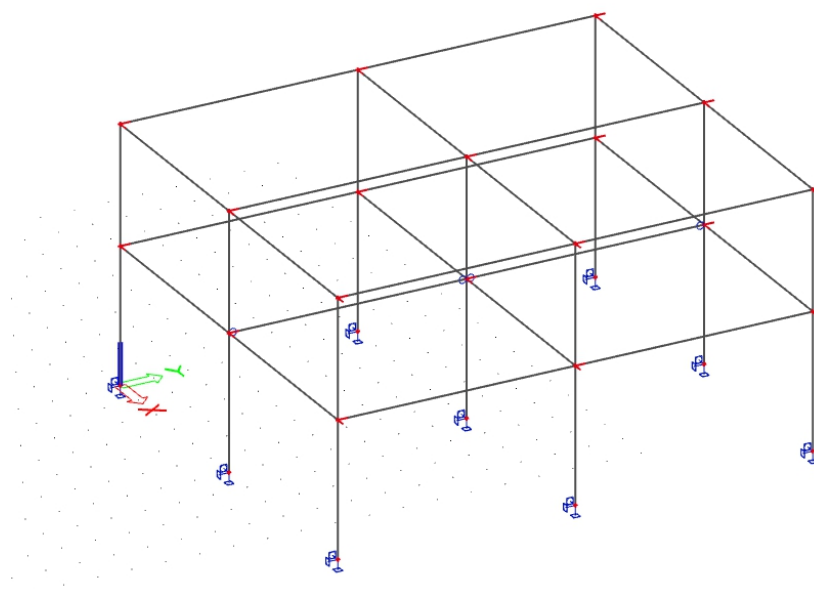
GSU:

$$K6: G+\Delta G+Q$$

$$K7: G+\Delta G+Q+W$$

$$K8: G+\Delta G+Q+S$$

Dimenzioniranje je provedeno u softveru SCIA Engineer 19.1. Model se sastoji od 1D štapnih elemenata za stupove i grede, te 2D elemenata za krovnu i međukatnu ploču. Stupovi su upeti u tlo, a grede su kruto vezane osim greda u smjeru y (grede B1) ispod međukatne konstrukcije koje su zglobno vezane.



Slika 4.6 Prikaz modela u softveru SCIA Engineer 19.1

Za čeličnu nosivu konstrukciju su dobiveni sljedeći profili s popratnim faktorom iskorištenosti nosivosti:

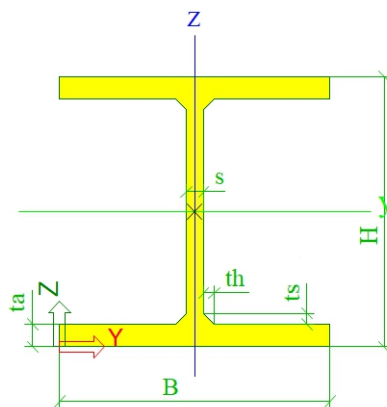
Stupovi HEA260,  $\eta=0,90$

Grede A HEA240,  $\eta=0,87$

Grede B HEA240,  $\eta=0,93$

Količina čelika po jedinici površine objekta iznosi:  $83,36 \text{ kg m}^{-2}$

Za aluminijsku konstrukciju korišteni su I profili oblika kao na slici 4.6.



Slika 4.7 Oblik korištenih aluminijskih profila

Koristeći oznaku “I gh (H; B; ta; s; ts; th)” dobiveni su sljedeći profili s pripadnim faktorom iskorištenosti nosivosti:

Stupovi I gh (350; 300; 18; 10; 27; 27),  $\eta=0,95$

Grede A I gh (250; 260; 13; 8; 24; 24),  $\eta=0,91$

Grede B I gh (290; 280; 13; 8; 24; 24),  $\eta=0,98$

Količina aluminija po jedinici površine objekta iznosi:  $42,17 \text{ kg m}^{-2}$

#### 4.2.1 Požarne kombinacije

Djelovanje požara spada u izvanredna djelovanja, pa se skladno tome koriste manji koeficijenti u kombinacijama jer je vjerojatnost te pojave manja. Korištene su sljedeće kombinacije:

N1:  $G+\Delta G+A$

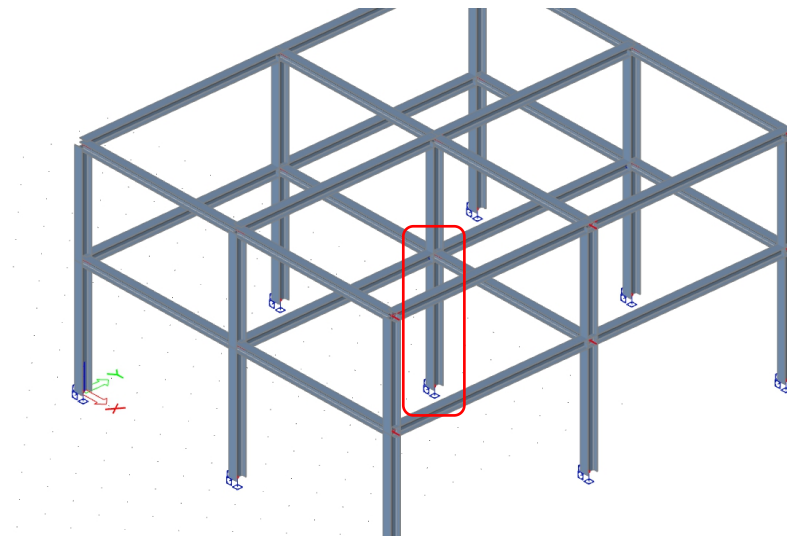
N2:  $G+\Delta G+0,3Q+0,3W+A$

N3:  $G+\Delta G+0,3Q+A$

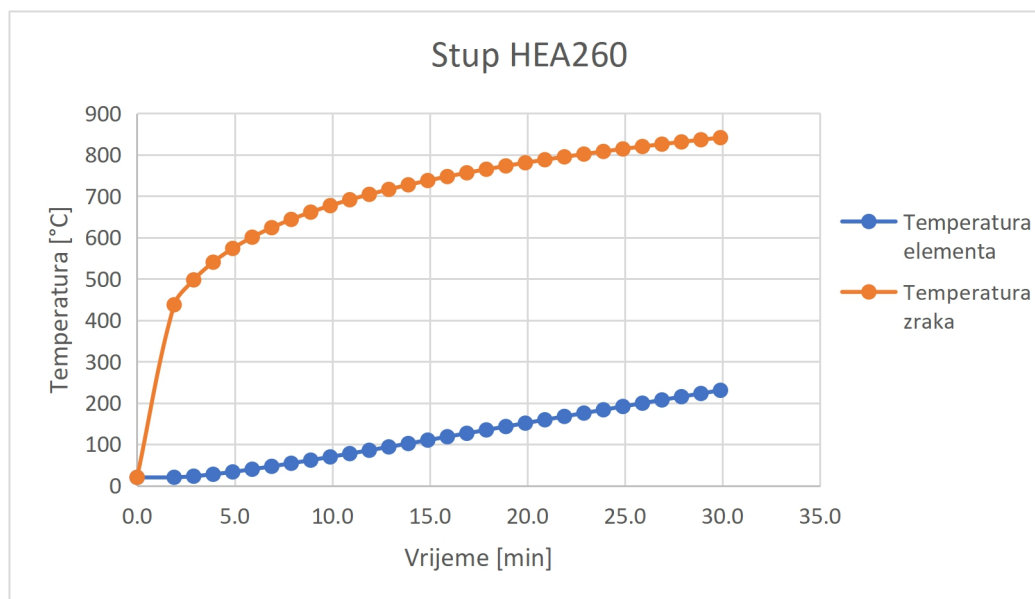
N4:G+ΔG+0,3W+A

## 4.2.2 Provjera otpornosti i stabilnosti čeličnih elemenata na požarno djelovanje

### 4.2.2.1 Stup HEA260



Slika 4.8 Prikaz najopterećenijeg stupa



Slika 4.9 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834)

Debljina zaštite 2 cm

$t = 230,53 \text{ } ^\circ\text{C}$   $\rightarrow k_{y,0} = 1,0; k_{E,0} = 0,87$

$\kappa_1 = 0,85$  (izložen s 3 strane)

$\kappa_2 = 1,00$

## Rezne sile

$$N_{fi,Ed} = -839,65 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,Ed} = 4,87 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,Ed} = 3,64 \text{ kN}$$

$$M_{y,fi,Ed} = -9,78 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,Ed} = -11,60 \text{ kNm}$$

Poprečni presjek je klase II.

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na uzdužnu silu

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 8681,94 \times 1,0 \times \frac{235}{1,0} = 2039,80 \text{ kN} \quad (25)$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{839,65}{2039,80} = 0,41 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja My

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{920830 \times 235}{1,00} = 216,40 \text{ kNm} \quad (26a)$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \times 216,40 \times \frac{1,0}{1,0} = 216,40 \text{ kNm} \quad (26b)$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{216,40}{0,85 \times 1,00} = 254,58 \text{ kNm} \quad (26c)$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{9,79}{254,58} = 0,04 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja Mz

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{429170 \times 235}{1,00} = 100,85 \text{ kNm} \quad (26a)$$

$$M_{z,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \times 100,85 \times \frac{1,0}{1,0} = 100,85 \text{ kNm} \quad (26b)$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{100,85}{0,85 \times 1,00} = 118,65 \text{ kNm} \quad (26c)$$

$$\frac{M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,t,Rd}} = \frac{11,60}{118,65} = 0,10 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu  $V_y$

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{6736,3 \times 235 / \sqrt{3}}{1,0} = 913,96 \text{ kN} \quad (27a)$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1,00 \times 913,96 \times \frac{1,00}{1,00} = 913,96 \text{ kN} \quad (27b)$$

$$\frac{V_{y,fi,Ed}}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{4,37}{913,96} = 0,01 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu  $V_z$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{2873,7 \times 235 / \sqrt{3}}{1,0} = 389,90 \text{ kN} \quad (27a)$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1,00 \times 389,90 \times \frac{1,00}{1,00} = 389,90 \text{ kN} \quad (27b)$$

$$\frac{V_{z,fi,Ed}}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{3,64}{389,90} = 0,01 \leq 1,00$$

