

Izbor optimalnog nosivog sustava čelične konstrukcije hale na požarno djelovanje

Strunje, Ante

Professional thesis / Završni specijalistički

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:448111>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ante Strunje

**IZBOR OPTIMALNOG NOSIVOG SUSTAVA
ČELIČNE KONSTRUKCIJE HALE NA POŽARNO
DJELOVANJE
SPECIJALISTIČKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Boko

Zagreb, 2023.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ante Strunje

**SELECTION OF THE OPTIMAL SUPPORTING
SYSTEM FROM THE STEEL STRUCTURE OF
THE HALL FOR FIRE ACTION**

SPECIALIST THESIS

Under the supervision:

Prof. dr. sc. Ivica Boko

Zagreb, 2023.

IZJAVA O IZVORNOSTI

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

Potpis

Sažetak:

U specijalističkom radu je prikazan način modeliranja razvoja požara, određivanja gustoće požarnog opterećenja, prijenos topline te postupak dokazivanja nosivosti konstrukcije uslijed djelovanja požara. U radu su također prikazane generalne smjernice te parametri koju utječu na određivanje nosive konstrukcije hale te načini stabilizacije hale, općeniti opis najčešće korištenih protupožarnih zaštita čeličnih konstrukcija te kratki osvrt na regulativu iz područja zaštite od požara u skladištima.

Zatim su analizirana tri okvira čelične hale različitih statičkih sustava sa različitim požarnim zaštitama te utjecaj požarnog opterećenja na njih. Za analizu su odabrani sustavi u obliku trozglobnog, dvozglobnog te upetog okvira. Kod dvozglobnog okvira zglobovi se nalaze na mjestu spoja stupa i temelja dok kod trozglobnog je uz ove spojeve također modeliran i zglob na mjestu spoja greda (sljeme) okvira. Za svaki od ovih okvira su analizirana četiri slučaja. Okviri su najprije proračunati na GSN osnovnu kombinaciju. Zatim je napravljen slučaj sa okvirima koji imaju tanju protupožarnu zaštitom te bez prisilnih deformacija nastalih temperaturnim istežanjem čelika prouzročenih požarom. Slijedeći slučaj je također sa protupožarnom zaštitom iste debljine ali u njemu su modelirane i deformacije nastale temp. istežanjem. Posljednji slučaj su okviri sa debljom protupožarnom zaštitom te sa temperaturnim istežanjem. Za sve slučajeve je korišteno isto požarno opterećenje. Na kraju je napravljena usporedba rezultata dobivenih za različite statičke sustave.

Cilj rada je bio odrediti utjecaj požarnog opterećenja na različite nosive sustave čelične konstrukcije industrijske hale te odabir rješenja konstrukcije pod djelovanjem požarnog opterećenja s obzirom na potrebnu količinu osnovnog materijala (čelika) za izvedbu nosive konstrukcije.

Na temelju rezultata proračuna može se primijetiti da sustavi sa manjim stupnjem slobode imaju lošiju nosivost tijekom požara. Također se može uočiti kako se primjenom deblje protupožarne zaštite postigla osjetno manja potreba za količinom čelika.

Ključne riječi: Čelik, mehanička svojstva, statički sustav, okvir, protupožarna zaštita, čelična hala, dokaz nosivosti

Abstract:

The specialist paper presents the method of modeling fire development, determining the fire load density, heat transfer, and the procedure for proving the load-bearing capacity of the structure due to the effects of fire. The paper also presents general guidelines and parameters that affect the determination of the load-bearing structure of the hall and ways of stabilizing the hall, a general description of the most commonly used fire protection of steel structures, and a brief overview of the regulations in the field of fire protection in warehouses.

Then, three steel hall frames with different static systems, different fire protections and the influence of fire load on them were analyzed. Three-jointed, two-jointed and braced frame systems were selected for analysis. In the two-jointed frame, the joints are located at the junction of the column and the foundation, while in the three-jointed frame, in addition to previous mentioned joint, the joint is also modeled at the junction of the frame beams. Four cases were analyzed for each of these frames. The frames are first calculated on the GSN basic combination. Then the case was made with frames that have thinner fire protection and without forced deformations caused by temperature stretching of steel caused by fire. The following case is also with fire protection of the same thickness, but in it the deformations caused by temp. stretching is applied. The last case is frames with thicker fire protection and with temperature stretching. The same fire load was used for all cases. At the end, a comparison of the results obtained for different static systems was made.

The aim of the work was to determine the influence of fire load on various load-bearing systems of the steel structure of the industrial hall, and to select the solution of the structure under the effect of fire load, considering the required amount of material (steel) for the construction of the load-bearing structure.

Based on the calculation results, it can be noted that systems with a smaller degree of freedom have a worse load capacity during a fire. It can also be seen that by applying thicker fire protection, a significantly lower need for the amount of steel was achieved.

Key words: Steel, mechanical properties, static system, frame, fire protection, steel hall, determination of bearing capacity

Sadržaj

1.	UVOD	7
2.	OPĆENITO O PRORAČUNU POŽARNOG OPTEREĆENJA I OTPORNOSTI METALNIH KONSTRUKCIJA NA POŽAR	9
2.1	Općenito o modeliranju požara u zatvorenom prostoru pomoću složenih metoda	9
2.1.1	Modeli s jednim područjem	10
2.1.2	Modeli s dva područja	11
2.1.3	Gustoće požarnih opterećenja	12
2.1.4	Određivanje karakteristične vrijednosti gustoće požarnog opterećenja	13
2.1.5	Prijenos topline	14
2.2	Prikaz postupka dokazivanja nosivosti konstrukcije uslijed djelovanja požara	16
3.	OBLIKOVANJE I ODABIR STATIČKIH SUSTAVA HALE	21
3.1	Parametri koji utječu na oblikovanje hale	21
3.1.1	Općenito	21
3.1.2	Tipična hala	25
3.1.3	Stabilizacija	25
3.1.4	Utjecaj temperature na određivanje sustava stabilizacije (položaj vezova)	27
3.2	Odabir statičkih sustava hale (predstavljanje triju statičkih sustava)	28
3.3	Konstruktivni elementi hala	33
3.3.1	Upeti okvir	33
3.3.2	Dvozglobni okvir	34
3.3.3	Trozglobni okvir	35
4.	ZAŠTITA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA OD POŽARA	36
4.1	Općenito o zaštiti	36
4.2	Protupožarne ploče	38
5.	REGULATIVA IZ PODRUČJA ZAŠTITE OD POŽARA U SKLADIŠTIMA	40
6.	ODREĐIVANJE POŽARNOG SCENARIJA I OPTEREĆENJA	42
6.1	Požarno opterećenje	42
6.1.1	Požarni sektor	42
6.1.2	Ulazni parametri	42
6.1.3	Karakteristike požarnog sektora	43
6.1.4	Analiza požarnog djelovanja	43
7.	ODREĐIVANJE REZNIH SILA I DIMENZIONIRANJE NA DJELOVANJE POŽARA.....	47
7.1	Opterećenja	47
7.1.1	Stalno opterećenje	47
7.1.2	Promjenjiva opterećenja	47
7.2	Prikaz rezultata dimenzioniranja za model s dvozglobnim okvirom	58
7.2.1	Model s dvozglobnim okvirom zaštićen PX protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija	58
7.2.2	Model s dvozglobnim okvirom – GSN – osnovna kombinacija	78

7.2.3	Model s dvozglbnim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija ...	78
7.2.4	Model s dvozglbnim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija bez temperaturnog djelovanja	79
7.3	Prikaz rezultata dimenzioniranja za model s upetim okvirom	80
7.3.1	Model s upetim okvirom zaštićen PX protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija	80
7.3.2	Model s upetim okvirom – GSN – osnovna kombinacija	100
7.3.3	Model s upetim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija	100
7.3.4	Model s upetim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija bez temperaturnog djelovanja	101
7.4	Prikaz rezultata dimenzioniranja za model s trozglbnim okvirom	102
7.4.1	Model s trozglbnim okvirom zaštićen PX protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija	102
7.4.2	Model s trozglbnim okvirom – GSN – osnovna kombinacija	122
7.4.3	Model s trozglbnim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija ..	122
7.4.4	Model s trozglbnim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija – bez temperaturnog djelovanja	123
8.	DISKUSIJA REZULTATA	124
9.	ZAKLJUČAK	129
10.	LITERATURA	130

POPIS SLIKA:

Slika 1.	Prikaz izloženosti elemenata predmetne konstrukcije požaru [4]	15
Slika 2.	Pojava reakcijske sile zbog toplinskog izduženja [11]	17
Slika 3.	Različiti oblici okvirnih sustava [10]	24
Slika 4.	Simetrični portalni okvir [10].....	25
Slika 5.	Vrste stabilizacija [10]	26
Slika 6.	Tlačne sile uslijed spriječenog širenja[10]	27
Slika 7.	položaj vertikalnih vezova[10]	28
Slika 8.	3D prikaz modela	29
Slika 9.	3D prikaz modela - aksonometrija	29
Slika 10.	3D prikaz zabatne stijene hale	30
Slika 11.	Prikaz glavnog nosača	30
Slika 12.	Bokocrt hale	30
Slika 13.	3D Prikaz bočne strane hale	30
Slika 14.	Tlocrt hale	31
Slika 15.	3D Prikaz - pogled odozgo	32
Slika 16.	Upeti okvir	34
Slika 17.	Dvozgladni okvir.....	34
Slika 18.	Trozgladni okvir	35
Slika 19.	Tržišni udio sustava zaštite od požara[14]	37
Slika 20.	Protupožarne ploče [15]	38
Slika 21.	Temperatura plina ($\theta_{g,max} = 980 \text{ °C}$ pri $t = 30\text{min}$)	45
Slika 22.	Brzina otpuštanja topline ($Q_{max} = 631.00 \text{ MW}$ pri $t = 33.0 \text{ min}$)	46
Slika 23.	Visina granice zona ($h_{max} = 3.08 \text{ m}$ pri $t = 38.5 \text{ min}$)	46
Slika 24.	Rasporedi (slučajevi) opterećenja snijegom za dvostrešne krovove	47
Slika 25.	Vjetrovne zone vertikalnih zidova[21]	48
Slika 26.	Vjetrovne zone vertikalnih zidova[21]	49
Slika 27.	Vjetrovne zone za krov[21]	50
Slika 28.	LC2 – dodatno stalno – krov	53
Slika 29.	LC3 – dodatno stalno - zidovi	53
Slika 30.	LC4 – snijeg	53
Slika 31.	LC5 – snijeg lijeva stana krova	53
Slika 32.	LC6 – snijeg desna stana krova	53
Slika 33.	Vijetar1 - 0, + CPE, + CPI	53
Slika 34.	Vijetar2 - 0, + CPE, - CPI	54
Slika 35.	Vijetar3 - 0, - CPE, + CPI	54
Slika 36.	Vijetar4 - 0, - CPE, - CPI	54
Slika 37.	Vijetar5 - 90, + CPE, + CPI	54
Slika 38.	Vijetar6 - 90, + CPE, - CPI	54
Slika 39.	Vijetar7 - 90, - CPE, + CPI	54

Slika 40.	Vijetar8 - 90, - CPE, - CPI	55
Slika 41.	Vijetar9 - 180, + CPE, + CPI	55
Slika 42.	Vijetar10 - 180, + CPE, - CPI	55
Slika 43.	Vijetar11 - 180, - CPE, + CPI	55
Slika 44.	Vijetar12 - 180, - CPE, - CPI	55
Slika 45.	Vijetar13 - 270, + CPE, + CPI	55
Slika 46.	Vijetar14 - 270, + CPE, - CPI	56
Slika 47.	Vijetar15 - 270, - CPE, + CPI	56
Slika 48.	Vijetar16 - 270, - CPE, - CPI	56
Slika 49.	LC 7 – Požar (opterećenje temperaturom)	56
Slika 50.	Rezne sile – uzdužna sila N	60
Slika 51.	Rezne sile – Moment	60
Slika 52.	Rezne sile – poprečna sila	61
Slika 53.	Rezne sile – Moment	61
Slika 54.	Rezne sile – poprečna sila	62
Slika 55.	Iskoristivost elemenata (grede i stupa)	62
Slika 56.	Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t	64
Slika 57.	Temperature plina i temperature čelika u gredi u vremenu t	71
Slika 58.	Rezne sile – uzdužna sila N	82
Slika 59.	Rezne sile – Moment	82
Slika 60.	Rezne sile – poprečna sila	83
Slika 61.	Rezne sile – Moment	83
Slika 62.	Rezne sile – poprečna sila	84
Slika 63.	Iskoristivost elemenata (grede i stupa)	84
Slika 64.	Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t	86
Slika 65.	Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t	93
Slika 66.	Rezne sile – uzdužna sila N	104
Slika 67.	Rezne sile – Moment	104
Slika 68.	Rezne sile – poprečna sila	105
Slika 69.	Rezne sile – Moment	105
Slika 70.	Rezne sile – poprečna sila	106
Slika 71.	Iskoristivost elemenata (grede i stupa)	106
Slika 72.	Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t	108
Slika 73.	Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t	115
Slika 74.	Spoj stup-temelj u obliku sidrenih vijaka	124
Slika 75.	Količina potrebnog čelika – usporedba statičkih sustava sa različitim protupožarnom zaštitom .	125
Slika 76.	Prikaz prirasta količine potrebnog čelika smanjenjem protupožarne zaštite za različite statičke sustave	126
Slika 77.	Razlika potrebnog čelika kod izvanredne (požarne) komb. u odnosu na GSN redovnu komb. – usporedba statičkih sustava sa različitim protupožarnom zaštitom	126

Slika 78. Prikaz prirasta razlike količine potrebnog čelika smanjenjem protupožarne zaštite za različite statičke sustave kod izvanredne (požarne) komb. u odnosu na GSN redovnu komb 127

Slika 79. Iskoristivost stupa kod upetog okvira 128

POPIS TABLICA:

