

Optimalni sustav zaštite od požara čelične konstrukcije skladišta

Janjić, Mario

Professional thesis / Završni specijalistički

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:413309>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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





GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mario Janjić, mag.ing.aedif.

OPTIMALNI SUSTAV ZAŠTITE OD POŽARA ČELIČNE KONSTRUKCIJE SKLADIŠTA

SPECIJALISTIČKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Davor Skejić

Zagreb, 2022.

SAŽETAK

Specijalističkim radom je provedena analiza uvjeta za izgradnju skladišnih prostora propisanih Hrvatskim Pravilnikom o zaštiti od požara u skladištima te je uspoređena s uvjetima danim u Američkom standardu NFPA 1. Ključne razlike se odnose na požarnu otpornost konstrukcije, obvezu ugradnje sustava za odvođenje dima i topline te sustava za dojavu požara. NFPA ne propisuje požarnu otpornost konstrukcije dok je Hrvatskim Pravilnikom za skladišta bez ugrađene sprinkler instalacije zahtijevana u trajanju od 30 minuta.

Nosivu čeličnu konstrukciju analiziranog skladišta čini sedam portalnih okvira raspona 14,30 m postavljenih na razmaku od 4,90 m. Visina konstrukcije u strehi je cca 4,90 m, dok je visina u sljemenu cca 5,80 m. Stupovi i rasponska konstrukcija su izrađeni od čelika kvalitete S 355, dok je ostatak konstrukcije izrađen od čelika kvalitete S 235.

Analizirano je skladištenje 5 različitih vrsta robe unutar istog čeličnog skladišta. Za svaku vrstu robe su izračunata požarna opterećenja, određena je brzina razvoja požara te je modelirana realna požarna krivulja temperatura-vrijeme. Provjera nosivosti prethodno dimenzioniranih čeličnih elemenata građevine na 'hladno stanje' provedena je u odnosu na ISO 834 krivulju standardnog požara i na realne požarne krivulje ovisno o predviđenom požarnom opterećenju, odnosno namjeni samog skladišta. Nosiva konstrukcija je u četiri od pet realnih požarnih scenarija zadovoljila uvjet nosivosti u trajanju od 30 minuta. Dijelovi konstrukcije su otkazali nosivost pri djelovanju standardnog požara, dok je u slučaju požara tekstilne robe otkazala čitava konstrukcija. Analizom požarnih scenarija utvrđeni su faktori koji najviše utječu na požarnu nosivost čelične konstrukcije bez potrebe za izvedbom dodatne zaštite.

Za čeličnu konstrukciju koja u pojedinim požarnim scenarijima nije zadovoljila provjeru nosivosti predloženo je nekoliko vrsta zaštite konstrukcije. Od aktivnih mjera je predviđen sprinkler sustav, dok je kod pasivnih predviđena zaštita protupožarnim premazima, protupožarnim pločama i protupožarnim žbukama. Utvrđene su prednosti i nedostaci pojedinih vrsta zaštite, prikladnost za ugradnju u skladišne prostore te je provedena ekonomska analiza. Najjeftinija ali najmanje prikladna zaštita je protupožarnim žbukama, a kao optimalno rješenje je odabrana zaštita protupožarnim premazima.

Ključne riječi:

Realni požar, skladište, čelična konstrukcija, EN 1993-1-2, zaštita od požara, optimizacija

ABSTRACT

Specialist thesis carried out analysis of conditions for construction of warehouses prescribed by Croatian Fire Safety Regulation in Warehouses and it was compared to conditions given in American Standard NFPA 1. The key differences relate to the fire resistance of the structure, the obligation to install a smoke and heat removal system and a fire alarm system. The NFPA does not prescribe the fire resistance of the structure, while the Croatian Regulation for warehouses without sprinkler installations requires it for a duration of 30 minutes.

The load-bearing steel structure of the analysed warehouse is made of seven portal frames with a span of 14,30 m placed at a distance of 4,90 m. The height of the structure in the eave is approx. 4,90 m, while the height in the ridge is approx. 5,80 m. The columns and span structure are made of S355 quality steel, while the rest of the structure is made of S235 quality steel.

It was analysed storing of five different types of goods inside the same steel warehouse. For every type of good were calculated fire loads, the speed of fire development was determined and a realistic fire curve temperature-time was modelled. The load-bearing capacity check of the previously dimensioned steel elements of the building in "cold state" was conducted in relation to ISO 834 standard fire curve and to the realistic fire curves as well, depending on the expected fire load, that is the purpose of the warehouse itself. In four out of five realistic fire scenarios, the load-bearing structure satisfied the load-bearing condition for 30 minutes. Parts of the structure failed in the load-bearing capacity of the standard fire, while in the case of a textile goods fire, the entire structure failed. The analysis of fire scenarios was determined the factors, which affect the most on the fire resistance of the steel structure without necessary additional protection.

For steel structure that in certain fire scenarios was not satisfied load-bearing analysis, it is proposed several types of structure protection. Active measures include fire sprinkler system, while passive measures predict fireproof coatings, fire resistant boards and heat resistant plaster. The advantages and disadvantages of certain types of protection, suitability for installation in storage areas were determined and an economic analysis was carried out. The cheapest but least suitable protection is heat resistant plasters, and as an optimal solution, protection with fireproof coatings is adopted.

Key words:

realistic fire, warehouse, steel structure, EN 1993-1-2, fire protection, optimization

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	REGULATIVA ZAŠTITE OD POŽARA U SKLADIŠTIMA	2
2.1.	Općenito	2
2.2.	Hrvatska regulativa	2
2.3.	Strana regulativa	5
2.4.	Usporedba propisa	7
3.	NAČINI ZAŠTITE ČELIČNE KONSTRUKCIJE OD DJELOVANJA POŽARA	10
3.1.	Općenito	10
3.2.	Protupožarne ploče	11
3.3.	Protupožarne žbuke	13
3.4.	Ekspandirajući premazi	14
3.5.	Sprinkler sustav	15
4.	PARAMETARSKA ANALIZA ČELIČNE KONSTRUKCIJE SKLADIŠTA NA POŽAR	17
4.1.	Uvodno o parametarskoj analizi	17
4.2.	Tehnički opis konstrukcije	19
4.3.	Izračun požarnog opterećenja i snage požara	20
4.3.1.	Nisko požarno opterećenje – bezalkoholna pića	20
4.3.2.	Srednje požarno opterećenje – građevinski materijal	21
4.3.3.	Visoko požarno opterećenje – duhanski proizvodi	23
4.3.4.	Visoko požarno opterećenje – pločasti drveni namještaj	24
4.3.5.	Visoko požarno opterećenje – vezena tekstilna roba	25
4.3.6.	Rezime razmotrenog požarnog opterećenja	27
4.4.	Modeliranje razvoja realnog požara	27
4.4.1.	Općenito	27
4.4.2.	Svojstva požarnog odjeljka	27
4.4.3.	Požarno opterećenje i mjere zaštite	29
4.4.4.	Rezime modeliranja razvoja realnog požara	35
4.4.5.	Rezultati analize realnih požara	35
4.5.	Analiza i proračun konstrukcije na 'hladno stanje'	40
4.5.1.	Analiza opterećenja	40
4.5.2.	Kombinacije opterećenja za 'hladno stanje'	41
4.5.3.	Proračun konstrukcije na 'hladno stanje'	41
4.6.	Proračun konstrukcije na djelovanje požara	41
4.6.1.	Analiza opterećenja	41

4.6.2.	Kombinacije opterećenja za požar	42
4.6.3.	Proračun konstrukcije na djelovanje požara	42
4.6.4.	Tablični prikaz rezultata dimenzioniranja	56
4.7.	Odabir zaštite čelične konstrukcije od djelovanja požara.....	56
5.	DISKUSIJA REZULTATA.....	58
6.	PRIJEDLOG SMJERNICA ZA ZAŠTITU ČELIČNE KONSTRUKCIJE SKLADIŠTA OD DJELOVANJA POŽARA	61
7.	ZAKLJUČAK	62
8.	LITERATURA	64
9.	GRAFIČKI PRILOZI	66

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Dodatne mjere zaštite od požara u skladištima [1]	4
Tablica 2.2. Maksimalna ukupna dužina evakuacijskog puta [9]	7
Tablica 2.3 Usporedba propisa	8
Tablica 3.1 Matrica za odabir optimalnog sustava pasivne zaštite čelične konstrukcije [13]	11
Tablica 4.1 Karakteristike konstrukcijskih elemenata	19
Tablica 4.2 Prikaz osnovnih rezultata u ovisnosti o tipu požarnog opterećenja	27
Tablica 4.3 Ulazni podatci za modeliranje razvoja realnog požara	35
Tablica 4.4 Rezultati dimenzioniranja čelične konstrukcije na "hladno stanje"	41
Tablica 4.5. Rezultati dimenzioniranja čelične konstrukcije	56
Tablica 5.1 Elementi koje je potrebno protupožarno štiti	59
Tablica 5.2 Procjena troškova zaštite konstrukcije od požara	60

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Tipovi skladišta po načinu skladištenja robe	3
Slika 3.1. Koeficijenti za izračun granice popuštanja, granice proporcionalnosti i modula elastičnosti [11]	10
Slika 3.2. Zaštita konstrukcije protupožarnim pločama [12]	12
Slika 3.3. Izvedba protupožarne zaštitne membrane [12]	13
Slika 3.4. Zaštita konstrukcije protupožarnom žbukom [12]	14
Slika 3.5. Protupožarni ekspanzirajući premaz nakon testiranja [14]	15
Slika 3.6. Sprinkler mlaznica [18]	16
Slika 4.1 Površine regala	18
Slika 4.2. 3D model konstrukcije	19
Slika 4.3. Temperatura zraka u gornjoj zoni kroz vrijeme	36
Slika 4.4. Temperatura zraka u donjoj zoni kroz vrijeme	36
Slika 4.5. Snaga požara kroz vrijeme	37
Slika 4.6. Visina granice između zona kroz vrijeme	37
Slika 4.7. Površina zahvaćena požarom kroz vrijeme	38
Slika 4.8. Kisik kroz vrijeme	38
Slika 4.9 Temperatura zraka u gornjoj zoni uz ugrađenu prisilnu ventilaciju	40

1. UVOD

U Republici Hrvatskoj je još uvijek zapostavljen odabir čelika kao materijala za građevinske konstrukcije kod izgradnje građevina za koje se zahtjeva otpornost konstrukcije na djelovanje požara. Preskriptivni proračun čeličnih konstrukcija na djelovanje požara često previše konzervativno propisuje temperature kojima je izložena konstrukcija. Precizno definiranje mogućih požarnih uvjeta daje mogućnost proračuna temperature u građevinskim elementima pri djelovanju realnog požara te uvid u nužnost i svrsishodnost zaštite konstrukcije od požara.

Hrvatskim pravilnikom koji regulira zaštitu od požara u skladištima je za sva skladišta bez ugrađenog sprinkler sustava propisana otpornost nosive konstrukcije na djelovanje požara u trajanju od minimalno 30 minuta (R30) [1]. Tražena otpornost nosive konstrukcije je puno konzervativnije zahtijevana nego u Američkim smjernicama za projektiranje skladišta prema kojima otpornost nosive konstrukcije na požar nije potrebna [2]. Razlike u zahtjevima za izgradnju skladišta propisanim hrvatskim propisom i NFPA standardom se pojavljuju ponajviše zbog pristupa pisanju propisa. Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima je izglasan 2008. godine, a napisan je u skladu s tada aktualnim propisima na području Europske unije te do danas nije ažuriran. NFPA standardi se razvijaju paralelno s razvojem znanstvene grane Znanost o požaru i inženjerske grane Požarno inženjerstvo. Redovno se ažuriraju jer se temelje na analizi mnoštva požara diljem Amerike te na provođenju testova s raznim požarnim scenarijima u kontroliranim uvjetima.

Kako je skladište poslovni prostor i u njemu se istovremeno može zadesiti svega nekoliko osoba koje su dobro upoznate s rasporedom evakuacijskih izlaza upitna je potreba za požarnom otpornosti konstrukcije u trajanju od 30 minuta.

Kako se u Republici Hrvatskoj skladišta moraju projektirati u skladu s Pravilnikom o zaštiti od požara u skladištima [1], ovim radom će se definirati potreba za zaštitom čelične konstrukcije na koju djeluje standardna krivulja požara ISO 834 te pet realnih požarnih temperaturnih krivulja. Za požarne scenarije u kojima se utvrdi potreba za zaštitom čelične konstrukcije usporedit će se primjena aktivnih i pasivnih mjera zaštite. Aktivnom mjerom zaštite smatra se ugradnja sprinkler sustava dok su za pasivne mjere zaštite korištene tri trenutno najzastupljenije vrste zaštite: protupožarni premazi, protupožarne ploče i protupožarne žbuke. Analiza će se provesti iz aspekta cijene ugradnje zaštite i aspekta prikladnosti ugradnje pojedinih vrsta zaštite u prostor skladišta.

2. REGULATIVA ZAŠTITE OD POŽARA U SKLADIŠTIMA

2.1. Općenito

Zakonom o zaštiti od požara (NN 92/10) [3] propisana je obveza donošenja Pravilnika kojim je definirana potrebna otpornost nosive konstrukcije građevine u slučaju požara kao i drugi zahtjevi koje građevina mora ispuniti u slučaju požara. Na osnovu toga donesen je Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13, 87/15) [4]. Generalno, navedeni je Pravilnik primjenjiv na različite vrste građevina odnosno građevine različitih namjena. Za određene namjene kao što su skladišta ili ugostiteljski objekti unutar hrvatske regulative postoje Pravilnici koji detaljnije propisuju uvjete zaštite od požara u tim objektima. Budući da u Hrvatskoj postoji Pravilnik koji definira zahtjeve za zaštitom od požara u skladištima, projektiranje prema stranim propisima je moguće isključivo uz prethodno odobrenje Ministarstva unutarnjih poslova. Ministarstvu unutarnjih poslova je potrebno podnijeti zahtjev za izuzećem od Hrvatskog Pravilnika s obrazloženjem zbog čega je strani propis prikladniji za projektiranje određene građevine.

U nastavku su navedeni uvjeti za izgradnju skladišta prema Pravilniku o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08) i prema NFPA 1 te usporedba tih propisa.

2.2. Hrvatska regulativa

Pravilnikom o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08) [1] su za određene veličine skladišta i načine skladištenja robe unutar skladišta definirani uvjeti koje skladište mora zadovoljiti u slučaju požara. Pravilnik se odnosi na skladišta kojima je ukupni volumen od poda do stropa veći od 300 m³, uz uvjet da je uskladištena roba zapaljiva ili nezapaljiva, ali u zapaljivoj ambalaži. Pravilnik se ne odnosi na skladišta eksploziva, zapaljivih tekućina i plinova, skladišno prodajne prostore u koje zalaze kupci itd.

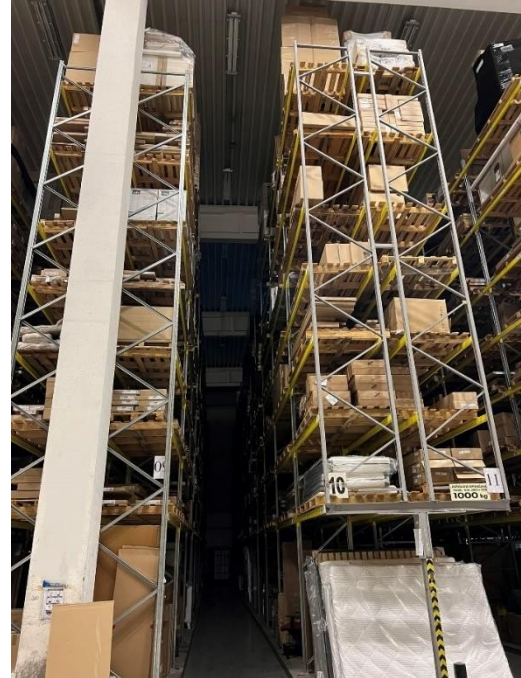
Skladišta se prema veličini požarnog odjeljka dijele na:

- mala (do 1.000 m²)
- srednja (1.000 m² do 3.000 m²)
- velika (3.000 m² do 6.000 m²)
- skladišta preko 6.000 m².

Prema načinu skladištenja robe dijele se na klasična (Slika 2.1 a), visokoregalna (Slika 2.1 b), silose (Slika 2.1 c) i hladnjače (Slika 2.1 d). Klasično skladište je skladište s uskladištenom robom do visine 9 m, dok se skladišta s uskladištenom robom visine iznad 9 m smatraju visokoregalnim skladištima.



a) klasično [5]



b) visokoregalno



c) silosi



d) hladnjača [6]

Slika 2.1 Tipovi skladišta po načinu skladištenja robe

Požarni odjeljak skladišta ne smije obuhvaćati prostore druge namjene osim ureda skladištara s pripadajućim sanitarnim čvorom ako im ukupna površina ne prelazi 20 m².

U skladištima koja imaju površinu veću od 300 m² definirano je kako se roba mora slagati u pojedinačne skupine kojima površina ne prelazi 150 m² s međusobnim razmacima tih površina od minimalno 2,4 m. Navedena vrijednost minimalnog razmaka može biti prilično ograničavajući

faktor kod projektiranja velikih modernih visokoregalnih skladišta. Uzevši u obzir napredak tehnologije skladištenja i uvođenje automatiziranih viličara kao i napredak na polju automatskih sustava za gašenje požara, izvjesno je da se zahtijevani razmak između regala može značajno smanjiti i time realizirati veći prostor za skladištenje robe.

Prema spomenutom pravilniku [1], otpornost svih nosivih dijelova slobodnostojećeg skladišta na djelovanje požara mora iznositi minimalno 30 min. Otpornost na požar dijelova konstrukcije koji se nalaze na granici požarnih odjeljaka mora iznositi 30 min kod skladišta s niskim požarnim opterećenjem (do 1.000 MJ/m²), 60 min kod skladišta sa srednjim požarnim opterećenjem (1.000 do 2.000 MJ/m²), te 90 min kod skladišta s visokim požarnim opterećenjem (preko 2.000 MJ/m²). Ukoliko je skladište manje od 6.000 m² šticeo automatskim sustavom za gašenje požara, ne postavljaju se zahtjevi za otpornost na požar nosive konstrukcije.

Pravilnikom [1] je definirano i ukoliko je nosiva konstrukcija skladišta izrađena od čelika koji nije vatrootporno šticeo. U tom slučaju potrebno je dokazati kako čelična konstrukcija pri djelovanju temperature od 500 °C neće doživjeti kolaps.

Sva skladišta na koja se odnosi Pravilnik [1] moraju biti šticeo unutarnjom hidrantskom mrežom, vanjskom hidrantskom mrežom i prijenosnim vatrogasnim aparatima za početno gašenje požara. U nastavku su navedene dodatne mjere zaštite od požara koje moraju biti ispunjene u skladištima u odnosu na njihovu veličinu, vrstu skladištenja i razinu požarnog opterećenja u njima.

Tablica 2.1. Dodatne mjere zaštite od požara u skladištima [1]

Požarno opterećenje	do 1 GJ/m ²			1 GJ/m ² do 2 GJ/m ²			iznad 2 GJ/m ²		
	Malo	Srednje	Veliko	Malo	Srednje	Veliko	Malo	Srednje	Veliko
Klasično skladište	.*	O ili V ili S	O i V ili S	O i V ili S	O i V ili S	O i S	O i V ili S	O i S	O i S
Visokoregalno skladište	S	S	O i S	S	O i S	O i S	O i S	O i S	O i S

Značenje oznaka u tablicama:

* – nisu potrebne dodatne mjere zaštite

O – sustav za odvođenje dima i topline

V – sustav za dojavu požara

S – sprinkler sustav ili drugi automatski sustav za gašenje požara

Iz Tablice 2.1 je vidljivo kako malo klasično skladište u kojemu se nalazi roba s niskim požarnim opterećenjem nema dodatnih zahtjeva za zaštitom od požara. Izvedba sprinkler sustava ili drugog automatskog sustava za gašenje požara je obavezna u svim visokoregalnim skladištima, dok kod klasičnih skladišta postaje obavezna tek u velikom skladištu sa srednjim požarnim opterećenjem te u srednjem i velikom skladištu s visokim požarnim opterećenjem.

Broj evakuacijskih izlaza iz skladišta se određuje u odnosu na maksimalno dozvoljenu ukupnu dužinu puta evakuacije iz bilo koje točke skladišnog prostora do vanjskog prostora ili do sigurnosno evakuacijskog stubišta. Tako je definirana najveća ukupna duljina evakuacijskog puta od 40 m za građevine bez ugrađenog stabilnog sustava za gašenje požara, odnosno 60 m u građevinama s ugrađenim stabilnim sustavom za gašenje požara. Skladišta veća od 300 m² ili s požarnim opterećenjem većim od 1.000 MJ/m² moraju imati minimalno dva izlaza međusobno udaljena za najmanje pola dijagonale skladišnog prostora odnosno požarnog odjeljka.

Sukladno Pravilniku o uvjetima za vatrogasne pristupe (NN 35/94, 55/94, 142/03) [7], vatrogasni pristup do skladišta mora biti osiguran najmanje s dvije duže strane građevine. S druge strane, Pravilnikom o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08) [1] broj vatrogasnih pristupa definiran je veličinom skladišta i načinom skladištenja robe u skladištu. Konkretno, definirano je kako vatrogasni pristupi do skladišta moraju biti osigurani s jedne strane za mala skladišta, s dvije strane za srednja i velika skladišta te s tri strane za visokoregalna skladišta i skladišta preko 6.000 m². Da bi se vatrogasni pristup mogao koristiti u tu svrhu, bitno je da se na tom pročelju nalaze otvori kroz koje vatrogasci mogu izvršiti evakuaciju i pristupiti gašenju požara. Vatrogasni pristupi uz pročelja zgrade na kojima ne postoje otvori za pristup vatrogascima kako bi mogli izvršiti evakuaciju i gašenje požara se ne mogu koristiti kao vatrogasni pristupi. Pravilnikom o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13, 87/15) [4] je definirano kako se na pročeljima na svakih 25 m mjereno od osi prozora moraju izvoditi prozori minimalne dimenzije 0,8 x 1,2 m s parapetom 0,9 do 1,2 m na unutarnjoj strani pročelja.

2.3. Strana regulativa

NFPA (engl. *National Fire Protection Association*) je neprofitna organizacija osnovana 1896. godine [8]. Njihova vizija je biti vodeća svjetska organizacija čiji se standardi temelje na istraživanjima različitih požarnih scenarija u različitim vrstama građevina kako bi se dobile što

realnije informacije o požarnim uvjetima te se na osnovu njih propisale optimalne mjere zaštite od požara. NFPA je propisao preko 300 standarda o zaštiti od požara, električnim i drugim opasnostima.