Provjera na kombinirano djelovanje savijanja, uzdužne sile i posmika

$$M_{N,y,fi,t,Rd} = \min \left[ \frac{M_{y,fi,t,Rd} \times (1-n)}{1-0,5 \times a}; M_{y,fi,t,Rd} \right] = \min \left[ \frac{254,58 \times (1-0,43)}{1-0,5 \times 0,25}; 254,58 \right] \quad (28a)$$

$$M_{N,y,fi,t,Rd} = 171,30 \text{ kNm}$$

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} = 0,41$$

$$a = (A - 2bt_f) / A = 0,25$$

$$n > a \Rightarrow M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] = 118,65 \left[ 1 - \left( \frac{0,43-0,25}{1-0,25} \right)^2 \right] = 112,14 \text{ kNm} \quad (28b)$$

$$\alpha = 2, \text{ za I i H profile; } \beta = 5 \times n = 5 \times 0,41 = 2,06$$

$$\left( \frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{N,y,fi,t,Rd}} \right)^\alpha + \left( \frac{M_{z,fi,Ed}}{M_{N,z,fi,t,Rd}} \right)^\beta = \left( \frac{9,78}{166,96} \right)^2 + \left( \frac{11,60}{112,14} \right)^{2,06} = 0,01 \leq 1,00 \quad (28c)$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 105000000}{4256^2} = 12013,14 \text{ kN} \quad (29a)$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 36700000}{2023^2} = 18590,36 \text{ kN}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{4256}{110} = 38,70 \quad (29b)$$

$$\lambda_z = \frac{l_{cr,z}}{i_z} = \frac{2023}{65} = 31,11$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{38,70}{\pi \times \sqrt{\frac{210000}{235}}} = 0,41 \quad (29c)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{31,11}{\pi \times \sqrt{\frac{210000}{235}}} = 0,33$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,41 \times \sqrt{\frac{1,0}{0,87}} = 0,44 \quad (29d)$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,33 \times \sqrt{\frac{1,0}{0,87}} = 0,35$$

$$\varphi_y = 0,5 \times [1 + \alpha \times \lambda_{rel,\theta,y} + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0,5 \times [1 + 0,65 \times 0,44 + 0,44^2] = 0,74 \quad (29e)$$

$$\varphi_z = 0,5 \times [1 + \alpha \times \lambda_{rel,\theta,z} + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0,5 \times [1 + 0,65 \times 0,35 + 0,35^2] = 0,67$$

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}} = \frac{1}{0,74 + \sqrt{0,74^2 - 0,44^2}} = 0,75 \quad (29f)$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}} = \frac{1}{0,67 + \sqrt{0,67^2 - 0,35^2}} = 0,80$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,75 \times 8681,94 \times 1,00 \times \frac{235}{1,00} = 1536,64 \text{ kN} \quad (29g)$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,80 \times 8681,94 \times 1,00 \times \frac{235}{1,00} = 1631,43 \text{ kN}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 1536,64 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{839,65}{1536,64} = 0,55 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje torzijom

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \times \left( G \times I_t + \frac{\pi^2 \times E \times I_w}{i_{cr}^2} \right) = \frac{1}{128^2} \times \left( 80769,2 \times 525000 + \frac{\pi^2 \times 210000 \times 5,1635 \times 10^{11}}{4000^2} \right) \quad (30a)$$

$$N_{cr,T} = 6666,46 \text{ kN}$$

$$\lambda_{rel,T} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{8680 \times 235}{6666460}} = 0,55 \quad (30b)$$

$$\lambda_{rel,\theta} = \lambda_{rel,T} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,55 \times \sqrt{\frac{1,0}{0,87}} = 0,59$$

$$\varphi = 0,5 \times [1 + \alpha \times \lambda_{rel,\theta} + \lambda_{rel,\theta}^2] = 0,5 \times [1 + 0,65 \times 0,59 + 0,59^2] = 0,87$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_{rel,\theta}^2}} = \frac{1}{0,87 + \sqrt{0,87^2 - 0,59^2}} = 0,66$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,66 \times 8681,94 \times 1,00 \times \frac{235}{1,00} = 1346,57 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{839,65}{1346,57} = 0,61 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na bočnu torziju

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{LT}^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z}} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2 - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right] \quad (31)$$

$$z_g = 0, z_j = 0$$

$$M_{cr} = 2,43 \times \frac{\pi^2 \times 210000 \times 36700000}{4000^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{5,1635 \times 10^{11}}{36700000} + \frac{4000^2 \times 80769,2 \times 524000}{\pi^2 \times 210000 \times 36700000}} \right]$$

$$M_{cr} = 1751,70 \text{ kNm}$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{920830 \times 235}{1751,70 \times 10^6}} = 0,35$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,35 \times \sqrt{\frac{1,0}{0,87}} = 0,37$$

$$\alpha_{LT} = 0,65 \times \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,65$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times \lambda_{rel,LT,\theta} + \lambda_{rel,LT,\theta}^2] = 0,5 \times [1 + 0,65 \times 0,36 + 0,36^2] = 0,68$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}} = \frac{1}{0,68 + \sqrt{0,68^2 - 0,36^2}} = 0,79$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,79 \times 920830 \times 1,00 \times \frac{235}{1,00} = 171,64 \text{ kNm}$$

$$\frac{|M_{y,fi,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{9,78}{171,64} = 0,06 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na uzdužni tlak

$$\chi_{min,fi} = \min(\chi_y, \chi_z) = \min(0,75; 0,67) = 0,67 \quad (32a)$$

$$\chi_{z,fi} = \min(\chi_{z,fi}, \chi) = \min(0,80; 0,67) = 0,67$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}} = \frac{1}{0,68 + \sqrt{0,68^2 - 0,36^2}} = 0,79$$



$$\beta_{M,y} = 1,40$$

$$\mu_y = \min[(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min(\lambda_{rel,LT,\theta}; 1,1) + 0,44 \times \beta_{M,y} + 0,29; 0,8] \quad (32b)$$

$$\mu_y = \min[(2 \times 1,40 - 5) \times \min(0,43; 1,1) + 0,44 \times 1,40 + 0,29; 0,8]$$

$$\mu_y = \min[-0,05; 0,8] = -0,05$$

$$k_y = \min\left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}; 3\right) = \min\left(1 - \frac{-0,05 \times 839650}{0,75 \times 8680 \times 1,00 \times \frac{235}{1}}\right) \quad (32c)$$

$$k_y = \min(1,03; 3) = 1,03$$

$$\beta_{M,z} = 1,40$$

$$\mu_z = \min[(1,2 \times \beta_{M,z} - 3) \times \lambda_{rel,\theta,z} + 0,71 \times \beta_{M,z} - 0,29; 0,8] =$$

$$\mu_z = \min[(1,2 \times 1,40 - 3) \times 0,35 + 0,71 \times 1,40 - 0,29; 0,8]$$

$$\mu_z = \min[0,24; 0,8] = 0,24$$

$$k_z = \min\left(1 - \frac{\mu_z \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{z,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}; 3\right) = \min\left(1 - \frac{0,24 \times 839650}{0,80 \times 8680 \times 1,00 \times \frac{235}{1}}\right)$$

$$k_z = \min(0,87; 3) = 0,87$$

$$\beta_{M,LT} = 1,40$$

$$\mu_{LT} = \min(0,15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0,15; 0,9) = \min(0,15 \times 0,35 \times 1,40 - 0,15; 0,9)$$

$$\mu_{LT} = \min(-0,08; 0,9) = -0,08$$

$$k_{LT} = \min\left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}; 3\right) = \min\left(1 - \frac{-0,08 \times 839650}{0,80 \times 8680 \times 1,00 \times \frac{235}{1}}\right)$$

$$k_{LT} = \min(1,04; 1) = 1,00$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y}$$

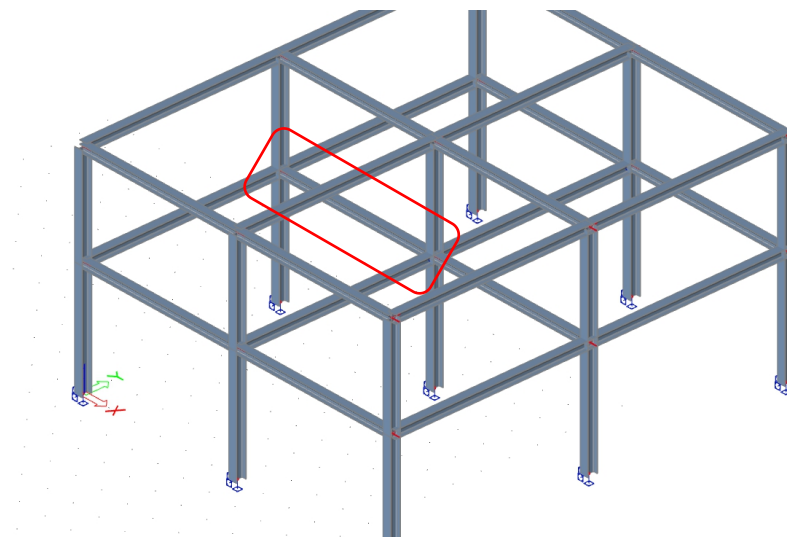
$$\frac{839650 \times 1,00}{0,79 \times 8680 \times 1,00 \times 235} + \frac{1,00 + 9,78 \times 10^6 \times 1,00}{0,79 \times 920830 \times 1,00 \times 235} + \frac{0,87 \times 11,60 \times 10^6 \times 1,00}{429170 \times 1,00 \times 235} = 0,77 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje posmikom

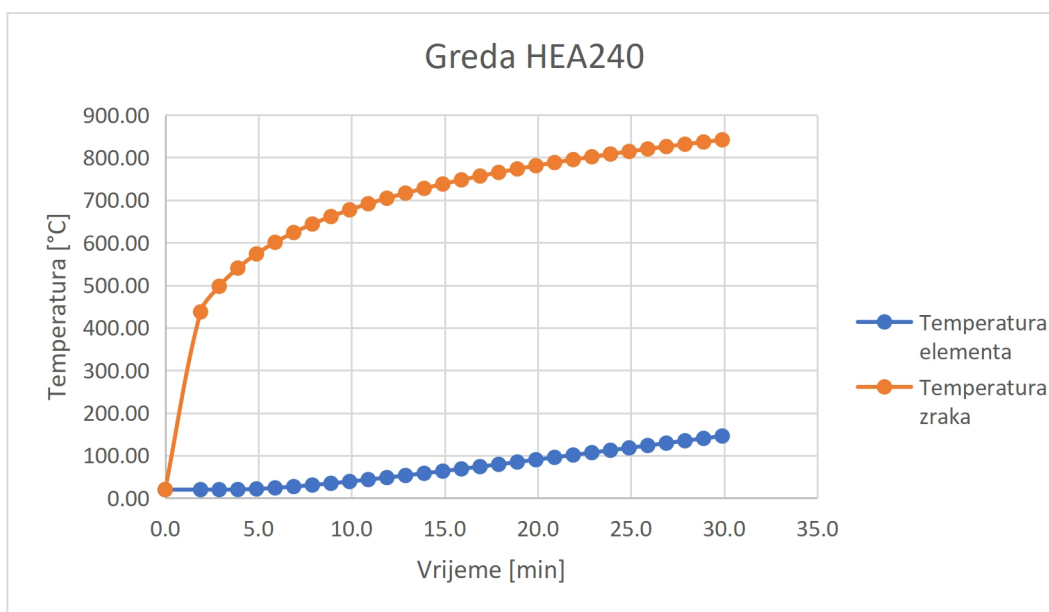
$$\frac{h_w}{t} = \frac{225}{8} = 30,00 < \frac{72 \times \varepsilon}{\eta} = \frac{72 \times 0,85}{1,2} = 51,00 \quad (33c)$$

Nije potrebna provjera na posmik.