Tablica 1.	Faktori 1, 2	12
Tablica 2.	Faktori	13
Tablica 3.	Karakteristike protupožarne zaštite	39
Tablica 4.	Tablica odabira sustava zaštite od požara u skladištima	41
Tablica 5.	Značajke materijala obloge skladišta	44
Tablica 6.	Koeficijenti tlakova za vertikalne zidove	49
Tablica 7.	Koeficijenti tlakova za krov	50
Tablica 8.	Parcijalni faktori i faktori kombinacija	51
Tablica 9.	Popis opterećenja	52
Tablica 10.	Grupe opterećenja	53
Tablica 11.	Mjerodavne kombinacije – dvozglojni okvir PX zaštita	58
Tablica 12.	Maksimalne rezne sile po presjecima– dvozglojni okvir PX zaštita	59
Tablica 13.	Iskoristivost poprečnih presjeka – dvozglojni okvir PX zaštita	62
Tablica 14.	Mjerodavne kombinacije– dvozglojni okvir GSN	78
Tablica 15.	Iskoristivost poprečnih presjeka– dvozglojni okvir GSN	78
Tablica 16.	Mjerodavne kombinacije– dvozglojni okvir P zaštita.....	78
Tablica 17.	Iskoristivost poprečnih presjeka– dvozglojni okvir P zaštita	79
Tablica 18.	Mjerodavne kombinacije– dvozglojni okvir P zaštita, bez temp. istezanja	79
Tablica 19.	Iskoristivost poprečnih presjeka– dvozglojni okvir P zaštita, bez temp. istezanja	79
Tablica 20.	Mjerodavne kombinacije – upeti okvir PX zaštita	80
Tablica 21.	Maksimalne rezne sile po presjecima– upeti okvir PX zaštita.....	81
Tablica 22.	Iskoristivost poprečnih presjeka – upeti okvir PX zaštita	84
Tablica 23.	Mjerodavne kombinacije– upeti okvir GSN	100
Tablica 24.	Iskoristivost poprečnih presjeka– upeti okvir GSN	100
Tablica 25.	Mjerodavne kombinacije– upeti okvir P zaštita	100
Tablica 26.	Iskoristivost poprečnih presjeka– upeti okvir P zaštita	100
Tablica 27.	Mjerodavne kombinacije– upeti okvir P zaštita, bez temp. istezanja	101
Tablica 28.	Iskoristivost poprečnih presjeka– upeti okvir P zaštita, bez temp. istezanja	101
Tablica 29.	Mjerodavne kombinacije – trozglojni okvir PX zaštita	102
Tablica 30.	Maksimalne rezne sile po presjecima– trozglojni okvir PX zaštita	103
Tablica 31.	Iskoristivost poprečnih presjeka – trozglojni okvir PX zaštita	106
Tablica 32.	Mjerodavne kombinacije– trozglojni okvir GSN	122
Tablica 33.	Iskoristivost poprečnih presjeka– trozglojni okvir GSN	122
Tablica 34.	Mjerodavne kombinacije– trozglojni okvir P zaštita	122
Tablica 35.	Iskoristivost poprečnih presjeka– trozglojni okvir P zaštita	122
Tablica 36.	Mjerodavne kombinacije– trozglojni okvir P zaštita, bez temp. istezanja	123
Tablica 37.	Iskoristivost poprečnih presjeka– trozglojni okvir P zaštita, bez temp. istezanja	123
Tablica 38.	Količine potrebnog čelika – usporedba	125

1. UVOD

Problem sigurnosti konstrukcija izloženih djelovanju visokih požarnih temperatura danas je u svijetu veoma aktualna tema. Svako nekontrolirano gorenje zbog kojeg može doći do ozljede ljudi i uništenja materijalnih dobara naziva se požar, koji prema novim propisima čini i jedno od ekstremnih djelovanja na konstrukciju, a važnosti ovoj problematici doprinijela je i havarija WTC nebudera koja je imala iznimno jake negativne efekte na ljude, imovinu i društvo kao cjelinu [1].

Sigurnost u slučaju požara je svojstvo koje se postavlja kao temeljni zahtjev za građevinu tijekom njenog građenja i uporabe. U skladu s tim zahtjevom, građevine moraju biti projektirane, izgrađene i održavane tako da u slučaju izbijanja požara, ljudski i materijalni gubici budu svedeni na najmanju moguću mjeru i da se očuva nosivost konstrukcije za zahtijevano vrijeme.

Projektanti konstrukcija se u slučaju zadovoljavanja ovog temeljnog zahtjeva često nađu u nedoumici u smislu teškog određivanja požarnog opterećenja, odabira tipa konstrukcije te njihove pravilne analize. Mnogi faktori utječu na razvoj požara te na ponašanje konstrukcije s obzirom na razvijeni požar, od geometrije konstrukcije, statičkog sustava konstrukcije, broja otvora, vrste i količine gorivih materijala, proizvodnih procesa koji se odvijaju, protupožarnoj zaštiti objekta, pristupačnim putevima itd.

Različiti statički sustavi se različito ponašaju tijekom požara. Generalno sustavi sa više stupnjeva slobode se bolje ponašaju u požaru zbog većih mogućnosti slobodnih deformacija. No u praksi se često, zbog raznih razloga kao npr. zbog zahtjeva investitora ili zbog mogućnosti izvedbe, izvode konstrukcije s velikim brojem upetih veza što u konačnici smanjuje mogućnost slobodnih deformacija. Također u današnje vrijeme cijena materijala (čelika) je sve veća te se pokušavanju što više racionalizirati konstrukcije čime se postiže smanjenje utjecaja cijene materijala na konačnu cijenu investicije.

Radi svih ovih razloga konstrukcije često budu ili predimenzionirane ili neadekvatno projektiranje na djelovanje požara čime se dolazi do vrlo visokih cijena izgradnje konstrukcije ili do njene havarije što za sobom nosi veliku materijalnu štetu te, u gorim situacijama, gubitak ljudskih života.

U ovom radu analizirana su tri okvira čelične hale različitih statičkih sustava sa različitim požarnim zaštitama te utjecaj požarnog opterećenja na njih. S obzirom na dobivene rezultate dane su smjernice koje bi mogle olakšati projektantima u budućnosti odabir optimalnog sustava nosive konstrukcije. Za simulaciju požara primijenio se napredni model razvoja i djelovanja požara upotrebom računalnog programa Ozone V3.04. i to za kombinaciju modela s jednim područjem i modela s dva područja. Analiza temperatura u zatvorenom prostoru provedena je u skladu s normama: HRN EN 1991-1-2:2012; HRN EN 1991-1-2:2012/Ispr.1:2014; HRN EN 1991-1-2:2012/NA:2012. Za model sagorijevanja korišteno je produženo djelovanje požara. Proračun otpornosti nosive čelične konstrukcije proveden je u skladu s normama HRN EN 1993-1-1:2014; HRN EN 1993-1-1:2014/A1:2015; HRN EN 1993-1-1:2014/NA:2015, HRN EN 1993-1-2:2014 i HRN EN 1993-1-2:2014/NA:2014 za pripadnu izvanrednu kombinaciju opterećenja.

2. OPĆENITO O PRORAČUNU POŽARNOG OPTEREĆENJA I OTPORNOSTI METALNIH KONSTRUKCIJA NA POŽAR

2.1 Općenito o modeliranju požara u zatvorenom prostoru pomoću složenih metoda

Računalni modeli koji se koriste za određivanje temperature požara u zatvorenom prostoru se mogu podijeliti na Determinističke modele koji koriste poznate fizikalno – kemijske zakonitosti i na Probabilističke modele koji predviđanje razvoja požara temelje na zakonu vjerojatnosti. Najčešći deterministički modeli koji se primjenjuju u današnjici su Modeli računalne dinamike fluida – modeli polja (CFD – Computational Fluid Mechanics) te Modeli zona [2].

Realno simuliranje požara kod numeričkog modeliranja je kompleksno zbog čega su se razvile različite metode pojednostavljenja ovog problema poput modela zona. Kod modela zona za proračun temperatura u zatvorenoj prostoriji uslijed djelovanja požara pretpostavlja se da se prostor može podijeliti u određeni broj zona s približno jednakim fizikalnim karakteristikama (temperatura, unutarnja energija, tlak, masa, gustoća). Modeliranje požara u zonama je još uvijek izazovno i trenutno se istražuje na svjetskim institutima poput NIST-a. Modeliranje u zonama koristi sustav diferencijalnih jednadžbi temeljenih na zakonima održanja mase (jednadžba kontinuiteta), zakonu održavanja energije (prvi zakon termodinamike) i zakonu idealnih plinova koji se postavljaju za svaku zonu [2]. Najčešće se primjenjuju ova dva modela zona:

- 1- Model s jednim područjem (1-zonski model) – jedinstven prostor (mogu se primijeniti za simulaciju potpuno razvijenog požara).
- 2- Model s dva područja (2- zonski model) – češće u primjeni

Kod dvozonskog modela zatvoreni prostor se dijeli na Gornju zonu (zona vrućih plinova i dima) te donju zonu (zona u kojoj se zadržava sobna temperatura i sobni tlak).

2.1.1 Modeli s jednim područjem

Prema HRN EN 1991-1-2:2012 [3] modele s jednim područjem treba upotrebljavati za uvjete nakon razbuktavanja pri čemu se u odjeljku pretpostavlja jednolika temperatura, gustoća, unutarnja energija i tlak plina.

Temperatura se proračunava uzimajući u obzir:

- rješenje jednadžbi očuvanja mase i očuvanja energije
- izmjenu mase između unutarnjeg plina, vanjskog plina (kroz otvore) i požara (brzina pirolize)
- izmjenu energije između požara, unutarnjeg plina, zidova i otvora

Pri čemu se razmatra zakon idealnog plina:

$$p = \rho R T \quad [\text{Pa} / \text{kg} \cdot \text{m}^3] \quad (1)$$

Sama ravnoteža masa plinova u odjeljku se može izraziti kao:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad [\text{kg} / \text{s}] \quad (2)$$

gdje je:

- brzina promjene mase plina u odjeljku
- ⊛ brzina odljeva mase plina koji izlazi kroz otvore
- ⊛ brzina odljeva mase plina koji dolazi kroz otvore
- ⊛ brzina stvaranja proizvoda pirolize

U nastavku [3] kaže da se brzina promjene mase plina i brzina pirolize smije zanemariti. Pa vrijedi:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3)$$

Također [3] kaže da se ovi tokovi mase smiju proračunati na temelju statičkog tlaka koji nastaje zbog razlika gustoće zraka pri temperaturi okoline i zraka na visokoj temperaturi.

Uvažavajući prethodno navedene pretpostavke ravnoteža energije plinova u požarnom odjeljku se smije uzeti kao:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{gain} \quad [W] \quad (4)$$

gdje je:

E unutarnja energija plina [J]

\dot{Q} brzina otpuštanja topline požara [W]

\dot{Q}_{in}

\dot{Q}_{out}

$\dot{Q}_{loss} = (h_{out} - h_{in}) \dot{m}$ gubitak energije na površinama ovojnice

$\dot{Q}_{gain} = \sum \dot{Q}_{i,j}$ gubitak energije zbog zračenja kroz otvore

uz

c specifični toplinski kapacitet [$J / (kg \cdot K)$]

\dot{h} neto tok topline dan izrazom $\dot{h} = h_{out} \dot{m}_{out} - h_{in} \dot{m}_{in}$ [J / s]

\dot{m} brzina priljeva (odljeva) mase plina [kg / s]

T temperatura [K]

2.1.2 Modeli s dva područja

HRN EN 1991-1-2:2012 [3] definira model s dva područja na pretpostavci nakupljanja proizvoda gorenja ispod plafona odnosno u gornjoj horizontalnoj zoni prostorije. Pritom razlikuje područja gornjeg sloja, donjeg sloja, samog požara te vanjskih plinova i zidova. Radi lakšeg proračuna [3] u gornjem sloju dopušta pretpostavku da svi plinovi imaju jednolika svojstva te da se između tih različitih područja smije proračunati izmjena mase, energije i kemijskih tvari.

Zbog jednostavnosti modeliranja požara pomoću modela zona često se pretpostavlja da će se u nekom trenutku, zbog razbuktavanja požara, po visini cijele prostorije doći do jednolikih svojstava zraka u pogledu temperature, gustoće i ostalih parametara. Prema [3] u danom požarnom odjeljku s jednoliko raspoređenim požarnim opterećenjem, model sa dva područja smije se pretvoriti u model s jednim područjem ako je temperatura plina u gornjem sloju viša od 500 °C ili ako gornji sloj raste tako da obuhvati 80% visine odjeljka.

2.1.3 Gustoće požarnih opterećenja

Gustoća požarnog opterećenja koja se upotrebljava u proračunu treba biti proračunska vrijednost, utemeljena na mjerenjima ili, u posebnim slučajevima, utemeljena na zahtjevima za požarnu otpornost danim u nacionalnim propisima [3].