NFPA 1 Fire Code propisuje minimalne zahtjeve zaštite od požara koji se odnose na zaštitu života i imovine od djelovanja požara ili eksplozija [2]. NFPA 101 Life Safety Code je najčešće korišteni izvor strategija za zaštitu ljudi na temelju vrste konstrukcije, požarne zaštite i namjene prostora [9].

Poglavlje 34 u NFPA 1 [2] govori o klasifikaciji skladišta i o uvjetima za izgradnju skladišnih objekata. Na samom početku su navedeni prostori na koje se ovo poglavlje ne odnosi: skladišta nezapaljivog materijala u nezapaljivoj ambalaži, podna skladišta žitarica i ugljena, skladišta u kojima se roba skladišti na plastičnim policama itd.

Skladišta su, prema [2], klasificirana u četiri klase prema vrsti robe koja se u njima skladišti:

- Klasa I. – nezapaljivi proizvodi skladišteni na paletama ili obloženi jednim slojem kartona.
- Klasa II. – nezapaljivi proizvodi skladišteni u drvenim sanducima ili obloženi s više slojeva kartona.
- Klasa III. – proizvodi izrađeni od drva, papira, prirodnih vlakana, plastike skupine C ili do 5% ekspandirane ili neekspandirane plastike skupine A ili B.
- Klasa IV. – proizvodi izrađeni djelomično ili potpuno od plastike skupine B ili do 15% neekspandirane odnosno 25% ekspandirane plastike skupine A.

Zasebna klasa su plastike skupine A, kao i skladišta guma, papira u rolama itd.

Standardom je definiran minimalni razmak između stropa i uskladištene robe za slučaj da nije instalirana sprinkler instalacija koji u tom slučaju iznosi 61 cm. U slučaju kada je instalirana sprinkler instalacija, tada razmak između prskalice i uskladištene robe mora iznositi minimalno 45 cm.

U NFPA 101 [9] navedena je klasifikacija prema opasnosti sadržaja koji se nalazi u građevini i opasnosti se svrstavaju u tri kategorije:

- Niska opasnost – ukoliko se u objektu može naći samo negoriva roba u negorivoj ambalaži
- Visoka opasnost – ukoliko se u objektu nalaze zapaljive tekućine, postoji mogućnost pojave zapaljivih para koje mogu izazvati pojavu eksplozivne atmosfere, prašine raznih žitarica, drva, plastike, aluminijska, magnezij i druge eksplozivne prašine itd.
- **Uobičajena opasnost** – sve ostalo.

Poglavljem 13.3., u NFPA 1 [2], je propisana obaveza ugradnje sprinkler sustava za visokoregalna skladišta zapaljivog materijala preko 232 m² kao i za klasična skladišta zapaljivog materijala preko 1115 m². Ukoliko je projektiranje sprinkler instalacije provedeno u skladu s poglavljem 13.3. čeličnu konstrukciju skladišta nije potrebno štiti od požara.

Skladišta s uskladištenom robom niske opasnosti od nastanka požara ne trebaju imati instaliran sustav vatrodjave. Skladišta s robom uobičajene ili visoke opasnosti od nastanka požara ne moraju imati instaliran sustav vatrodjave ukoliko površinom nisu veća od 9.300 m². Ukoliko su skladišta štice sprinkler sustavom ne moraju imati sustav vatrodjave budući da će sprinkler instalacija nakon prorade poslati obavijest nadležnoj vatrogasnoj službi o izbijanju požara.

Skladišta također moraju biti štice prijenosnim vatrogasnim aparatima te unutarnjom i vanjskom hidrantskom mrežom.

Nastavno na provedena istraživanja od strane NFPA-a zaključeno je kako sustav odvodnje dima i topline nema utjecaja na građevine s ugrađenim sprinkler sustavom i kako je odvodnja dima i topline važna samo kod ručnog gašenja požara. Ukoliko je prostor skladišta štice ESFR (engl. *Early Suppression Fast-Response*) sprinkler sustavom, otvorima za odvodnju dima i topline se mora upravljati ručno ili moraju posjedovati mehanizam s topivim elementom na temperaturi od 182 °C.

Širina prolaza između regala kao i dubina regala nisu ograničeni standardom nego se oni određuju u odnosu na odabranu tehnologiju skladištenja.

Dužine evakuacijskih puteva su različite u odnosu na kategoriju u koju je svrstana građevina prema opasnosti te ovisno o tome je li u građevini instaliran sprinkler sustav ili ne.

Tablica 2.2. Maksimalna ukupna dužina evakuacijskog puta [9]

Razina opasnosti / Zaštita prostora	Niska opasnost (m)	Uobičajena opasnost (m)	Visoka opasnost (m)
Prostor štice sprinkler sustavom	Nema ograničenja	122	30
Prostor nije štice sprinkler sustavom	Nema ograničenja	61	23

2.4. Usporedba propisa

NFPA 1 [2] za razliku od Pravilnika o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08) [1] puno detaljnije obrađuje vrstu robe koja će se skladištiti unutar skladišta, načine skladištenja, precizno definira

uvjete za skladištenje itd., sažeto prikazano u Tablici 2.3. Tako je definiran minimalni razmak od uskladištene robe do stropa, minimalni razmak od sprinkler mlaznica do uskladištene robe. Definirano je da ukoliko se roba skladišti iznad donje pojasnice glavnog krovnog nosača mora biti odmaknuta od njega minimalno 30 cm kako bi se osiguralo hlađenje sprinkler sustavom ili nosač mora biti šticećen požarnom zaštitom 60 min. Uskladišteni materijal mora biti udaljen minimalno 90 cm u svim smjerovima od sustava grijanja objekta itd.

Tablica 2.3 Usporedba propisa

	NFPA 1	Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08)
Sustav za odvođenje dima i topline	nema utjecaja na gašenje požara sprinkler sustavom	propisan u većini slučajeva uz sprinkler instalaciju ili bez nje
Obveza ugradnje sprinkler sustava	visokoregalna skladišta zapaljive robe površine veće od 232 m ² klasična skladišta zapaljive robe površine veće od 1.115 m ²	sva visokoregalna skladišta klasična skladišta: velika skladišta sa srednjim požarnim opterećenjem te srednja i velika skladišta s visokim požarnim opterećenjem
Ukupna duljina evakuacijskih puteva	122 m uz ugrađen sprinkler sustav 61 m bez ugrađenog sprinkler sustava.	60 m uz ugrađen sprinkler sustav 40 m bez sprinkler sustava
Požarna otpornost	ne postavlja zahtjeve za požarnom zaštitom nosive konstrukcije ukoliko su usvojene sve mjere u skladu s NFPA standardom	30 minuta osim kod skladišta površine manje od 6.000 m ² s instaliranim sprinkler sustavom, kada nije tražena požarna otpornost konstrukcije

Hrvatskim pravilnikom [1] je u odnosu na veličinu skladišta, način skladištenja robe i požarno opterećenje definirana obaveza ugradnje sustava za odvođenje dima i topline, sustava za dojavu požara i sprinkler sustava. Sustav za odvođenje dima i topline je propisan u većini slučajeva uz sprinkler instalaciju ili bez nje. NFPA je većinu ispitivanja sprinkler sustava proveo bez sustava za odvodnju dima i topline te su zaključili kako nema utjecaja na gašenje požara sprinkler sustavom.

Sustav za odvođenje dima i topline je bitan prilikom ručnog gašenja požara zbog vidljivosti i zaštite vatrogasaca.

Ugradnja sprinkler sustava je hrvatskim Pravilnikom [1] definirana za sva visokoregalna skladišta, dok kod klasičnih skladišta postaje obavezna tek u velikom skladištu sa srednjim požarnim opterećenjem te u srednjem i velikom skladištu s visokim požarnim opterećenjem. S druge strane NFPA 1 [2] je definirao obvezu ugradnje u visokoregalnim skladištima zapaljive robe čija je površina preko 232 m², a klasičnim skladištima zapaljive robe čija je površina preko 1115 m².

NFPA nema ograničenje u veličini površine na kojoj će se skladištiti roba od 150 m kao ni udaljenost do slijedeće površine za skladištenje u svim smjerovima od 2,4 m, nego raspored i veličinu regala za skladištenje robe kao i prolaze između regala određuje tehnologija skladišta.

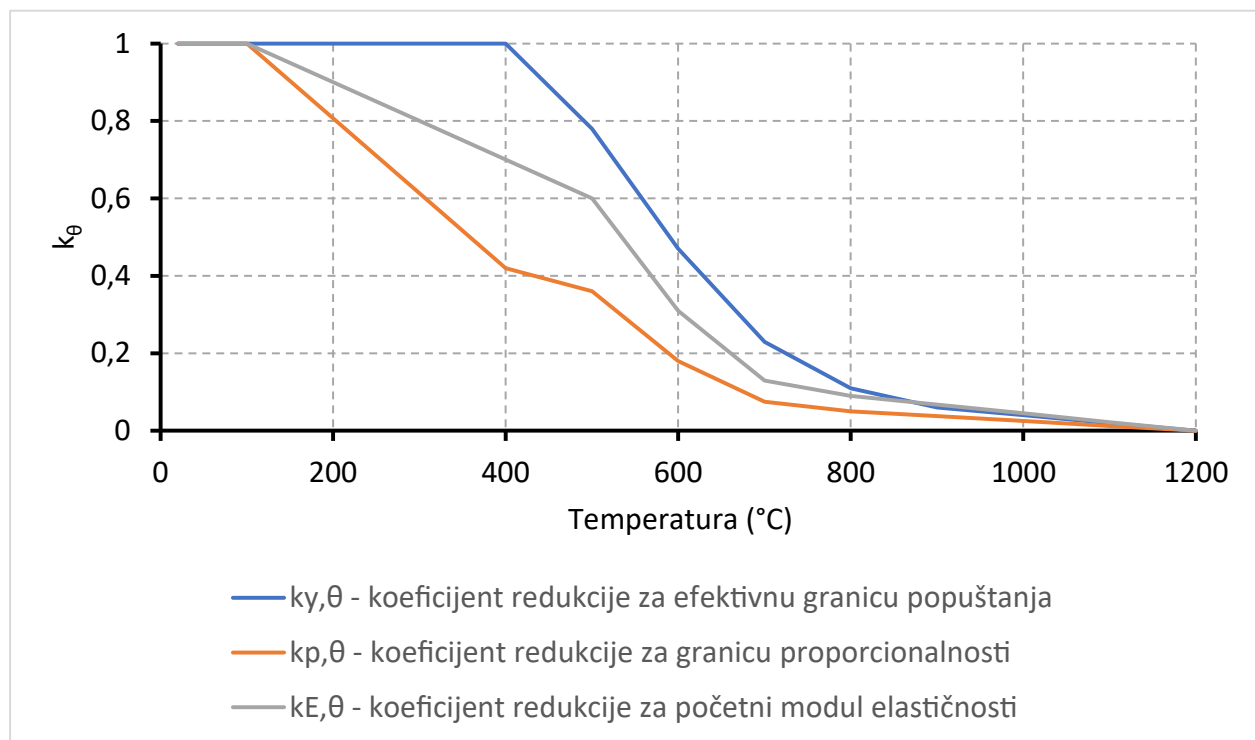
Ukupne duljine evakuacijskih puteva su u hrvatskom Pravilniku [1] ograničene na 60 m uz ugrađen sprinkler sustav odnosno 40 m bez sprinkler sustava, dok je NFPA za uobičajenu požarnu opasnost ukupnu duljinu evakuacijskog puta ograničio na 122 m uz ugrađen sprinkler sustav odnosno 61 m bez ugrađenog sprinkler sustava.

Požarna otpornost nosive konstrukcije je Pravilnikom o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08) tražena 30 minuta osim kod skladišta površine manje od 6.000 m² s instaliranim sprinkler sustavom, kada nije tražena požarna otpornost konstrukcije. NFPA ne postavlja zahtjeve za požarnom zaštitom nosive konstrukcije ukoliko su usvojene sve mjere u skladu s NFPA standardom.

3. NAČINI ZAŠTITE ČELIČNE KONSTRUKCIJE OD DJELOVANJA POŽARA

3.1. Općenito

Povećanjem temperature u čeličnim konstrukcijama dolazi do smanjenja modula elastičnosti i granice popuštanja. Na temperaturama do 400 °C se vlačna čvrstoća neznatno povećava, a preko tih temperatura dolazi do naglog snižavanja [10]. Granica popuštanja je na 500 °C smanjena za oko 20 % dok je već na 600 °C smanjena za 50 %. Na Slici 3.1 je vidljiv odnos porasta temperature i redukcijskih faktora za izračun granice popuštanja, granice proporcionalnosti te modula elastičnosti.



Slika 3.1. Koeficijenti za izračun granice popuštanja, granice proporcionalnosti i modula elastičnosti [11]

Kako ne bi došlo do kolapsa konstrukcije pri djelovanju visokih temperatura, čeličnu konstrukciju je potrebno štiti. Zaštita čelične konstrukcije na djelovanje požara se dijeli na dvije osnovne grupe, a to su aktivne i pasivne mjere. Aktivnom zaštitom čelične konstrukcije se smatra ugradnja sprinkler sustava. U današnje vrijeme tri najrasprostranjenije vrste pasivne zaštite su oblaganje konstrukcije protupožarnim pločama, protupožarne žbuke i protupožarni (ekspandirajući) premazi. Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke koji ju čine prikladnom za

postavljanje u prostorima različite namjene i s različitim stupnjem požarne zaštite. Udio zaštite protupožarnim premazima je oko 70 %, oblaganje protupožarnim pločama oko 25 %, a protupožarne žbuke oko 3 % [12].

U nastavku je naveden tablični prikaz matrice za odabir optimalnog sustava pasivne zaštite čelične konstrukcije.

Tablica 3.1 Matrica za odabir optimalnog sustava pasivne zaštite čelične konstrukcije [13]

R	30	60	90	120	180
Ograničenje mase	premaz	premaz	žbuka	žbuka	žbuka
Estetski izgled	premaz	ploče/premaz	ploče	ploče	ploče
Vlažnost	ploče	ploče/žbuka	ploče/žbuka	ploče/žbuka	ploče/žbuka
Mehanička otpornost	ploče/premaz	ploče	ploče	ploče	ploče
Zahtjev u pogledu negorivosti A1	ploče	ploče/žbuka	ploče/žbuka	ploče/žbuka	ploče/žbuka
Suha montaža	ploče	ploče	ploče	ploče	ploče
Dimenzije malih profila	ploče/premaz	ploče/premaz	ploče	ploče	ploče
Niske temperature	ploče	ploče	ploče	ploče	ploče
Vrijeme potrebno za montažu	premaz	ploče/žbuka	ploče/žbuka	ploče/žbuka	ploče

3.2. Protupožarne ploče

Protupožarne ploče se smatraju najpouzdanijim sustavom zaštite čelične konstrukcije. Obično se proizvode kao mineralne ploče ojačane vlaknima i punilima [12]. Pogodne su za ugradnju u vanjske i unutarnje prostore, a površinska obrada može biti u raznim bojama. Dostupne su u raznim debljinama, a mogu se postavljati i u više slojeva. Ugradnja ploča se vrši na gradilištu i relativno je jednostavna. Nisu pogodne za zaštitu rešetkastih nosača, ali u tom slučaju postoji mogućnost izvedbe protupožarne stropne membrane u obliku spuštenog stropa. Problem s

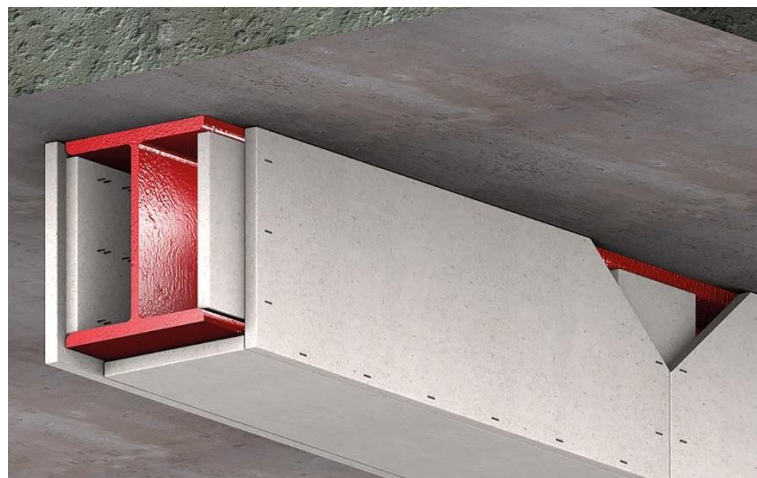
protupožarnim pločama je velika debljina kod velike požarne otpornosti kao i težina kod ploča velike gustoće.

Prednosti u odnosu na druge pasivne metode zaštite:

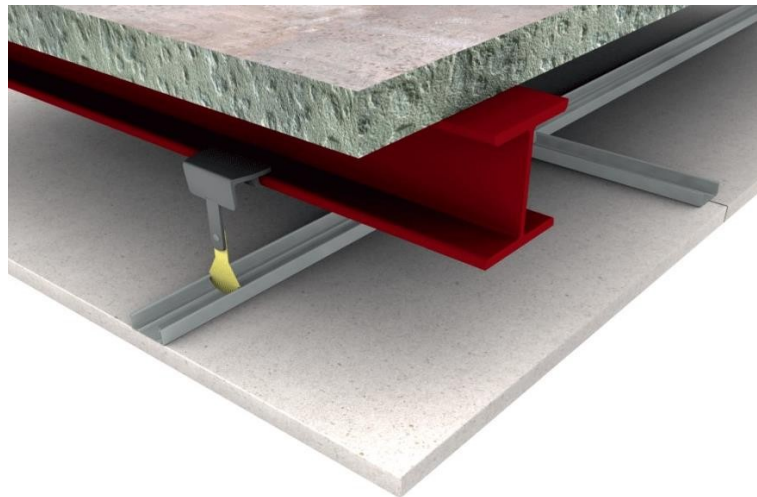
- brza i jednostavna montaža
- mogu se ugrađivati u svim uvjetima
- otpornost na vlagu
- otpornost na udarce
- lagana zamjena
- trajnost
- cijena kod visokih klasa otpornosti na požar
- estetski izgled – oblik kutije koji se površinski može obraditi po želji
- manja razvijena površina zaštite

Nedostaci:

- cijena kod niskih klasa otpornosti na požar
- estetski izgled – čelična konstrukcija nije vidljiva



Slika 3.2. Zaštita konstrukcije protupožarnim pločama [12]



Slika 3.3. Izvedba protupožarne zaštitne membrane [12]

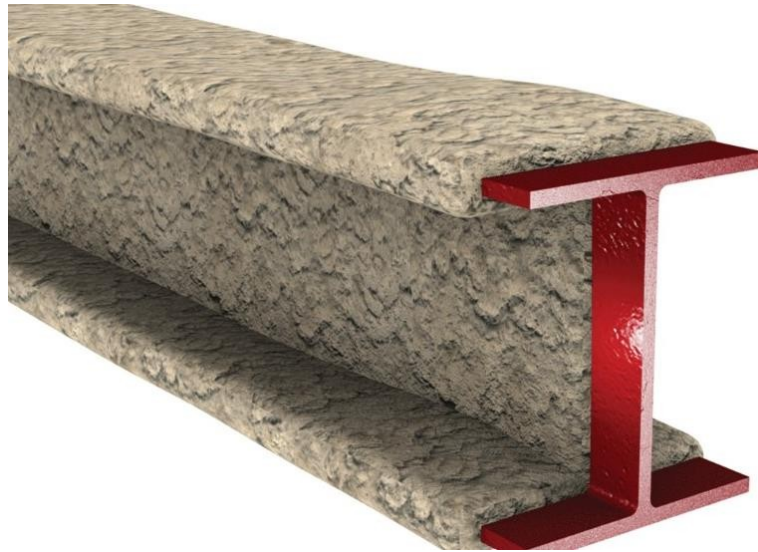
3.3. Protupožarne žbuke

Protupožarne žbuke se mogu sastojati od cementnih vlakana, vermikulita i gipsa [12]. Nanose se špricanjem na gradilištu u debljini 10 do 70 mm što utječe na izvođenje ostalih vrsta radova jer će se prostor jako zaprljati te se za to vrijeme drugi radovi ne mogu izvoditi. Nisu pogodne za primjenu na manjim čeličnim profilima zbog velikog rasipanja prilikom nanošenja. Primjenjuju se najčešće na mjestima gdje nosiva konstrukcija nije vidljiva jer je nanošenje neravnomjerno. Prednosti protupožarne žbuke su mala cijena te dobra apsorpcija zvuka. Troškovi ugradnje se ne povećavaju razmjerno s debljinom nanesenog sloja jer glavni dio troška se odnosi na rad i opremu. Problem sa protupožarnim žbukama je što se lagano oštećuju i zauzimaju dosta prostora [12]. Prednosti u odnosu na druge pasivne metode zaštite:

- cijena (najpovoljniji od ove tri pasivne mjere zaštite)
- nanosi se na licu mjesta
- brzina izvedbe
- otpornost na vlagu (žbuke na bazi cementa)
- trajnost (deklarirana trajnost prema normi 25 godina)

Nedostatci su im:

- otpornost na vlagu (gips-vermikulitne žbuke)
- budući da se nanose špricanjem, zaprlja se cijeli prostor
- zahtjeva posebne klimatske uvjete za nanošenje i sušenje (temperatura, vlaga)
- estetski izgled (gruba, neuredno nanesena površina)
- otpornost na oštećenja
- veća razvijena površina zaštite



Slika 3.4. Zaštita konstrukcije protupožarnom žbukom [12]

3.4. **Ekspandirajući** premazi

Ekspandirajući premazi su najzastupljenija zaštita čelične konstrukcije jer imaju brojne prednosti u odnosu na ostale vrste zaštite [12]. Financijski gledano su dosta povoljni što ponajviše ovisi o klasi otpornosti na požar, a zbog tankog sloja u kojemu se nanose gotovo su neprimjetni. Nanošenjem premaza se zadržava izvorni izgled čelične konstrukcije uz mogućnost odabira raznih boja završnog sloja.

Pri porastu temperature u premazu se događa kemijska reakcija i premazi bubre stvarajući toplinsko izolacijski sloj koji štiti čeličnu konstrukciju od visokih požarnih temperatura. Premazi ovisno o vrsti ekspandiraju 10 do 100 puta u odnosu na naneseni sloj. Premazi se nanose tlačnim prskanjem ili premazivanjem valjcima u dva do tri sloja: temeljni premaz, protupožarni premaz te završni premaz (estetski) po potrebi. Nanošenje protupožarnog premaza je u sloju debljine 0,1 do 5 mm. Premazivanje se može vršiti u radionici ili na gradilištu. Prednosti premazivanja u radionici su što se premaz nanosi u kontroliranim uvjetima te nanošenje premaza nema utjecaj na tijek izvođenja radova na gradilištu. Ukoliko se premazivanje izvodi u radionici, na gradilištu je potrebno obraditi spojeve. Problem s premazima je njihov vijek trajanja te se zbog toga moraju vršiti periodički pregledi konstrukcije zaštićene s protupožarnim premazima [12].