#### 4.2.2.2 Greda HEA240



Slika 4.10 Prikaz najopterećenije grede



Slika 4.11 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834)

Debljina zaštite 3 cm

$$t = 145,89^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{y,\theta} = 1,0; \quad k_{E,\theta} = 0,96$$

$$\kappa_1 = 0,85 \text{ (izložen s 3 strane)}$$

$$\kappa_2 = 1,00$$

## Rezne sile

$$N_{fi,Ed} = -844,08 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,Ed} = 72,42 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,Ed} = 17,16 \text{ kN}$$

$$M_{y,fi,Ed} = 60,91 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,Ed} = 0,60 \text{ kNm}$$

Poprečni presjek je klase II.

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na uzdužnu silu

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 7680 \times 1,0 \times \frac{235}{1,0} = 1804,80 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{844,08}{1804,80} = 0,47 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja My

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{745830 \times 235}{1,00} = 175,27 \text{ kNm}$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \times 175,27 \times \frac{1,0}{1,0} = 175,27 \text{ kNm}$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{175,27}{0,85 \times 1,00} = 206,20 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{60,91}{206,20} = 0,30 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja Mz

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{351670 \times 235}{1,00} = 82,64 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \times 82,64 \times \frac{1,0}{1,0} = 82,64 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{82,64}{0,85 \times 1,00} = 97,23 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,t,Rd}} = \frac{0,60}{97,23} = 0,00 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu Vy

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{5973,7 \times 235 / \sqrt{3}}{1,0} = 810,50 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,y,Rd} \times \frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} = 1,00 \times 810,50 \times \frac{1,00}{1,00} = 810,50 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{y,fi,Ed}}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{72,42}{810,50} = 0,09 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu Vz

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{2514,0 \times 235 / \sqrt{3}}{1,0} = 341,09 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,z,Rd} \times \frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} = 1,00 \times 341,09 \times \frac{1,00}{1,00} = 341,09 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{z,fi,Ed}}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{17,16}{341,09} = 0,05 \leq 1,00$$

Provjera na kombinirano djelovanje savijanja, uzdužne sile i posmika

$$M_{N,y,fi,t,Rd} = \min \left[ \frac{M_{y,fi,t,Rd} \times (1-n)}{1-0,5 \times a}; M_{y,fi,t,Rd} \right] = \min \left[ \frac{206,20 \times (1-0,47)}{1-0,5 \times 0,25}; 206,20 \right]$$

$$M_{N,y,fi,t,Rd} = 124,54 \text{ kNm}$$

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} = 0,47$$

$$a = (A - 2bt_f) / A = 0,25$$

$$n > a \Rightarrow M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] = 97,23 \left[ 1 - \left( \frac{0,47-0,25}{1-0,25} \right)^2 \right] = 88,74 \text{ kNm}$$

$$\alpha = 2, \text{ za I i H profile; } \beta = 5 \times n = 5 \times 0,47 = 2,36$$

$$\left( \frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{N,y,fi,t,Rd}} \right)^\alpha + \left( \frac{M_{z,fi,Ed}}{M_{N,z,fi,t,Rd}} \right)^\beta = \left( \frac{60,91}{124,54} \right)^2 + \left( \frac{0,60}{88,74} \right)^{2,36} = 0,24 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 7,76 \times 10^7}{7660^2} = 2740,87 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 2,77 \times 10^7}{3057^2} = 6141,49 \text{ kN}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{7660}{110} = 76,21$$

$$\lambda_z = \frac{l_{cr,z}}{i_z} = \frac{3057}{65} = 50,91$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{76,21}{\pi \times \sqrt{\frac{210000}{235}}} = 0,81$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{50,91}{\pi \times \sqrt{\frac{210000}{235}}} = 0,54$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,81 \times \sqrt{\frac{1,0}{1,0}} = 0,81$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,54 \times \sqrt{\frac{1,0}{1,0}} = 0,54$$

$$\varphi_y = 0,5 \times [1 + \alpha \times \lambda_{rel,\theta,y} + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0,5 \times [1 + 0,65 \times 0,81 + 0,81^2] = 1,09$$

$$\varphi_z = 0,5 \times [1 + \alpha \times \lambda_{rel,\theta,z} + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0,5 \times [1 + 0,65 \times 0,54 + 0,54^2] = 0,82$$

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}} = \frac{1}{1,09 + \sqrt{1,09^2 - 0,81^2}} = 0,55$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}} = \frac{1}{0,82 + \sqrt{0,82^2 - 0,54^2}} = 0,69$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,55 \times 7680 \times 1,00 \times \frac{235}{1,00} = 988,85 \text{ kN}$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,69 \times 7680 \times 1,00 \times \frac{235}{1,00} = 1251,15 \text{ kN}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 988,855 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{844,08}{988,85} = 0,85 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na bočnu torziju

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{LT}^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z}} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2 - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right]$$

$$z_g = 0, z_j = 0$$

$$M_{cr} = 2,04 \times \frac{\pi^2 \times 210000 \times 2,77 \times 10^7}{6000^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1}{1} \right)^2 \times \frac{3,2849 \times 10^{11}}{2,77 \times 10^7} + \frac{6000^2 \times 80769,2 \times 416000}{\pi^2 \times 210000 \times 2,77 \times 10^7}} \right]$$

$$M_{cr} = 590,33 \text{ kNm}$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{745830 \times 235}{590,33 \times 10^6}} = 0,54$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,54 \times \sqrt{\frac{1,0}{1,0}} = 0,54$$

$$\alpha_{LT} = 0,65 \times \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,65$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times \lambda_{rel,LT,\theta} + \lambda_{rel,LT,\theta}^2] = 0,5 \times [1 + 0,65 \times 0,54 + 0,54^2] = 0,83$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,54^2}} = 0,69$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,69 \times 745830 \times 1,00 \times \frac{235}{1,00} = 121,23 \text{ kNm}$$

$$\frac{|M_{y,fi,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{60,91}{121,23} = 0,50 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na uzdužni tlak

$$\chi_{min,fi} = \min(\chi_y, \chi_z) = \min(0,55; 0,69) = 0,55$$

$$\chi_{z,fi} = \min(\chi_{z,fi}, \chi) = \min(0,69; 1,0) = 0,69$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,54^2}} = 0,69$$

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7 \times \psi_y + \frac{M_{Q,y} \times [\beta_{M,Q} - (1,8 - 0,7 \times \psi_y)]}{\delta_{M,y}}$$

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7 \times (-0,2) + \frac{29,70 \times 10^6 \times [1,30 - (1,8 - 0,7 \times (-0,2))]}{60,10 \times 10^6} = 1,62$$

$$\mu_y = \min[(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min(\lambda_{rel,\theta,y}; 1,1) + 0,44 \times \beta_{M,y} + 0,29; 0,8]$$

$$\mu_y = \min[(2 \times 1,62 - 5) \times \min(0,81; 1,1) + 0,44 \times 1,62 + 0,29; 0,8]$$

$$\mu_y = \min[-0,52; 0,8] = -0,42$$

$$k_y = \min\left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}; 3\right) = \min\left(1 - \frac{-0,52 \times 844080}{0,55 \times 7680 \times 1,00 \times \frac{235}{1}}\right)$$

$$k_y = \min(1,44; 3) = 1,44$$

$$\beta_{M,z} = 1,40$$

$$\mu_z = \min[(1,2 \times \beta_{M,z} - 3) \times \lambda_{rel,\theta,z} + 0,71 \times \beta_{M,z} - 0,29; 0,8] =$$

$$\mu_z = \min[(1,2 \times 1,40 - 3) \times 0,54 + 0,71 \times 1,40 - 0,29; 0,8]$$

$$\mu_z = \min[-0,01; 0,8] = -0,01$$

$$k_z = \min\left(1 - \frac{\mu_z \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}; 3\right) = \min\left(1 - \frac{-0,01 \times 844080}{0,69 \times 7680 \times 1,00 \times \frac{235}{1}}\right)$$

$$k_z = \min(1,01; 3) = 1,01$$

$$\beta_{M,LT} = 1,8 - 0,7 \times \psi_y + \frac{M_{Q,y} \times [\beta_{M,Q} - (1,8 - 0,7 \times \psi_y)]}{\delta, M_y}$$

$$\beta_{M,LT} = 1,8 - 0,7 \times (-0,2) + \frac{29,70 \times 10^6 \times [1,30 - (1,8 - 0,7 \times (-0,2))]}{51,68 \times 10^6} = 1,57$$

$$\mu_{LT} = \min(0,15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0,15; 0,9) = \min(0,15 \times 0,54 \times 1,57 - 0,15; 0,9)$$

$$\mu_{LT} = \min(-0,02; 0,9) = -0,02$$

$$k_{LT} = \min\left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}; 3\right) = \min\left(1 - \frac{-0,02 \times 844080}{0,69 \times 7680 \times 1,00 \times \frac{235}{1}}\right)$$

$$k_{LT} = \min(1,01; 1) = 1,00$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y}$$

$$\frac{844080 \times 1,00}{0,69 \times 7680 \times 1,00 \times 235} + \frac{1,00 \times 60,91 \times 10^6 \times 1,00}{0,69 \times 745830 \times 1,00 \times 235} + \frac{1,01 \times 0,60 \times 10^6 \times 1,00}{351670 \times 1,00 \times 235} = 0,95 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje posmikom