Proračunska vrijednost požarnog opterećenja q_{pr} , određena je izrazom:

$$q_{pr} = q_{f,0} \cdot k_{f,0} \cdot k_{f,1} \cdot k_{f,2} \cdot k_{f,3} \quad [\text{MJ} / \text{m}^2] \quad (5)$$

gdje je:

$q_{f,0}$ faktor gorenja

$k_{f,0}$ faktor kojim se uzima u obzir rizik nastanka požara s obzirom na veličinu odjeljka (vidjeti tablicu 1)

$k_{f,1}$ faktor kojim se uzima u obzir rizik nastanka požara s obzirom na namjenu (vidjeti tablicu 1)

$k_{f,2}$ faktor kojim se uzimaju u obzir različite aktivne mjere i za borbu protiv požara (prskalice (sprinkleri), otkrivanje požara, automatska dojava alarma, vatrogasci...). Ove aktivne mjere se općenito uvode radi spašavanja života (vidjeti tablicu 2)

$k_{f,3}$ karakteristična gustoća požarnog opterećenja po jedinici ploštine poda [MJ / m^2]

Ploština poda odjeljka (m^2)	Opasnost nastanka požara	Opasnost nastanka požara	Primjeri namjene prostora
25	1,10	0,78	umjetnička galerija, muzej, plivački bazen
250	1,50	1,00	ured, stanovanje, hotel, proizvodnja papira
2500	1,90	1,22	proizvodnja strojeva
5000	2,00	1,44	kemijski laboratoriji, radionica za bojanje
10000	2,13	1.66	proizvodi za vatromet ili boje

Tablica 1. Faktori $k_{f,0}$, $k_{f,1}$, $k_{f,2}$ i $k_{f,3}$

Automatsko sprječavanje požara			Automatsko otkrivanje požara			
Automatski sustavi gašenja vodom	Neovisna opskrba vodom			Automatsko otkrivanje požara i alarm		Automatska dojava vatrogasnoj jedinici
	0	1	2	toplinom	dimom	
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 do 0,73		0,87
Ručno sprječavanje požara						
Zaposlene vatrogasne jedinice	Vatrogasne jedinice na drugom mjestu		Sigurnosni pristupni putovi	Uređaji za gašenje požara	Sustav odvodnje dima	
0,61 do 0,78			0,9 ili 1,0 ili 1,5	1,0 ili 1,5	1,0 ili 1,5	

Tablica 2. Faktori

Za obične mjere borbe protiv požara koje trebaju gotovo uvijek biti prisutne kao što su sigurnosni pristupni putovi, uređaji za gašenje požara, sustavi za odvodnju dima u stubištima, vrijednosti iz tablice 2 treba uzeti 1,0. Međutim, ako te mjere nisu predviđene, odgovarajuće vrijednosti faktora treba uzeti 1,5.

Ako se u slučaju požarnog alarma stubišni prostor stavlja u uvjete nadtlaka, za faktor iz tablice 2 smije se uzeti vrijednost 0,9.

Prethodni pristup utemeljen je na pretpostavci da su ispunjeni zahtjevi odgovarajuće europske norme za prskalice (sprinklere), otkrivanje, alarm i sustave za odvodnju dima. Međutim, lokalni uvjeti mogu utjecati na vrijednosti dane tablicom 2 [3].

2.1.4 Određivanje karakteristične vrijednosti gustoće požarnog opterećenja

Požarno opterećenje treba sadržavati cjelokupni sadržaj gorivog materijala u zgradi i gorive dijelove gradnje, uključujući obloge i završne slojeve. Gorive dijelove gradnje koji se ne pretvaraju u ugljen tijekom požara ne treba uzeti u obzir [3].

Karakteristična vrijednost gustoće požarnog opterećenja može se odrediti s obzirom na namjenu prostora ili se može odrediti pojedinačno za svaki projekt.

Kada se gustoće požarnog opterećenja određuju razredbom požarnog opterećenja s obzirom na namjenu, treba paziti da se ukupno požarno opterećenje sastoji od:

- požarnog opterećenja određenog s obzirom na namjenu dana razredbom
- te od dodatnog požarnog opterećenja koja potječu od zapaljivih dijelova zgrade (elementi gradnje, obloge i završni slojevi) koji inače nisu uključeni u razredbu odnosno koji se trebaju odrediti posebno.

2.1.5 Prijenos topline

Rezultirajući toplinski tok h_{Σ} , na površini elementa sastoji se od dva toka prijenosa topline [4], konvektivni tok h_{konv} , i radijacijski tok h_{rad} :

$$h_{\Sigma} = h_{\text{konv}} + h_{\text{rad}}, \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (6)$$

$$h_{\text{konv}} = \alpha \cdot (t_{\text{plina}} - t_{\text{površine}}) \quad (7)$$

$$h_{\text{rad}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (t_{\text{okoline}}^4 - t_{\text{površine}}^4) \quad (8)$$

Gdje je:

- koeficijent konvekcije [$\text{W} / \text{m}^2 \text{K}$]
- temperatura plina u blizini elementa [$^{\circ}\text{C}$]
- temperatura površine elementa [$^{\circ}\text{C}$]
- faktor konfiguracije
- faktor emisije površine elementa
- faktor emisije požara
- Stephan Boltzmann-ova konstanta ($= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}^4$);
- efektivna temperatura radijacije okoline (\sim temperatura plamena) [$^{\circ}\text{C}$].

Za nezaštićeni čelični presjek povećanje temperature Δt , u vremenskom intervalu Δt (≤ 5) je definirano iznosom neto toplinskog toka koji profil primi kroz to vrijeme:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t = \epsilon \cdot \sigma \cdot h_{\Sigma} \cdot \Delta t \cdot A \quad (9)$$

- specifična toplina čelika [kJ/kgK]
- ρ -gustoća čelika [kg / m^3]
- V -faktor oblika poprečnog presjeka []
- površina poprečnog presjeka elementa [m^2]
- V-Volumen elementa po jedinici duljine [m^3]
- h_{Σ} -toplinski tok po jedinici površine [W / m^2]
- Δt -vremenski interval [s]
- koeficijent sjene [= 1]

Proračun prirasta temperature ΔT , čelika vremenskom intervalu $\Delta t (\leq 5)$ kod zaštićenih čeličnih elemenata vrši se prema izrazu [4]:

$$\Delta T = \frac{\rho \cdot c \cdot (T_0 - T_1)}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (\phi/3 - 1) \cdot \Delta T_0, \quad (10)$$

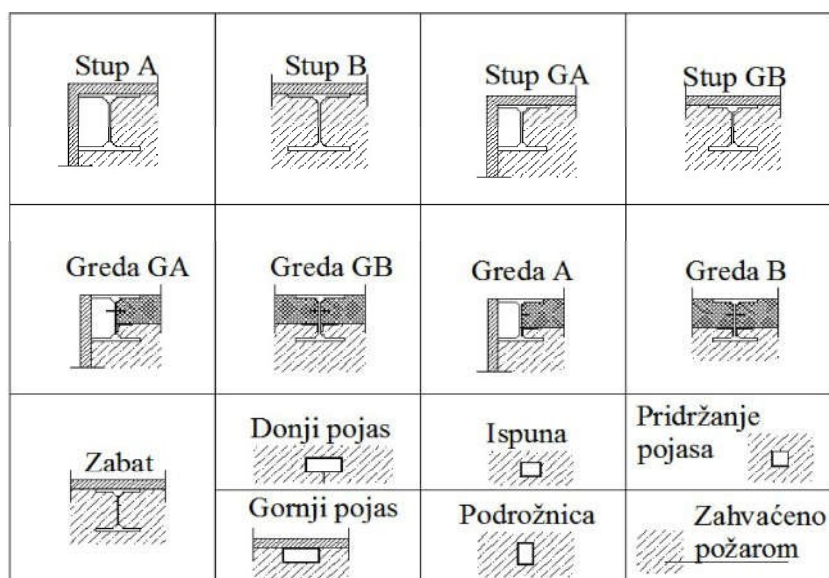
($\Delta T \geq 0$ za $\Delta t > 0$)

$$\phi = \frac{\rho \cdot c}{\lambda \cdot d} \cdot \Delta t$$

$$\Delta T_0 = T_0 + \Delta T_0$$

Gdje je:

- gustoća vatrootpornog materijala [kg/m³]
- T_0 -temperatura čeličnog elementa u trenutku [°C]
- T_1 -temperatura okolnog zraka u trenutku [°C]
- ΔT_0 -povećanje temperature okolnog zraka u intervalu [°C]
- ϕ -faktor oblika poprečnog presjeka zaštićenog elementa []
- d -površina vatrootpornog materijala pojedinci dužine elementa [m²]
- V-Volumen elementa po jedinici dužine [m³]
- specifični toplinski kapacitet vatrootpornog materijala [J/kg·°C]
- debljina vatrootpornog materijala [m]
- koeficijent toplinske provodljivosti vatrootpornog materijala [W/m·°C]
- vremenski interval u sekundama



Slika 1. Prikaz izloženosti elemenata predmetne konstrukcije požaru [4]

2.2 Prikaz postupka dokazivanja nosivosti konstrukcije uslijed djelovanja požara

Proračun djelovanja požara na nosive konstrukcije prema eurokodu zasniva se na semiprobabilističkom konceptu dokaza pouzdanosti, obrađenom u europskoj normi HRN EN 1990. Proračun djelovanja požara može se provesti u 3 različita područja: vremena, čvrstoće i temperature [5]. U ovom radu proračun je proveden u području čvrstoće.

Proračun u području čvrstoće provodi se prema izrazu:

$$R_{t, \text{pr}} \leq R_{t, \text{pr}} \quad (11)$$

$R_{t, \text{pr}}$ - proračunska vrijednost mjerodavnog učinka djelovanja u požarnoj situaciji u vremenu t

$R_{t, \text{pr}}$ - proračunska vrijednost otpornosti konstrukcijskog elementa u požarnoj situaciji u vremenu t .

Dokaz ponašanja čeličnih konstrukcija u požarnoj situaciji provodi se prema HRN EN 1993-1-2 [6] i to u području čvrstoće prema prethodnom izrazu.

Mjerodavna kombinacija opterećenja s aspekta graničnog stanja nosivosti u slučaju djelovanja požara prema HRN EN 1990 [7] dana je izrazom:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{t, i} \psi_{t, i} S_{k, i} + \gamma_{t, P} S_{k, P} \leq R_{t, \text{pr}} \quad (12)$$

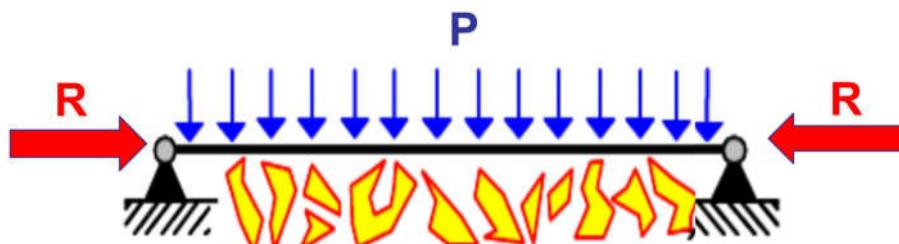
gdje je:

- $\gamma_{t, i}$ - karakteristična vrijednost stalnog djelovanja
- P - djelovanje od prednapinjanja,
 - proračunska vrijednost temperaturnog djelovanja zbog požara
 - $\psi_{t, i}$ - karakteristična vrijednost prevladavajućega promjenjivog djelovanja
 - $\psi_{t, i}$ - karakteristične vrijednosti ostalih promjenjivih djelovanja
 - $\gamma_{t, P}$ - faktor za učestalost vrijednosti promjenjivog djelovanja (prema tablici A1.1 u HRN EN 1990 [7])
 - $\gamma_{t, P}$ - faktori za kvazistalne vrijednosti promjenjivih djelovanja (prema tablici A1.1 u HRN EN 1990 [7]).

Proračunska vrijednost temperaturnog djelovanja su ustvari rezne sile nastale zbog temperaturnog djelovanja požara. Ove rezne sile se mogu pojaviti zbog [8]:

- spriječenog uzdužnog toplinskog izduženja prouzročenog požarom
- različitog toplinskog izduženja kod statički neodređenog sustava
- toplinski gradijenti u poprečnom presjeku koji izazivaju dodatna naprezanja
- toplinskog izduženja koje izaziva pomake susjednih elemenata (npr. bočni pomak vrha stupa prouzročenog toplinskom deformacijom pridržanih greda na vrhu stupa)
- toplinskog izduženja zagrijanih elemenata koji utječu na elemente konstrukcije izvan požarnog sektora.

Ova pojava dodatnih reznih sila zbog toplinskog izduženja se može pokazati na jednostavnom primjeru grede horizontalno pridržane na oba kraja na koju djeluje temperatura (požar). Zbog nemogućnosti deformacije u uzdužnom smjeru grede na krajevima dolazi do pojave horizontalne reakcije koja stvara dodatnu tlačnu silu u gredi.



Slika 2. Pojava reakcijske sile zbog toplinskog izduženja [9]

Generalno u praksi se zanemaruje pojava reznih sila zbog požara kod slučajeva kada se u proračunu primjenjuje krivulja standardnog požara (ISO 834 krivulja) ili u slučajevima jednostavnih konstrukcija sa velikim stupnjevima slobode [8]. U ovom radu korištena je krivulja realnog požara na konstrukciju kod koje je variran broj stupnjeva slobode tako da su napravljene varijante modela sa temperaturnim izduženjem i bez te su uspoređeni rezultati.