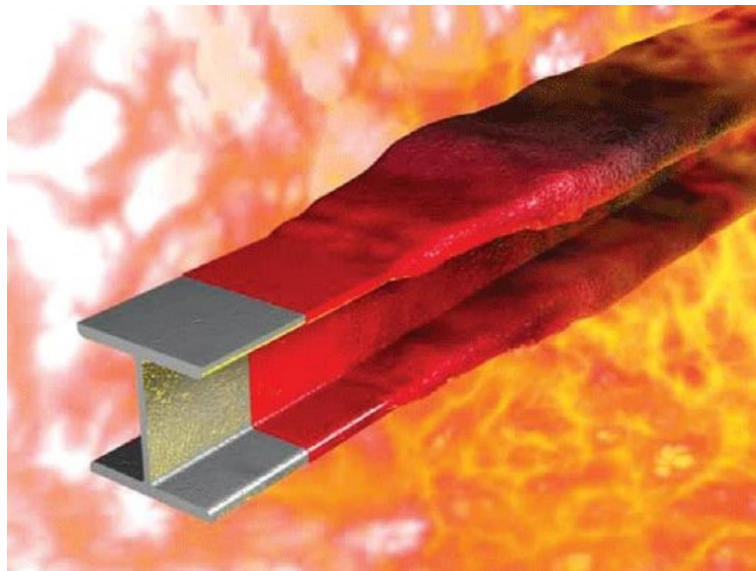
Prednosti u odnosu na druge pasivne metode zaštite:

- mala debljina premaza
- estetski zadržavaju izgled profila,

- moguće ih je nanositi u radionici
- cijena (ovisno o klasi otpornosti na požar).

Nedostatci su im:

- zahtijevaju ograničene uvjete za nanošenje (temperatura, vlaga, priprema podloge)
- osjetljivi su na vlagu (potrebni su dodatni zaštitni premazi)
- trajnost (prema normi deklarirana trajnost ne može biti veća od 10 godina)
- kod većih klasa otpornosti na požar zahtijevaju puno slojeva
- otpornost na oštećenja
- potrebna stručna kontrola debljine – nadzor
- veća razvijena površina zaštite



Slika 3.5. Protupožarni ekspandirajući premaz nakon testiranja [14]

3.5. Sprinkler sustav

Dijelovi sprinkler sustava su: siguran izvor vode, sprinkler stanica te cijevni razvod sa sprinkler mlaznicama. Ukoliko u javnoj vodovodnoj mreži nije dostatan tlak ni zahtijevana količina vode za ispravno funkcioniranje sprinkler sustava pristupa se gradnji spremnika s pumpama za podizanje tlaka.

Sprinkler sustavi se dijele na suhe i mokre sprinkler instalacije. Ovisno o požarnom opterećenju i vrsti sprinkler mlaznica određuje se djelotvorna površina jedne mlaznice. Mlaznice su u prostoru raspoređene na način da cijeli prostor bude zaštićen. Dijelovi mlaznice su: raspršivač, ampula odnosno topivi element, pladanj i tijelo sprinkler mlaznice. Mlaznice se dijele prema tipu raspršivača, smjeru ugradnje, brzini aktiviranja, K faktoru i temperaturi aktiviranja. [15] K faktor

predstavlja količinu vode koju mlaznica osigurava. Ampule se razlikuju prema temperaturi aktiviranja koja mora biti minimalno 30 °C veća od maksimalne temperature koja se može pojaviti u normalnim uvjetima rada [16].

Današnji sprinkler sustavi automatski po proradi vrše i dojavu požara. Klasični sprinkler sustav nije predviđen za gašenje požara nego za njegovo lokaliziranje do dolaska vatrogasne službe, mada ga u većini slučajeva uspijeva u potpunosti ugasiti. ESFR (engl. *Early Suppression Fast Response*) je tip sprinkler instalacije razvijen za ugradnju u skladišne prostore i zadaća mu je gašenje požara. Za ugradnju ESFR sustava propisane su detaljne upute oko načina skladištenja robe kako bi se omogućilo vertikalno širenje požara, a horizontalno svelo na minimum.

Sprinkler sustav je dizajniran na način da ne reagira na dim ili kuhinjske pare nego se aktiviraju samo mlaznice na kojima se pojavi temperatura veća od temperature na kojoj se aktivira ampula. U 75% slučajeva požar uspiju ugasiti jedna do četiri aktivirane sprinkler mlaznice [17].

U razvijenim zemljama osiguravajuće kuće odobravaju znatne popuste na premiju osiguranja skladišnih prostora u kojima je ugrađen sprinkler sustav te se na taj način sama u početku visoka investicija isplati u roku nekoliko godina.



Slika 3.6. Sprinkler mlaznica [18]

4. PARAMETARSKA ANALIZA ČELIČNE KONSTRUKCIJE SKLADIŠTA NA POŽAR

4.1. Uvodno o parametarskoj analizi

Skladište koje je predmet ovog specijalističkog rada je projektirano prema zahtjevima navedenim u Pravilniku o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08). Hrvatski Pravilnik definira požarnu otpornost nosive konstrukcije 30 min za razliku od NFPA standarda u kojemu ona nije tražena. Analiza stalnog opterećenja konstrukcije provedena je u skladu s HRN EN 1991-1-1 [19]. Analiza promjenjivog opterećenja provedena je za opterećenje snijegom u skladu s HRN EN 1991-1-3 [20], te za opterećenja vjetrom u skladu s HRN EN 1991-1-4 [21].

Proračunu specifičnog požarnog opterećenja prethodi odabir načina skladištenja robe u skladištu. Kao jedan od najzastupljenijih način skladištenja robe odabrano je skladištenje na drvenim paletama u regalima izrađenim od čeličnih profila. U odnosu na odabranu tehnologiju skladištenja raspoređeni su regali po skladišnom prostoru te je izračunata površina pokrivena s regalima, određena je maksimalna visina skladištenja robe i maksimalna popunjenost regala. Ti podatci su potrebni za izračun volumena koji će zauzeti uskladištena roba u prostoru. Za izračun požarnog opterećenja u nekom prostoru potrebno je znati kalorijsku vrijednost materijala od kojih je prostor izgrađen kao i onih koji se u prostoru povremeno ili stalno nalaze. Neto kalorijske vrijednosti osnovnih gorivih materijala za proračun požarnog opterećenja za svega nekoliko osnovnih namjena definirani su u sklopu HRN EN 1991-1-2 [22]. Kao priznato pravilo struke u Hrvatskoj se koristi Austrijska smjernica TRVB A 126 [23] u kojoj su navedena specifična požarna opterećenja za razne namjene građevina kao i podaci za izračun požarnog opterećenja od uskladištene robe. Vrijednosti jediničnih požarnih opterećenja su očitane iz Austrijske smjernice TRVB A 126 [23], a proračunato specifično požarno opterećenje je izraženo u odnosu na ukupnu površinu skladišnog prostora.

Nakon definiranja požarnog opterećenja pristupa se modeliranju realnog požara. Razvoj požara prolazi kroz tri faze [24]:

- Razvijanje požara
- Potpuno razvijeni požar
- Dogorijevanje

Pretpostavljeno je kako faza dogorijevanja nastupa nakon što izgori 70 % goriva u fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara.

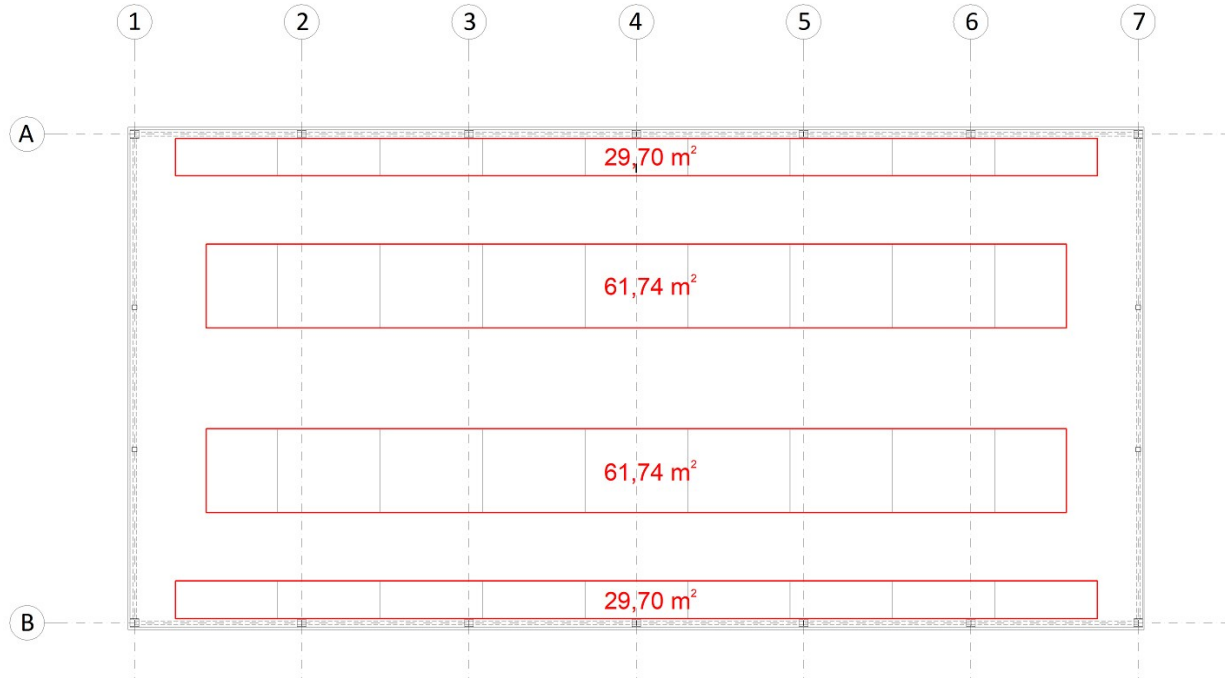
Snaga požara se određuje u odnosu na brzinu razvoja požara i vrijeme trajanja požara [24]. Snaga požara izražena po jedinici površine skladišta se označava kao RHR_f . U slučaju gorivom kontroliranih uvjeta RHR_f predstavlja najveću brzinu otpuštanja topline proizvedene na ploštini od 1 m^2 požara izraženu u kW/m^2 [22].

U skladištu su na dvije duže strane postavljeni prozori u četiri središnja polja dužine 2,75 m i visine 1 m s parapetom 3,7 m. Vrata na ulazu u objekt su dimenzije 2x2,5 m, a za potrebe proračuna je definirano da su u požaru stalno otvorena. Površina otvora u odnosu na površinu skladišta iznosi približno 6 %.

Krivulja realnog požara [25] će se odrediti putem programskog paketa Ozone v3.0.4.

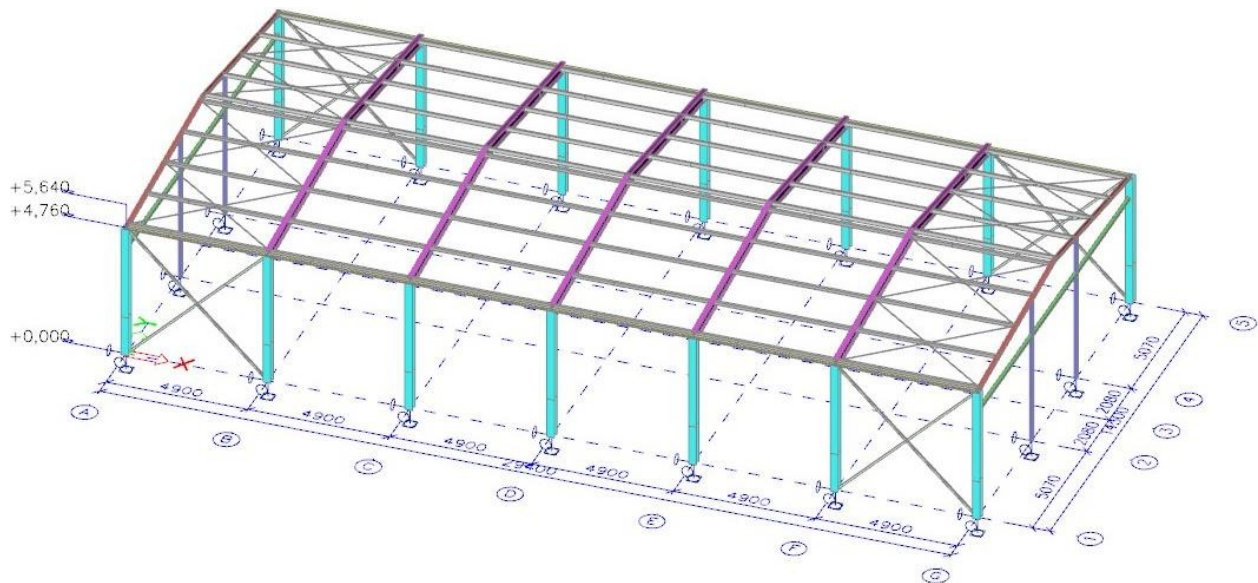
Proračun konstrukcije na djelovanje realnog požara je proveden u programskom paketu SCIA Engineer 21.1, a za proračun je korištena kombinacija opterećenja za izvanredne proračunske situacije [26].

Konstrukcija će se proračunati na ISO 834 požarnu krivulju [27] te na 5 realnih požara. Realni požari su modelirani s niskim požarnim opterećenjem, srednjim požarnim opterećenjem te s tri visoka požarna opterećenja. Navedena visoka požarna opterećenja se razlikuju po svom iznosu te po brzini razvoja požara.



Slika 4.1 Površine regala

4.2. Tehnički opis konstrukcije



Slika 4.2. 3D model konstrukcije

Tablica 4.1 Karakteristike konstrukcijskih elemenata

Poprečni presjek	Materijal	Duljina (m)
HEA 260 - Stup	S 355	4,76
IPE 360 - Glavni nosač	S 355	7,204
RHS 120/80/6,3 - Sekundarni nosač	S 235	4,9
HEA 120 - Zabatni glavni nosač	S 235	7,204
SHS 100/100/5 - Zabatni stup	S 235	5,384
HEA 100 - Ukрутna greda	S 235	4,9
SHS 100/100/5 - Zabatna ukрутna greda	S 235	5,07
SHS 60/60/4 - Vertikalni spreg	S 235	6,83
D20 - Krovni spreg	S 235	6,07

Glavnu nosivu konstrukciju zgrade čini sustav portalnih okvira postavljenih na rasteru od 4,90 m, ukupno sedam (7) komada. Raspon okvira iznosi 14,30 m. Visina nosivog sustava u vijencu je cca 4,90 m, dok je visina u sljemenu cca 5,80 m. Stupovi i rasponska konstrukcija su izrađeni od čelika kvalitete S355, dok je ostatak konstrukcije izrađen od čelika kvalitete S235. Po dužoj strani skladišta s obje strane su postavljeni prozori koji služe za osvjetljenje skladišnog prostora. Prozori su postavljeni u četiri središnja polja dužine 2,75 m i visine 1 m s parapetom 3,7 m. Vrata za ulaz u objekt su dimenzije 2x2,5 m. Površina otvora u odnosu na površinu poda skladišta iznosi približno 6 %.

Stupovi okvira se izvode od vruće valjanih čeličnih profila HEA 260 koji su zglobno povezani s temeljnom konstrukcijom.

Grede portalnog okvira izvode se od vruće valjanih čeličnih profila IPE 360, a sa stupovima su povezane vijčanom vezom.

Sekundarni krovni nosači postavljani su okomito na glavne nosače na međusobnom razmaku od 1,79 m. Izvode se od cijevnih čeličnih profila RHS 120/80/6,3 mm te su statičkog sustava prosta greda.

Stabilnost konstrukcije u poprečnom smjeru osigurana je okvirnim djelovanjem, dok je u uzdužnom smjeru osigurana vertikalnim veznim sustavom. Vertikalni vezni sustav izvodi se od cijevnih čeličnih profila SHS 60/60/4 mm. Krutost krovne ravnine osigurana je izvedbom krovnog veznog sustava (šipke $\Phi 20$) predviđenih za prihvat isključivo vlačnih naprezanja.

Krovni pokrov izvodi se od termo panela debljine 10 cm u nagibu od 7°.

4.3. Izračun požarnog opterećenja i snage požara

4.3.1. Nisko požarno opterećenje – bezalkoholna pića

Kao primjer niskog požarnog opterećenja pretpostavljeno je da će se skladištiti bezalkoholna pića kojima je jedinično požarno opterećenje 300 MJ/m^3 , a brzina razvoja požara okarakterizirana kao srednje brzi požar.

- Površina predviđena za skladištenje robe:	182,88 m ²
- Površina skladišta:	431,55 m ²
- Visina skladištenja:	3,7 m
- Popunjenost regala:	70 %
- Požarno opterećenje od bezalkoholnih pića:	300 MJ/m ³
- Požarno opterećenje od paleta:	400 MJ/paleta

Proračun požarnog opterećenja:

- Volumen prostora za skladištenje robe:
 $182,88 \text{ m}^2 \times 3,70 \text{ m} = 676,66 \text{ m}^3$
- Ukupno požarno opterećenje od bezalkoholnih pića:
 $300 \text{ MJ/m}^3 \times 676,66 \text{ m}^3 \times 0,7 = 142.098,60 \text{ MJ}$
- Ukupno požarno opterećenje od paleta:
 $400 \text{ MJ/paleti} \times 308 \text{ paleta} = 123.200 \text{ MJ}$
- Ukupno požarno opterećenje:
 $Q = 142.098,60 \text{ MJ} + 123.200 \text{ MJ} = 265.298,60 \text{ MJ}$

- Specifično požarno opterećenje po m²:

$$Q' = 265.298,60 \text{ MJ} / 431,55 \text{ m}^2 = 614,76 \text{ MJ/m}^2 \approx 615 \text{ MJ/m}^2$$

- Požarno opterećenje u fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara:

$$Q_1 = 0,7 \times Q = 0,7 \times 265.298,60 = 185.709,02 \text{ MJ}$$

1. Faza – faza razvoja požara

- Pretpostavka: maksimalna snaga potpuno razvijenog požara

$$Q^* = 74 \text{ MW}$$

- Faktor razvoja požara za srednje brzi požar iznosi:

$$\alpha_r = 0,01170 \text{ kW/s}^2$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{Q^*}{\alpha_r}} = \sqrt{\frac{74.000}{0,01170}} = 2.515 \text{ s}$$

$$Q_{1,1} = \frac{t_1 \times Q^*}{3} = \frac{2.515 \times 74}{3} = 62.037 \text{ MJ}$$

2. Faza – faza potpuno razvijenog požara

$$t_2 = 590 \cdot f^{0,3} = 590 \cdot 32,37^{0,3} = 1.675 \text{ s}$$

$$f = \frac{Q'}{19} = \frac{615}{19} = 32,37 \text{ kg/m}^2$$

$$Q_{1,2} = t_2 \times Q^* = 1.675 \times 74 = 123.950 \text{ MJ}$$

$$Q_1 = Q_{1,1} + Q_{1,2} = 62.037 + 123.950 = 185.987 \text{ MJ} \approx 185.709,02 \text{ MJ}$$

$$\text{RHR}_f = \frac{Q^*}{P} = \frac{74.000}{431,55} = 171,47 \text{ kW/m}^2 \approx 170 \text{ kW/m}^2$$

4.3.2. Srednje požarno opterećenje – građevinski materijal

Kao primjer srednjeg požarnog opterećenja pretpostavljeno je da će se skladištiti građevinski materijal kojemu je jedinično požarno opterećenje 800 MJ/m³, dok je brzina razvoja požara okarakterizirana kao spori požar.

- Površina predviđena za skladištenje robe: 182,88 m²
- Površina skladišta: 431,55 m²
- Visina skladištenja: 3,7 m
- Popunjenost regala: 70 %
- Požarno opterećenje od građevinskog materijala: 800 MJ/m³
- Požarno opterećenje od paleta: 400 MJ/paleta

Proračun požarnog opterećenja:

- Volumen prostora za skladištenje robe:

$$182,88 \text{ m}^2 \times 3,70 \text{ m} = 676,66 \text{ m}^3$$

- Ukupno požarno opterećenje od građevinskog materijala:

$$800 \text{ MJ/m}^3 \times 676,66 \text{ m}^3 \times 0,7 = 378.929,60 \text{ MJ}$$

- Ukupno požarno opterećenje od paleta:

$$400 \text{ MJ/paleti} \times 308 \text{ paleta} = 123.200 \text{ MJ}$$

- Ukupno požarno opterećenje:

$$Q = 378.929,60 \text{ MJ} + 123.200 \text{ MJ} = 502.129,60 \text{ MJ}$$

- Specifično požarno opterećenje po m²:

$$Q' = 502.129,60 \text{ MJ} / 431,55 \text{ m}^2 = 1.163,55 \text{ MJ/m}^2 \approx 1.160 \text{ MJ/m}^2$$

- Požarno opterećenje u fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara:

$$Q_1 = 0,7 \times Q = 0,7 \times 502.129,60 = 351.490,72 \text{ MJ}$$

1. Faza – faza razvoja požara

- Pretpostavka: maksimalna snaga potpuno razvijenog požara

$$Q^* = 91 \text{ MW}$$

- Faktor razvoja požara za srednje brzi požar iznosi:

$$\alpha_r = 0,00293 \text{ kW/s}^2$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{Q^*}{\alpha_r}} = \sqrt{\frac{91.000}{0,00293}} = 5.573 \text{ s}$$

$$Q_{1,1} = \frac{t_1 \times Q^*}{3} = \frac{5.573 \times 91}{3} = 169.048 \text{ MJ}$$

2. Faza – faza potpuno razvijenog požara

$$t_2 = 590 \cdot f^{0,3} = 590 \cdot 61,05^{0,3} = 2.026 \text{ s}$$

$$f = \frac{Q'}{19} = \frac{1.160}{19} = 61,05 \text{ kg/m}^2$$

$$Q_{1,2} = t_2 \times Q^* = 2.026 \times 91 = 184.366 \text{ MJ}$$

$$Q_1 = Q_{1,1} + Q_{1,2} = 169.048 + 184.366 = 353.414 \text{ MJ} \approx 351.490,72 \text{ MJ}$$

$$\text{RHR}_f = \frac{Q^*}{P} = \frac{91.000}{431,55} = 210,87 \text{ kW/m}^2 \approx 210 \text{ kW/m}^2$$

4.3.3. Visoko požarno opterećenje – duhanski proizvodi

Jedan od primjera visokog požarnog opterećenja je skladište duhanskih proizvoda kojima je jedinično požarno opterećenje 2.000 MJ/m^3 , a brzina razvoja požara je okarakterizirana kao brzi požar.