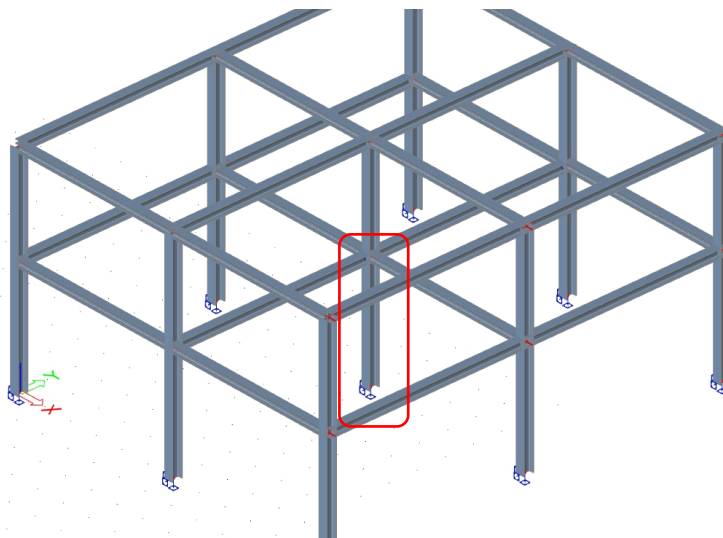
$$\frac{h_w}{t} = \frac{206}{8} = 27,47 < \frac{72 \times \varepsilon}{\eta} = \frac{72 \times 0,85}{1,2} = 51,00$$

Nije potrebna provjera na posmik.

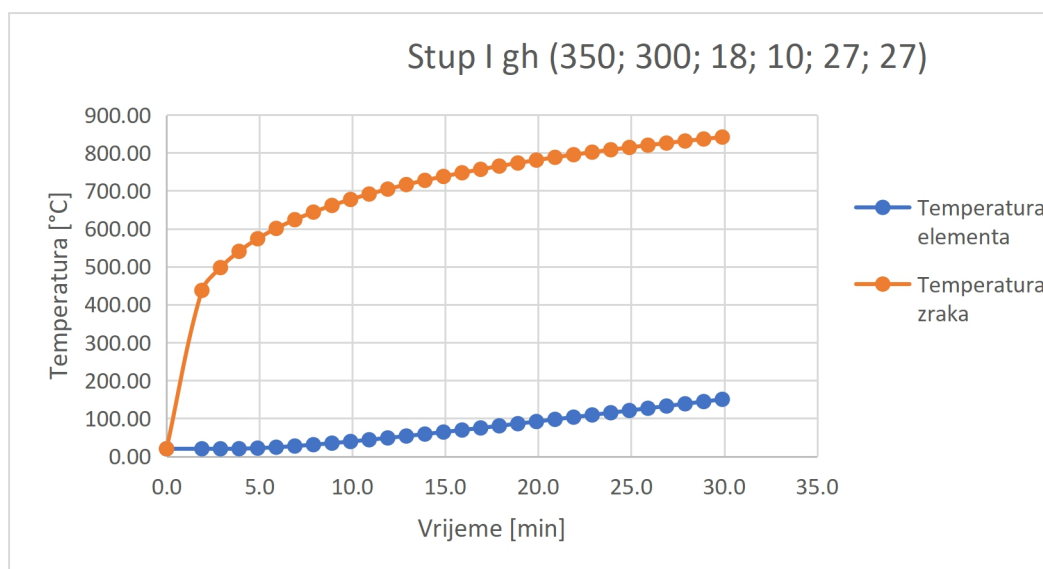
Proračuni otpornosti i stabilnosti provedeni su u skladu s normama EN 1993:1-1, te EN 1993:1-2.[35,36]

### 4.2.3 Provjera otpornosti i stabilnosti aluminijevih elemenata na požarno djelovanje

#### 4.2.3.1 Stup I gh (350; 300; 18; 10; 27; 27)



Slika 4.12 Prikaz najoptrećenijeg stupa



Slika 4.13 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834)

Debljina zaštite 3 cm

$$t = 150,31 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{0,\theta} = 0,91; \quad k_{E,\theta} = 0,93$$

Rezne sile

$$N_{fi,Ed} = -803,86 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,Ed} = 4,69 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,Ed} = 4,16 \text{ kN}$$

$$M_{y,fi,Ed} = -11,39 \text{ kNm}$$



$$M_{z,fi,Ed} = -11,88 \text{ kNm}$$

Poprečni presjek je klase IV.

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na uzdužnu silu

$$N_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta} \times N_{Rd} \frac{\gamma_{M,x}}{1,2\gamma_{M,fi}} = k_{0,\theta} \frac{A_{eff} \times f_o}{\gamma_{M1}} \times \frac{\gamma_{M,x}}{1,2\gamma_{M,fi}} = 0,91 \frac{11915 \times 240}{1,10} \times \frac{1,10}{1,2} = 2168,53 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{803,86}{2168,53} = 0,37 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja My

$$\alpha_y = \frac{W_{eff,y}}{W_{el,y}} = \frac{1679700}{2032500} = 0,83 \quad (34a)$$

$$M_{o,y,Rd} = \frac{W_{net,y} \times f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{1876500 \times 290}{1,25} = 435,35 \text{ kNm} \quad (34b)$$

$$M_{o,y,Rd} = \frac{\alpha_y \times W_{el,y} \times f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,83 \times 2032500 \times 240}{1,10} = 366,48 \text{ kNm} \quad (34c)$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = k_{0,\theta_{max}} \times M_{o,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = 0,91 \times 366,48 \times \frac{1,10}{1,0} = 366,85 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{11,39}{366,85} = 0,03 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja Mz

$$\alpha_z = \frac{W_{eff,z}}{W_{el,z}} = \frac{488840}{542470} = 0,90$$

$$M_{o,z,Rd} = \frac{\alpha_z \times W_{el,z} \times f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,90 \times 542470 \times 240}{1,10} = 106,66 \text{ kNm}$$

$$M_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta_{max}} \times M_{o,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = 0,91 \times 106,66 \times \frac{1,10}{1,0} = 106,77 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{11,88}{106,77} = 0,11 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu Vy

$$V_{y,Rd} = \frac{A_{v,y} \times f_o / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = \frac{10800 \times 240 / \sqrt{3}}{1,10} = 1360,45 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{0,\theta_{max}} \times V_{y,Rd} \times \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} = 0,91 \times 1360,45 \times \frac{1,10}{1,00} = 1361,81 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{y,fi,Ed}}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{4,69}{1361,81} = 0,00 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu Vz

$$V_{z,Rd} = \frac{A_{v,z} \times f_o / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = \frac{3320 \times 240 / \sqrt{3}}{1,10} = 418,21 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{o,\theta max} \times V_{z,Rd} \times \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} = 0,91 \times 418,21 \times \frac{1,10}{1,00} = 418,63 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{z,fi,Ed}}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{4,16}{418,63} = 0,01 \leq 1,00$$

Provjera na kombinirano djelovanje savijanja, uzdužne sile i posmika

$$\sigma_{N,Ed} = \frac{-N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{803860}{11915} = 67,5 \text{ MPa} \quad (35a)$$

$$\sigma_{M_y,Ed} = \frac{M_{y,Ed} \times z}{I_{y,eff}} = \frac{11,39 \times 10^6 \times (-175)}{3,0712 \times 10^8} = 6,5 \text{ MPa} \quad (35b)$$

$$\sigma_{M_z,Ed} = \frac{M_{z,Ed} \times y}{I_{z,eff}} = \frac{11,88 \times 10^6 \times (-150)}{7,5326 \times 10^7} = 23,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tot,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{M_y,Ed} + \sigma_{M_z,Ed} = 67,5 + 6,5 + 23,7 = 97,6 \text{ MPa} \quad (35c)$$

$$\tau_{tot,Ed} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{von Mises,Ed} = \sigma_{tot,Ed} = 97,6 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{tot,Ed}}{\frac{f_o \times k_{o,\theta max}}{\gamma_{M,fi}}} = \frac{97,6}{\frac{240 \times 0,91}{1,00}} = 0,45 \leq 1,00 \quad (35d)$$

$$\frac{\sigma_{von Mises,Ed}}{\frac{\sqrt{C} \times f_o \times k_{o,\theta max}}{\gamma_{M,fi}}} = \frac{97,6}{\frac{\sqrt{1,2} \times 240 \times 0,91}{1,00}} = 0,41 \leq 1,00 \quad (35e)$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 70000 \times 3,5569 \times 10^8}{4363^2} = 12909,34 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 70000 \times 8,1371 \times 10^7}{2026^2} = 13699,85 \text{ kN}$$

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_o}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{11915 \times 240}{12909,34}} = 0,46$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_o}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{11915 \times 240}{13699,85}} = 0,46$$

$$\varphi_y = 0,5 \times [1 + \alpha \times \lambda_{rel,y} + \lambda_{rel,y}^2] = 0,5 \times [1 + 0,20 \times 0,46 + 0,46^2] = 0,65$$

$$\varphi_z = 0,5 \times [1 + \alpha \times \lambda_{rel,z} + \lambda_{rel,z}^2] = 0,5 \times [1 + 0,20 \times 0,46 + 0,46^2] = 0,65$$