Postupak klasifikacije poprečnog presjeka pri visokim temperaturama identičan je kao i kod normalnih temperatura uz modifikaciju [4]:

$$= 0,85(235/) \cdot \quad (13)$$

Gdje je:

- granica popuštanja pri normalnim temperaturama,
- faktor koji uzima u obzir utjecaj čvrstoće čelika na klasu presjeka

Izraz za otpornost vlačnog elementa s jednolikom razdiobom temperature u poprečnom presjeku:

$$, , = \cdot \cdot \frac{1}{,} \quad (14)$$

Gdje je

- , -faktor redukcije za granicu popuštanja čelika pri temperaturi u trenutku
- otpornost poprečnog presjeka na vlačnu silu pri normalnim temperaturama
- , -parcijalni faktor za otpornost pri normalnim temperaturama
- , -parcijalni faktor za otpornost pri visokim temperaturama

Izraz za otpornost tlačnog elementa na izvijanje s jednolikom razdiobom temperature [4]:

$$, , , = \cdot , \cdot \cdot \frac{1}{,} \quad (15)$$

Gdje je

- faktor redukcije koji uzima u obzir izvijanje elementa u slučaju požara,
- , -faktor redukcije za granicu popuštanja čelika pri temperaturi u trenutku

$$= \frac{1}{-} \quad (16)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cdot - + -)$$

$$= 0,65 \cdot \frac{235}{-}$$

$$- = - \cdot (, / ,) \cdot$$

gdje je:

η - bezdimenzionalna vitkost pri temperaturi

Izraz za otpornost grednog elementa opterećenog momentom savijanja s jednolikom razdiobom temperature u poprečnom presjeku [4]:

$$M_{Rd} = \eta \cdot M_{yk} \cdot \frac{1}{\gamma_M} \quad (17)$$

Izraz za otpornost grednog elementa klase 1 i 2 (razlika za klasu 3 je što umjesto η , koristimo η_{red}) na savijanje s jednolikom razdiobom temperature u trenutku :

$$M_{Rd} = \eta_{red} \cdot M_{yk} \cdot \frac{1}{\gamma_M} \quad (18)$$

Gdje je

η -faktor redukcije koji uzima u obzir gubitak bočne stabilnosti elementa u slučaju požara,
 η_{red} -faktor redukcije za granicu popuštanja čelika pri temperaturi u tlačnoj pojasnici koja je dosegnuta u trenutku t

$$\eta_{red} = \frac{1}{\eta_{red} + \eta_{red} - \bar{\sigma}_{yk}} \quad (19)$$

$$\eta_{red} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \eta_{red} + \bar{\sigma}_{yk})$$

$$\bar{\sigma}_{yk} = \sigma_{yk} \cdot \left(\frac{t}{t_{yk}} \right)^2$$

η_{red} -faktor redukcije za modul elastičnosti čelika pri temperaturi u tlačnoj pojasnici koja je dosegnuta u trenutku

Izraz za posmičnu otpornost poprečnog presjeka s jednolikom razdiobom temperature u trenutku :

$$M_{Rd} = M_{yk} \cdot \frac{1}{\gamma_M} \quad (20)$$

gdje je:

M_{yk} -posmična otpornost poprečnog presjeka za normalne temperature
 η_{red} -faktor redukcije za granicu popuštanja čelika pri temperaturi u hrptu nosača koja je dosegnuta u trenutku

Izraz za otpornost grednog elementa opterećenog momentom savijanja i uzdužnom tlačnom silom s jednolikom razdiobom temperature u poprečnom presjeku [4]:

-bez problema bočnog izvijanja

$$\frac{M_{ed}}{M_{Rd}} + \frac{N_{ed}}{N_{Rd}} \leq 1,0 \quad (21)$$

$$= 0,8 \cdot (1,2 \cdot 0,8 - 3) + 0,44 \cdot 0,8 - 0,29 \leq 0,8$$

$$= 1 - \frac{M_{ed}}{M_{Rd}} \leq 3,0$$

- sa problemom bočnog izvijanja

$$\frac{M_{ed}}{M_{Rd}} + \frac{N_{ed}}{N_{Rd}} \leq 1,0 \quad (22)$$

$$= 0,15 \cdot 0,8 - 0,15 \leq 0,9$$

$$= 1 - \frac{M_{ed}}{M_{Rd}} \leq 3,0$$

3. OBLIKOVANJE I ODABIR STATIČKIH SUSTAVA HALE

3.1 Parametri koji utječu na oblikovanje hale

3.1.1 Općenito

Svaka hala ispod svoje vanjštine ima neki oblik nosivog konstrukcijskog sustava. Ovi nosivi sustavi hale se najčešće grade industrijskim načinom gradnje. Pod ovim načinom gradnje se misli na gradnju sa serijskim montažnim elementima, tipizaciji priključaka i spojeva, strojna obrada čvornih ploča i sličnih dijelova te točno planirani postupak montaže [10].

Trošak nosive konstrukcije ima važnu ulogu pri određivanju ekonomičnosti izvođenja hale. Sa povećanjem opsega i raspona hale znatno se povećava potrošnja čelika, troškovi gradnje i u konačnici troškove montaže. Sami odabir nosivog sklopa ima veliki utjecaj na ove troškove pa se upravo dobrim odabirom ovog sustava u idejnoj fazi projekta može postići ušteda odnosno optimizacija. Stoga je za svaki projektni zadatak potrebno uzeti u obzir sve čimbenike koji utječu na izradu glavnog projekta, a to se može postići samo cjelovitim rješenjem zadatka u kojem moraju biti uključeni svi projektanti (konstruktori-čeličari, arhitekti i projektanti ostalih struka) [10].

Osim što nosiva konstrukcija utječe na ukupnu cijenu, ona također ima velik udio i u na pouzdanost objekta u cjelini. Stoga je razumljivo da odabiru glavne nosive konstrukcije treba posvetiti odgovarajuću pozornost. Sam izbor ponajprije je ovisan o namjeni objekta tj. o zahtjevima tehnološkog procesa, ako se radi npr. o tvorničkoj hali. Uz zadovoljenje uvjeta funkcionalnosti i estetike, očito je jedan od važnijih čimbenika je i cijena koštanja objekta. To znači da treba birati takvu konstrukciju koja će zahtijevati najmanje potrebnog rada za njenu izradu uz najmanju potrebnu količinu ugrađenog materijala. To je moguće postići ispravnim odabirom vrste glavne nosive konstrukcije kao i usvajanjem optimalnog raspona i razmaka glavnih nosivih sustava. Kod odabira optimalnog konstrukcijskog sustava glavne nosive konstrukcije najvažniji čimbenici su [10]:

- dimenzije i oblik hale,
- vrsta i intenzitet djelovanja,
- način temeljenja,

- izbor obloga hale,
- dodatni zahtjevi u pogledu funkcionalnosti, osvjetljenja, ventilacije i slično.

Nosive sustave hale s obzirom na tip možemo podijeliti na rešetkaste konstrukcije i na sustave sa punostijenim nosačima. Donošenje odluke između odabira tipa ovisi o sljedećem [10]:

- kod hala velikih raspona i visine, rešetkasti nosači su često najekonomičniji,
- pri velikom omjeru momenta savijanja i poprečne sile (M/V) ekonomičniji su rešetkasti nosači, budući da hrbat punostijenog nosača (koji preuzima poprečnu silu) nije dovoljno iskorišten,
- odnos cijene rada i materijala (rešetkasti nosači zahtijevaju više rada, ali je manji utrošak materijala u odnosu na punostijene nosače),
- u korozivnim sredinama pokazali su se povoljniji punostijeni presjeci,
- estetski zahtjevi

U praksi se, najopćenitije, u ovisnosti o ekonomičnosti i veličini objekta, pokazalo da vrijede sljedeće preporuke [10]:

- male hale: valjani profili, okvirni nosači,
- srednje hale: rešetkasti nosači na stupovima u punostijenoj izvedbi,
- velike i teške hale: krovni nosač i stupovi ili rešetkasti nosači ili sastavljeni limeni nosači

Glavni nosivi sustav čelične hale koji je zadužen za mehaničku otpornost i stabilnost građevine najčešće je izveden od čeličnih okvira. No da bi se ostvarila globalna stabilnost potrebno je povezati i ostale konstrukcijske elemente u jednu cjelinu odnosno prostorni sustav. Spajanje svih konstrukcijskih elemenata u cjelinu naziva se “uobličjenje” (framing). Pri tome veze između pojedinih elemenata mogu biti zglobne, nepopustljive ili djelomično popustljive ili u drugoj formulaciji zglobne, krute ili djelomično krute [10].

Kada je riječ o uvjetno rečeno ravninskom sustavu krovne konstrukcije vrlo je bitan i razmak između glavnog nosivog konstrukcijskog sustava (vertikalna poprečna ravnina). Taj razmak također treba odabrati uzimajući u obzir prethodno navedene čimbenike te se pokazalo da je najčešće taj razmak $b=(0,3-0,5)L$ gdje L označava ukupni raspon okvira. Naravno, ove

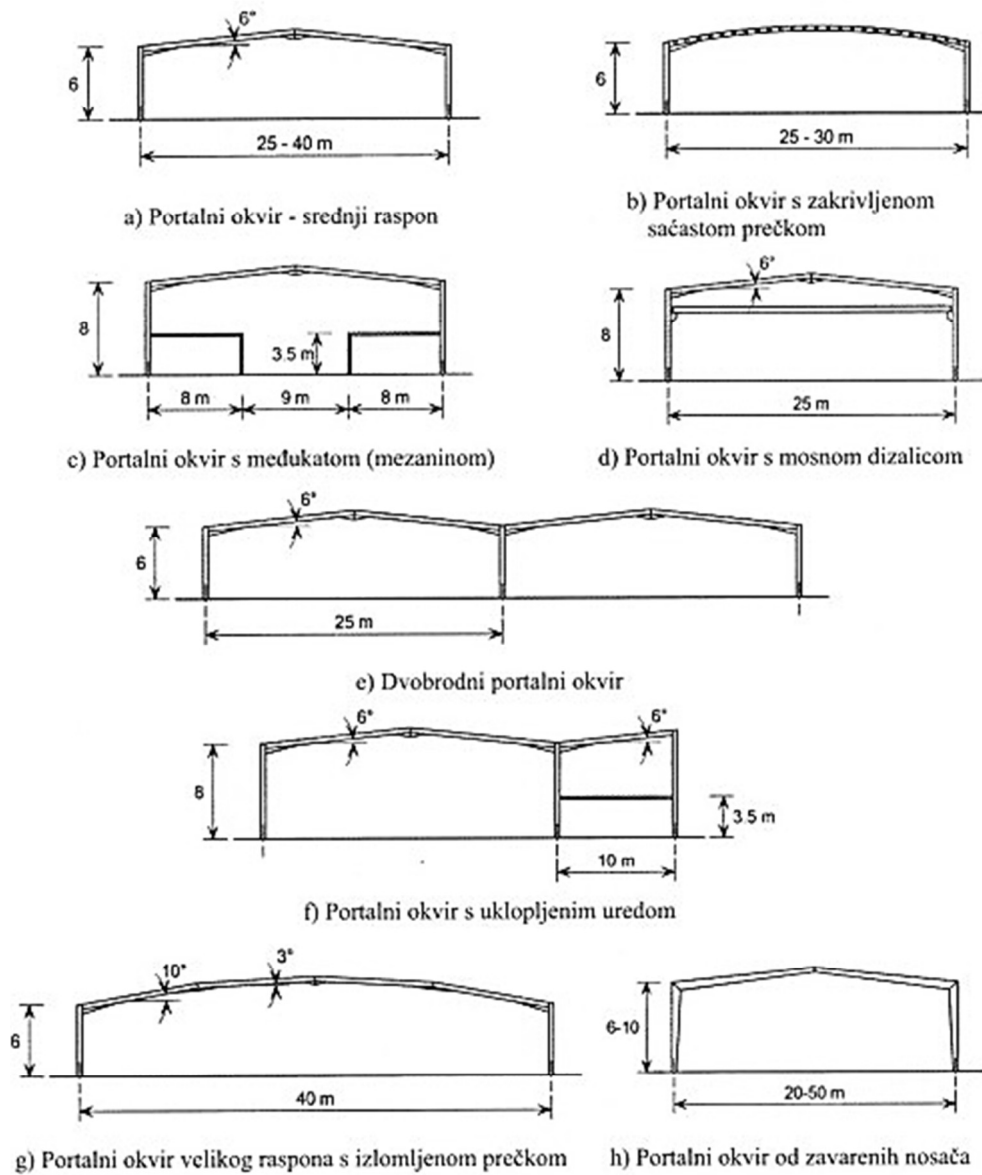
vrijednosti mogu odstupati ovisno od slučaja do slučaja. Na primjer, kod tipiziranih objekata, gdje se glavna nosiva konstrukcija proizvodi serijski, pojavljuju se i drukčiji omjeri b/L . Mogući nešto veći utrošak materijala zbog nepovoljnijeg omjera b/L nadomješta se velikom serijskom proizvodnjom elemenata konstrukcije tipiziranih hala. Kod većine hala razmak okvira je od 6 m do 10 m [10].

Prilikom odabira vrste glavne nosive konstrukcije potrebno je obratiti pozornost i na tip odabranog pokrova. Ako se glavnim konstrukcijskim sustavom rješava nagib krova radi odvodnje, glavni rasponski nosač treba oblikovati tako da osigurava najmanji pad od 2%. Pri tome, za nagibe krovova od 2-10% odgovara npr. porubljeni pokrov, koji se izvodi u dugačkim trakama pa ne dolazi do procurivanja uslijed potpuhivanja kišnice. Za strmije tipove krovova (nagib veći od 10%) prikladni su trapezno oblikovani limovi, kod kojih je djelotvorna izolacija na preklopu dviju ploča. Kod hala koje su izvedene s okvirima kao glavnim nosivim elementima krovovi se izvode kao krovovi s nagibom ili kao ravni krovovi. Kod krovova sa nagibom nagib se nalazi u rasponu od 5° do 10° , obično 6° [10].

Ukoliko je tlo loše nosivosti bolje je predvidjeti zglobno oslanjanje okvira na temelj. Međutim, ukoliko tlo i nije tako loše nosivosti izvedba sa zglobnim priključkom na temelj ima prednost radi jednostavnije izvedbe i montaže.

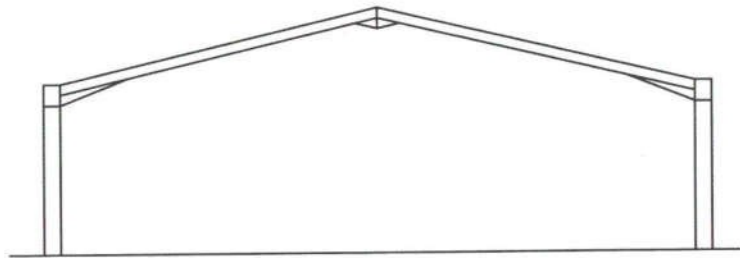
Analiza okvira može se provesti prema teoriji elastičnosti ili teoriji plastičnosti. Teorija plastičnosti daje manji utrošak čelika, ali je analiza kompliciranija i treba voditi računa o "pridržanju plastičnih zglobova". Rasponi okvira kreću se od 20 m do 60 m, ali najčešće su u primjeni rasponi između 20 m i 30 m.