- Površina predviđena za skladištenje robe:	182,88 m ²
- Površina skladišta:	431,55 m ²
- Visina skladištenja:	3,7 m
- Popunjenost regala:	70 %
- Požarno opterećenje od duhanskih proizvoda:	2.000 MJ/m ³
- Požarno opterećenje od paleta:	400 MJ/paleta

Proračun požarnog opterećenja:

- Volumen prostora za skladištenje robe:

$$182,88 \text{ m}^2 \times 3,70 \text{ m} = 676,66 \text{ m}^3$$
- Ukupno požarno opterećenje od duhanskih proizvoda:

$$2.000 \text{ MJ/m}^3 \times 676,66 \text{ m}^3 \times 0,7 = 947.324 \text{ MJ}$$
- Ukupno požarno opterećenje od paleta:

$$400 \text{ MJ/paleti} \times 308 \text{ paleta} = 123.200 \text{ MJ}$$
- Ukupno požarno opterećenje:

$$Q = 947.324 \text{ MJ} + 123.200 \text{ MJ} = 1.070.524 \text{ MJ}$$
- Specifično požarno opterećenje po m²:

$$Q' = 1.070.524 \text{ MJ} / 431,55 \text{ m}^2 = 2.480,65 \text{ MJ/m}^2 \approx 2.480 \text{ MJ/m}^2$$
- Požarno opterećenje u fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara:

$$Q_1 = 0,7 \times Q = 0,7 \times 1.070.524 = 749.366,80 \text{ MJ}$$

1. Faza – faza razvoja požara

- Pretpostavka: maksimalna snaga potpuno razvijenog požara

$$Q^* = 228 \text{ MW}$$

- Faktor razvoja požara za srednje brzi požar iznosi:

$$\alpha_r = 0,04660 \text{ kW/s}^2$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{Q^*}{\alpha_r}} = \sqrt{\frac{228.000}{0,0466}} = 2.212 \text{ s}$$

$$Q_{1,1} = \frac{t_1 \times Q^*}{3} = \frac{2,212 \times 228}{3} = 168,112 \text{ MJ}$$

2. Faza – faza potpuno razvijenog požara

$$t_2 = 590 \cdot f^{0,3} = 590 \cdot 130,53^{0,3} = 2,544 \text{ s}$$

$$f = \frac{Q'}{19} = \frac{2,480}{19} = 130,53 \text{ kg/m}^2$$

$$Q_{1,2} = t_2 \times Q^* = 2,544 \times 228 = 580,032 \text{ MJ}$$

$$Q_1 = Q_{1,1} + Q_{1,2} = 168,112 + 580,032 = 748,144 \text{ MJ} \approx 749,366,80 \text{ MJ}$$

$$\text{RHR}_f = \frac{Q^*}{P} = \frac{228,000}{431,55} = 528,33 \text{ kW/m}^2 \approx 530 \text{ kW/m}^2$$

4.3.4. Visoko požarno opterećenje – pločasti drveni namještaj

Primjer ekstremnijeg visokog požarnog opterećenja je skladište pločastog drvenog namještaja s jediničnim požarnim opterećenjem od 8.500 MJ/m³ i brzinom razvoja požara okarakteriziranom kao spori požar.

- Površina predviđena za skladištenje robe:	182,88 m ²
- Površina skladišta:	431,55 m ²
- Visina skladištenja:	3,7 m
- Popunjenost regala:	70 %
- Požarno opterećenje pločastog drvenog namještaja:	17 MJ/kg
- Prosječna težina pločastog drvenog namještaja:	500 kg/m ³
- Požarno opterećenje od paleta:	400 MJ/paleta

Proračun požarnog opterećenja:

- Volumen prostora za skladištenje robe:

$$182,88 \text{ m}^2 \times 3,70 \text{ m} = 676,66 \text{ m}^3$$

- Specifično požarno opterećenje pločastog drvenog namještaja po m³:

$$17 \text{ MJ/kg} \times 500 \text{ kg/m}^3 = 8.500 \text{ MJ/m}^3$$

- Ukupno požarno opterećenje od pločastog drvenog namještaja:

$$8.500 \text{ MJ/m}^3 \times 676,66 \text{ m}^3 \times 0,7 = 4.026.127 \text{ MJ}$$

- Ukupno požarno opterećenje od paleta:

$$400 \text{ MJ/paleti} \times 308 \text{ paleta} = 123.200 \text{ MJ}$$

- Ukupno požarno opterećenje:

$$Q = 4.026.127 \text{ MJ} + 123.200 \text{ MJ} = 4.149.327 \text{ MJ}$$

- Specifično požarno opterećenje po m²:

$$Q' = 4.149.327 \text{ MJ} / 431,55 \text{ m}^2 = 9.614,94 \text{ MJ/m}^2 \approx 9.615 \text{ MJ/m}^2$$

- Požarno opterećenje u fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara:

$$Q_1 = 0,7 \times Q = 0,7 \times 4.149.327 = 2.904.528,90 \text{ MJ}$$

1. Faza – faza razvoja požara

- Pretpostavka: maksimalna snaga potpuno razvijenog požara

$$Q^* = 381 \text{ MW}$$

- Faktor razvoja požara za srednje brzi požar iznosi:

$$\alpha_r = 0,00293 \text{ kW/s}^2$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{Q^*}{\alpha_r}} = \sqrt{\frac{381.000}{0,00293}} = 11.403 \text{ s}$$

$$Q_{1,1} = \frac{t_1 \times Q^*}{3} = \frac{11.403 \times 381}{3} = 1.448.181 \text{ MJ}$$

2. Faza – faza potpuno razvijenog požara

$$t_2 = 590 \cdot f^{0,3} = 590 \cdot 506,05^{0,3} = 3.820 \text{ s}$$

$$f = \frac{Q'}{19} = \frac{9.615}{19} = 506,05 \text{ kg/m}^2$$

$$Q_{1,2} = t_2 \times Q^* = 3.820 \times 381 = 1.455.420 \text{ MJ}$$

$$Q_1 = Q_{1,1} + Q_{1,2} = 1.448.181 + 1.455.420 = 2.903.601 \text{ MJ} \\ \approx 2.904.528,90 \text{ MJ}$$

$$\text{RHR}_f = \frac{Q^*}{P} = \frac{381.000}{431,55} = 882,86 \text{ kW/m}^2 \approx 880 \text{ kW/m}^2$$

4.3.5. Visoko požarno opterećenje – vezena tekstilna roba

Primjer ekstremnijeg visokog požarnog opterećenja kojemu je brzina razvoja požara okarakterizirana kao brzi požar je skladište vezene tekstilne robe s jediničnim požarnim opterećenjem od 17.000 MJ/m³.

- Površina predviđena za skladištenje robe: 182,88 m²
- Površina skladišta: 431,55 m²
- Visina skladištenja: 3,7 m
- Popunjenost regala: 70 %
- Požarno opterećenje od vezene tekstilne robe: 17.000 MJ/m³
- Požarno opterećenje od paleta: 400 MJ/paleta

Proračun požarnog opterećenja:

- Volumen prostora za skladištenje robe:

$$182,88 \text{ m}^2 \times 3,70 \text{ m} = 676,66 \text{ m}^3$$

- Ukupno požarno opterećenje od vezene tekstilne robe:

$$17.000 \text{ MJ/m}^3 \times 676,66 \text{ m}^3 \times 0,7 = 8.052.254 \text{ MJ}$$

- Ukupno požarno opterećenje od paleta:

$$400 \text{ MJ/paleti} \times 308 \text{ paleta} = 123.200 \text{ MJ}$$

- Ukupno požarno opterećenje:

$$Q = 8.052.254 \text{ MJ} + 123.200 \text{ MJ} = 8.175.454 \text{ MJ}$$

- Specifično požarno opterećenje po m²:

$$Q' = 8.175.454 \text{ MJ} / 431,55 \text{ m}^2 = 18.944,40 \text{ MJ/m}^2 \approx 18.950 \text{ MJ/m}^2$$

- Požarno opterećenje u fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara:

$$Q_1 = 0,7 \times Q = 0,7 \times 8.175.454 = 5.722.817,80 \text{ MJ}$$

1. Faza – faza razvoja požara

- Pretpostavka: maksimalna snaga potpuno razvijenog požara

$$Q^* = 927 \text{ MW}$$

- Faktor razvoja požara za brzi požar iznosi:

$$\alpha_r = 0,0466 \text{ kW/s}^2$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{Q^*}{\alpha_r}} = \sqrt{\frac{927.000}{0,0466}} = 4.460 \text{ s}$$

$$Q_{1,1} = \frac{t_1 \times Q^*}{3} = \frac{4.460 \times 927}{3} = 1.378.140 \text{ MJ}$$

2. Faza – faza potpuno razvijenog požara

$$t_2 = 590 \cdot f^{0,3} = 590 \cdot 997,37^{0,3} = 4.683 \text{ s}$$

$$f = \frac{Q'}{19} = \frac{18.950}{19} = 997,37 \text{ kg/m}^2$$

$$Q_{1,2} = t_2 \times Q^* = 4.683 \times 927 = 4.341.141 \text{ MJ}$$

$$Q_1 = Q_{1,1} + Q_{1,2} = 1.378.140 + 4.341.141 = 5.719.281 \text{ MJ} \\ \approx 5.722.817,80 \text{ MJ}$$

$$\text{RHR}_f = \frac{Q^*}{P} = \frac{927.000}{431,55} = 2.148,07 \text{ kW/m}^2 \approx 2.150 \text{ kW/m}^2$$

4.3.6. Rezime razmotrenog požarnog opterećenja

U nastavku je tablični prikaz osnovnih rezultata u ovisnosti o vrsti požarnog opterećenja.

Tablica 4.2 Prikaz osnovnih rezultata u ovisnosti o tipu požarnog opterećenja

Vrsta opterećenja	Brzina razvoja požara	Specifično požarno opterećenje (MJ/m ²)	Razina požarnog opterećenja	Maksimalna snaga požara (MW)	RHR _f (kW/m ²)
Bezalkoholna pića	Srednje brzi	615	Nisko	74	170
Građevinski materijal	Spori	1160	Srednje	91	210
Duhanski proizvodi	Brzi	2480	Visoko	228	530
Pločasti drveni namještaj	Spori	9615	Visoko	381	880
Tekstilna roba	Brzi	18950	Visoko	927	2150

4.4. Modeliranje razvoja realnog požara

4.4.1. Općenito

Modeliranje realnog požara će se provesti putem 2-zonskog modela koji pripada skupini determinističkih računalnih modela. 2-zonski model se sastoji od gornje i donje zone. Gornja zona predstavlja zonu vrućih plinova i dima dok donja zona predstavlja zonu u kojoj se zadržavaju sobna temperatura i tlak. Donja zona iščezava i model postaje 1 – zonski ukoliko se dogodi jedan od slijedećih scenarija:

- temperatura u gornjoj zoni prelazi 500°C
- dim se spušta u zonu uskladištene robe te ukoliko je temperatura dima veća od temperature paljenja robe (cca 300°C) dolazi do naglog širenja požara po cijelom sektoru
- gornja zona se prošiti na više od 80% visine prostorije
- površina požara se proširi na više od 25% površine poda

4.4.2. Svojstva požarnog odjeljka

U nastavku je zajednički dio ispisa iz programskog paketa Ozone V3.0.4 za sve požarne scenarije. U ispisu su prikazani parametri prema kojima puca staklo na otvorima, geometrijske karakteristike skladišta i građevinski materijali od kojih se skladište sastoji.

Parameters

Temperature Dependent Openings

Linear Variation

Temperature	% of Total Openings
[°C]	[%]
20	10
200	50
400	100

Compartment...

Compartment Geometry: Rectangular Floor

Height: 5,8 m

Depth: 14,55 m

Length: 29,66 m

Double Pitch Roof

Ceiling Height: 0,9

Floor

Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
	[cm]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Rel Emissivity
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000	0,8	0,8

Ceiling

Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
	[cm]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Rel Emissivity
Steel [EN1994-1-2]	0,05	7850	45	600	0,8	0,8
Glass wool Rock wool	10	60	0,037	1030	0,8	0,8
Steel [EN1994-1-2]	0,06	7850	45	600	0,8	0,8

Wall 1

Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
	[cm]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Rel Emissivity
Steel [EN1994-1-2]	0,05	7850	45	600	0,8	0,8
Glass wool Rock wool	10	60	0,037	1030	0,8	0,8
Steel [EN1994-1-2]	0,06	7850	45	600	0,8	0,8

Openings

Sill Height Hi	Soffit Height Hs	Width	Variation	Adiabatic
----------------	------------------	-------	-----------	-----------

[m]	[m]	[m]		
0	2,5	2	Constant	no

Wall 2

Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
	[cm]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Rel Emissivity
Steel [EN1994-1-2]	0,05	7850	45	600	0,8	0,8
Glass wool Rock wool	10	60	0,037	1030	0,8	0,8
Steel [EN1994-1-2]	0,06	7850	45	600	0,8	0,8

Openings

Sill Height Hi	Soffit Height Hs	Width	Variation	Adiabatic
[m]	[m]	[m]		
3,7	4,7	11	Linear	no

Wall 3

Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
	[cm]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Rel Emissivity
Steel [EN1994-1-2]	0,05	7850	45	600	0,8	0,8
Glass wool Rock wool	10	60	0,037	1030	0,8	0,8
Steel [EN1994-1-2]	0,06	7850	45	600	0,8	0,8

Wall 4

Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
	[cm]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Rel Emissivity
Steel [EN1994-1-2]	0,05	7850	45	600	0,8	0,8
Glass wool Rock wool	10	60	0,037	1030	0,8	0,8
Steel [EN1994-1-2]	0,06	7850	45	600	0,8	0,8

Openings

Sill Height Hi	Soffit Height Hs	Width	Variation	Adiabatic
[m]	[m]	[m]		
3,7	4,7	11	Linear	no

4.4.3. Požarno opterećenje i mjere zaštite**4.4.3.1. Nisko požarno opterećenje – bezalkoholna pića**

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2)

Max Fire Area: 61,74 m²

Fire Elevation: 0 m

Fuel Height: 3,7 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load qf,k	Danger of Fire Activation
		[kW/m ²]	80% Fractile [MJ/m ²]	
User Defined	300	170	615	0,78

Active Fire Fighting Measures

Automatic Water Extinguishing System		$\delta_1=1$
Independent Water Supplies		$\delta_2=1$
Automatic Fire Detection by Heat		$\delta_{3,4}=1$
Automatic Fire Detection by Smoke		
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade		$\delta_5=1$
Work Fire Brigade		$\delta_{6,7}=0,78$
Off Site Fire Brigade	on	
Safe Access Routes	on	$\delta_8=1$
Staircases Under Overpressure in Fire Alarm		
Fire Fighting Devices	on	$\delta_9=1$
Smoke Exhaust System	on	$\delta_{10}=1$

Fire Risk Area: 431,55 m² $\delta_{q,1} = 1,6$ Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2} = 0,78$ Active Measures: $\prod \delta_{n,i} = 0,78$

qf,d = 478,9

Combustion Heat of Fuel: 17,5MJ/kg

Combustion Efficiency Factor: 0,8

4.4.3.2. *Srednja požarno opterećenje – građevinski materijal*

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2)

Max Fire Area: 61,74 m²

Fire Elevation: 0 m

Fuel Height: 3,7 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load qf,k	Danger of Fire Activation
		[kW/m ²]	80% Fractile [MJ/m ²]	

User Defined	600	210	1160	0,78
--------------	-----	-----	------	------

Active Fire Fighting Measures

Automatic Water Extinguishing System		$\delta_1=1$
Independent Water Supplies		$\delta_2=1$
Automatic Fire Detection by Heat		$\delta_{3,4}=1$
Automatic Fire Detection by Smoke		
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade		$\delta_5=1$
Work Fire Brigade		$\delta_{6,7}=0,78$
Off Site Fire Brigade	on	
Safe Access Routes	on	$\delta_8=1$
Staircases Under Overpressure in Fire Alarm		
Fire Fighting Devices	on	$\delta_9=1$
Smoke Exhaust System	on	$\delta_{10}=1$

Fire Risk Area: 431,55 m² $\delta_{q,1} = 1,6$

Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2} = 0,78$

Active Measures: $\prod \delta_{n,i} = 0,78$

$q_{f,d} = 903,4$

Combustion Heat of Fuel: 17,5MJ/kg

Combustion Efficiency Factor: 0,8

4.4.3.3. **Visoko požarno opterećenje – duhanski proizvodi**

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2)

Max Fire Area: 61,74 m²

Fire Elevation: 0 m

Fuel Height: 3,7 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load $q_{f,k}$	Danger of Fire Activation
		[kW/m ²]	80% Fractile [MJ/m ²]	
User Defined	150	530	2480	0,78

Active Fire Fighting Measures

Automatic Water Extinguishing System		$\delta_1=1$
Independent Water Supplies		$\delta_2=1$
Automatic Fire Detection by Heat		$\delta_{3,4}=1$

Automatic Fire Detection by Smoke		
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade		$\delta_5=1$
Work Fire Brigade		$\delta_{6,7}=0,78$
Off Site Fire Brigade	on	
Safe Access Routes	on	$\delta_8=1$
Staircases Under Overpressure in Fire Alarm		
Fire Fighting Devices	on	$\delta_9=1$
Smoke Exhaust System	on	$\delta_{10}=1$

Fire Risk Area: 431,55 m² $\delta_{q,1} = 1,6$

Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2} = 0,78$

Active Measures: $\Pi\delta_{n,i} = 0,78$

$q_{f,d} = 1931,3$

Combustion Heat of Fuel: 17,5MJ/kg

Combustion Efficiency Factor: 0,8

4.4.3.4. **Visoko požarno opterećenje – pločasti drveni namještaj**

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2)

Max Fire Area: 61,74 m²

Fire Elevation: 0 m

Fuel Height: 3,7 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load $q_{f,k}$	Danger of Fire Activation
		[kW/m ²]	80% Fractile [MJ/m ²]	
User Defined	600	880	9615	0,78

Active Fire Fighting Measures

Automatic Water Extinguishing System		$\delta_1=1$
Independent Water Supplies		$\delta_2=1$
Automatic Fire Detection by Heat		$\delta_{3,4}=1$
Automatic Fire Detection by Smoke		
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade		$\delta_5=1$
Work Fire Brigade		$\delta_{6,7}=0,78$
Off Site Fire Brigade	on	
Safe Access Routes	on	$\delta_8=1$

Staircases Under Overpressure in Fire Alarm		
Fire Fighting Devices	on	$\delta_9=1$
Smoke Exhaust System	on	$\delta_{10}=1$

Fire Risk Area: 431,55 m² $\delta_{q,1} = 1,6$

Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2} = 0,78$

Active Measures: $\Pi\delta_{n,i} = 0,78$

$q_{f,d} = 7487,7$

Combustion Heat of Fuel: 17,5MJ/kg

Combustion Efficiency Factor: 0,8

4.4.3.5. *Visoko požarno opterećenje – vezena tekstilna roba bez sprinkler instalacije*

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2)

Max Fire Area: 61,74 m²

Fire Elevation: 0 m

Fuel Height: 3,7 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load $q_{f,k}$	Danger of Fire Activation
		[kW/m ²]	80% Fractile [MJ/m ²]	
User Defined	150	2150	18950	0,78

Active Fire Fighting Measures

Automatic Water Extinguishing System		$\delta_1=1$
Independent Water Supplies		$\delta_2=1$
Automatic Fire Detection by Heat		$\delta_{3,4}=1$
Automatic Fire Detection by Smoke		
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade		$\delta_5=1$
Work Fire Brigade		$\delta_{6,7}=0,78$
Off Site Fire Brigade	on	
Safe Access Routes	on	$\delta_8=1$
Staircases Under Overpressure in Fire Alarm		
Fire Fighting Devices	on	$\delta_9=1$
Smoke Exhaust System	on	$\delta_{10}=1$

Fire Risk Area: 431,55 m² $\delta_{q,1} = 1,6$

Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2} = 0,78$

Active Measures: $\Pi\delta_{n,i} = 0,78$ $q_{f,d} = 14757,4$

Combustion Heat of Fuel: 17,5MJ/kg

Combustion Efficiency Factor: 0,8

4.4.3.6. Vezena tekstilna roba - s ugrađenom sprinkler instalacijom

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2)

Max Fire Area: 10 m²

Fire Elevation: 0 m

Fuel Height: 3,7 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load $q_{f,k}$	Danger of Fire Activation
		[kW/m ²]	80% Fractile [MJ/m ²]	
User Defined	150	2150	18950	0,78

Active Fire Fighting Measures

Automatic Water Extinguishing System	on	$\delta_1=0,61$
Independent Water Supplies	on	$\delta_2=0,7$
Automatic Fire Detection by Heat		$\delta_{3,4}=1$
Automatic Fire Detection by Smoke		
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade	on	$\delta_5=0,87$
Work Fire Brigade		$\delta_{6,7}=0,78$
Off Site Fire Brigade	on	
Safe Access Routes	on	$\delta_8=1$
Staircases Under Overpressure in Fire Alarm		
Fire Fighting Devices	on	$\delta_9=1$
Smoke Exhaust System	on	$\delta_{10}=1$

Fire Risk Area: 431,55 m² $\delta_{q,1} = 1,6$ Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2} = 0,78$ Active Measures: $\Pi\delta_{n,i} = 0,2898$ $q_{f,d} = 5482,9$

Combustion Heat of Fuel: 17,5MJ/kg

Combustion Efficiency Factor: 0,8

4.4.4. Rezime modeliranja **razvoja realnog požara**

U nastavku je naveden tablični prikaz ulaznih podataka za modeliranje razvoja realnog požara.