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,65 + \sqrt{0,65^2 - 0,46^2}} = 0,90$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,65 + \sqrt{0,65^2 - 0,46^2}} = 0,90$$

$$x_{s,y} = \frac{l_{c,y}}{2} = \frac{4363}{2} = 2181,5 \text{ mm} \quad (36a)$$

$$x_{s,z} = \frac{l_{c,z}}{2} = \frac{2026}{2} = 1013 \text{ mm}$$

$$\omega_{x,y} = \frac{1}{\chi_{y,fi} + (1 - \chi_{y,fi}) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,y}}{l_{c,y}}\right)} = \frac{1}{0,90 + (1 - 0,90) \times \sin\left(\frac{\pi \times 2181}{4363}\right)} = 1,00 \quad (36b)$$

$$\omega_{x,z} = \frac{1}{\chi_{z,fi} + (1 - \chi_{z,fi}) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,z}}{l_{c,z}}\right)} = \frac{1}{0,90 + (1 - 0,90) \times \sin\left(\frac{\pi \times 1013}{2026}\right)} = 1,00$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = \kappa_y \times \chi_{y,fi} \times \omega_{x,y} \times A_{eff} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{1,2 \gamma_{M,fi}} \quad (36c)$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = 1,0 \times 0,90 \times 1,0 \times 11915 \times \frac{240}{1,10} \times 0,91 \times \frac{1,10}{1,2} = 1951,68 \text{ kN}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = \kappa_z \times \chi_{z,fi} \times \omega_{x,z} \times A_{eff} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{1,2 \gamma_{M,fi}}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = 1,0 \times 0,90 \times 1,0 \times 11915 \times \frac{240}{1,10} \times 0,91 \times \frac{1,10}{1,2} = 1951,68 \text{ kN}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 1951,68 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{803,86}{1951,68} = 0,41 \leq 1,00$$

Provjera na izbočavanje

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{LT}^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right]$$

$$z_g = 0, z_j = 0$$

$$M_{cr} = 2,43 \times \frac{\pi^2 \times 70000 \times 36700000}{4000^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{5,1635 \times 10^{11}}{36700000} + \frac{4000^2 \times 26923,1 \times 524000}{\pi^2 \times 70000 \times 36700000}} \right]$$

$$M_{cr} = 1751,06 \text{ kNm}$$

$$\alpha = \min\left(\frac{W_{eff,y}}{W_{el,y}}, \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}}\right) = \min\left(\frac{1679700}{2032500}, \frac{2255100}{2032500}\right) = \min(0,83; 1,11) = 0,83 \quad (37)$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{\alpha \times W_{el,y} \times f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,83 \times 2032500 \times 240}{1751,06 \times 10^6}} = 0,48$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times \lambda_{rel,LT} + \lambda_{rel,LT}^2] = 0,5 \times [1 + 0,20 \times 0,48 + 0,48^2] = 0,66$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT}^2}} = \frac{1}{0,66 + \sqrt{0,66^2 - 0,48^2}} = 0,89$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{el,y} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = 0,89 \times 2032500 \times \frac{240}{1,10} \times 0,91 \times \frac{1,10}{1,0} = 386,84 \text{ kNm}$$

$$\frac{|M_{y,fi,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{11,39}{386,84} = 0,03 \leq 1,00$$

Provjera na savijanje i uzdužni tlak

$$\xi_{yc} = 0,80$$

$$\xi_{zc} = 0,80$$

$$\eta_c = 0,80$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = 1951,68 \text{ kN}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = 1951,68 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = \min(M_{u,y,Rd}, M_{o,y,Rd}) = \min(435,35; 366,48) = 366,48 \text{ kNm} \quad (38a)$$

$$M_{y,fi,Rd} = M_{y,Rd} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} = 366,48 \times 0,91 \times \frac{1,10}{1,0} = 366,85 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = \min(M_{u,z,Rd}, M_{o,z,Rd}) = \min(125,32; 106,66) = 106,66 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,Rd} = M_{z,Rd} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} = 106,66 \times 0,91 \times \frac{1,10}{1,0} = 106,77 \text{ kNm}$$

$$\left(\frac{|N_{Ed}|}{N_{y,fb,fi,Rd}}\right)^{\xi_{yc}} + \frac{|M_{y,Ed}|}{M_{y,fi,Rd}} = \left(\frac{803,86}{1951,68}\right)^{0,8} + \frac{11,39}{366,85} = 0,52 \leq 1,00 \quad (38b)$$

$$\left(\frac{|N_{Ed}|}{N_{z,fb,fi,Rd}}\right)^{\eta_c} + \left(\frac{|M_{z,Ed}|}{M_{z,fi,Rd}}\right)^{\xi_{zc}} = \left(\frac{803,86}{1951,68}\right)^{0,8} + \left(\frac{11,88}{106,77}\right)^{0,8} = 0,66 \leq 1,00 \quad (38c)$$

$$\chi_{z,LT,fi} = 0,89$$

$$\xi_{z,LT} = 0,80$$

$$\eta_{c,LT} = 0,80$$

$$\gamma_c = 1,00$$

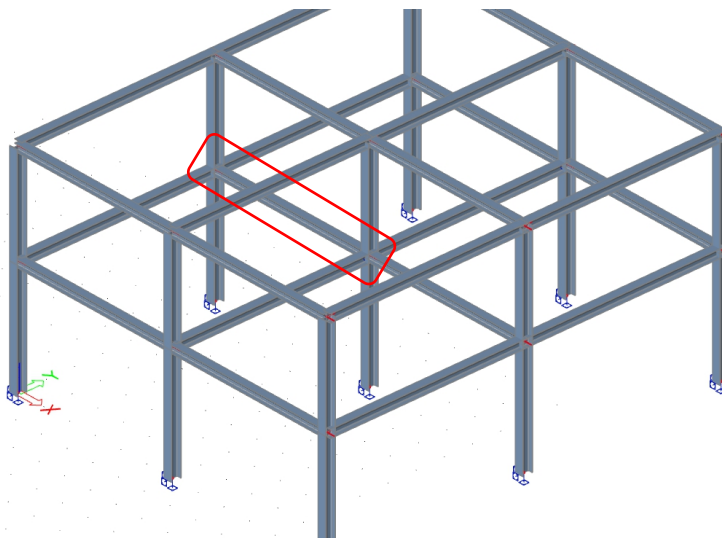
$$M_{b,fi,Rd} = 386,84 \text{ kNm}$$

$$N_{z,b,fi,Rd} = 1951,68 \text{ kN}$$

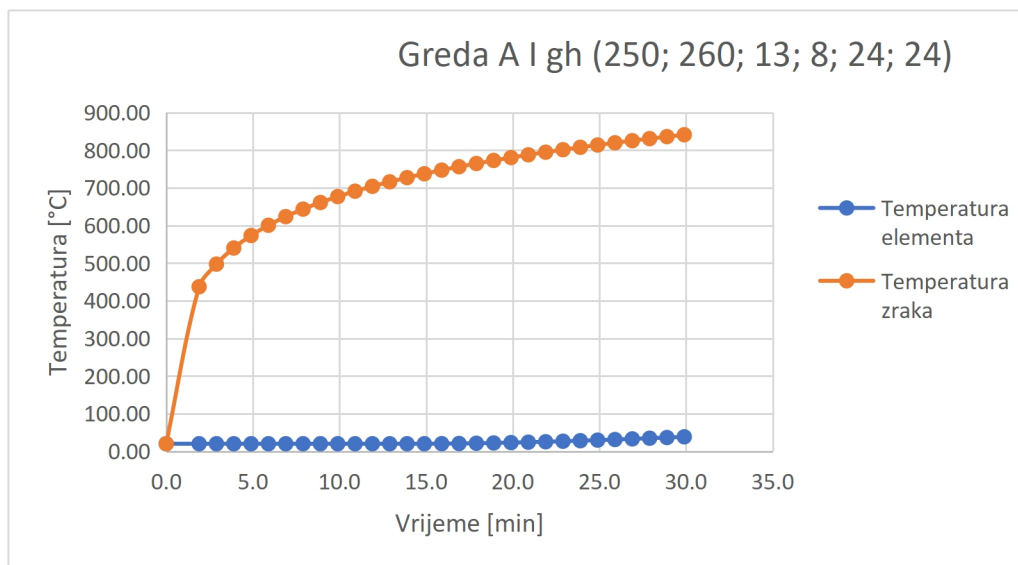
$$\left(\frac{|N_{Ed}|}{N_{z,b,fi,Rd}}\right)^{\eta_{c,LT}} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,fi,Rd}}\right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,Rd}}\right)^{\xi_{zc,LT}} = \left(\frac{803,86}{1951,68}\right)^{0,8} + \left(\frac{11,39}{386,84}\right)^{1,00} + \left(\frac{11,88}{106,77}\right)^{0,8} \quad (38d)$$

$$0,70 \leq 1,00$$

#### 4.2.3.2 Greda A I gh (250; 260; 13; 8; 24; 24)



Slika 4.14 Prikaz najopterećenije grede A



Slika 4.15 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834)

Debljina zaštite 4 cm

$$t = 100,93 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{0,\theta} = 0,95; \quad k_{E,\theta} = 0,98$$

Rezne sile

$$N_{fi,Ed} = -443,73 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,Ed} = 21,69 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,Ed} = 16,21 \text{ kN}$$

$$M_{y,fi,Ed} = 57,68 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,Ed} = 0,17 \text{ kNm}$$

Poprečni presjek je klase IV.