Različiti primjeri i rješenja okvirnih sustava prikazani su na sljedećoj slici:



Slika 3. Različiti oblici okvirnih sustava [10]

3.1.2 Tipična hala



Slika 4. Simetrični portalni okvir [10]

Na prethodnoj slici je prikazan okvir tipične (često projektirane) hale. Za nju je karakteristično da su:

- Rasponi su između 15 m do 60 m, ali su najčešće u primjeni od 20 m do 30 m;
- Visine stupova su između 5 m i 10 m, obično od 5m do 6 m, ali klijenti iz komercijalnih razloga mogu zatražiti i veće visine;
- Nagib prečki je između 5° do 10° , a obično se usvaja za nagib 6° ;
- Razmak između okvira obično iznosi 5 m do 8 m, ali kod velikih raspona okvira razmaci mogu biti i veći;
- Obično se izvode vute na krajevima i sredini prečke. Na taj se način dobivaju manji poprečni presjeci te se učinkovitije realizira proračun i izvedba priključaka. Često su vute izvedene iz istih profila kao i prečke [10].

3.1.3 Stabilizacija

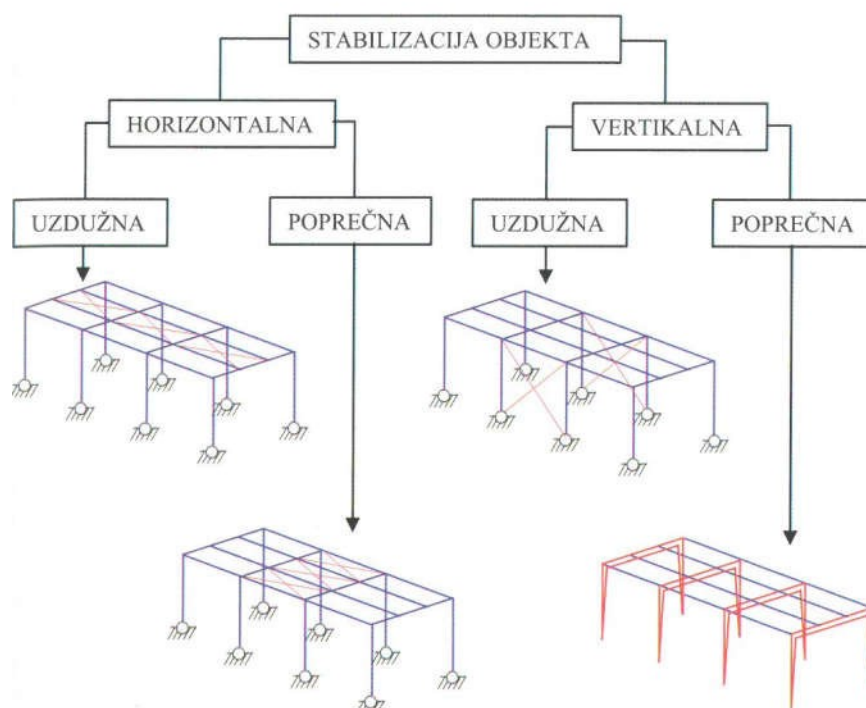
Osnovna zadaća stabilizacije je osigurati prijenos svih djelovanja na konstrukciju do temelja, i to na način da ne bude ugrožena globalna stabilnost konstrukcije. Dakle, prilikom rješavanja ovog zadatka pretpostavlja se da elementi pojedinačno mogu preuzeti dio zadanih djelovanja te da sami nisu podložni velikim deformacijama [10].

Najčešće se stabilizacija objekta rješavana ugradnjom tzv. vezova. Međutim, stabilizacija se može izvesti i pomoću drugih konstrukcijskih sustava koji su u stanju preuzeti djelovanja na konstrukciju i prenijeti ih u temelje bez velikih pomaka konstrukcije. Tako funkciju horizontalne stabilizacije mogu preuzeti elementi koji tvore posmično krutu ploču (npr. armiranobetonska ploča, trapezni lim), a vertikalna stabilizacija može se izvesti uz pomoć okvirnog sustava, također s posmičnim poljima od trapeznih limova itd. Ako se pak radi o

stvarnoj građevini, tada se zbog jednostavnosti jedan smjer objekta (obično duža strana) proglašava uzdužnim, a drugi poprečnim. Svaka građevina najopćenitije mora imati 4 dijela ukupne stabilizacije objekta:

- horizontalnu uzdužnu,
- horizontalnu poprečnu,
- vertikalnu uzdužnu,
- vertikalnu poprečnu.

Prikaz navedenih vrsta stabilizacije na primjeru jedne hale dan je na slici ispod:



Slika 5. Vrste stabilizacija [10]

Uobičajeno je da se horizontalna uzdužna stabilizacija izvodi uz uzdužni rub krovne ravnine objekta, dok se horizontalna poprečna stabilizacija postavlja u prvo i posljednje polje (ili u neposrednu blizinu) te u svako četvrto, peto polje. Vertikalna uzdužna stabilizacija se može postaviti pri sredini građevine, kako bi se omogućilo slobodno temperaturno dilatiranje konstrukcije na jednu i drugu stranu [10].

3.1.4 Utjecaj temperature na određivanje sustava stabilizacije (položaj vezova)

Širenje konstrukcije uslijed djelovanja temperature posebno je važno za čelične konstrukcije gdje koeficijent linearnog toplinskog istezanja iznosi 12×10^{-6} za $^{\circ}\text{C}$. Ovo toplinsko širenje je posebno izraženo u slučaju požara zbog velikih iznosa temperatura [10].

Pomaci uslijed djelovanja temperature mogu dovesti do:

- oštećenja na osloncima,
- otkazivanja priključaka,
- značajnih unutarnjih sila kod statički neodređenih konstrukcija.

Ukoliko je spriječeno širenje konstrukcije uslijed utjecaja temperature u konstrukcijskom sustavu pojavljuju se tlačne sile kako je i prikazano na slici ispod.

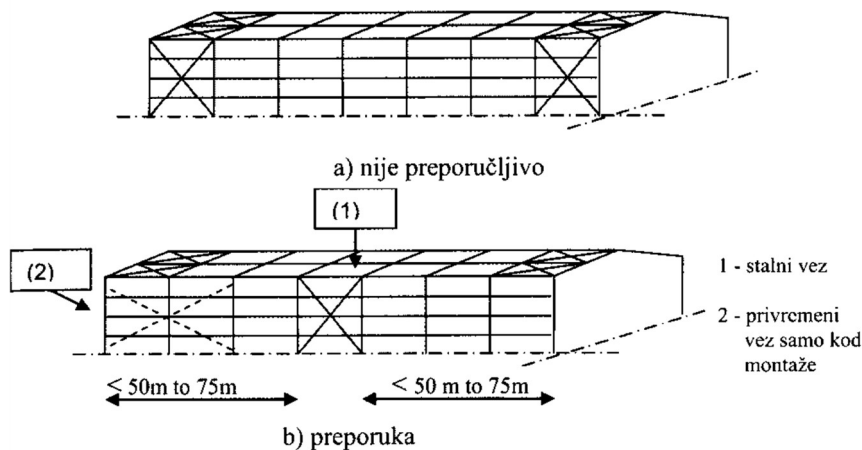


Slika 6. Tlačne sile uslijed spriječenog širenja[10]

Da se izbjegne pojava tih tlačnih sila građevina se može podijeliti na odvojene dijelove koji su spojeni dilatacijama. Na taj se način eliminira pojava tlačnih sila jer su omogućeni pomaci dilatiranih dijelova građevine [10].

Drugi način rješavanja tog problema je postavljanje vertikalnih vezova na pozicije koji će omogućiti pomake na krajevima konstrukcije.

Iskustvo iz prakse je pokazalo kako položaj vertikalnih vezova na krajevima hale, zbog temperaturnog djelovanja koje izaziva širenje, prouzrokuje znatne unutarnje sile u elementima konstrukcije. Iz tog je razloga bolje rješenje postavljanje vertikalnog veza u sredini tako da je omogućeno širenje konstrukcije na obje strane bez izazivanja unutarnjih sila. Navedena rješenja prikazana su na slici ispod [10].



Slika 7. položaj vertikalnih vezova[10]

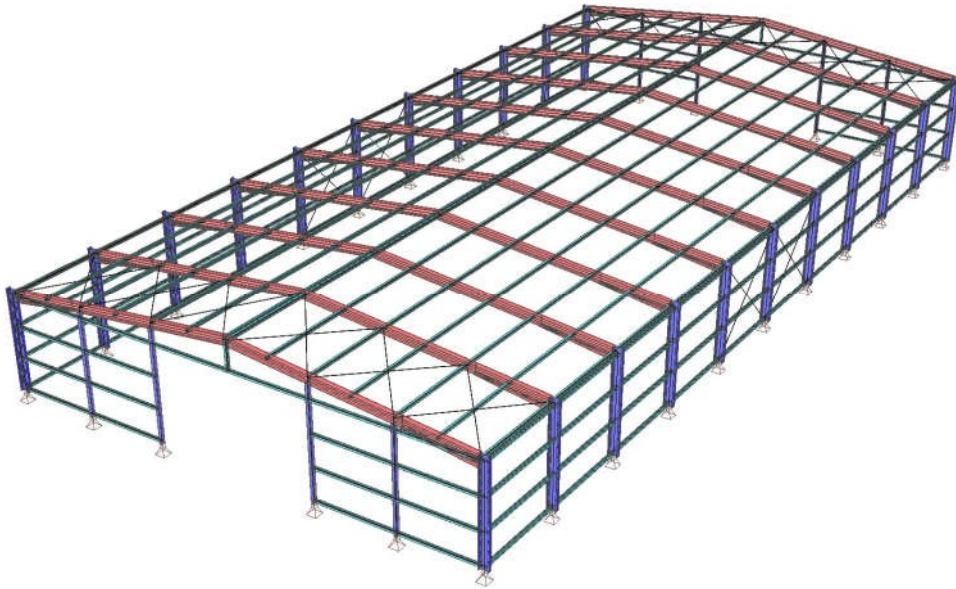
3.2 Odabir statičkih sustava hale (predstavljanje triju statičkih sustava)

Da bi se vidio utjecaj odabira statičkog sustava nosive konstrukcije hale na ukupnu potrebnu količinu čelika u ovom radu su analizirane hale sa upetim, dvozglornim i trozglornim okvirom. Za svaki od ovih okvira dimenzionirani su elementi konstrukcije na ista opterećenja odnosno na iste kombinacije opterećenja (na GSN – osnovnu kombinaciju te izvanrednu požarnu kombinaciju).

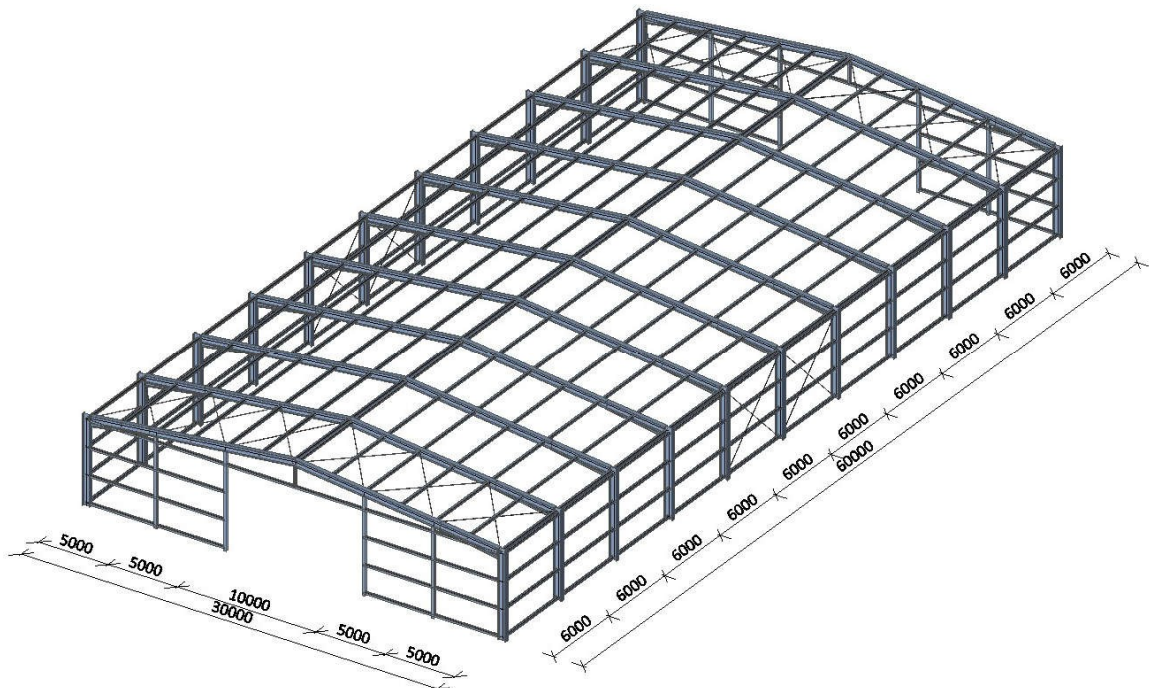
Sve tri analizirane hale su identične po ostalim karakteristikama (tlocrtne dimenzije, broj okvira i njihov razmak, položaj spregova, djelovanja na konstrukciju, materijali itd., broj i položaj otvora itd.).

U nastavku su najprije prikazane zajedničke geometrijske karakteristike ovih triju statičkih sustava dok u poglavlju konstruktivni elementi hala su objašnjeni elementi okvira za svaki sustav pojedinačno.