Tablica 4.3 Ulazni podatci za modeliranje razvoja realnog požara

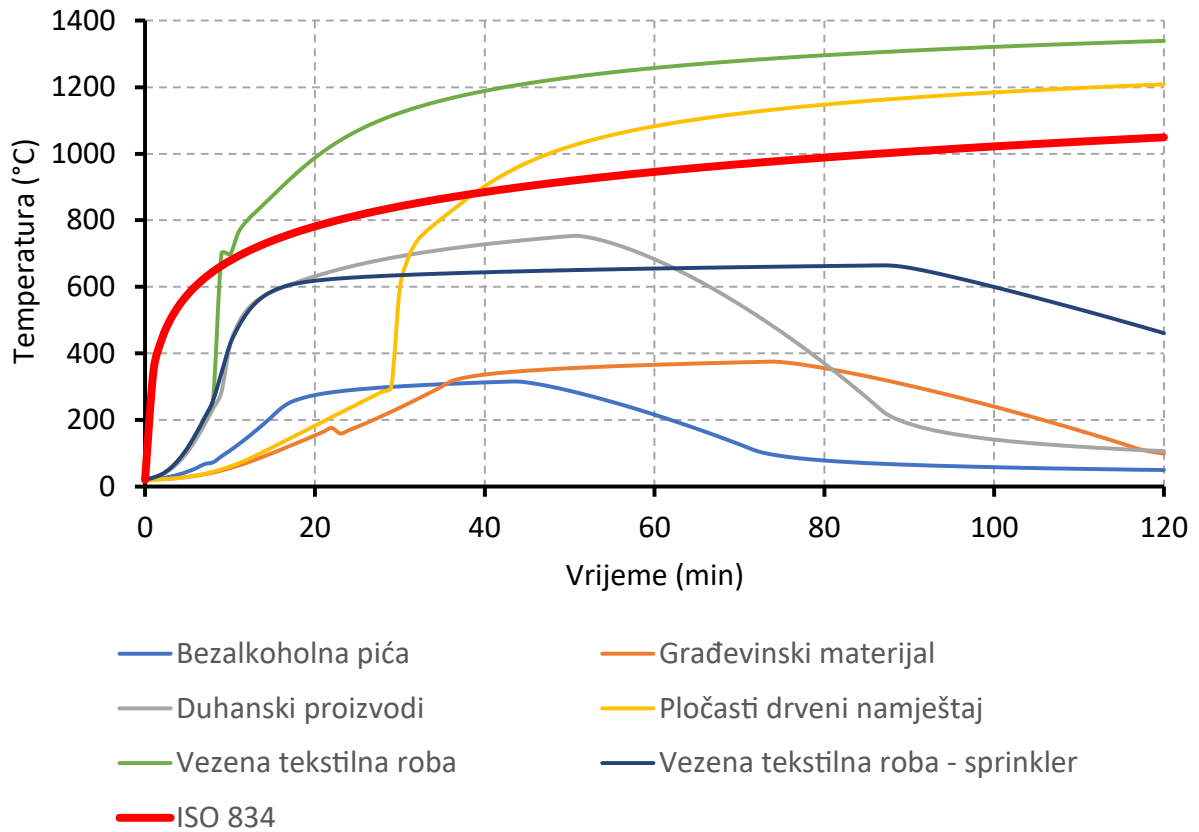
Vrsta opterećenja	Najveća površina požara (m ²)	Brzina razvoja požara (s)	Opasnost od aktiviranja požara	Koeficijent aktivnih mjera
Bezalkoholna pića	61,74	300	0,78	0,78
Građevinski materijal	61,74	300	0,78	0,78
Duhanski proizvodi	61,74	150	0,78	0,78
Pločasti drveni namještaj	61,74	600	0,78	0,78
Tekstilna roba - bez sprinkler instalacije	61,74	150	0,78	0,78
Tekstilna roba - sa sprinkler instalacijom	10	150	0,78	0,2898

4.4.5. Rezultati **analize realnih požara**

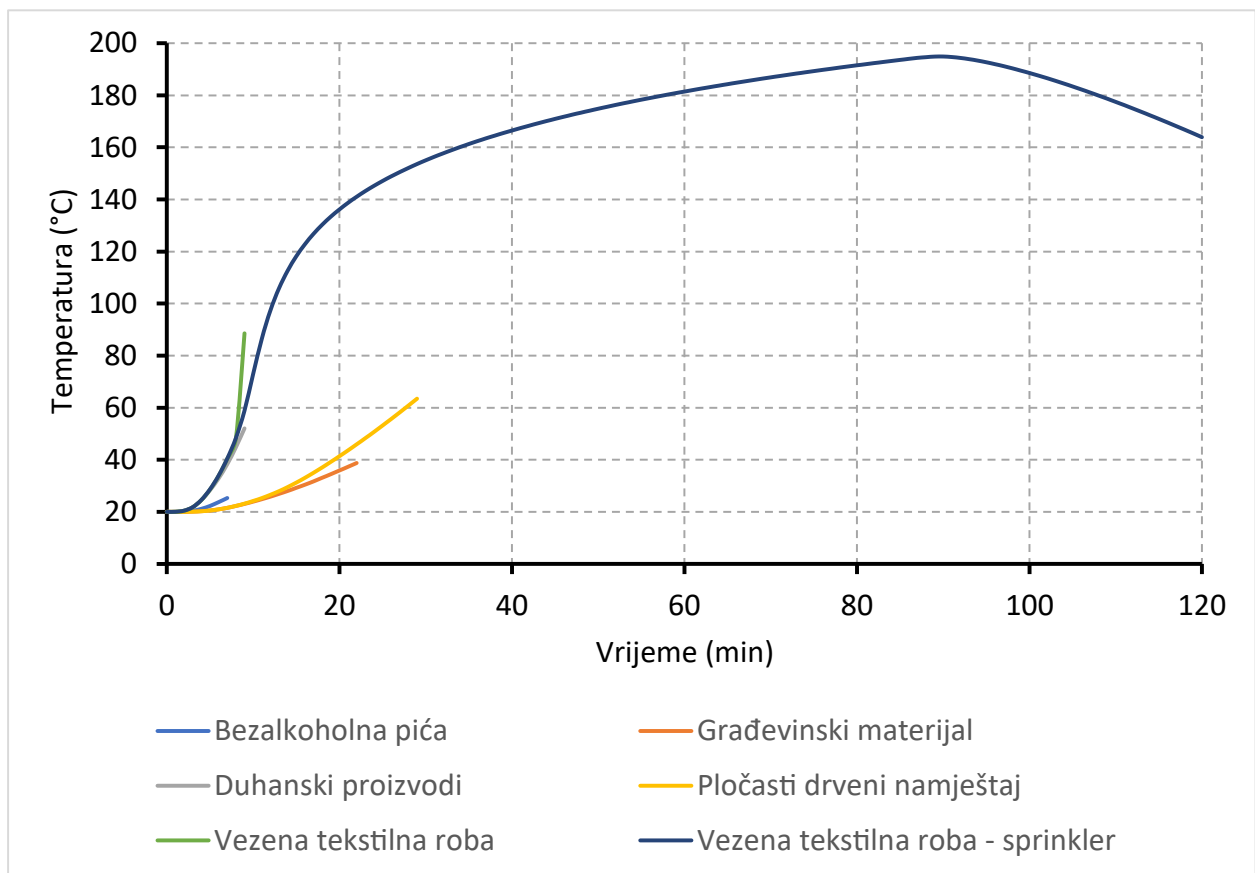
U nastavku su prikazani slijedeći dijagrami:

- Temperatura – vrijeme (gornja zona)
- Temperatura – vrijeme (donja zona)
- Snaga požara – vrijeme
- Visina granice između zona – vrijeme
- Površina zahvaćena požarom – vrijeme
- Kisik – vrijeme

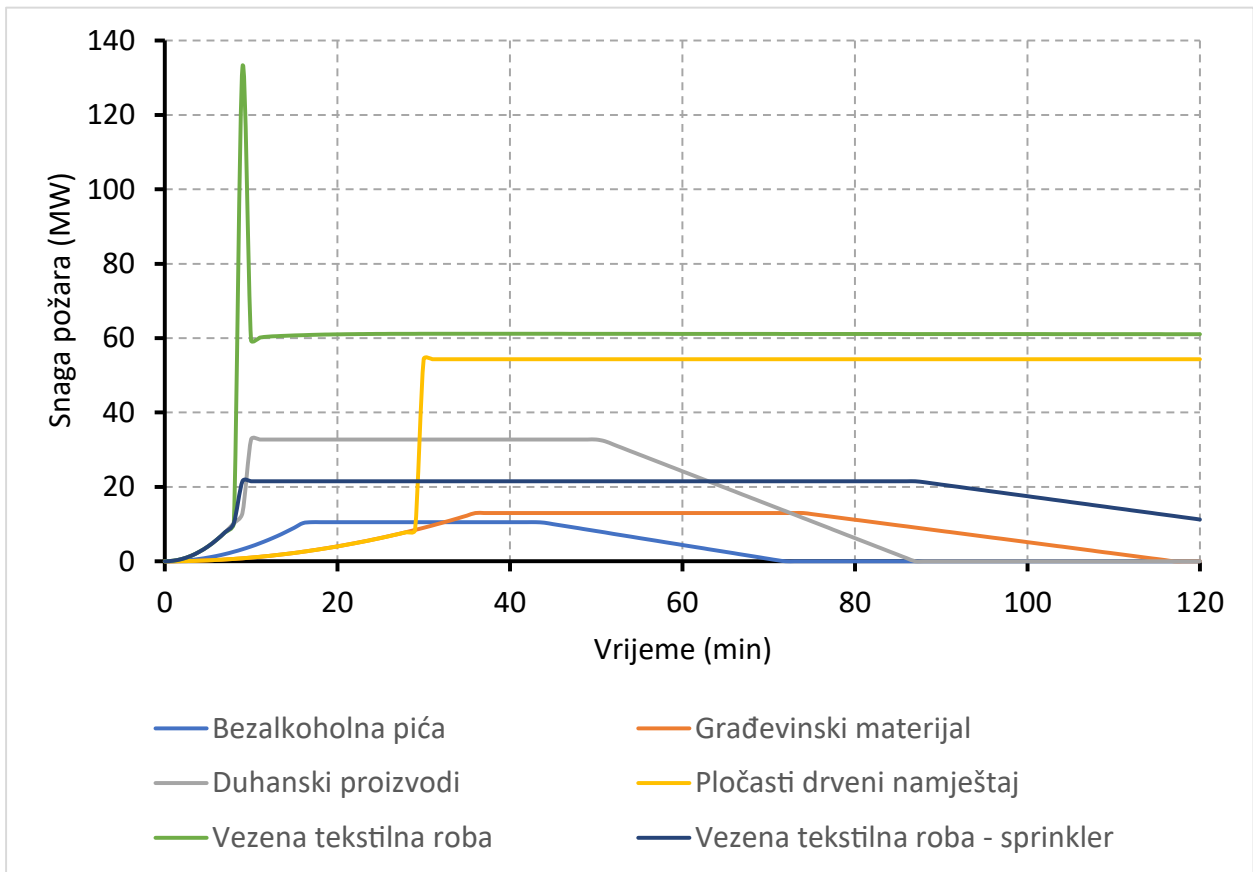
Dijagrami su iskazani za sva modelirana požarna opterećenja. Požarno opterećenje od vezene tekstilne robe je modelirano bez sprinkler instalacije i sa sprinkler instalacijom. Modeliranje realnog požara u prostoru šticeom sprinkler instalacijom je izvedeno na način da je veličina požara ograničena na 10 m² što uzima u obzir kvar na jednoj sprinkler mlaznici. Krivulje temperatura – vrijeme su uspoređene s krivuljom standardnog požara ISO 834.



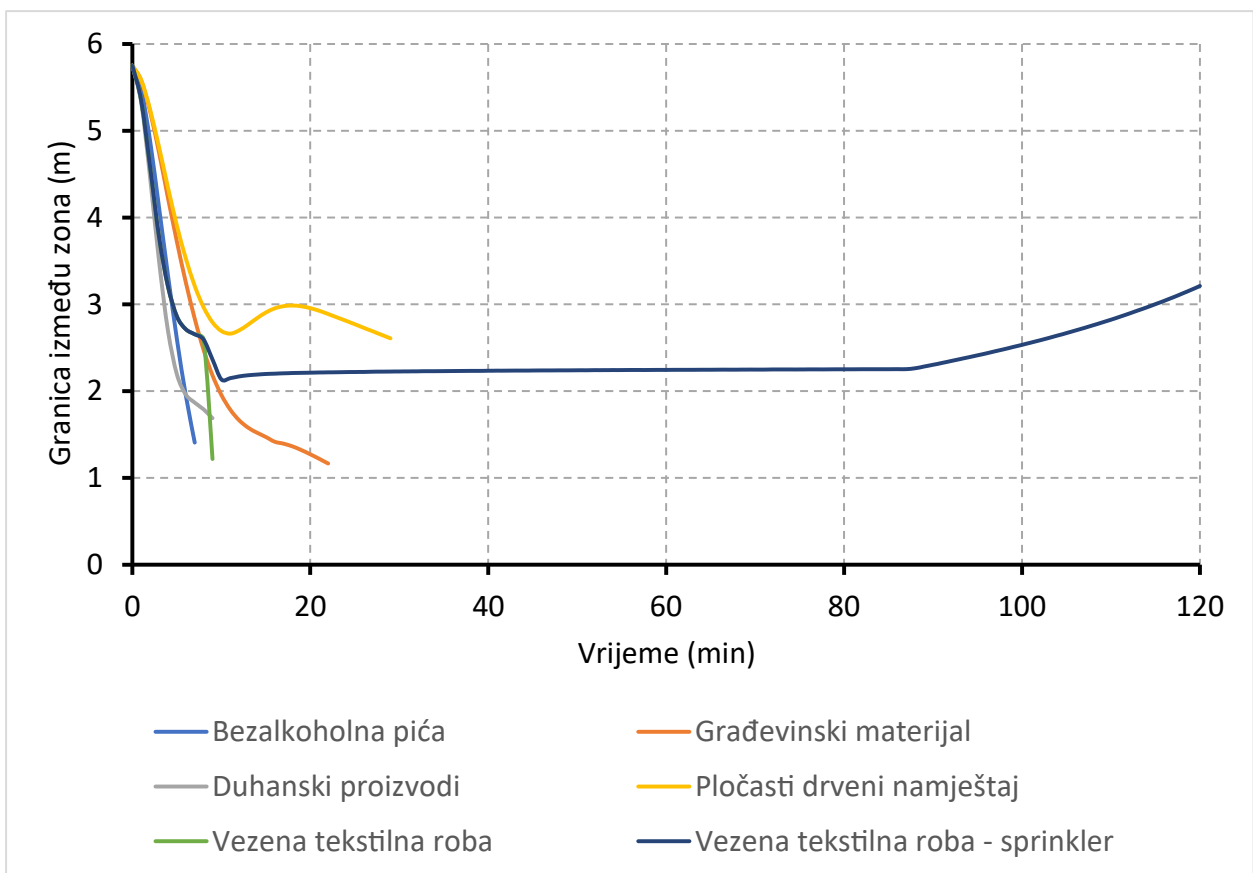
Slika 4.3. Temperatura zraka u gornjoj zoni kroz vrijeme



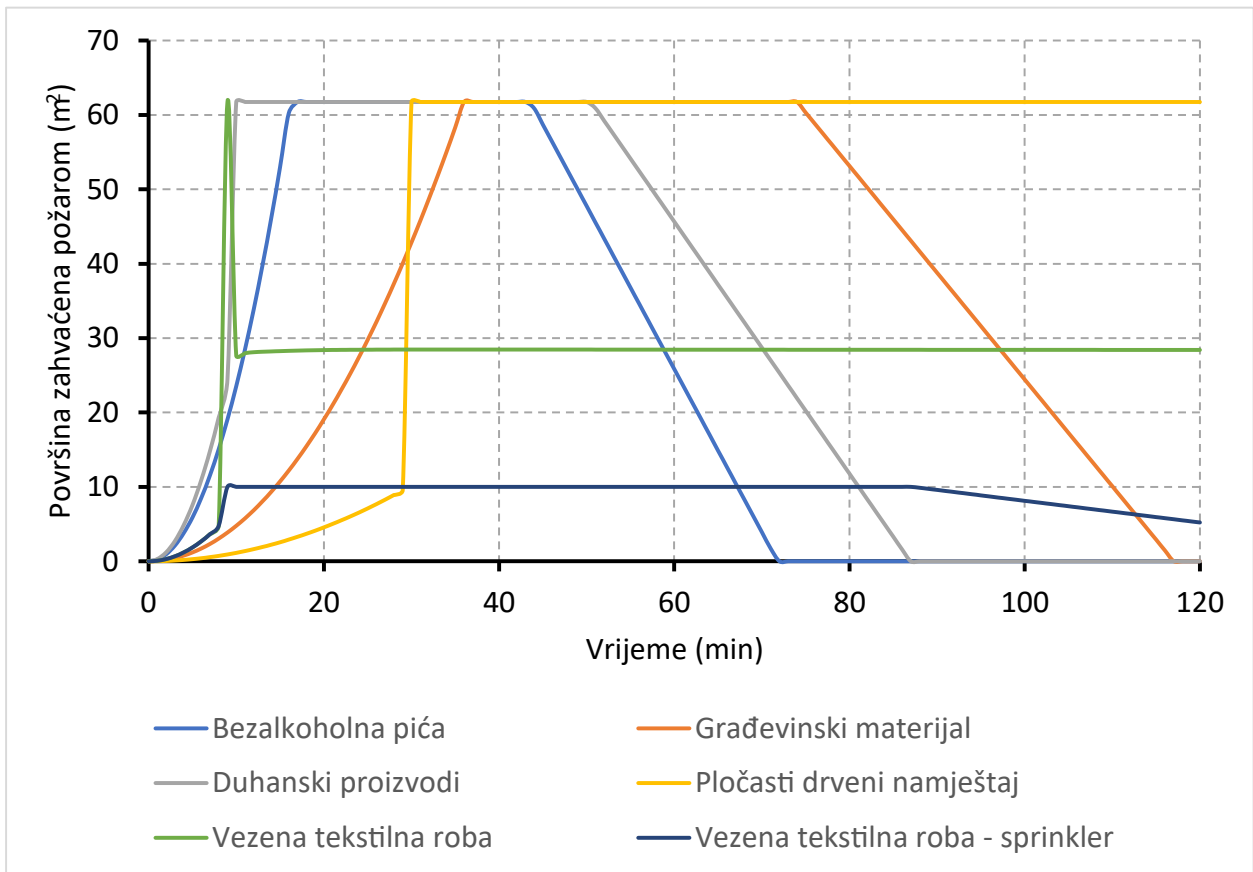
Slika 4.4. Temperatura zraka u donjoj zoni kroz vrijeme



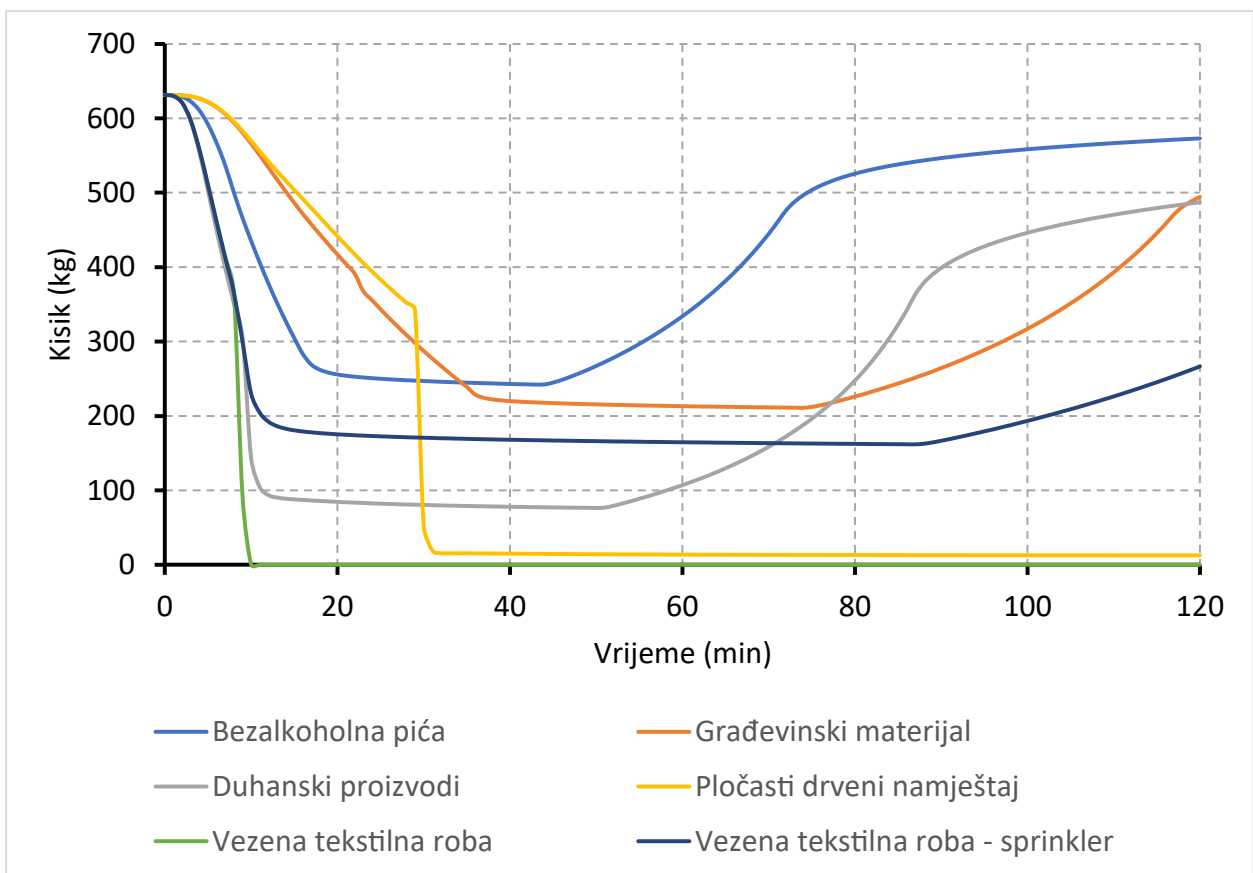
Slika 4.5. Snaga požara kroz vrijeme



Slika 4.6. Visina granice između zona kroz vrijeme



Slika 4.7. Površina zahvaćena požarom kroz vrijeme



Slika 4.8. Kisik kroz vrijeme

Iz grafa sa Slici 4.3 je vidljivo kako sve temperaturne krivulje na početku imaju sporiji prirast temperature nego standardna požarna krivulja ISO 834, ali krivulje pločastog drvenog namještaja i vezene tekstilne robe u konačnici razvijaju veće temperature. Budući da je tražena otpornost konstrukcije 30 min iz krivulja je vidljivo kako je veoma bitan parametar brzina razvoja požara. Kod sporih požara čak i s visokim požarnim opterećenjem se tek u 30. minuti razvijaju visoke temperature dok se to kod srednje brzih a poglavito kod brzih događa znatno ranije.

Iz grafova sa Slici 4.4 i Slici 4.6 je vidljivo kako donja zona u slučaju srednje brzih i brzih požara iščezne za manje od 10 minuta, kod sporih požara za nešto više od 20 minuta, a jedino se kod požara kontroliranog sprinkler sustavom zadržala kroz cijelo vrijeme trajanja požara.