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na uzdužnu silu

$$N_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta} \times N_{Rd} \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = k_{0,\theta} \frac{A_{eff} \times f_o}{\gamma_{M1}} \times \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times \frac{6804,6 \times 240}{1,10} \times \frac{1,10}{1,00} = 1633,10 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{443,73}{1633,10} = 0,27 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja  $M_y$

$$\alpha_y = \frac{W_{eff,y}}{W_{el,y}} = \frac{6799900}{9200900} = 0,74$$

$$M_{o,y,Rd} = \frac{W_{net,y} \times f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{831160 \times 290}{1,25} = 192,83 \text{ kNm}$$

$$M_{o,y,Rd} = \frac{\alpha_y \times W_{el,y} \times f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,74 \times 920090 \times 240}{1,10} = 148,36 \text{ kNm}$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = k_{0,\theta_{max}} \times M_{o,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times 148,36 \times \frac{1,10}{1,0} = 155,04 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{57,68}{155,04} = 0,37 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja  $M_z$

$$\alpha_z = \frac{W_{eff,z}}{W_{el,z}} = \frac{244890}{294570} = 0,83$$

$$M_{o,z,Rd} = \frac{\alpha_z \times W_{el,z} \times f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,83 \times 294570 \times 240}{1,10} = 53,43 \text{ kNm}$$

$$M_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta_{max}} \times M_{o,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times 53,43 \times \frac{1,10}{1,0} = 55,83 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{0,17}{55,83} = 0,00 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu  $V_y$

$$V_{y,Rd} = \frac{A_{v,y} \times f_o / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = \frac{6760 \times 240 / \sqrt{3}}{1,10} = 851,54 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{o,\theta max} \times V_{y,Rd} \times \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times 851,54 \times \frac{1,10}{1,00} = 889,86 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{y,fi,Ed}}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{21,69}{889,86} = 0,02 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu Vz

$$V_{z,Rd} = \frac{A_{v,z} \times f_o / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = \frac{1896 \times 240 / \sqrt{3}}{1,10} = 238,83 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{o,\theta max} \times V_{z,Rd} \times \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times 238,83 \times \frac{1,10}{1,00} = 249,58 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{z,fi,Ed}}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{16,21}{249,58} = 0,06 \leq 1,00$$

Provjera na kombinirano djelovanje savijanja, uzdužne sile i posmika

$$\sigma_{N,Ed} = \frac{-N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{443730}{6804,6} = 65,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{My,Ed} = \frac{M_{y,Ed} \times z}{I_{y,eff}} = \frac{57,68 \times 10^6 \times 125}{9,1912 \times 10^7} = 78,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mz,Ed} = \frac{M_{z,Ed} \times y}{I_{z,eff}} = \frac{0,17 \times 10^6 \times 150}{3,3402 \times 10^7} = 0,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tot,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{My,Ed} + \sigma_{Mz,Ed} = 65,2 + 78,4 + 0,8 = 144,4 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tot,Ed} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{von Mises,Ed} = \sigma_{tot,Ed} = 144,4 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{tot,Ed}}{\frac{f_o \times k_{o,\theta max}}{\gamma_{M,fi}}} = \frac{144,4}{\frac{240 \times 0,95}{1,00}} = 0,63 \leq 1,00$$

$$\frac{\sigma_{von Mises,Ed}}{\frac{\sqrt{C} \times f_o \times k_{o,\theta max}}{\gamma_{M,fi}}} = \frac{144,4}{\frac{\sqrt{1,2} \times 240 \times 0,95}{1,00}} = 0,60 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 70000 \times 1,1501 \times 10^8}{7465^2} = 1425,77 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 70000 \times 3,8294 \times 10^7}{3362^2} = 2339,96 \text{ kN}$$

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_o}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{6804,6 \times 240}{1425770}} = 1,07$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_o}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{6804,6 \times 240}{2339960}} = 0,84$$

$$\varphi_y = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,y}^2]$$

$$\varphi_y = 0,5 \times [1 + 0,20 \times (1,07 - 0,10) + 1,07^2] = 1,17$$

$$\varphi_z = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,z}^2]$$

$$\varphi_z = 0,5 \times [1 + 0,20 \times (0,84 - 0,10) + 0,84^2] = 0,92$$

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,17 + \sqrt{1,17^2 - 1,07^2}} = 0,61$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,92 + \sqrt{0,92^2 - 0,84^2}} = 0,76$$

$$x_{s,y} = \frac{l_{c,y}}{2} = \frac{7465}{2} = 3733 \text{ mm}$$

$$x_{s,z} = \frac{l_{c,z}}{2} = \frac{3362}{2} = 1681 \text{ mm}$$

$$\omega_{x,y} = \frac{1}{\chi_{y,fi} + (1 - \chi_{y,fi}) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,y}}{l_{c,y}}\right)} = \frac{1}{0,61 + (1 - 0,61) \times \sin\left(\frac{\pi \times 3733}{7465}\right)} = 1,00$$

$$\omega_{x,z} = \frac{1}{\chi_{z,fi} + (1 - \chi_{z,fi}) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,z}}{l_{c,z}}\right)} = \frac{1}{0,76 + (1 - 0,76) \times \sin\left(\frac{\pi \times 1681}{3362}\right)} = 1,00$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = \kappa_y \times \chi_{y,fi} \times \omega_{x,y} \times A_{eff} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = 1,0 \times 0,61 \times 1,0 \times 6804,6 \times \frac{240}{1,10} \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,00} = 944,96 \text{ kN}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = \kappa_z \times \chi_{z,fi} \times \omega_{x,z} \times A_{eff} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = 1,0 \times 0,76 \times 1,0 \times 6804,6 \times \frac{240}{1,10} \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,00} = 1180,91 \text{ kN}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 944,96 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{443,73}{944,96} = 0,47 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na bočnu torziju

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{LT}^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z}} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2 - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right]$$

$$z_g = 0, z_j = 0$$



$$M_{cr} = 3,01 \times \frac{\pi^2 70000 \times 38294000}{6000^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{5,0964 \times 10^{11}}{3829400} + \frac{6000^2 \times 26923,1 \times 878520}{\pi^2 \times 70000 \times 3829400}} \right]$$

$$M_{cr} = 471,27 \text{ kNm}$$

$$\alpha = \min\left(\frac{W_{eff,y}}{W_{el,y}}, \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}}\right) = \min\left(\frac{679990}{920090}, \frac{1021200}{920090}\right) = \min(0,74; 1,11) = 0,74$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{\alpha \times W_{el,y} \times f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,74 \times 920090 \times 240}{471,27 \times 10^6}} = 0,59$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times \lambda_{rel,LT} + \lambda_{rel,LT}^2] = 0,5 \times [1 + 0,20 \times 0,59 + 0,59^2] = 0,73$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT}^2}} = \frac{1}{0,73 + \sqrt{0,73^2 - 0,59^2}} = 0,86$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{el,y} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = 0,86 \times 920090 \times \frac{240}{1,10} \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,0} = 176,65 \text{ kNm}$$

$$\frac{|M_{y,fi,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{57,68}{176,65} = 0,33 \leq 1,00$$

Provjera na kombinirano djelovanje savijanja i uzdužne tlačne sile

$$\xi_{yc} = 0,80$$

$$\xi_{zc} = 0,80$$

$$\eta_c = 0,80$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = 944,96 \text{ kN}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = 1180,91 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = \min(M_{u,y,Rd}, M_{o,y,Rd}) = \min(192,83; 148,36) = 148,36 \text{ kNm}$$

$$M_{y,fi,Rd} = M_{y,Rd} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} = 148,36 \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,0} = 155,04 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = \min(M_{u,z,Rd}, M_{o,z,Rd}) = \min(67,98; 53,43) = 53,43 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,Rd} = M_{z,Rd} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} = 53,43 \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,0} = 55,83 \text{ kNm}$$

$$\left(\frac{|N_{Ed}|}{N_{y,fb,fi,Rd}}\right)^{\xi_{yc}} + \frac{|M_{y,Ed}|}{M_{y,fi,Rd}} = \left(\frac{443,73}{944,96}\right)^{0,8} + \frac{57,68}{155,04} = 0,92 \leq 1,00$$

$$\left(\frac{|N_{Ed}|}{N_{z,fb,fi,Rd}}\right)^{\eta_c} + \left(\frac{|M_{zEd}|}{M_{z,fi,Rd}}\right)^{\xi_{zc}} = \left(\frac{443,73}{1180,91}\right)^{0,8} + \left(\frac{0,17}{55,83}\right)^{0,8} = 0,47 \leq 1,00$$

$$\chi_{z,LT,fi} = 0,86$$

$$\xi_{zc,LT} = 0,80$$

$$\eta_{c,LT} = 0,80$$

$$\gamma_c = 1,00$$

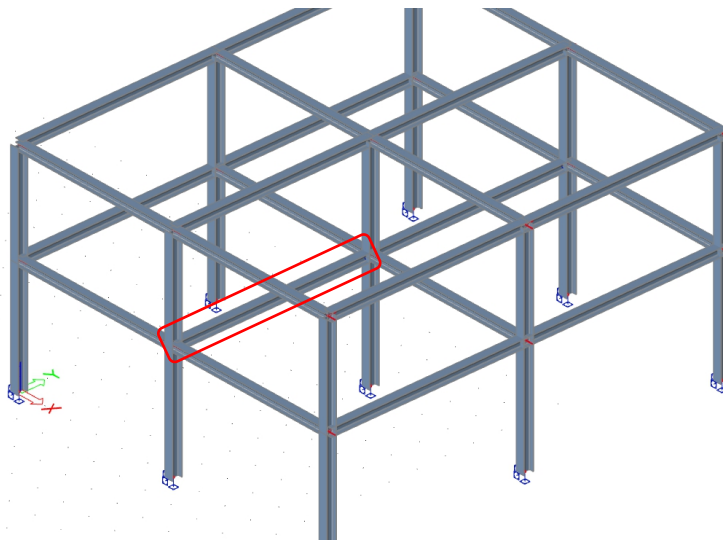
$$M_{b,fi,Rd} = 176,65 \text{ kNm}$$

$$N_{z,b,fi,Rd} = 1180,91 \text{ kN}$$

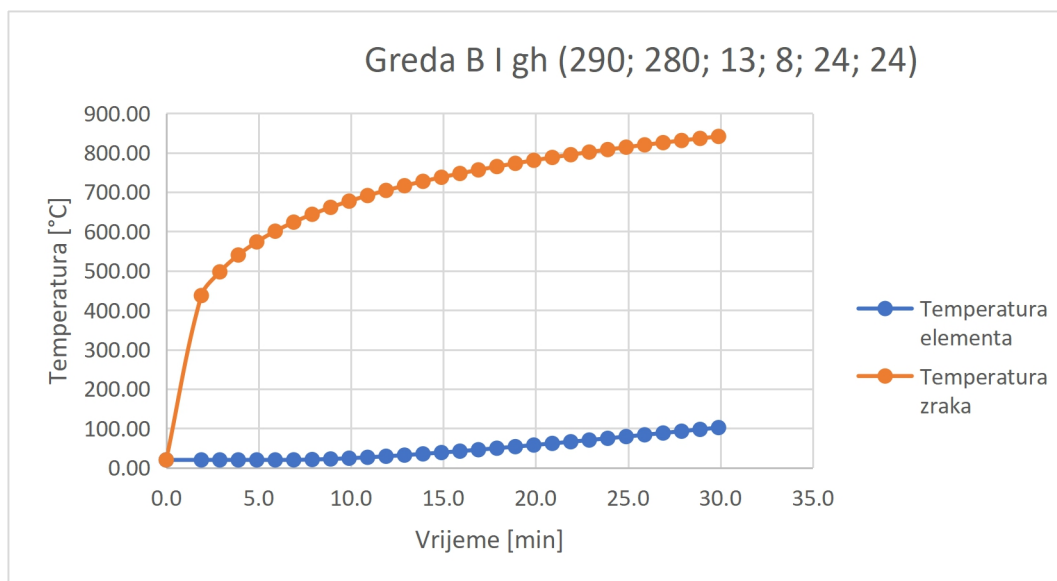
$$\left(\frac{|N_{Ed}|}{N_{z,b,fi,Rd}}\right)^{\eta_{c,LT}} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,fi,Rd}}\right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,Rd}}\right)^{\xi_{zc,LT}} = \left(\frac{443,73}{1180,91}\right)^{0,8} + \left(\frac{57,68}{176,65}\right)^{1,00} + \left(\frac{0,17}{55,83}\right)^{0,8}$$

$$0,79 \leq 1,00$$

#### 4.2.3.3 Greda B I gh (290; 280; 13; 8; 24; 24)



Slika 4.16 Prikaz najopterećenije grede B



Slika 4.17 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834)