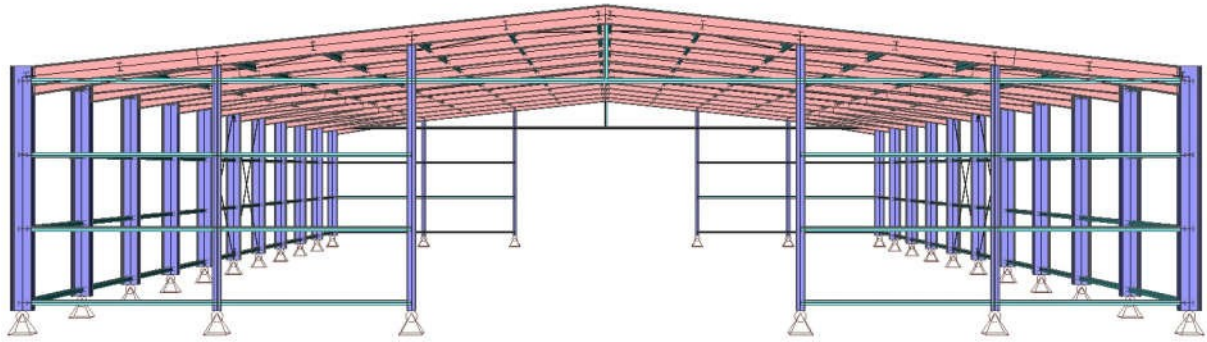
U svrhu ovog rada pretpostavljen je položaj hala u Koprivnici. Tlocrtna dimenzija hala su 30,0 x 60,0 (m), a visina iznosi 7,00 (m). Krovna ploha je u odnosu na horizontalnu ravninu nagnuta pod kutom $\alpha = 6,00^\circ$, što je ekvivalentno nagibu od 12%. Projektirana je za potrebe skladištenja lako zapaljivog materijala.



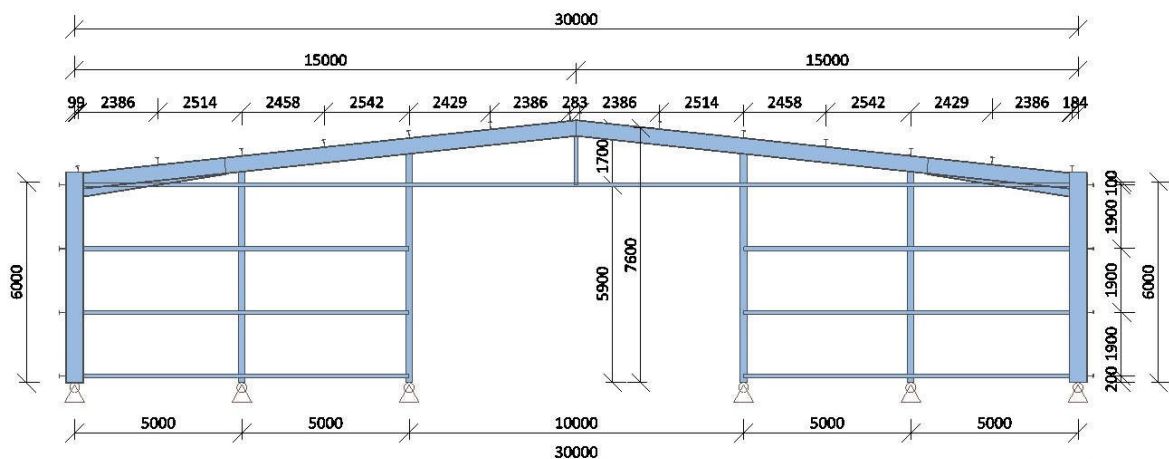
Slika 8. 3D prikaz modela



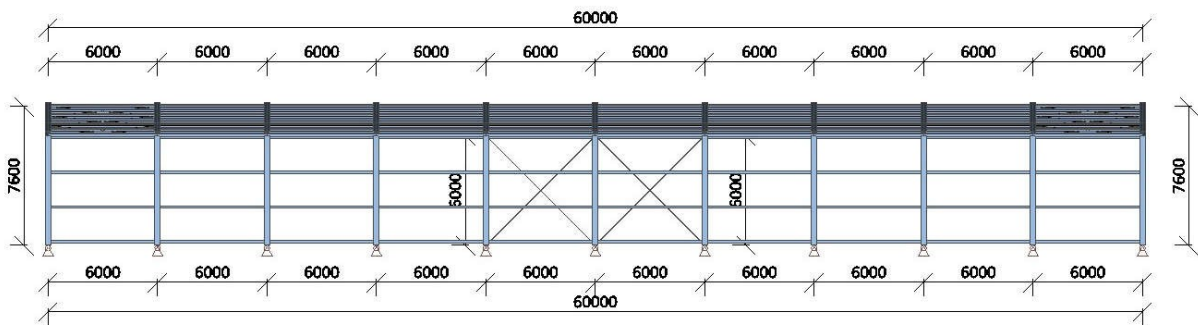
Slika 9. 3D prikaz modela - aksonometrija



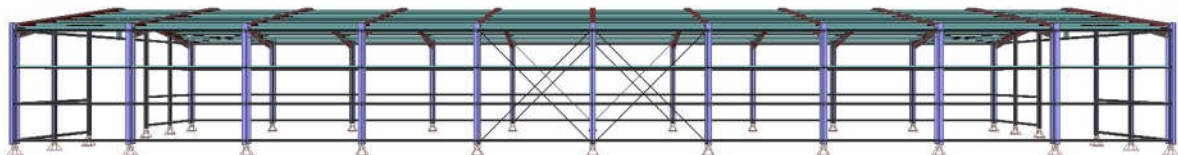
Slika 10. 3D prikaz zabatne stijene hale



Slika 11. Prikaz glavnog nosača

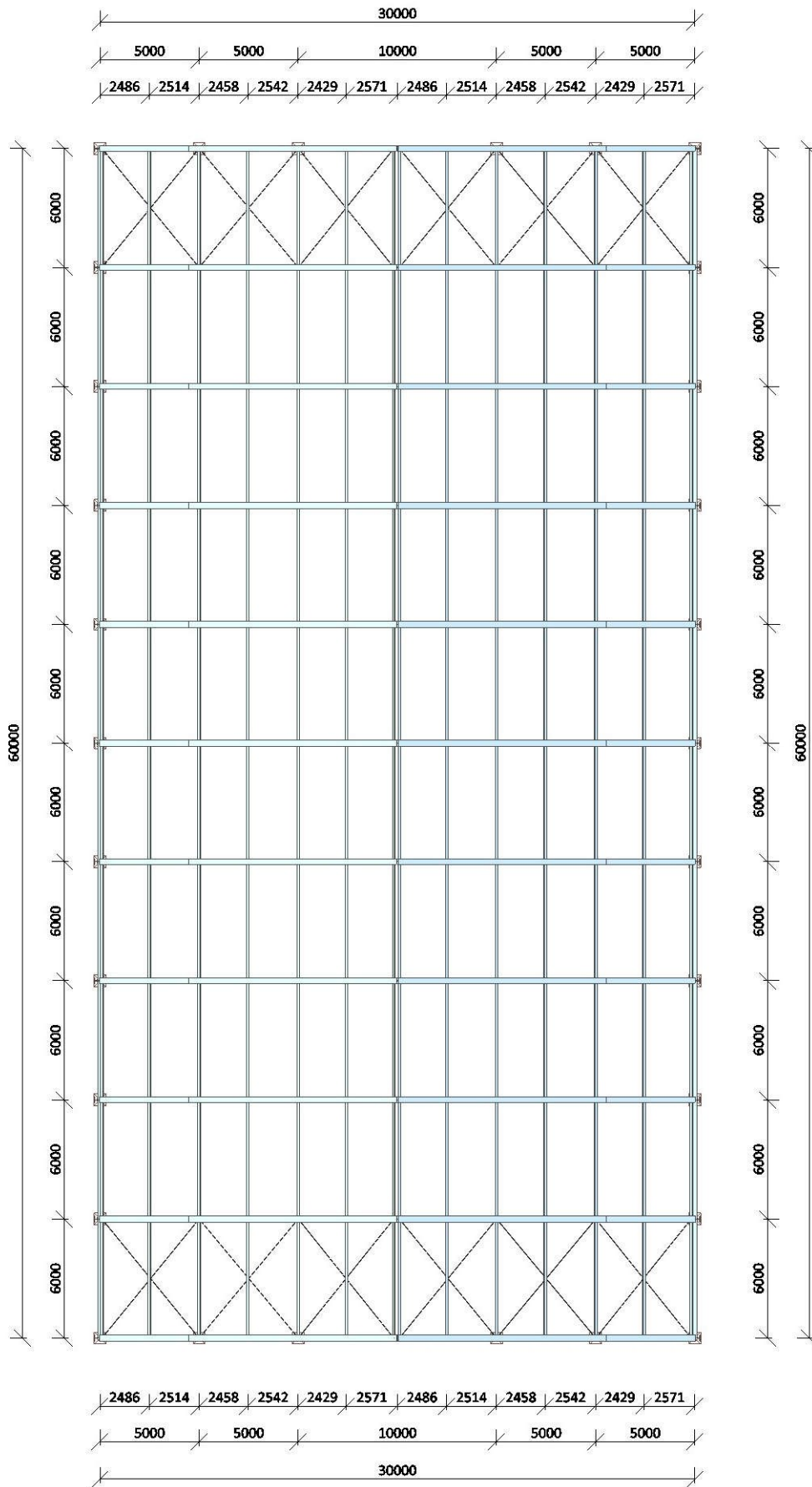


Slika 12. Bokocrt hale

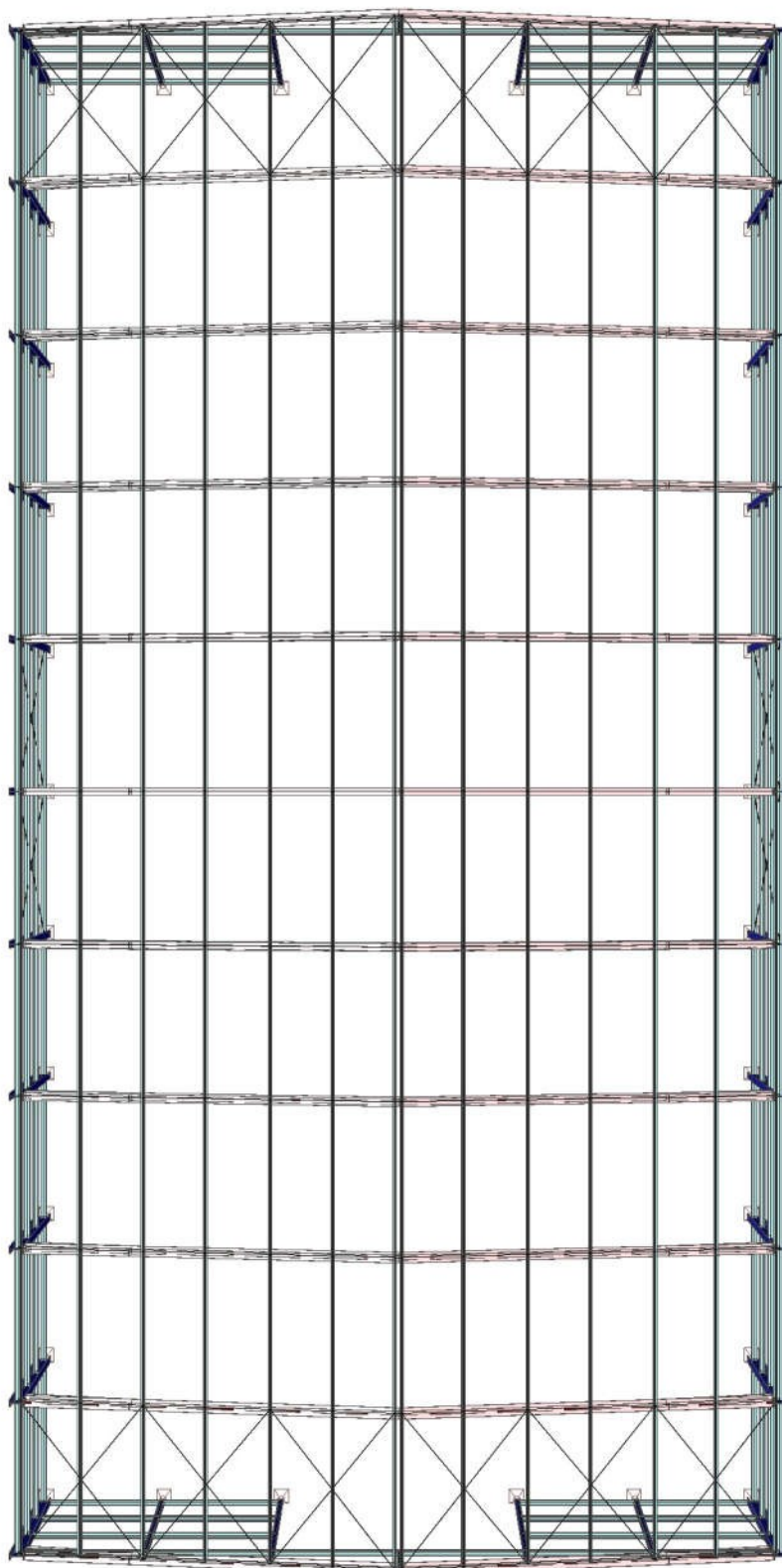


Slika 13. 3D Prikaz bočne strane hale

Glavni nosivi sustav hala je zamišljen kao sustav 10 ravninskih okvira raspona 30,0 (m), stabilnih u svojoj ravnini, na međusobnom osnom razmaku od 6,0 (m).



Slika 14. Tlocrt hale



Slika 15.3D Prikaz - pogled odozgo

Na grede okvira se oslanjaju sekundarni krovni nosači (podrožnice) na međusobnom osnom razmaku od 2,063 (m), a na stupove su oslonjeni sekundarni bočni nosači na međusobnom osnom razmaku od 2,33 (m).

Stabilizacija hale u smjeru okomitom na glavni nosivi sustav ostvaren je spregovima u krovnim (horizontalnim) i bočnim (zidnim) ravninama i to u krajnjim poljima (prvom i posljednjem), osim vertikalne uzdužne stabilizacije koja je ostvarena u središnjim poljima (petom i šestom). Kao pokrov koriste se aluminijski sendvič paneli.