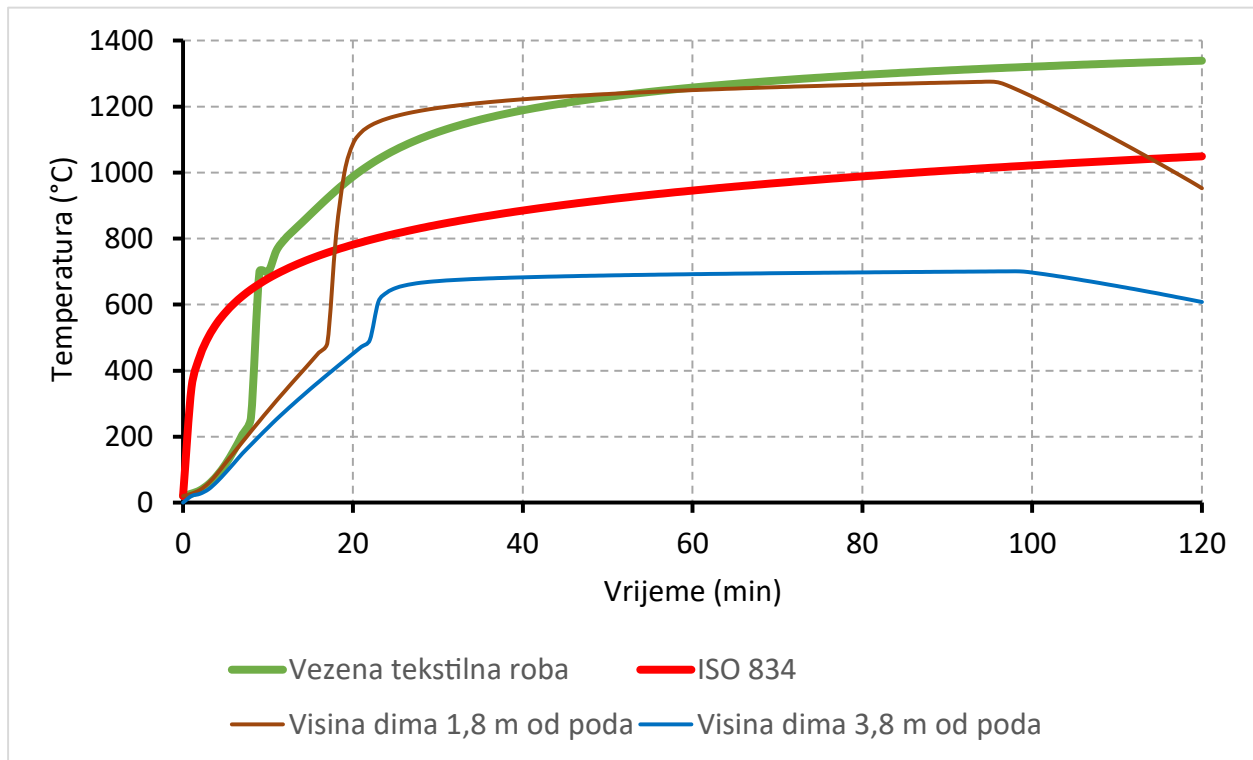
Iz grafova sa Slike 4.5, Slike 4.6 i Slike 4.8 se može iščitati kako je jedino požar vezene tekstilne robe uvjetovan količinom kisika, dok su ostali požari uvjetovani količinom i karakteristikama požarnog opterećenja.

DODATAK ANALIZI REALNIH POŽARA

Kako za površinu otvora od cca 6 % bez ugrađenog prisilnog sustava za dovođenje dima i topline u svih požarnim scenarijima donja zona iščezne za manje od 30 minuta, u nastavku je prijedlog za daljnje istraživanje. Predlaže se provesti modeliranje razvoja požara uz ugrađen sustav prisilne ventilacije s ograničavanjem visine dimnog sloja do zone udisanja te s ograničavanjem visine dimnog sloja do uskladištene robe. Ograničenje visine dimnog sloja do 1,8 m od poda se postiže dodavanjem prisilne ventilacije s protokom od cca 50 m³/s, dok se ograničenje visine dimnog sloja do 3,8 m od poda postiže s ugradnjom prisilne ventilacije s protokom od cca 150 m³/s.

Na grafu u nastavku su prikazane slijedeće temperaturne krivulje:

- Krivulja standardnog požara ISO 834
- Krivulja vezene tekstilne robe bez prisilne ventilacije
- Krivulja vezene tekstilne robe s prisilnom ventilacijom i ograničenjem visine dimnog sloja na 1,8 m od poda
- Krivulja vezene tekstilne robe s prisilnom ventilacijom i ograničenjem visine dimnog sloja na 3,8 m od poda



Slika 4.9 Temperatura zraka u gornjoj zoni uz ugrađenu prisilnu ventilaciju

Iz navedenih temperaturnih krivulja je vidljivo kako u oba slučaja prisilne ventilacije imamo sporiji razvoj temperatura u požaru nego u slučaju bez prisilne ventilacije. Ukoliko je visina dimnog sloja ograničena na 1,8 m od poda temperature potpuno razvijenog požara su približno jednake kao i u slučaju bez prisilne ventilacije. Ukoliko je visina dimnog sloja ograničena na 3,8 m od poda u požaru se razvijaju znatno niže temperature (maksimalno 690 °C), te u tom slučaju konstrukcija u traženom vremenu od 30 minuta neće izgubiti nosivost bez dodatne zaštite.

4.5. Analiza i proračun konstrukcije na 'hladno stanje'

4.5.1. Analiza opterećenja

STALNO OPTEREĆENJE

Vlastita težina

(automatski obračunato programom)

Termo panel d = 10 cm

= 0,25 kN/m²

PROMJENJIVO OPTEREĆENJE

Snijeg

$s_k = 1 \text{ kN/m}^2$

Vjetar

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

Građevina se nalazi u predgrađu na 90 m nadmorske visine.

4.5.2. Kombinacije opterećenja za 'hladno stanje'

za KGS: trajna i prolazna proračunska situacija:

$$\Sigma \gamma_{Gj} G_{kj} \text{ "+" } \gamma_{Q1} Q_{k1} \text{ "+" } \Sigma \gamma_{Qi} \psi_0 Q_{ki}$$

za GSU: karakteristična (rijetka) proračunska situacija:

$$\Sigma G_{kj} \text{ "+" } Q_{k1} \text{ "+" } \Sigma \psi_0 Q_{ki}$$

nazovistalna proračunska situacija:

$$\Sigma G_{kj} \text{ "+" } \Sigma \psi_2 Q_{ki}$$

PARCIJALNI KOEFICIJENTI ZA OPTEREĆENJA:

$$\gamma_G = 1,35 \text{ (KGS)}, 1,00 \text{ (GSU)}$$

$$\gamma_Q = 1,50 \text{ (KGS)}, 1,00 \text{ (GSU)}, \psi_2 = 0,80$$

$$\psi_0 = 0,60 \text{ (vjetar)}, \psi_2 = 0,00 \text{ (vjetar)}$$

$$\psi_0 = 0,50 \text{ (snijeg)}, \psi_2 = 0,00 \text{ (snijeg)}$$

4.5.3. Proračun konstrukcije na 'hladno stanje'

Proračun konstrukcije je proveden u programskom paketu SCIA 21.1 na krajnje granično stanje i granično stanje uporabljivosti prema Eurokodu. Obzirom na odabrani statički sustav i geometrijska svojstva konstrukcije usvojeni su optimalni čelični profili. Usvojeni profili i rezultati dimenzioniranja su vidljivi u Tablici 4.4.

Tablica 4.4 Rezultati dimenzioniranja čelične konstrukcije na "hladno stanje"

Konstrukcijski element	Iskoristivost za 'Hladno stanje'
Stup - HEA260	0,85
Glavni nosač - IPE360	0,89
Sekundarni nosač - 120/80/6,3	0,95
Zabatni glavni nosač - HEA120	0,95
Zabatni stup - SHS 100/100/5	0,82
Ukrutna greda - HEA100	0,09
Zabatna ukрутna greda - SHS 100/100/5	0,16
Spreg - SHS 60/60/4	0,92

4.6. Proračun konstrukcije na djelovanje požara

4.6.1. Analiza opterećenja

STALNO OPTEREĆENJE

Vlastita težina

(automatski obračunato programom)

Termo panel d = 10 cm

= 0,25 kN/m²**4.6.2. Kombinacije opterećenja za požar**

za KGS: Izvanredna proračunska situacija:

$$\Sigma G_{kj} \text{ "+" } \gamma_{2,1} Q_{k1} \text{ "+" } \Sigma \gamma_{2,i} Q_{ki}$$

PARCIJALNI KOEFICIJENTI ZA OPTEREĆENJA:

$$\gamma_G = 1,00 \text{ (KGS)}$$

4.6.3. Proračun konstrukcije na djelovanje požara

Proračun konstrukcije na djelovanje požara je proveden za izvanrednu proračunsku kombinaciju opterećenja. U nastavku je prikazan proračun jedne pozicije stupa i glavnog nosača na realni požarni scenarij gorenja uskladištene vezene tekstilne robe.

4.6.3.1. Dimenzioniranje stupa HEA260

EC-EN 1993 Steel check fire resistance

Linear calculation

Combination: SLS-Char (auto)2

Coordinate system: Principal

Extreme 1D: Global

Selection: All

Filter: Cross-section = Stup - HEA260

EN 1993-1-2 Fire Resistance Code Check

National annex: Standard EN

Member B17	4,760 / 4,760 m	HEA260	S 355	SLS-Char (auto)2	45,01 -
------------	-----------------	--------	-------	------------------	---------

Combination key

SLS-Char (auto)2 / LC 1 + LC 2

Partial safety factors

γ_{M0} for resistance of cross-sections	1,00
γ_{M1} for resistance to instability	1,00
γ_{M2} for resistance of net sections	1,25
$\gamma_{M,fi}$ for resistance to fire	1,00

Material

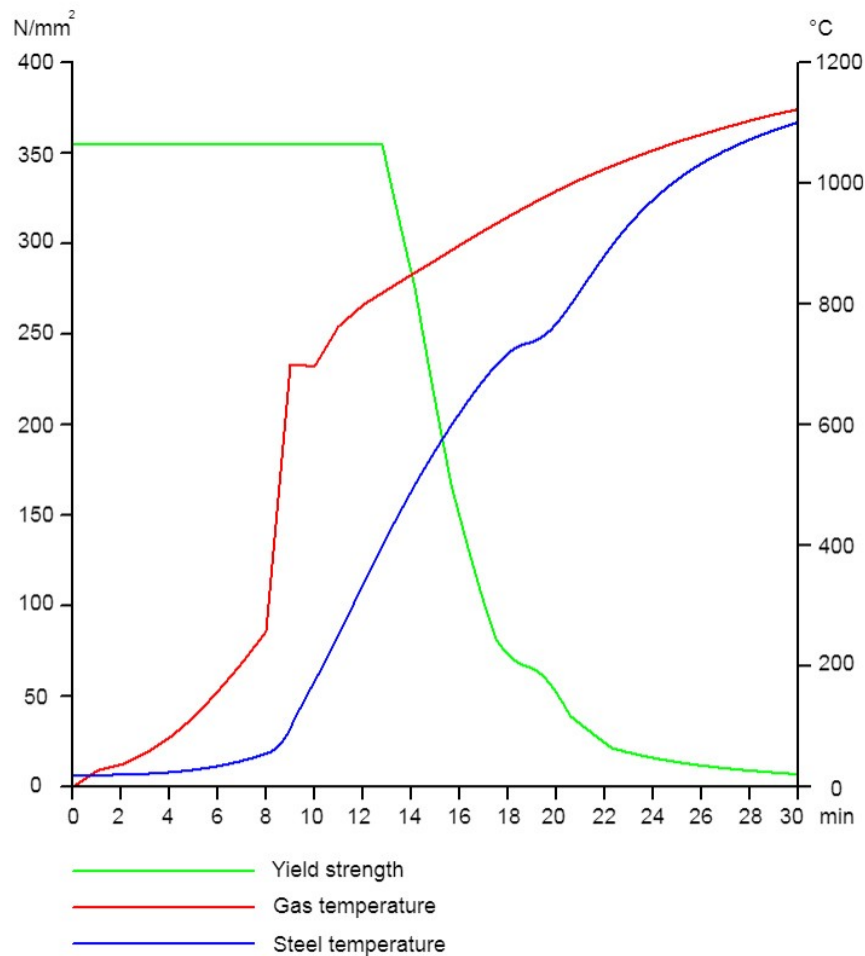
Yield strength	f_y	355,0	MPa
Ultimate strength	f_u	490,0	MPa
Fabrication		Rolled	

Fire resistance

Verification in Resistance domain according to EN 1993-1-2 article 4.2.3

Fire resistance			
Temperature-time curve		User defined	
Coefficient of heat transfer by convection	α_c	25,00	W/m ² K
Emissivity related to fire compartment	ϵ_f	1,00	
Emissivity related to surface material	ϵ_m	0,70	
Configuration factor for radiation heat flux	ϕ	1,00	
Required fire resistance	R	30	min
Gas temperature	θ_g	1123,00	°C
Material temperature	$\theta_{a,t}$	1101,28	°C
Beam exposure		All sides	
Adaptation factor for cross-section	k_1	1,00	
Adaptation factor for beam	k_2	1,00	
Section factor for unprotected steel members	A_m/V	1,7051e+02	1/m
Adaptation factor for the shadow effect	k_{sh}	0,62	
Reduction factor for the yield strength	$k_{y,\theta}$	0,02	
Reduction factor for the E modulus	$k_{E,\theta}$	0,02	

The check results shown hereafter are given at the required time $t = 30$ min.



...:SECTION CHECK:...:

The critical check is on position 4,760 m

Internal forces		Calculated	Unit
Normal force	$N_{fi,Ed}$	-18,03	kN
Shear force	$V_{y,fi,Ed}$	0,00	kN
Shear force	$V_{z,fi,Ed}$	6,12	kN
Torsion	$T_{fi,Ed}$	0,00	kNm
Bending moment	$M_{y,fi,Ed}$	29,11	kNm
Bending moment	$M_{z,fi,Ed}$	-0,01	kNm

Classification for cross-section design

Classification according to EN 1993-1-2 article 4.2.2

Classification of Internal and Outstand parts according to EN 1993-1-1 Table 5.2 Sheet 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Class 1 Limit [-]	Class 2 Limit [-]	Class 3 Limit [-]	Class
1	SO	102	13	-30972,261	-30940,491				
3	SO	102	13	-30989,506	-31021,275				
4	I	177	8	-22560,135	26711,682	47,0	54,4	73,0	1
5	SO	102	13	35123,809	35092,039	6,2	6,9	9,5	3
7	SO	102	13	35141,053	35172,823	6,2	6,9	9,5	3

Note: The Classification limits have been set according to Semi-Comp+.

The cross-section is classified as Class 3

Semi-Comp+ properties			
Material coefficient	ϵ	0,69	
Flange class 2 slenderness limit	$\beta_{2,y,f}$	6,92	
Flange class 3 slenderness limit	$\beta_{3,y,f}$	9,68	
Web class 2 slenderness limit	$\beta_{2,y,w}$	57,40	
Web class 3 slenderness limit	$\beta_{3,y,w}$	85,76	
Flange class 2 slenderness limit	$\beta_{2,z,f}$	6,92	
Flange class 3 slenderness limit	$\beta_{3,z,f}$	11,07	
Web slenderness ratio	c/t_w	23,60	
Flange slenderness ratio	c/t_f	8,18	
Reference slenderness ratio	$c/t_{ref,y}$	0,46	
Reference slenderness ratio	$c/t_{ref,z}$	0,30	
Interpolated section modulus	$W_{3,y}$	8,8206e-04	m ³
Interpolated section modulus	$W_{3,z}$	3,8433e-04	m ³

Note: The resistance for this semi-compact section has been calculated according to Semi-Comp+.

Compression check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 and formula (4.5)

Cross-section area	A	8,6800e-03	m ²
Design buckling resistance	$N_{fi,t,Rd}$	60,84	kN
Unity check		0,30	-

Bending moment check for M_y

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.10)

Interpolated section modulus	$W_{3,y}$	8,8206e-04	m ³
Interpolated bending resistance	$M_{3,y,Rd}$	313,13	kNm
Bending resistance	$M_{y,fi,\theta,Rd}$	6,18	kNm
Design bending resistance	$M_{y,fi,t,Rd}$	6,18	kNm
Unity check		4,71	-

Bending moment check for M_z

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.10)

Interpolated section modulus	$W_{3,z}$	3,8433e-04	m ³
Interpolated bending resistance	$M_{3,z,Rd}$	136,44	kNm
Bending resistance	$M_{z,fi,\theta,Rd}$	2,69	kNm
Design bending resistance	$M_{z,fi,t,Rd}$	2,69	kNm
Unity check		0,00	-

Shear check for V_y

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.16)

Shear correction factor	η	1,20	
Shear area	A_v	6,7363e-03	m ²
Plastic shear resistance for V_y	$V_{pl,y,Rd}$	1380,66	kN
Plastic shear resistance for V_y	$V_{y,fi,t,Rd}$	27,26	kN
Unity check		0,00	-

Shear check for V_z

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.16)

Shear correction factor	η	1,20	
Shear area	A_v	2,8737e-03	m ²
Plastic shear resistance for V_z	$V_{pl,z,Rd}$	589,00	kN
Plastic shear resistance for V_z	$V_{z,fi,t,Rd}$	11,63	kN
Unity check		0,53	-

Torsion check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3

According to EN 1993-1-1 article 6.2.7 and formula (6.23)

Index of fibre	Fibre	2	
Total torsional moment	$\tau_{fi,Ed}$	0,0	MPa
Design torsional resistance	$\tau_{fi,t,Rd}$	4,0	MPa
Unity check		0,00	-

Note: The unity check for torsion is lower than the limit value of 0,05. Therefore torsion is considered as

insignificant and is ignored in the combined checks.

Combined bending, axial force and shear force check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3

According to EN 1993-1-1 article 6.2.9.1 & 6.2.10 and formula (6.41)

Reduction of yield strength z	ρ_z	0,00	
Interpolated moment resistance reduced due to N_{Ed} , V_z	$M_{NV,3,y,fi,t,Rd}$	4,34	kNm
Exponent of bending ratio y	α	2,00	
Interpolated moment resistance reduced due to N_{Ed}	$M_{N,3,z,fi,t,Rd}$	2,46	kNm
Exponent of bending ratio z	β	1,48	

Unity check (4.9) = 45,01 + 0,00 = 45,01 -

The member does NOT satisfy the section check!

...:STABILITY CHECK:...:

Classification for member buckling design

Decisive position for stability classification: 4,760 m

Decisive utilisation factor η : 45,01

Classification according to EN 1993-1-2 article 4.2.2

Classification of Internal and Outstand parts according to EN 1993-1-1 Table 5.2 Sheet 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Class 1 Limit [-]	Class 2 Limit [-]	Class 3 Limit [-]	Class
1	SO	102	13	-30972,261	-30940,491				
3	SO	102	13	-30989,506	-31021,275				
4	I	177	8	-22560,135	26711,682	47,0	54,4	73,0	1
5	SO	102	13	35123,809	35092,039	6,2	6,9	9,5	3
7	SO	102	13	35141,053	35172,823	6,2	6,9	9,5	3

Note: The Classification limits have been set according to Semi-Comp+.

The cross-section is classified as Class 3

Note: The decisive position for the stability classification is based on the utilisation factor η according to Semi-Comp+.

Flexural Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 and formula (4.5)

Buckling parameters		yy	zz	
Sway type		sway	non-sway	
System length	L	4,760	4,760	m
Buckling factor	k	2,73	0,90	
Buckling length	l_{cr}	12,986	4,303	m
Critical Euler load	N_{cr}	1290,44	4108,37	kN
Slenderness	λ	118,07	66,17	
Relative slenderness	λ_{rel}	1,55	0,87	
Relative slenderness	$\lambda_{rel,\theta}$	1,46	0,82	
Imperfection	α	0,53	0,53	
Reduction factor	χ_{fi}	0,31	0,59	
Buckling resistance	$N_{b,fi,t,Rd}$	18,79	35,61	kN

Flexural Buckling verification			
Cross-section area	A	8,6800e-03	m ²
Buckling resistance	$N_{b,fi,t,Rd}$	18,79	kN
Unity check		0,96	-

Torsional(-Flexural) Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 and formula (4.5)

Note: For this I-section the Torsional(-Flexural) buckling resistance is higher than the resistance for Flexural buckling. Therefore Torsional(-Flexural) buckling is not printed on the output.

Lateral Torsional Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.11)

LTB parameters			
Interpolated section modulus	$W_{3,y}$	8,8206e-04	m ³
Elastic critical moment	M_{cr}	970,53	kNm
Relative slenderness	$\lambda_{rel,LT}$	0,57	
Relative slenderness	$\lambda_{rel,LT,\theta}$	0,54	
Imperfection	α_{LT}	0,53	
Reduction factor	$\chi_{LT,fi}$	0,74	
Design buckling resistance	$M_{b,fi,t,Rd}$	4,55	kNm
Unity check		6,40	-

Mcr parameters			
LTB length	l_{LT}	4,760	m
Influence of load position		no influence	
Correction factor	k	1,00	
Correction factor	k_w	1,00	
LTB moment factor	C_1	1,77	
LTB moment factor	C_2	0,00	
LTB moment factor	C_3	1,00	
Shear centre distance	d_z	0	mm
Distance of load application	Z_g	0	mm

Mcr parameters			
Mono-symmetry constant	β_y	0	mm
Mono-symmetry constant	z_j	0	mm

Note: C parameters are determined according to ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Bending and axial compression check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.5 and formula (4.21a),(4.21b)

Bending and axial compression check parameters			
Cross-section area	A	8,6800e-03	m ²
Interpolated section modulus	$W_{3,y}$	8,8206e-04	m ³
Interpolated section modulus	$W_{3,z}$	3,8433e-04	m ³
Design compression force	$N_{fi,Ed}$	18,03	kN
Design bending moment	$M_{y,fi,Ed}$	29,11	kNm
Design bending moment	$M_{z,fi,Ed}$	-0,01	kNm
Reduction factor	$\chi_{min,fi}$	0,31	
Reduction factor	$\chi_{z,fi}$	0,59	
Reduction factor	$\chi_{LT,fi}$	0,74	
Equivalent moment factor	$\beta_{M,y}$	1,80	
Factor	μ_y	-0,46	
Interaction factor	k_y	1,44	
Equivalent moment factor	$\beta_{M,z}$	1,80	
Factor	μ_z	0,30	
Interaction factor	k_z	0,85	
Equivalent moment factor	$\beta_{M,LT}$	1,80	
Factor	μ_{LT}	0,07	
Interaction factor	k_{LT}	0,96	

Unity check (4.21a) = 0,96 + 6,78 + 0,00 = 7,74 -

Unity check (4.21b) = 0,51 + 6,17 + 0,00 = 6,68 -

Shear Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3

According to EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 and formula (5.10) & (7.1)

Shear Buckling parameters			
Buckling field length	a	4,760	m
Web		unstiffened	
Web height	h_w	225	mm
Web thickness	t	8	mm
Material coefficient	ϵ	0,69	
Shear correction factor	η	1,20	

Shear Buckling verification		
Web slenderness	h_w/t	30,00
Web slenderness limit		41,49

Note: The web slenderness is such that Shear Buckling effects may be ignored according to EN 1993-1-5 article 5.1(2).

The member does NOT satisfy the stability check!