Debljina zaštite 4 cm

$$t = 102,13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{0,\theta} = 0,95; k_{E,\theta} = 0,98$$

Rezne sile

$$N_{fi,Ed} = -413,66 \text{ kN}$$

$$V_{y,fi,Ed} = 0,00 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,Ed} = 24,11 \text{ kN}$$

$$M_{y,fi,Ed} = 63,74 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

Poprečni presjek je klase IV.

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na uzdužnu silu

$$N_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta} \times N_{Rd} \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = k_{0,\theta} \frac{A_{eff} \times f_o}{\gamma_{M1}} \times \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times \frac{6996,8 \times 240}{1,10} \times \frac{1,10}{1,00} = 1595,27 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{413,66}{1595,27} = 0,26 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja My

$$\alpha_y = \frac{W_{eff,y}}{W_{el,y}} = \frac{836210}{1170800} = 0,71$$

$$M_{o,y,Rd} = \frac{W_{net,y} \times f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{1061500 \times 290}{1,25} = 246,27 \text{ kNm}$$

$$M_{o,y,Rd} = \frac{\alpha_y \times W_{el,y} \times f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,71 \times 1170800 \times 240}{1,10} = 182,45 \text{ kNm}$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = k_{o,\theta max} \times M_{o,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M,x}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times 182,45 \times \frac{1,10}{1,0} = 190,66 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{63,74}{190,66} = 0,33 \leq 1,00$$

Provjera otpornosti poprečnog presjeka na posmičnu silu Vz

$$V_{z,Rd} = \frac{A_{v,z} \times f_o / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = \frac{2216 \times 240 / \sqrt{3}}{1,10} = 279,14 \text{ kN}$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{o,\theta max} \times V_{z,Rd} \times \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} = 0,95 \times 279,14 \times \frac{1,10}{1,0} = 291,70 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{z,fi,Ed}}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{24,11}{291,70} = 0,08 \leq 1,00$$

Provjera na kombinirano djelovanje savijanja, uzdužne sile i posmika

$$\sigma_{N,Ed} = \frac{-N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{413660}{6996,8} = 59,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{My,Ed} = \frac{M_{y,Ed} \times z}{I_{y,eff}} = \frac{63,74 \times 10^6 \times 145}{1,3305 \times 10^8} = 69,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mz,Ed} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tot,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{My,Ed} + \sigma_{Mz,Ed} = 59,1 + 69,5 = 128,6 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tot,Ed} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{von Mises,Ed} = \sigma_{tot,Ed} = 128,6 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{tot,Ed}}{\frac{f_o \times k_{o,\theta max}}{\gamma_{M,fi}}} = \frac{128,6}{\frac{240 \times 0,95}{1,00}} = 0,56 \leq 1,00$$

$$\frac{\sigma_{von Mises,Ed}}{\frac{\sqrt{c} \times f_o \times k_{o,\theta max}}{\gamma_{M,fi}}} = \frac{128,6}{\frac{\sqrt{1,2} \times 240 \times 0,95}{1,00}} = 0,51 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na izvijanje

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 70000 \times 1,6977 \times 10^8}{7000^2} = 2393,60 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 70000 \times 4,7777 \times 10^7}{3869^2} = 2204,67 \text{ kN}$$

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_o}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{6996,8 \times 240}{2393600}} = 0,84$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_o}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{6996,8 \times 240}{2204670}} = 0,87$$

$$\varphi_y = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,y}^2]$$

$$\varphi_y = 0,5 \times [1 + 0,20 \times (0,84 - 0,10) + 0,84^2] = 0,92$$

$$\varphi_z = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,z}^2]$$

$$\varphi_z = 0,5 \times [1 + 0,20 \times (0,87 - 0,10) + 0,87^2] = 0,96$$

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,92 + \sqrt{0,92^2 - 0,84^2}} = 0,76$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,96 + \sqrt{0,96^2 - 0,87^2}} = 0,74$$

$$x_{s,y} = \frac{l_{c,y}}{2} = \frac{7000}{2} = 3500 \text{ mm}$$

$$x_{s,z} = \frac{l_{c,z}}{2} = \frac{3869}{2} = 1935 \text{ mm}$$

$$\omega_{x,y} = \frac{1}{\chi_{y,fi} + (1 - \chi_{y,fi}) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,y}}{l_{c,y}}\right)} = \frac{1}{0,76 + (1 - 0,76) \times \sin\left(\frac{\pi \times 3500}{7000}\right)} = 1,00$$

$$\omega_{x,z} = \frac{1}{\chi_{z,fi} + (1 - \chi_{z,fi}) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,z}}{l_{c,z}}\right)} = \frac{1}{0,74 + (1 - 0,74) \times \sin\left(\frac{\pi \times 1935}{3869}\right)} = 1,00$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = \kappa_y \times \chi_{y,fi} \times \omega_{x,y} \times A_{eff} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = 1,0 \times 0,76 \times 1,0 \times 6996,8 \times \frac{240}{1,10} \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,00} = 1212,24 \text{ kN}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = \kappa_z \times \chi_{z,fi} \times \omega_{x,z} \times A_{eff} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = 1,0 \times 0,74 \times 1,0 \times 6996,8 \times \frac{240}{1,10} \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,00} = 1178,66 \text{ kN}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 1178,66 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{fi,Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{413,66}{1178,66} = 0,35 \leq 1,00$$

Provjera stabilnosti elementa na bočnu torziju

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{LT}^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right]$$

$$z_g = 0, z_j = 0$$

$$M_{cr} = 1,35 \times \frac{\pi^2 \times 70000 \times 47777000}{7000^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{8,7801 \times 10^{11}}{47777000} + \frac{7000^2 \times 26923,1 \times 909850}{\pi^2 \times 70000 \times 47777000}} \right]$$

$$M_{cr} = 212,45 \text{ kNm}$$

$$\alpha = \min\left(\frac{W_{eff,y}}{W_{el,y}}, \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}}\right) = \min\left(\frac{836210}{1170800}, \frac{1290500}{1170800}\right) = \min(0,71; 1,10) = 0,71$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{\alpha \times W_{el,y} \times f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,71 \times 1170800 \times 240}{212,45 \times 10^6}} = 0,97$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times \lambda_{rel,LT} + \lambda_{rel,LT}^2] = 0,5 \times [1 + 0,20 \times 0,97 + 0,97^2] = 1,07$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT}^2}} = \frac{1}{1,07 + \sqrt{1,07^2 - 0,97^2}} = 0,66$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{el,y} \times \frac{f_o}{\gamma_{M,1}} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = 0,66 \times 1170800 \times \frac{240}{1,10} \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,0} = 176,18 \text{ kNm}$$

$$\frac{|M_{y,fi,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{63,74}{176,18} = 0,36 \leq 1,00$$

Provjera na kombinirano djelovanje savijanja i uzdužne tlačne sile

$$\xi_{yc} = 0,80$$

$$\xi_{zc} = 0,80$$

$$\eta_c = 0,80$$

$$N_{o,fb,fi,y,Rd} = 1212,24 \text{ kN}$$

$$N_{o,fb,fi,z,Rd} = 1178,66 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = \min(M_{u,y,Rd}, M_{o,y,Rd}) = \min(246,27; 182,45) = 182,45 \text{ kNm}$$

$$M_{y,fi,Rd} = M_{y,Rd} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} = 182,45 \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,0} = 190,66 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = \min(M_{u,z,Rd}, M_{o,z,Rd}) = \min(78,84; 59,93) = 59,93 \text{ kNm}$$

$$M_{z,fi,Rd} = M_{z,Rd} \times k_{o,\theta} \times \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} = 59,93 \times 0,95 \times \frac{1,10}{1,0} = 62,63 \text{ kNm}$$

$$\left( \frac{|N_{Ed}|}{N_{y,fb,fi,Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{|M_{y,Ed}|}{M_{y,fi,Rd}} = \left( \frac{413,66}{1212,24} \right)^{0,8} + \frac{63,74}{190,66} = 0,76 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{|N_{Ed}|}{N_{z,fb,fi,Rd}} \right)^{\eta_c} + \left( \frac{|M_{z,Ed}|}{M_{z,fi,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} = \left( \frac{413,66}{1178,66} \right)^{0,8} + \left( \frac{0,00}{59,93} \right)^{0,8} = 0,43 \leq 1,00$$

$$\chi_{z,LT,fi} = 0,66$$

$$\xi_{zc,LT} = 0,80$$

$$\eta_{c,LT} = 0,80$$

$$\gamma_c = 1,00$$

$$M_{b,fi,Rd} = 176,18 \text{ kNm}$$

$$N_{z,b,fi,Rd} = 1178,66 \text{ kN}$$

$$\left( \frac{|N_{Ed}|}{N_{z,b,fi,Rd}} \right)^{\eta_{c,LT}} + \left( \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,fi,Rd}} \right)^{\gamma_c} + \left( \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,Rd}} \right)^{\xi_{zc,LT}} = \left( \frac{413,66}{1178,66} \right)^{0,8} + \left( \frac{63,74}{176,18} \right)^{1,00} + \left( \frac{0,00}{59,93} \right)^{0,8}$$

$$0,79 \leq 1,00$$

Proračuni otpornosti i stabilnosti provedeni su u skladu s normama EN 1999:1-1, te EN 1999:1-2.[10,14]

## 5 ZAKLJUČAK

Aluminij kao materijal u građevinarstvu ima određenih prednosti u odnosu na čelik: otpornost na koroziju, manja vlastita težina, estetske karakteristike i uz to se čvrstoćom može usporediti s čelicima nižih klasa. Međutim, ima i veliku manu u vidu znatno manje otpornosti na djelovanje topline.