3.3 Konstruktivni elementi hala

U nastavku su prikazani elementi za ova tri statička sustava koji su dobiveni proračunom na „hladno“ stanje (GSN-osnovna kombinacija).

3.3.1 Upeti okvir

Grede – valjani I profil poprečnog presjeka HEA 500 na duljini od 10500mm. Na mjestu spoja grede i stupa, na duljini od 4500mm, presjek je dodatno ojačan vutom profila HEA 500 sa visinom 250mm na kraju (u dodiru sa stupom).

Za preliminarno dimenzioniranje visine prečke (grede) koristila se preporuka L/55 [11].

Za dužinu vute koristila se preporuka od 0.15L (4500mm) a za visinu od osi prečke do dna vute preporuka od L/50 ($600 \approx 500/2+250$).

Ove dimenzije su se dodatno prilagodile s obzirom na dobivene rezultate dimenzioniranja.

Stupovi - valjanih I profila HEA 500.

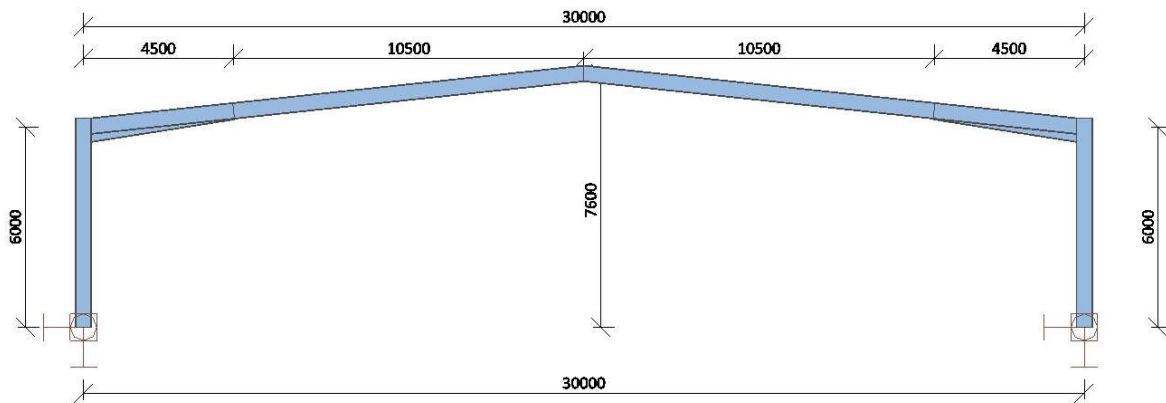
Stupovi na pročelju (dodatni stupovi kod prvog i zadnjeg okvira) - valjanih I profila HEA 180.

Podrožnice - valjanih I profila IPE 200O.

Sekundarni bočni nosači - valjanih I profila IPE 220.

Spregovi - Kao dijagonale krovnog sprega su odabrani okrugli puni profili promjera 20 (mm).

Kao dijagonale bočnog sprega su odabrani, okrugli puni profili promjera 8 (mm).



Slika 16. Upeti okvir

3.3.2 Dvozglubni okvir

Grede – valjani I profil poprečnog presjeka HEA 500 na duljini od 10500mm. Na mjestu spoja grede i stupa, na duljini od 4500mm, presjek je dodatno ojačan vutom profila HEA 500 sa visinom 250mm na kraju (u dodiru sa stupom).

Stupovi - valjanih I profila HEA 550.

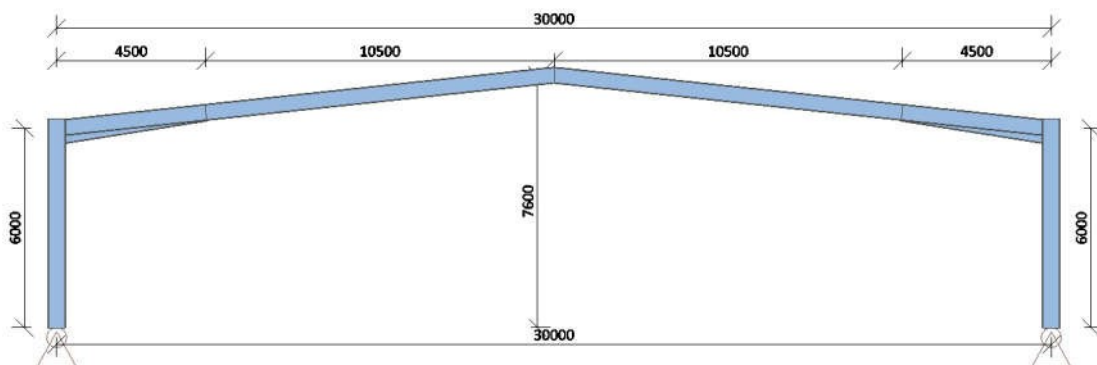
Stupovi na pročelju (dodatni stupovi kod prvog i zadnjeg okvira) - valjanih I profila HEA 200.

Podrožnice - valjanih I profila IPE 220.

Sekundarni bočni nosači - valjanih I profila IPE 220.

Spregovi - Kao dijagonale krovnog sprega su odabrani okrugli puni profili promjera 20 (mm).

Kao dijagonale bočnog sprega su odabrani, okrugli puni profili promjera 19 (mm).



Slika 17. Dvozglubni okvir

3.3.3 Trozglobni okvir

Grede – vareni I profil HEB 600 sa modificiranom visinom od 400mm na duljini od 10500mm. Na mjestu spoja grede i stupa, na duljini od 4500mm, presjek je promjenjivog profila HEB 600 sa visinom od 400mm na jednom kraju te 1050mm na kraju u dodiru sa stupom.

Stupovi - vareni I profil HEA 600 promjenjivog poprečnog presjeka sa modificiranom visinom na dnu stupa od 300 mm te visinom profila od 800 mm na vrhu.

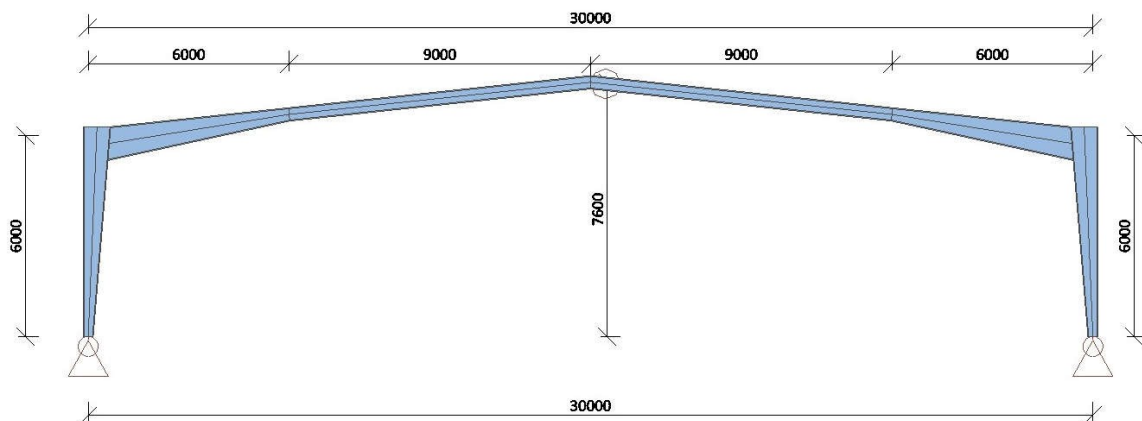
Stupovi na pročelju (dodatni stupovi kod prvog i zadnjeg okvira) - valjanih I profila HEA 220

Podrožnice - valjanih I profila IPE 220.

Sekundarni bočni nosači - valjanih I profila IPE 220O.

Spreгови - Kao dijagonale krovnog sprega su odabrani okrugli puni profili promjera 24 (mm).

Kao dijagonale bočnog sprega su odabrani, okrugli puni profili promjera 18 (mm).



Slika 18. Trozglobni okvir

4. ZAŠTITA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA OD POŽARA

4.1 Općenito o zaštiti

Kada se čelik zagrije tijekom požara, konstrukcija postupno gubi nosivost na temperaturama između 350 °C i 750 °C. Ovisno o opterećenjima i djelovanjima na konstrukciju, čelik obično popusti kad dosegne temperature između 500 i 600 °C. Stoga mu je potrebna konstrukcijska zaštita kako bi se očuvala stabilnost građevinske konstrukcije u slučaju požara. Najčešće vrste zaštite su obloge, žbuke i intumescentni premazi [12].

S obzirom na oblik protupožarne zaštite možemo podijeliti na kutijaste zaštite, profilirane zaštite i horizontalne membrane [13].

Najčešći primjer kutijaste zaštite je oblačenje čeličnih profila (elemenata) pločama. Debljina upotrijebljenog materijala je jednostavna za kontrolu jer se može lako izmjeriti na prednjoj (vidljivoj) strani kutije. Također se površina ovakve zaštite može estetski prilagoditi [13].

Profilirana zaštita prati oblik profila. Mogu biti korišteni razni materijali kao na primjer reaktivni i nereaktivni premazi ili ploče koje se profilirano oblače oko elementa.

Nereaktivni premazi se najčešće sastoji od temeljnog premaza, ojačanja mrežicom i zaštitnog sloja. Ovaj sustav je pogodan čak i za vrlo komplicirano oblikovane konstrukcije.

Reaktivni premazi su posebno korisni za očuvanje izgleda i oblika čelične konstrukcije. Reaktivni premaz se nanosi nakon anti-korozivne zaštite. Sustav također može biti i završni sloj.

Profilirano oblačenje pločama se koristi u iznimnim slučajevima, posebno za velike presjeke profila i moraju biti testirani za tu specifičnu izvedbu.

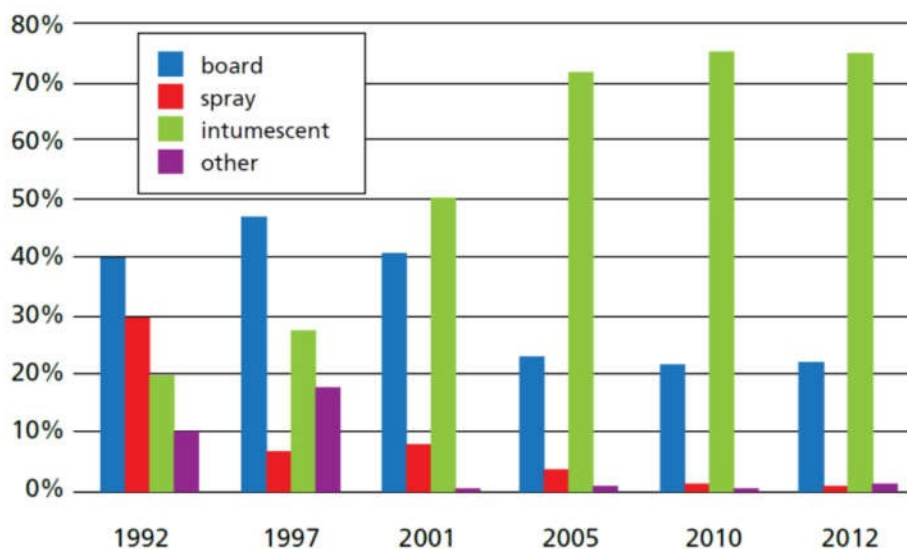
Horizontalna membrana je vrsta protupožarne zaštite koja ima oblik spuštenog stropa. Ona stvara glatku površinu, koja štiti nosivu konstrukciju iznad od prekomjerne topline. [13].

Potrebna debljina svake vrste zaštite ovisi o [12]:

- zahtijevanoj protupožarnoj otpornosti (obično 60, 90 ili 120 minuta, ponekad čak i 180 ili 240 minuta, u skladu s nacionalnim zakonodavstvom te uglavnom ovisno o funkciji i visini te aktivnostima unutar zgrade);
- kritičnoj temperaturi čelika (obično 500 – 600 °C te određeno nacionalnim propisima ili od strane inženjera projekatanta); to je maksimalna temperatura na kojoj čelik zadržava dovoljno čvrstoće da se izbjegnu urušavanja ili velike deformacije;
- geometriji i orijentaciji čelične konstrukcije: Što su čelični elementi deblji, to će se sporije zagrijavati odnosno tanji elementi će se brže zagrijati. To se izražava kao faktor profila, koji je obično 50 – 100 m⁻¹ za debele teške profile i 200 – 300 m⁻¹ za tanke i lagane profile. Na faktor profila utječe i izloženost vatri, npr. s tri strane za gredu, a s četiri strane za stup.

Iako se čelik klasificira kao nezapaljiv materijal, pri visokim temperaturama dolazi do deformacija i brzog rušenja čeličnih konstrukcija.

Danas su za protupožarnu zaštitu čeličnih konstrukcija dostupna razna rješenja, od kojih prevladavaju sljedeća 3: protupožarne boje (premazi), oblaganje protupožarnim pločama i protupožarne žbuke. Najveći udio zauzimaju protupožarni premazi s otprilike 70 %, oblaganje pločama pokriva otprilike 25 %, a protupožarne žbuke otprilike 3 % [15].

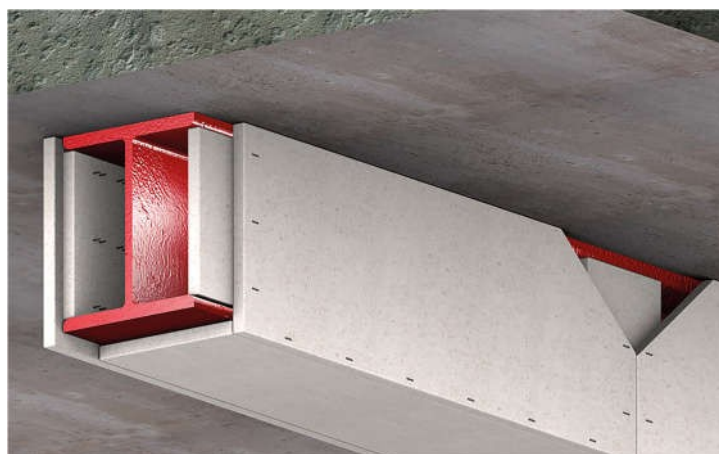


Slika 19. Tržišni udio sustava zaštite od požara[14]

Osim prethodno navedenih postoje i druge metode, poput oblaganja vatrootpornim oblogama, zalijevanje čeličnih stupova betonom, djelomično zalijevanje betonom, punjenje stupova opekom od pjenastog betona i betoniranje nosivih elemenata do polovine u betonski krov. Primjena tih metoda je u padu [15].