4.6.3.2. *Dimenzioniranje glavnog nosača IPE360*

EC-EN 1993 Steel check fire resistance

Linear calculation

Combination: SLS-Char (auto)2

Coordinate system: Principal

Extreme 1D: Global

Selection: All

Filter: Cross-section = Glavni nosač - IPE360

EN 1993-1-2 Fire Resistance Code Check

National annex: Standard EN

Member B18	7,004 / 7,204 m	IPE360	S 355	SLS-Char (auto)2	7,31 -
------------	-----------------	--------	-------	------------------	--------

Combination key

SLS-Char (auto)2 / LC 1 + LC 2

Partial safety factors

γ_{M0} for resistance of cross-sections	1,00
γ_{M1} for resistance to instability	1,00
γ_{M2} for resistance of net sections	1,25
$\gamma_{M,fi}$ for resistance to fire	1,00

Material

Yield strength	f_y	355,0	MPa
Ultimate strength	f_u	490,0	MPa
Fabrication		Rolled	

Fire resistance

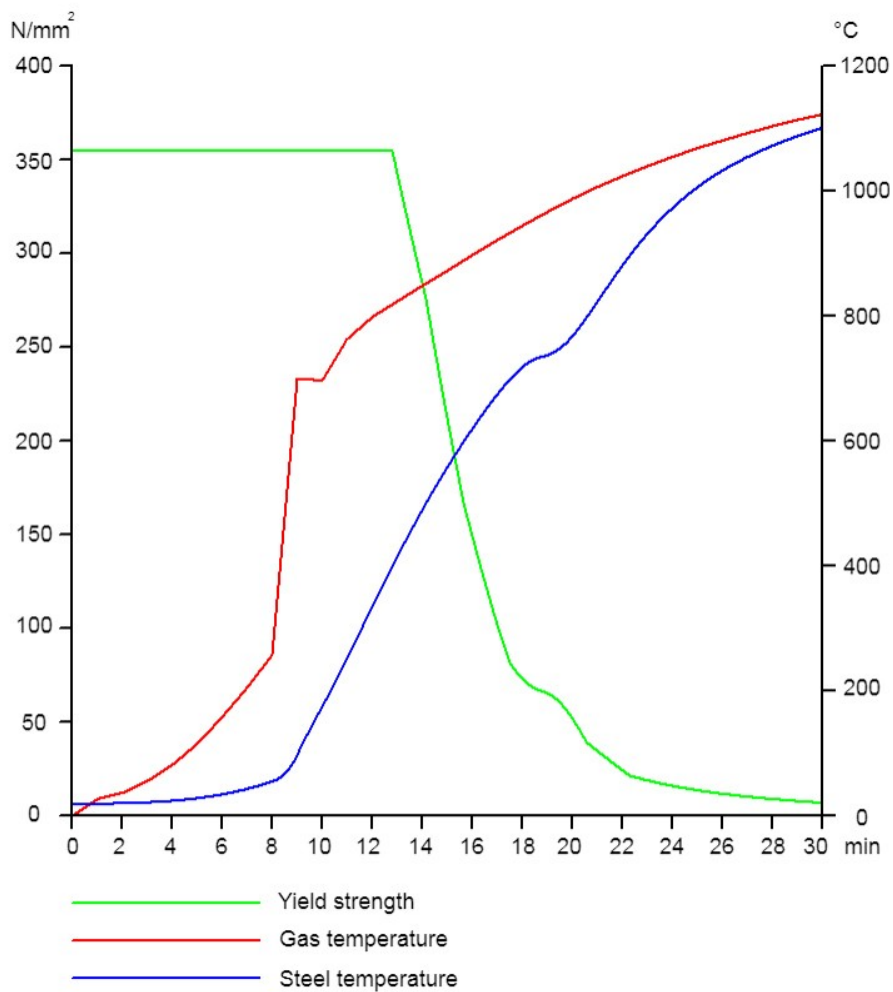
Verification in Resistance domain according to EN 1993-1-2 article 4.2.3

Fire resistance

Temperature-time curve		User defined	
Coefficient of heat transfer by convection	α_c	25,00	W/m ² K
Emissivity related to fire compartment	ϵ_f	1,00	
Emissivity related to surface material	ϵ_m	0,70	
Configuration factor for radiation heat flux	ϕ	1,00	
Required fire resistance	R	30	min
Gas temperature	θ_g	1123,00	°C

Fire resistance			
Material temperature	$\theta_{a,t}$	1102,92	°C
Beam exposure		3 sides	
Covered flange		Upper flange	
Adaptation factor for cross-section	K_1	0,70	
Adaptation factor for beam	K_2	1,00	
Section factor for unprotected steel members	A_m/V	1,6272e+02	1/m
Adaptation factor for the shadow effect	k_{sh}	0,68	
Reduction factor for the yield strength	$k_{y,\theta}$	0,02	
Reduction factor for the E modulus	$k_{E,\theta}$	0,02	

The check results shown hereafter are given at the required time $t = 30$ min.



...:SECTION CHECK::...

The critical check is on position 7,004 m

Internal forces		Calculated	Unit
Normal force	$N_{fi,Ed}$	-6,40	kN
Shear force	$V_{y,fi,Ed}$	-0,10	kN

Internal forces		Calculated	Unit
Shear force	$V_{z,fi,Ed}$	1,50	kN
Torsion	$T_{fi,Ed}$	0,00	kNm
Bending moment	$M_{y,fi,Ed}$	27,09	kNm
Bending moment	$M_{z,fi,Ed}$	-0,05	kNm

Classification for cross-section design

Classification according to EN 1993-1-2 article 4.2.2

Classification of Internal and Outstand parts according to EN 1993-1-1 Table 5.2 Sheet 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Class 1 Limit [-]	Class 2 Limit [-]	Class 3 Limit [-]	Class
1	SO	63	13	-27932,939	-27647,716				
3	SO	63	13	-28132,142	-28417,365				
4	I	299	8	-23978,243	25738,935	49,2	56,8	79,7	1
5	SO	63	13	29693,631	29408,408	6,2	6,9	9,6	1
7	SO	63	13	29892,834	30178,057	6,2	6,9	9,5	1

Note: The Classification limits have been set according to Semi-Comp+.

The cross-section is classified as Class 1

Compression check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 and formula (4.5)

Cross-section area	A	7,2700e-03	m ²
Design buckling resistance	$N_{fi,t,Rd}$	50,11	kN
Unity check		0,13	-

Bending moment check for M_y

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.10)

Plastic section modulus	$W_{pl,y}$	1,0190e-03	m ³
Plastic bending moment	$M_{pl,y,Rd}$	361,75	kNm
Bending resistance	$M_{y,fi,\theta,Rd}$	7,02	kNm
Design bending resistance	$M_{y,fi,t,Rd}$	10,03	kNm
Unity check		2,70	-

Bending moment check for M_z

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.10)

Plastic section modulus	$W_{pl,z}$	1,9100e-04	m ³
Plastic bending moment	$M_{pl,z,Rd}$	67,81	kNm
Bending resistance	$M_{z,fi,\theta,Rd}$	1,32	kNm
Design bending resistance	$M_{z,fi,t,Rd}$	1,88	kNm
Unity check		0,03	-

Shear check for V_y

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.16)

Shear correction factor	η	1,20	
Shear area	A_v	4,5260e-03	m ²
Plastic shear resistance for V_y	$V_{pl,y,Rd}$	927,65	kN
Plastic shear resistance for V_y	$V_{y,fi,t,Rd}$	18,01	kN
Unity check		0,01	-

Shear check for V_z

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.16)

Shear correction factor	η	1,20	
Shear area	A_v	3,5108e-03	m ²
Plastic shear resistance for V_z	$V_{pl,z,Rd}$	719,57	kN
Plastic shear resistance for V_z	$V_{z,fi,t,Rd}$	13,97	kN
Unity check		0,11	-

Torsion check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3

According to EN 1993-1-1 article 6.2.7 and formula (6.23)

Index of fibre	Fibre	2	
Total torsional moment	$\tau_{fi,Ed}$	0,1	MPa
Design torsional resistance	$\tau_{fi,t,Rd}$	4,0	MPa
Unity check		0,02	-

Note: The unity check for torsion is lower than the limit value of 0,05. Therefore torsion is considered as

insignificant and is ignored in the combined checks.

Combined bending, axial force and shear force check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3

According to EN 1993-1-1 article 6.2.9.1 and formula (6.41)

Plastic bending moment	$M_{y,fi,t,Rd}$	10,03	kNm
Exponent of bending ratio y	α	2,00	
Plastic bending moment	$M_{z,fi,t,Rd}$	1,88	kNm
Exponent of bending ratio z	β	1,00	

Unity check (4.9) = 7,29 + 0,03 = 7,31 -

Note: Since the shear forces are less than half the plastic shear resistances their effect on the moment

resistances is neglected.

Note: Since the axial force satisfies both criteria (6.33) and (6.34) of EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) its effect on the moment resistance about the y-y axis is neglected.

Note: Since the axial force satisfies criteria (6.35) of EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) its effect on the moment

resistance about the z-z axis is neglected.

The member does NOT satisfy the section check!

...:STABILITY CHECK:...:

Classification for member buckling design

Decisive position for stability classification: 7,004 m

Decisive utilisation factor η : 7,31

Classification according to EN 1993-1-2 article 4.2.2

Classification of Internal and Outstand parts according to EN 1993-1-1 Table 5.2 Sheet 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Class 1 Limit [-]	Class 2 Limit [-]	Class 3 Limit [-]	Class
1	SO	63	13	-27932,939	-27647,716				
3	SO	63	13	-28132,142	-28417,365				
4	I	299	8	-23978,243	25738,935	49,2	56,8	79,7	1
5	SO	63	13	29693,631	29408,408	6,2	6,9	9,6	1
7	SO	63	13	29892,834	30178,057	6,2	6,9	9,5	1

Note: The Classification limits have been set according to Semi-Comp+.

The cross-section is classified as Class 1

Note: The decisive position for the stability classification is based on the utilisation factor η according to Semi-Comp+.

Flexural Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 and formula (4.5)

Buckling parameters		yy	zz	
Sway type		sway	non-sway	
System length	L	7,204	1,701	m
Buckling factor	k	2,51	0,66	
Buckling length	l_{cr}	18,085	1,131	m
Critical Euler load	N_{cr}	1030,98	16907,86	kN
Slenderness	λ	120,89	29,85	
Relative slenderness	λ_{rel}	1,58	0,39	
Relative slenderness	$\lambda_{rel,\theta}$	1,49	0,37	
Imperfection	α	0,53	0,53	
Reduction factor	χ_{fi}	0,30	0,82	
Buckling resistance	$N_{b,fi,t,Rd}$	14,96	41,10	kN

Flexural Buckling verification			
Cross-section area	A	7,2700e-03	m ²
Buckling resistance	$N_{b,fi,t,Rd}$	14,96	kN
Unity check		0,43	-

Torsional(-Flexural) Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 and formula (4.5)

Note: For this I-section the Torsional(-Flexural) buckling resistance is higher than the resistance for Flexural buckling. Therefore Torsional(-Flexural) buckling is not printed on the output.

Lateral Torsional Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 and formula (4.11)

LTB parameters			
Plastic section modulus	$W_{pl,y}$	1,0190e-03	m ³
Elastic critical moment	M_{cr}	1471,83	kNm
Relative slenderness	$\lambda_{rel,LT}$	0,50	
Relative slenderness	$\lambda_{rel,LT,\theta}$	0,47	
Imperfection	α_{LT}	0,53	
Reduction factor	$\chi_{LT,fi}$	0,77	
Design buckling resistance	$M_{b,fi,t,Rd}$	5,41	kNm
Unity check		5,00	-

Mcr parameters			
LTB length	l_{LT}	1,701	m
Influence of load position		no influence	
Correction factor	k	1,00	
Correction factor	k_w	1,00	
LTB moment factor	C_1	1,07	
LTB moment factor	C_2	0,00	
LTB moment factor	C_3	1,00	
Shear centre distance	d_z	0	mm
Distance of load application	z_g	0	mm
Mono-symmetry constant	β_y	0	mm
Mono-symmetry constant	z_j	0	mm

Note: C parameters are determined according to ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Bending and axial compression check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3.5 and formula (4.21a),(4.21b)

Bending and axial compression check parameters			
Cross-section area	A	7,2700e-03	m ²
Plastic section modulus	$W_{pl,y}$	1,0190e-03	m ³
Plastic section modulus	$W_{pl,z}$	1,9100e-04	m ³
Design compression force	$N_{fi,Ed}$	6,40	kN

Bending and axial compression check parameters			
Design bending moment	$M_{y,fi,Ed}$	27,09	kNm
Design bending moment	$M_{z,fi,Ed}$	-0,05	kNm
Reduction factor	$\chi_{min,fi}$	0,30	
Reduction factor	$\chi_{z,fi}$	0,82	
Reduction factor	$\chi_{LT,fi}$	0,77	
Equivalent moment factor	$\beta_{M,y}$	2,14	
Factor	μ_y	0,45	
Interaction factor	k_y	0,81	
Equivalent moment factor	$\beta_{M,z}$	2,08	
Factor	μ_z	0,80	
Interaction factor	k_z	0,88	
Equivalent moment factor	$\beta_{M,LT}$	1,19	
Factor	μ_{LT}	-0,08	
Interaction factor	k_{LT}	1,00	

Unity check (4.21a) = 0,43 + 3,11 + 0,03 = 3,57 -

Unity check (4.21b) = 0,16 + 5,00 + 0,03 = 5,19 -

Shear Buckling check

According to EN 1993-1-2 article 4.2.3

According to EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 and formula (5.10) & (7.1)

Shear Buckling parameters			
Buckling field length	a	7,204	m
Web		unstiffened	
End post		non-rigid	
Web height	h_w	335	mm
Web thickness	t	8	mm
Yield strength	f_{yw}	355,0	MPa
Flange width	b_f	170	mm
Flange thickness	t_f	13	mm
Yield strength	f_{yf}	355,0	MPa
Material coefficient	ϵ	0,69	
Shear correction factor	η	1,20	

Shear Buckling verification			
Web slenderness	h_w/t	41,83	
Web slenderness limit		41,49	
Plate slenderness	$\lambda_{w,\theta}$	0,56	
Reduction factor	$\chi_{w,fi}$	1,20	
Contribution of the web	$V_{bw,fi,t,Rd}$	12,78	kN
Capacity of the flange	$M_{f,fi,t,Rd}$	4,06	kNm
Flange factor	c	0,000	m
Contribution of the flange	$V_{bf,fi,t,Rd}$	0,00	kN
Maximum resistance	$V_{b,fi,t,Rd,limit}$	12,78	kN
Resistance	$V_{b,fi,t,Rd}$	12,78	kN
Plastic resistance	$M_{pl,fi,t,Rd}$	7,02	kNm
Shear ratio	$\eta_{3,bar}$	0,12	

Unity check (5.10) = 0,12 -

Note: The interaction between Bending and Shear Buckling does not need to be verified because the shear ratio does not exceed 0.5.

The member does NOT satisfy the stability check!

4.6.4. Tablični prikaz rezultata dimenzioniranja

Tablica 4.5. Rezultati dimenzioniranja čelične konstrukcije

Iskoristivost za / Konstrukcijski element	1	2	3	4	5	6	7
Stup - HEA260	0,15	0,14	0,37	0,14	45,01	0,3	1,08
Glavni nosač - IPE360	0,1	0,1	0,27	0,1	7,31	0,22	0,82
Sekundarni nosač - 120/80/6,3	0,12	0,12	0,51	0,12	>100	0,36	1,89
Zabatni glavni nosač – HEA120	0,13	0,13	0,5	0,13	>100	0,36	1,84
Zabatni stup – 100/100/5	0,13	0,12	0,55	0,13	>100	0,39	1,3
Ukrutna greda – HEA100	0,04	0,04	0,13	0,04	2,56	0,1	0,38
Zabatna ukrutna greda – 100/100/5	0,03	0,03	0,09	0,03	>100	0,07	0,28
Spreg – 60/60/4	0,18	0,16	0,84	0,18	8,14	0,57	1,81

Iskoristivost za:

- 1 - Bezalkoholna pića
- 2 - Građevinski materijal
- 3 - Duhanski proizvodi
- 4 - Pločasti drveni namještaj
- 5 - Vezena tekstilna roba
- 6 - Vezena tekstilna roba - sprinkler
- 7 - ISO 834

4.7. Odabir zaštite čelične konstrukcije od djelovanja požara

Iz Tablice 4.5 vidljivo je kako u slučaju djelovanja četiri od pet analiziranih realnih požara na nosivu čeličnu konstrukciju, neće doći do gubitka njene nosivosti. Pri djelovanju požarnog opterećenja tekstilne robe (požarno opterećenje 5) otkazuju svi konstrukcijski elementi. S druge strane, pri djelovanju standardnog ISO 834 požara rasponska konstrukcija i ukrutne grede zadovoljavaju uvjet nosivosti, dok ostali elementi ne zadovoljavaju.

Iz aspekta sigurnosti i zaštite imovine najučinkovitija metoda zaštite je ugradnja sprinkler sustava. Sprinkler sustav kao aktivna mjera zaštite će požar neposredno nakon nastanka lokalizirati ili u potpunosti ugasi te na taj način spriječiti veći gubitak imovine.

Pasivne zaštite čelične konstrukcije su financijski prihvatljivije, a pogotovo jer omogućavaju lokalnu zaštitu samo elemenata koji u slučaju požara gube svoju nosivost.

U nastavku su usvojene prosječne debljine protupožarnih zaštita s kojima će konstrukcija zadovoljiti uvjet nosivosti u trajanju od 30 minuta:

- protupožarni premazi: 0,25 mm (250 μ m),
- protupožarna žbuka: 10 mm,
- protupožarne ploče: 12 mm.

5. DISKUSIJA REZULTATA

Modeliranje realnih požara je provedeno 2 - zonskim računalnim modelom uz površinu otvora koja služi za prirodno odvođenje dima i topline iz prostora skladišta. Površina otvora je ista za sve požarne scenarije i iznosi cca 6 % površine poda skladišta. Rezultat modeliranja je visina donje zone, njezina temperatura, te vrijeme u kojemu ona iščezava. Nakon što donja zona nestane smatra se da je cijeli prostor ispunjen dimom i vrućim plinovima. U tri od pet modeliranih realnih požara (bezalkoholna pića, duhanski proizvodi i tekstilna roba) donja zona iščezne za manje od 10 minuta, u požaru građevinskog materijala za 22 minute, a u požaru pločastog drvenog namještaja za 29 minuta.

Proračunom je utvrđeno kako konstrukcija ne zadovoljava uvjet nosivosti u trajanju od 30 minuta na djelovanje požarne krivulje realnog požara tekstilne robe te dio konstrukcije ne zadovoljava nosivost na djelovanje krivulje standardnog požara ISO 834. U četiri od pet realnih požara konstrukcija je zadovoljila uvjet nosivosti bez potrebe za dodatnom zaštitom što ukazuje da je u većini slučajeva zahtjev iz NFPA 1 [2] promjenjiv.

Uvjet vatrootpornosti konstrukcije se postavlja na građevine kako bi se osiguralo dovoljno vrijeme za evakuaciju svih osoba koje se u prostoru mogu zadesiti kao i za zaštitu spašavatelja. Budući da je skladišni prostor poslovna građevina u kojoj se može zadesiti svega nekoliko zaposlenika koji su dobro upoznati s evakuacijskim izlazima, vrijeme potrebno za evakuaciju je svega nekoliko minuta.

U požarnom scenariju (požar tekstilne robe) u kojemu konstrukcija ne zadovoljava uvjet nosivosti od 30 minuta, donja zona iščezne nakon devet minuta od početka požara. U 10. minuti je unutar cijelog volumena skladišta temperatura od cca 430 °C. Ukoliko se u skladištu s takvom robom ne ugradi sprinkler instalacija, konstrukcija će prije gašenja požara vjerojatno doživjeti kolaps bez obzira na dodatnu zaštitu, a sve osobe se svakako moraju evakuirati u prvih nekoliko minuta.

Iz navedenog se da utvrditi kako je upitan smisao tražene otpornosti nosive konstrukcije u trajanju od minimalno 30 minuta.

Kako bismo ispunili zahtjeve propisane hrvatskim Pravilnikom, konstrukciju koja ne zadovoljava uvjet nosivosti u trajanju od 30 minuta je potrebno dodatno štititi. Zaštita sprinkler sustavom je s aspekta sigurnosti i zaštite uskladištene robe koja često prelazi vrijednost samog skladišta najprikladnija jer ne dopušta razvoj požara i njegovo širenje. Prilikom nastanka požara, sprinkler

sustav će se vrlo brzo aktivirati te će nastali požar lokalizirati do dolaska vatrogasne postrojbe ili u većini slučajeva u potpunosti ugasiti. Na taj način je omogućeno dulje vrijeme za evakuaciju osoba kao i mogućnost ulaska vatrogascima u skladište za potpuno gašenje požara. Propisi koji definiraju uvjete za ugradnju sprinkler instalacije detaljno postavljaju ograničenja vezana za način i raspored skladištenja robe. U nekim slučajevima je potrebno postaviti sprinkler mlaznice i unutar regala što povećava cijenu ugradnje. Ukoliko u javnoj vodovodnoj mreži nije dostupna dovoljna količina vode ili tlak za ispravno funkcioniranje sustava, potrebno je izgraditi spremnik za vodu i pumpe za podizanje tlaka s rezervnim napajanjem. Sprinkler sustav je potrebno redovno ispitivati i održavati. U razvijenim zemljama osiguravajuće kuće odobravaju znatne popuste na premiju osiguranja skladišnih prostora u kojima je ugrađen sprinkler sustav te se na taj način anulira visoka investicija ugradnje sustava.

Prednost pasivnih mjera zaštite konstrukcije je u mogućnosti postavljanja zaštite samo lokalno na elemente kojima otkazuje nosivost.

U Tablici 5.1 je popis elemenata koje je potrebno štiti u odnosu na požarne scenarije u kojima ne zadovoljavaju požarnu otpornost u trajanju od 30 minuta.

Tablica 5.1 Elementi koje je potrebno protupožarno štiti

Požarni scenarij/ Konstrukcijski element	Tekstilna roba	ISO 834
Stup - HEA260	+	+
Glavni nosač - IPE360	+	/
Sekundarni nosač - 120/80/6,3	+	+
Zabatni glavni nosač	+	+
Zabatni stup	+	+
Ukrutna greda	+	/
Zabatna ukрутna greda	+	/
Spreg	+	+

+ - potrebno štiti

/ - nije potrebno štiti

U Tablici 5.2 su navedene procjene troškova zaštite elemenata navedenih u Tablici 5.1. U cijenu su uključeni rad i ugradnja zaštite do potpune gotovosti. Cijene su usklađene s trenutno aktualnim cijenama na tržištu.

Tablica 5.2 Procjena troškova zaštite konstrukcije od požara

Vrsta zaštite / Požarni scenarij	Protupožarni premazi [HRK]	Protupožarna žbuka [HRK]	Protupožarne obloge [HRK]	Sprinkler sustav* [HRK]
ISO 834	11.500,00	10.500,00	40.000,00 kn	710.000,00
Požar tekstilne robe	19.000,00	17.000,00	65.000,00 kn	

* U cijenu ugradnje sprinkler sustava je uračunat stropni razvod, armiranobetonski spremnik za vodu i sprinkler stanica s pumpama za podizanje tlaka.