U primjeru je dobivena potrebna debljina zaštite za čelične elemente 1 cm manja, nego za aluminijske. Ta razlika nije puno značajna, ali treba uzeti u obzir da je tražena razina požarne otpornosti bila R30. Na temperaturama do  $\sim 150$  °C opadanje čvrstoće kod čelika i aluminija je približno jednako, no nakon toga čvrstoća aluminija počne puno brže opadati, nego kod čelika. Aluminij ima i veći koeficijent toplinskog širenja što znači da visoke temperature unose i veće unutarnje sile kod statički neodređenih konstrukcija. Također treba uzeti u obzir utrošak materijala, potrebna količina (masa) aluminija je upola manja u odnosu na čelik.

I aluminij i čelik imaju svoje prednosti i mane. Izbor materijala za konstrukciju ovisi o brojnim parametrima. Prije odabira je potrebno sagledati sve zadaće projekta i pronaći optimalno rješenje.



## Literatura

- [1] <https://www.ega.ae/en/products/how-aluminium-is-made> (23.06.2021.)
- [2] Awaso Bauxite Red Mud-Cement Based Composites: Characterisation for Pavement Applications
- [3] <http://miroslavjakovljevic.iz.hr/o-aluminiju/> (23.06.2021.)
- [4] <https://www.metallurgyfordummies.com/the-bayer-and-hall-heroult-process.html> (23.06.2021.)
- [5] I. Boko, D. Skejić, N. Torić: Aluminijske konstrukcije, Udžbenik sveučilišta u Splitu i Zagrebu, Izdavač: Sveučilište u Splitu, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [6] [https://www.wikiwand.com/hr/Precipitacijsko\\_očvršćivanje](https://www.wikiwand.com/hr/Precipitacijsko_očvršćivanje) (23.06.2021.)
- [7] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al\\_1g.pdf](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_1g.pdf) (23.06.2021.)
- [8] P. Sensharma, M. Collette, J. Harrington (2010): Effect of Welded Properties on Aluminum Structures, National Technical Information Service Springfield, USA
- [9] D. Skejić, I. Boko, N. Torić (2015): Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije, Građevinar 11/2015
- [10] Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules
- [11] Pravilnik o zaštiti od požara, Republika Hrvatska, 2012.
- [12] Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- [13] I. Boko: Proračun požarne otpornosti čeličnih konstrukcija prema EN 1993-1-2, interna skripta
- [14] Eurocode 9 - Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design
- [15] I. Boko: Otpornost konstrukcija na požar, interna skripta
- [16] Pravilnik o zaštiti od požara, Republika Hrvatska, 2012.
- [17] <https://vatrozastita.com/kako-izabrati-odgovarajuci-vatrogasni-aparat/> (23.06.2021.)
- [18] <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/39657/protupozarni-kanalni-sustavi-vazno-pasivno-protupozarno-rjesenje/> (23.06.2021.)

- [19] [https://mgipu.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Zastita\\_procelja\\_zgrada\\_od\\_pozara\\_Jelcic\\_Carevic\\_Banjad.pdf](https://mgipu.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Zastita_procelja_zgrada_od_pozara_Jelcic_Carevic_Banjad.pdf) (23.06.2021.)
- [20] <http://www.mtz-instalacije.hr/sprinkleri/> (23.06.2021.)
- [21] [https://up.codes/viewer/new\\_york/ny-building-code-2010/chapter/7/fire-resistance-rated-construction#7](https://up.codes/viewer/new_york/ny-building-code-2010/chapter/7/fire-resistance-rated-construction#7) (23.06.2021.)
- [22] Cramer, S.M.; Friday, O.M.; White, R.H.; Sriprutkiat, G. 2003. Mechanical properties of gypsum board at elevated temperatures. Fire and materials 2003 : 8th International Conference, January 2003, San Francisco, CA, USA. London : Interscience Communications Limited, c2003: pages 33-42
- [23] Just, A.; Schmid, J.; König, J. (2010): Gypsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database, SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm
- [24] E. Steau, M. Mahendran (2021): Elevated Temperature Thermal Properties of Fire Protective Boards and Insulation Materials for Light Steel Frame Systems, Journal of Building Engineering
- [25] <https://www.constructionspecifier.com/specifying-intumescent-coating-film-thicknesses/> (23.06.2021.)
- [26] <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/39704/intumescentni-premaz-ucinkovita-zastita-celicnih-struktura-od-vatre/> (23.06.2021.)
- [27] N. Torić: Trajnost čeličnih konstrukcija, interna skripta
- [28] A.J. Headly; M.B. Hileman; A.S. Robbins; E.S. Piekos; E.K. Stirrup; C.C. Roberts (2018): Thermal conductivity measurements and modeling of ceramic fiber insulation materials, Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA
- [29] <https://www.promatmiddleeast.com/en/blog/fireproofing/spray-fire-protection-steel> (23.06.2021.)
- [30] V.K.R. Kodur; A.M. Shakya (2013): Effect of temperature on thermal properties of spray applied fire resistive materials, Michigan State University, USA
- [31] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- [32] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions - Snow loads
- [33] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions

- [34] Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions
- [35] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [36] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design

## Popis slika

Slika 1.1	Dijagram tijeka Bayerovog procesa proizvodnje glinice [2].....	1
Slika 1.2	Shematski prikaz Hall-Héroutovog procesa [4].....	2
Slika 1.3	Shematski prikaz zrnate strukture aluminija i kliznih ravnina.....	3
Slika 1.4	Postupak toplinskog očvršćavanja [6].....	4
Slika 1.5	Usporedba dijagrama naprezanja legura 6061-T6 i 5083-H116 u normalnom stanju i u području HAZ-a (crtkano) [8].....	7
Slika 2.1	Globalni koncept sigurnosti konstrukcija u požaru [13].....	11
Slika 2.2	Krivulje porasta temperature u zatvorenom prostoru [13].....	12
Slika 2.3	Podjela domene na sub-volumene [15].....	15
Slika 2.4	Podjela objekta na gornju i donju zonu [13].....	15
Slika 3.1	Područje primjene pojedine vrste protupožarnih aparata [17].....	18
Slika 3.2	Načini postavljanja zaštite na profil [21].....	20
Slika 3.3	Prirast temperature na stražnjoj strani ploče tipa A (GtA) i tipa F (GtF) u standardnom požaru [23].....	22
Slika 3.4	Promjena specifične topline u ovisnosti o temperaturi uzorka [24].....	24
Slika 3.5	Gubitak mase u ovisnosti o promjeni temperature uzorka [24].....	24
Slika 3.6	Toplinska vodljivost u ovisnosti o promjeni temperature uzorka [24].....	25
Slika 3.7	Ekspandirajući premaz prije (lijevo) i nakon (desno) djelovanja požara [25].....	26
Slika 3.8	Tolinska vodljivost Fiberfrax 970-H, mjereni i modelirani rezultati u odnosu na (a) temperaturu (pri odabranoj kompresiji), (b) tlak [28].....	28
Slika 3.9	Tolinska vodljivost Fiberfrax T-30LR, mjereni i modelirani rezultati u odnosu na (a) temperaturu (pri odabranoj kompresiji), (b) tlak [28].....	28
Slika 3.10	Promjena toplinske vodljivosti s obzirom na porast temperature [30].....	30
Slika 3.11	Promjena specifične topline s obzirom na porast temperature [30].....	30
Slika 3.12	Gubitak mase s obzirom na porast temperature [30].....	30
Slika 4.1	Dimenzije zadanog objekta.....	32

---

Slika 4.2 Krivulja toplinska vodljivost - temperatura za legure 3xxx i 6xxx (A), te 5xxx i 7xxx (B).....	38
Slika 4.3 Krivulja specifični toplinski kapacitet - temperatura.....	38
Slika 4.4 Krivulja toplinska vodljivost - temperatura za S235.....	39
Slika 4.5 Krivulja specifični toplinski kapacitet - temperatura za S235.....	40
Slika 4.6 Prikaz modela u softveru SCIA Engineer 19.1.....	41
Slika 4.7 Oblik korištenih aluminijskih profila.....	42
Slika 4.8 Prikaz najopterećenijeg stupa.....	43
Slika 4.9 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834).....	43
Slika 4.10 Prikaz najopterećenije grede.....	49
Slika 4.11 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834).....	49
Slika 4.12 Prikaz najoptrećenijeg stupa.....	55
Slika 4.13 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834).....	55
Slika 4.14 Prikaz najopterećenije grede A.....	60
Slika 4.15 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834).....	60
Slika 4.16 Prikaz najopterećenije grede B.....	65
Slika 4.17 Prikaz razvoja temperature u elementu i okolnom zraku (ISO-834).....	66

---

**Popis tablica**

Tablica 1-1 Fizikalna svojstva aluminija [7].....	5
Tablica 1-2 Označavanje glavnih skupina aluminijevih legura [9].....	10
Tablica 1-3 Označavanje najučestalijih glavnih skupina lijevanih aluminijevih legura [9].	10
Tablica 2-1 Omjeri čvrstoće pri 0,2% zaostaloj deformaciji $k_{0,0}$ za aluminijeve legure pri povišenim temperaturama do 2 sata izlaganja [14].....	13
Tablica 2-2 Ovisnost modula elastičnosti aluminijevih legura o temperaturi [14].....	14
Tablica 3-1 Inženjerska svojstva gips ploče tipa X debljine 15,9 mm [22].....	22
Tablica 3-2 Sastav ploča od kalcijevog silikata [24].....	24
Tablica 3-3 : Maseni sastav ispitanih materijala [28].....	28
Tablica 3-4 Sastav ispitanih materijala [30].....	29
Tablica 4-1 Pritisak vjetra na vanjske površine.....	34
Tablica 4-2 Pritisak vjetra na unutarnje površine.....	34
Tablica 4-3 Ukupno djelovanje vjetra .....	34