6. PRIJEDLOG SMJERNICA ZA ZAŠTITU ČELIČNE KONSTRUKCIJE SKLADIŠTA OD DJELOVANJA POŽARA

Nosiva konstrukcija analiziranog skladišta je čelična okvirna konstrukcija, a način skladištenja robe unutar skladišta je u regalima na drvenim paletama. Hrvatskim Pravilnikom o zaštiti od požara [1] u malim regalnim skladištima sa srednjim i visokim požarnim opterećenjem je propisana potreba za ugradnjom sustava za odvođenje dima i topline dok NFPA 1 [2] takav zahtjev ne propisuje. U predmetnom skladištu nije predviđen mehanički sustav odvođenja dima i topline, ali su na pročeljima predviđeni otvori površine 6% u odnosu na površinu poda. Rezultati provedene analize upućuju na zaključak da čeličnu konstrukciju nije potrebno štititi od požara u slučaju skladištenja robe niskog i srednjeg požarnog opterećenja. Za slučaj visokog požarnog opterećenja potrebno je provesti proračun konstrukcije na požar, te dokazati potrebu za izvedbom protupožarne zaštite.

Skladišta u kojima se skladišti roba velike vrijednosti preporučuje se štititi sprinkler sustavom. Sprinkler sustav kao aktivna mjera zaštite služi za sprječavanje širenja požara odnosno za zaštitu uskladištene robe, dok je pasivnim mjerama zaštite zadatak isključivo sprječavanje kolapsa konstrukcije u zahtijevanom vremenu.

Ukoliko se pokaže potreba za zaštitom od požara, predlaže se primjenjivati ekspandirajuće premaze. Zaštita ekspandirajućim premazom je znatno jeftinija od zaštite protupožarnim pločama, zauzima manje mjesta i estetski je puno prihvatljivija od zaštite protupožarnim žbukama. Moguće ju je nanijeti u radionici što je pogodno zbog brzine gradnje skladišta budući da drugi radovi ne moraju biti u prekidu za vrijeme nanošenja zaštite. Nadalje, nanošenje u radionici je preporučljivo zbog kontroliranih uvjeta u kojima se zaštita nanosi i suši.

7. ZAKLJUČAK

Specijalističkim radom je provedeno modeliranje razvoja realnih požara u skladištu s čeličnom konstrukcijom za 5 različitih vrsta uskladištene robe. Roba se razlikovala po specifičnom požarnom opterećenju (nisko, srednje, visoko) i po brzini razvoja požara (spori, srednje brzi, brzi). Programskim paketom Ozone v3.0.4 putem 2 - zonskog računalnog modela su za sva požarna opterećenja modelirane realne požarne krivulje temperatura - vrijeme. Dobivene temperaturne krivulje su uspoređene sa standardnom krivuljom požara ISO 834. Sve temperaturne krivulje, u odnosu na ISO 834, na početku imaju sporiju brzinu razvoja požara što se manifestira kao duže trajanje faze razvoja požara i niže temperature u prvih nekoliko minuta. Nakon prelaska u potpuno razvijeni požar temperaturne krivulje drvenog pločastog namještaja i tekstilne robe razvijaju veće temperature od ISO 834 krivulje. Simulacijom realnih požara uočeno je kako su svi požari kontrolirani količinom gorive robe u skladištu osim požara tekstilne robe koji je kontroliran količinom kisika u skladištu.

Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima [1] zahtjeva nosivost čelične konstrukcije skladišta u trajanju od 30 minuta za razliku od NFPA 1 [2] standarda u kojemu nosivost konstrukcije u požaru nije propisana, odnosno ne zahtjeva se. Otpornost nosive konstrukcije na djelovanje požara u trajanju od 30 minuta je ispunjena bez dodatne zaštite za četiri od pet modeliranih realnih požara, što ukazuje da je zahtjev NFPA primjenjiv u veći slučajeva. Iskazala se potreba za dodatnom zaštitom čelične konstrukcije pri djelovanju požara tekstilne robe i pri djelovanju standardne ISO 834 krivulje.

Analizom modeliranih temperaturnih krivulja se može zaključiti kako je za dokaz nosivosti čelične konstrukcije na djelovanje požara u trajanju od 30 minuta najbitniji faktor brzina razvoja požara. Vidljivo je kako samo požari okarakterizirani kao brzi uz dovoljno visoko specifično požarno opterećenje mogu u kratkom vremenu postići kritične temperature čeličnih elemenata na razmatranoj konstrukciji. Čak ni požar duhanskih proizvoda, koji spada u visoko požarno opterećenje s brzim razvojem požara, nije razvio dovoljno visoke temperature koje bi uzrokovale otkazivanje nosivosti elemenata konstrukcije.

Ukoliko se proračunom dokaže potreba za dodatnom zaštitom čelične konstrukcije u slučaju požara, predložene su smjernice za odabir zaštite. U skladištima u kojima se skladišti roba visoke vrijednosti predlaže se ugradnja sprinkler sustava jer će on osim zaštite same konstrukcije

spriječiti širenje požara i u kratkom ga vremenu lokalizirati ili u potpunosti ugasiti te na taj način zaštititi većinu uskladištene robe. Provedena je usporedba tri najkorištenije mjere pasivne zaštite konstrukcije, usvojene su potrebne debljine zaštita te je provedena usporedba prikladnosti primjene i ekonomska analiza. Za navedenu namjenu i traženu klasu otpornosti konstrukcije, predlaže se zaštita ekspanzirajućim premazima.

Zaključno, projektiranje požarne zaštite čelične konstrukcije prema hrvatskom pravilniku može se smatrati neekonomičnim rješenjem jer zahtjeva izvedbu zaštite čelične konstrukcije. Kako bi se optimizirali troškovi izgradnje neophodno je provesti simulaciju realnog požara jer u većini slučajeva zaštita konstrukcije neće biti potrebna.

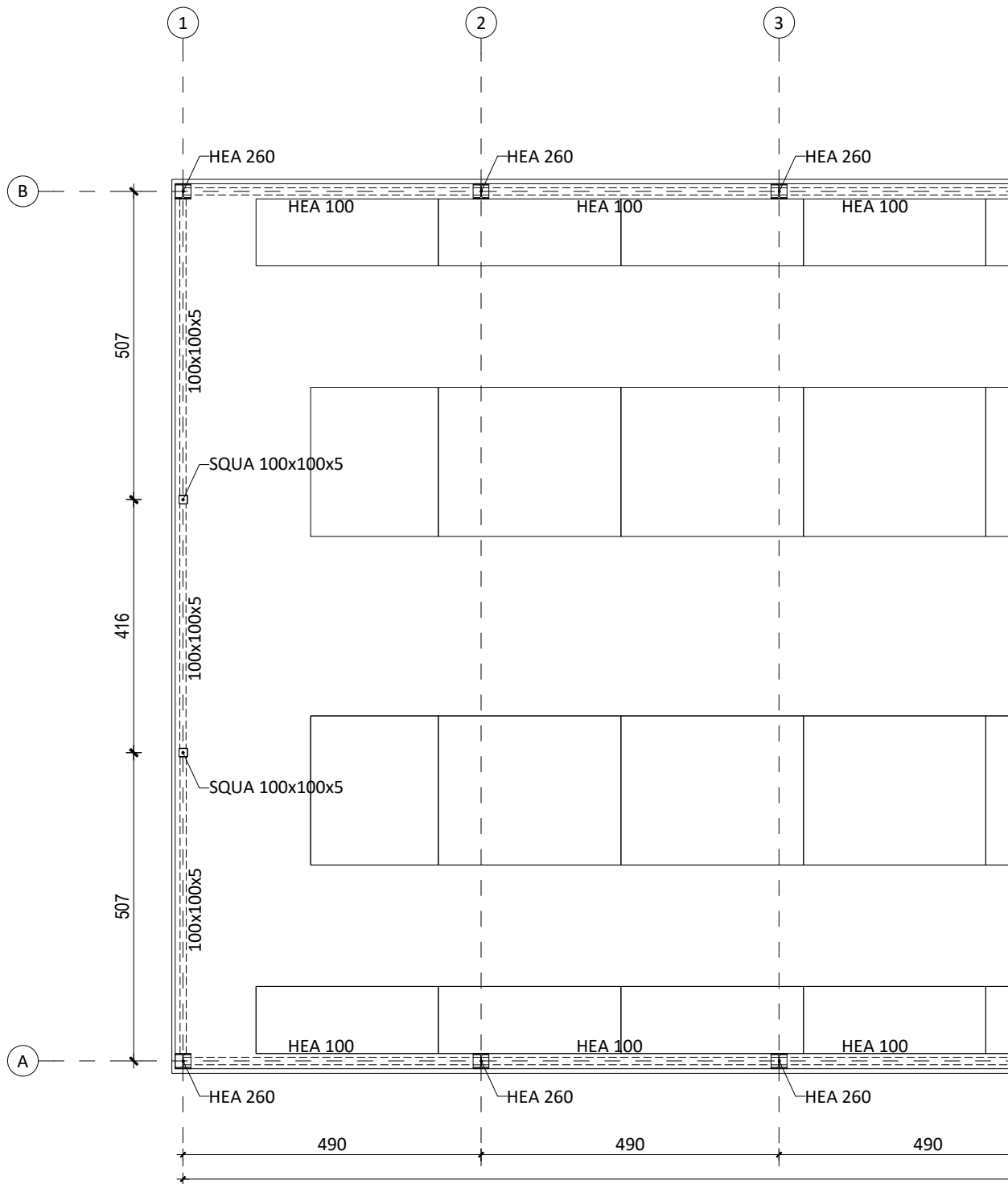
Nadalje, u prostoru skladišta se može zadesiti svega nekoliko zaposlenih osoba koje su upoznate s evakuacijskim putevima iz objekta te se evakuacija može provesti u nekoliko minuta. Imajući na umu vrijeme potrebno za evakuaciju kao i činjenicu da je četiri od pet skladišta zadovoljilo traženu požarnu otpornost bez dodatne zaštite, može se zaključiti kako je zahtjev iz hrvatskog pravilnika konzervativan te da američki standard propisuje realnije zahtjeve za konstrukcije skladišta izložene požaru.

8. LITERATURA

- [1] Ministarstvo unutarnjih poslova: Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08), (29. srpnja 2008.)
- [2] National Fire Protection Association: NFPA 1, (2021.)
- [3] Hrvatski sabor: Zakon o zaštiti od požara: Zakon o zaštiti od požara (NN 92/10, 114/22), (3.10.2022.)
- [4] Ministarstvo unutarnjih poslova: Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13, 87/15), (31. srpnja 2015.)
- [5] OHRA: <https://www.ohra.hr/proizvodi/paletni-regal> [pristupljeno 1. listopada 2022.]
- [6] Agroklub: <https://www.agroklub.com/poljoprivredne-vijesti/gradit-ce-se-20-hladnjaca-za-jabuke-te-drugo-voce-i-povrce/49638/> [pristupljeno 1. listopada 2022.]
- [7] Ministarstvo unutarnjih poslova: Pravilnik o uvjetima za vatrogasne pristupe (NN 35/94, 55/94, 142/03), (27. kolovoza 2003.)
- [8] National Fire Protection Association: <https://www.nfpa.org/About-NFPA> [pristupljeno 22. rujna 2022.]
- [9] National Fire Protection Association: NFPA 101, (2021.)
- [10] Serdar M.: Ponašanje građevinskih materijala u požaru, Predavanje na poslijediplomskom specijalističkom studiju požarnog inženjerstva (2018.)
- [11] Skejić, D.: https://www.huzop.hr/wp-content/uploads/2019/06/HUZOP_Zg_2019_Skejic.pdf [pristupljeno 26. rujna 2022.]
- [12] Promat: <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/39721/odabir-odgovarajuceg-sustava-za-protupožarnu-zastitu-celicnih-konstrukcija/> [pristupljeno 25. rujna 2022.]
- [13] Promat: <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/39739/kliucni-parametri-protupožarne-zastite-celicnih-konstrukcija/> [pristupljeno 22. rujna 2022.]
- [14] Kozlik, M.: Materijali za zaštitu od požara čeličnih konstrukcija, Završni rad (2019.)
- [15] Apin: <https://apin.hr/sprinkler-sustav/dijelovi/> [pristupljeno 20. rujna 2022.]
- [16] Aling: <http://www.aling.hr/clanak/38/sprinkler-sustav> [pristupljeno 20. rujna 2022.]
- [17] Deković, J.: http://huzop.hr/wp-content/uploads/2014/12/SPRINKLER_u_garazama_2007.pdf [pristupljeno 21. rujna 2022.]

- [18] MTZ instalacije: <http://www.mtz-instalacije.hr/sprinkleri/> [pristupljeno 21. rujna 2022.]
- [19] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1991-1-1:2012 (2012.)
- [20] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1991-1-3:2012 (2012.)
- [21] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1991-1-4:2012 (2012.)
- [22] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1991-1-2:2012 (2012.)
- [23] Državni vatrogasni savez Austrije: Tehničke smjernice za preventivnu zaštitu od požara TRVB A 126 (1987.)
- [24] Boko, I.: Modeliranje razvoja požara, Predavanje na poslijediplomskom specijalističkom studiju požarnog inženjerstva (2018.)
- [25] Silva, T. et al.: Buckling Analysis of Steel Frames Exposed to Natural Fire Scenarios, Structures, 10, 76–88. doi:10.1016/j.istruc.2017.02.003
- [26] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1990:2011 (2011.)
- [27] Skejić, D. et al.: Procjena metoda proračuna čeličnog nosača izloženog požaru, GRAĐEVINAR 70 (2018) 2, 159-169
- [27] Promat: <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/39739/kljucni-parametri-protupozarne-zastite-celicnih-konstrukcija/> [pristupljeno 22. rujna 2022.]

9. GRAFIČKI PRILOZI



GRADIVO:

beton:

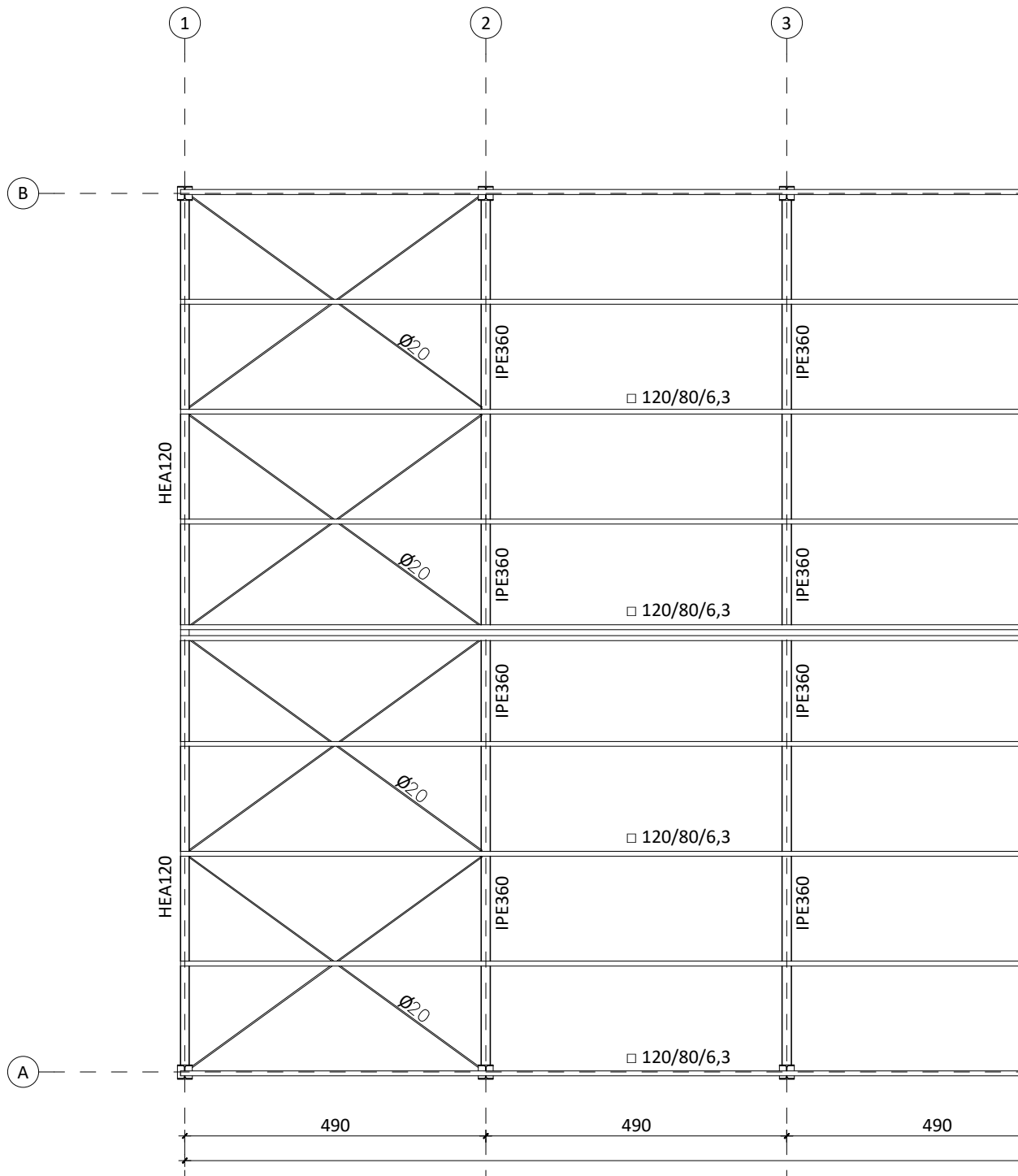
- C25/30, XC2, c=4,0 cm - temeljna konstrukcija
- C25/30, XC1, c=3,0 cm - nadtemeljna konstrukcija

armatura:

- B500B - armaturne šipke
- B500A - armaturne mreže

čelik:

- S355J2 rasponska konstrukcija (IPE 300),
 - S235J2 ostala konstrukcija
- klasa izvođenja EXC1, zaštita od korozije C2 (160 μ m)
klasa zavara D, klasa zavara C - priključci



GRADIVO:

beton:

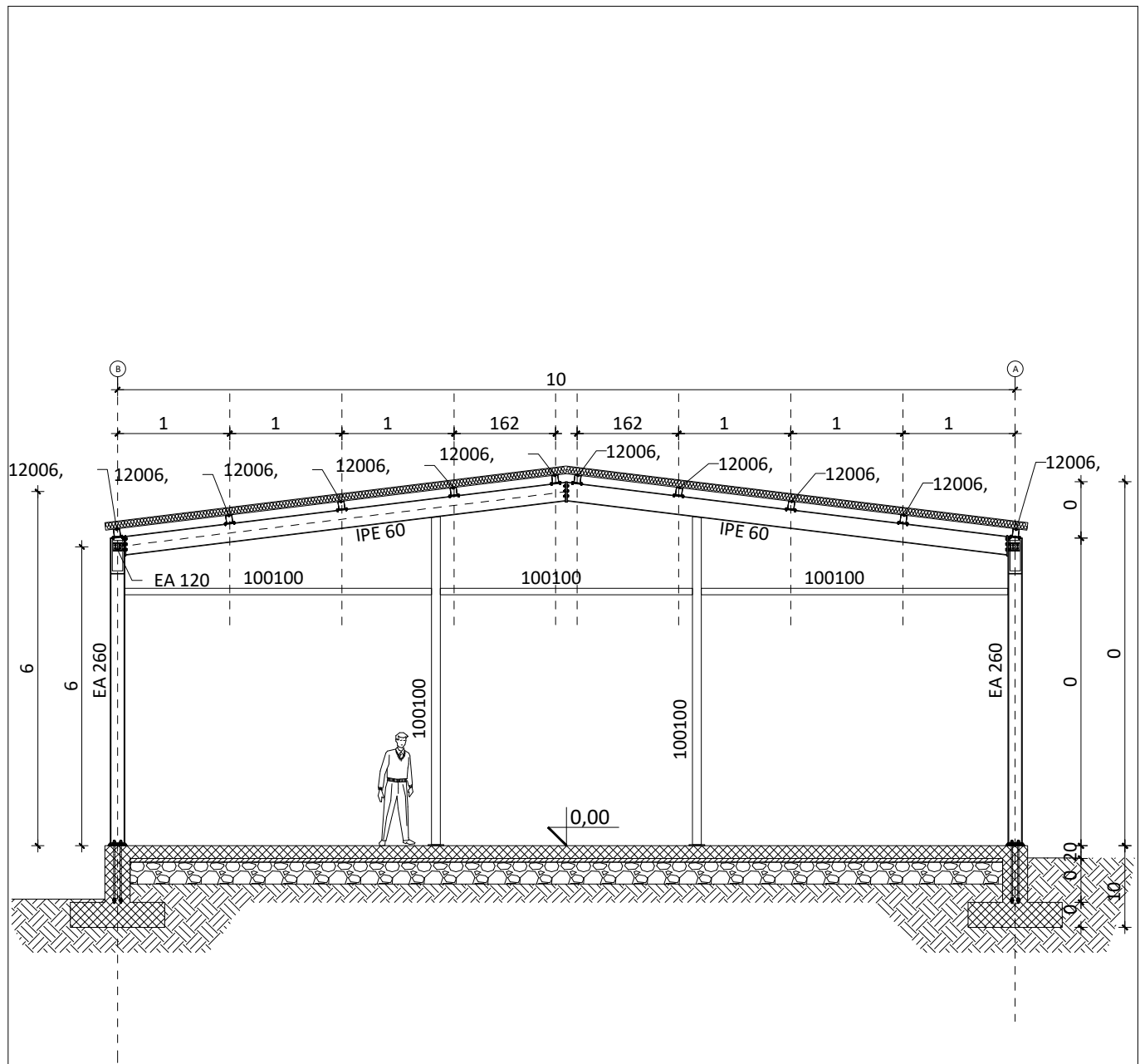
- C25/30, XC2, c=4,0 cm - temeljna konstrukcija
- C25/30, XC1, c=3,0 cm - nadtemeljna konstrukcija

armatura:

- B500B - armaturne šipke
- B500A - armaturne mreže

čelik:

- S355J2 rasponska konstrukcija (IPE 300),
 - S235J2 ostala konstrukcija
- klasa izvođenja EXC1, zaštita od korozije C2 (160 μ m)
klasa zavara D, klasa zavara C - priključci



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Fra Andrije Kačića Miošića 26, 10 000 Zagreb		TEMA: OPTIMALNI SUSTAV ZAŠTITE OD POŽARA ČELIČNE KONSTRUKCIJE SKLADIŠTA	
STUDIJ: Pojedini dijelovi		DATUM: 10.10.2022	
SMJER: Pomoćno zgrade		SADRŽAJ LISTA: PRESJEK 1	
PREDMET: Strukturalni rad		MJEŠTO: 1:100	
STUDENT: Mario Janjić, agingaedi	MENTOR: rodr Daor Sejić	BROJ LISTA:	