4.2 Protupožarne ploče

Protupožarne ploče predstavljaju drugu najčešću korištenu metodu zaštite čeličnih konstrukcija. Obično su to mineralne ploče (npr. od kalcijeva silikata) ojačane vlaknima i punilima. Ovisno o proizvođaču, mogu biti otporne i na vlagu i mraz te mogu biti obrađene i/ili premazane dekorativnim bojama. Debljina ploča ovisi o proizvođaču i stupnju protupožarne zaštite, a može iznositi od 10 mm do 60 mm. Ploče se postavljaju na mjestu ugradnje i prikladne su za razine zaštite od R 30 do R 180, pri čemu se preporučuje upotreba od R60 nadalje, uglavnom zbog boljeg omjera zaštitnih svojstava i cijene. Postupci obrade i postavljanja relativno su jednostavni (rezanje pilom, pričvršćivanje vijcima, klamanje). Budući da nema specifičnih ograničenja u pogledu vremena i temperature, ploče se mogu postavljati tijekom cijele sezone. Protupožarne ploče najpouzdaniji su sustav zaštite čeličnih konstrukcija, što je dokazano i u stvarnim okolnostima. Protupožarne ploče moraju se ispitati u skladu s normom EN 13381-4, njihova gorivost mora biti klasificirana prema normi EN 13501-1, a njihova klasa vatrootpornosti prema normi EN 13501-2. Moraju biti ispitane i prema europskom sustavu tehničke procjene (ETA), odnosno ETAG 018, i moraju imati certifikat konstantnosti proizvoda (COC), što sve zajedno omogućuje izdavanje CE oznake, ili bilo koje druge dokaze u skladu sa Zakonom o građevinskim proizvodima [15].



Slika 20. Protupožarne ploče [15]

Osim izravnog oblaganja moguće su i druge opcije postavljanja protupožarnih ploča. U praksi se često može dogoditi da oblaganje stropne konstrukcije bude previše složeno ili previše skupo. U tim slučajevima, ovisno o postojećoj situaciji, mogu se izvesti zaštitne membrane.

To je posebno korisno u slučaju prednapregnutih konstrukcija ili rešetkastih nosača, na kojima se zaštita uvijek teško izvodi. Pri odabiru takvih sustava potreban je oprez jer zaštitna membrana mora ispunjavati specifične zahtjeve i u slučaju vodoravne membrane mora biti ispitana u skladu s normom EN 13381-1 koja osigurava klasifikaciju nosivosti konstrukcije u klase R. ili ispitana u skladu s normom EN 1365-2, čime se osiguravaju nosivost i vatrootpornost REI [15].

Za protupožarnu zaštitu konstrukcije hala odabrana je zaštita u obliku protupožarnih ploča sa slijedećim karakteristikama:

Gustoća	Specifični toplinski kapacitet	Toplinska vodljivost
[kg/m ³]	[J/kgK]	[W/mK]
835	1700	0.189

Tablica 3. Karakteristike protupožarne zaštite

U radu se tijekom analize statičkih sustava hala radile varijacije debljine prethodno opisane zaštite. Točnije koristile su se dvije debljine zaštite, jedna debljine 25 mm (u nastavku će se modeli sa ovom zaštitom označavati sa PX) a druga 12 mm (modeli sa oznakom P).

5. REGULATIVA IZ PODRUČJA ZAŠTITE OD POŽARA U SKLADIŠTIMA

U Hrvatskoj osnovni pravilnik za određivanje zahtjeva koje treba ispuniti neko skladište je Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08). U nastavku će se izdvojiti dijelovi odnosno stavci iz ovog pravilnika pomoću kojih će se odrediti potrebna zaštita hale obrađena u ovom radu.

Pravilnik u člancima 2. i 3. skladišta dijeli s obzirom na površinu i način skladištenja.

Članak 2. skladišta dijeli prema površini na [16]:

- mala skladišta – površine požarnog sektora do 1000 m²,
- srednja skladišta – površine požarnog sektora iznad 1000 do 3000 m²,
- velika skladišta – površine požarnog sektora iznad 3000 do 6000 m²,
- skladišta površine požarnog sektora iznad 6000 m².

Također pravilnik (članak 3.) skladišta prema načinu skladištenja robe dijeli na:

- klasična skladišta (sa skladištenom robom do visine 9 m),
- visokoregalna skladišta (sa skladištenom robom iznad visine 9 m),
- silose,
- hladnjače.

Po pravilniku (članak 4.) skladište mora biti zaseban požarni sektor i u pravilu obuhvaća najviše jednu etažu. U skladištima površine iznad 300 m², roba se skladišti (slaže) u pojedinačne cjeline na površini od najviše 150 m² s međusobnim razmacima od najmanje 2,4 m.

Članak 5. propisuje da nosiva konstrukcija slobodnostojećeg objekta skladišta mora zadovoljavati najmanje otpornost na požar od 30 minuta. Ako je nosiva konstrukcija skladišta čelična i pritom nije vatrootporno zaštićena, potrebno je dokazati da pri temperaturi od 500°C neće doći do deformacije konstrukcije koje bi izazvale oštećenja koja utječu na otpornost na požar i stabilnost konstrukcije na granici požarnih sektora kroz koje prolazi čelična konstrukcija [16].

U pravilniku se nalazi tablica pomoću koje se mora odrediti sustavi zaštite od požara (Članak 7).

Oznake korištene u tablici su:

O – sustav za odvođenje dima i topline

V – sustav za dojavu požara

S – sprinkler ili drugi odgovarajući automatski sustav za gašenje požara

Skladišta propisana ovim pravilnikom moraju biti zaštićena unutarnjom i vanjskom hidrantskom mrežom (silosi i hladnjače samo vanjskom) te aparatima za gašenje požara.

Požarno opterećenje do 1 GJ/m²			
	Malo skladište	Srednje skladište	Veliko skladište
Klasično skladište		O ili V, ili S	O i V, ili S
Visokoregalno	S	S	O i S
Požarno opterećenje iznad 1 GJ/m² do 2 GJ/m²			
	Malo skladište	Srednje skladište	Veliko skladište
Klasično skladište	O i V, ili S	O i V, ili S	O i S
Visokoregalno	S	O i S	O i S
Požarno opterećenje iznad 2 GJ/m²			
	Malo skladište	Srednje skladište	Veliko skladište
Klasično skladište	O i V, ili S	O i S	O i S
Visokoregalno	O i S	O i S	O i S

Tablica 4. Tablica odabira sustava zaštite od požara u skladištima

Tlocrtne dimenzije hala koje su analizirane u ovom radu su 30x60 odnosno njihova površina je 1800 m². Požarno opterećenje iznosi 1890 MJ/m² (izračun opterećenja je objašnjeno u poglavlju Požarno opterećenje).

Poštujući prethodno navedene članke hala u ovom radu se po površini svrstava u srednje skladište a po iznosu opterećenja u skladište sa srednjim požarnim opterećenjem (<2 GJ/m²). Iz ovoga proizlazi da je skladište potrebno štiti sa sprinkler sustavom ili sa kombinacijom sustava za odvođenje dima i topline i sustava za dojavu požara. Odabrana je kombinacija sustava za odvođenje dima i topline i sustava za dojavu požara.

Prema pravilniku skladište mora također biti zaštićeno unutarnjom i vanjskom hidrantskom mrežom te mora zadovoljavati najmanju otpornost na požar od 30 minuta [16].

6. ODREĐIVANJE POŽARNOG SCENARIJA I OPTEREĆENJA

6.1 Požarno opterećenje

6.1.1 Požarni sektor

Cijela hala formirana je u jedan požarni sektor. Zahtjevi za otpornost na požar nosive konstrukcije je R 30. U objektu je predviđeno skladištenje zapaljive robe. Hala je sa svih strana zatvoren unutarnjom i vanjskom oblogom koja se sastoji od „sendvič“ panela te je pokrov krovišta također od „sendvič“ panela a pod se sastoji od AB ploče (industrijski pod). U razini poda predviđena su dva evakuacijska otvora, dok su ostala vrata protupožarna s automatskim zatvaranjem. Na uzdužnim (bočnim) fasadama nalaze se stakleni prozori.

6.1.2 Ulazni parametri

Kao što je već prethodno napomenuto cijela hala je formirana u jedan požarni sektor sa zahtijevanom otpornosti na požar R 30.

Obzirom na požarnu opasnost odjeljak je svrstan u srednju kategoriju, a predviđene mjere zaštite od požara su:

- automatski vatrodojavni sustav,
- unutarnja hidrantska mreža,
- vatrogasni aparati,
- očekivano potrebno vrijeme dolaska vatrogasne postrojbe je unutar 10 min,
- sustav za odvođenje dima i topline.

U objektu je predviđeno skladištenje zapaljive robe (drvenih paleta), a osnovni razlog koji može prouzročiti i omogućiti širenje požara je neispravnost predvidivih funkcionalno-tehničkih sklopova građevine (električne i strojarske opreme i instalacija, gromobranske instalacije i sl.).

Ukupno specifično požarno opterećenje u predmetnom prostoru je $q_{f,k} = 1890 \text{ MJ/m}^2$ (srednje požarno opterećenje).

Navedeni podaci predstavljaju ulazne parametre za proračun djelovanja požara na konstrukciju i njene otpornosti u zahtijevanom vremenu.

Konstrukcija je zaštićena protupožarnim pločama sa karakteristikama opisanim u poglavlju protupožarne ploče.

6.1.3 Karakteristike požarnog sektora

Požarni sektor hale je pravokutnog tlocrtnog oblika dimenzija 30x60 m i prosječne visine 6,8 m. Sa svih strana je zatvoren unutarnjom i vanjskom oblogom od „sendvič“ panela, pokrovom također od „sendvič“ panela i podnom AB pločom sa industrijskim podom. U razini poda predviđena su dva evakuacijska otvora (vrata dimenzija 5.5x10m), dok su ostala vrata protupožarna s automatskim zatvaranjem. Na uzdužnim (bočnim) fasadama na visini od 4.0 m od poda nalaze se stakleni prozori visine 1.5m i dužine 50m čini ukupnu površinu otvora od 260 m².

Pri analizi požarnog djelovanja u obzir su uzete toplinske karakteristike svih elemenata i materijala koji omeđuju odjeljak. Površinu otvora predstavljaju evakuacijska vrata, dok su stakleni dijelovi fasada temperaturno ovisni otvori i kao takvi uzeti u obzir pri dosizanju temperature od 400°C.

6.1.4 Analiza požarnog djelovanja

Djelovanje požara određeno je prema HRN EN 1991-1-2 [3]. Obzirom na karakteristike i dimenzije požarnog sektora analizirano je temperaturno djelovanje naprednim modelom požara.

Proračunska vrijednost požarnog opterećenja

Karakteristike jedne palete:

- Dimenzije: 120x100x16,5 cm
- Težina: 10,5 kg
- Neto kalorijska vrijednost [17]: 12MJ/kg

$$= 20 \cdot 10 + 20 \cdot 10 = 400 \quad - \text{Površina goriva (naslaganih paleta)}$$

$$h = 2,97\text{m} \quad - \text{ukupna visina stupca naslaganih paleta}$$

$$Q_f, k = \frac{400}{1,2 \cdot 1} \cdot \frac{2,97}{0,165} \cdot 10,5 \cdot 12 = 756000$$

$$q_f, k = \frac{756000}{400} = 1890 \quad /$$

$m = 0.8$ - faktor gorenja

$\delta_{q1} = 1.59$; $\delta_{q2} = 1.0$ - faktori rizika nastanka požara obzirom na veličinu i namjenu sektora

$\delta_n = \Pi\delta_{ni} = 0.6786$ - produkt faktora aktivnih mjera za borbu protiv požara

$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n = 1631.4 \text{ MJ/m}^2$

Brzina oslobađanja topline [18]:

(obzirom na namjenu prostora i veliku brzinu rasta požara)

$RHR_f = 6000 \text{ kW/m}^2$ - brzina otpuštanja topline po 1 m^2

$t_{\alpha} = 150 \text{ s}$ - vrijeme potrebno da se dostigne brzina otpuštanja topline od 1 MW

Toplinske karakteristike sektora

Značajke materijala koji omeđuju sektor:

Materijal (iznutra prema van)	Debljina [cm]	Specifična težina [kg/m ³]	Toplinska provodljivost [W/mK]	Specifična toplina [J/kgK]
POD				
Beton normalne težine	15	2300	1.6	1000
STROP (paneli)				
Čelik	0.09	7850	45	600
Kamena ili staklena vuna	15	60	0.037	1030
Čelik	0.07	7850	45	600
ZIDOVI (paneli)				
Čelik	0.05	7850	45	600
Kamena ili staklena vuna	15	60	0.037	1030
Čelik	0.05	7850	45	600

Tablica 5. Značajke materijala obloge skladišta

$A_f = 400 \text{ m}^2$ - površina požara

$A_t = 1800 \text{ m}^2$ - površina sektora

$A_{v1} = 110 \text{ m}^2$ - površina neovisnih otvora (evakuacijski izlazi)

$A_{v2} = 150 \text{ m}^2$ - površina temperaturno ovisnih otvora ($400 \text{ }^\circ\text{C}$, stakleni prozori)

Napredni model požara

Napredni model razvoja i djelovanja požara proveden je računalnim programom OZone V3.0.4 i to za kombinaciju modela s jednim područjem i modela s dva područja.

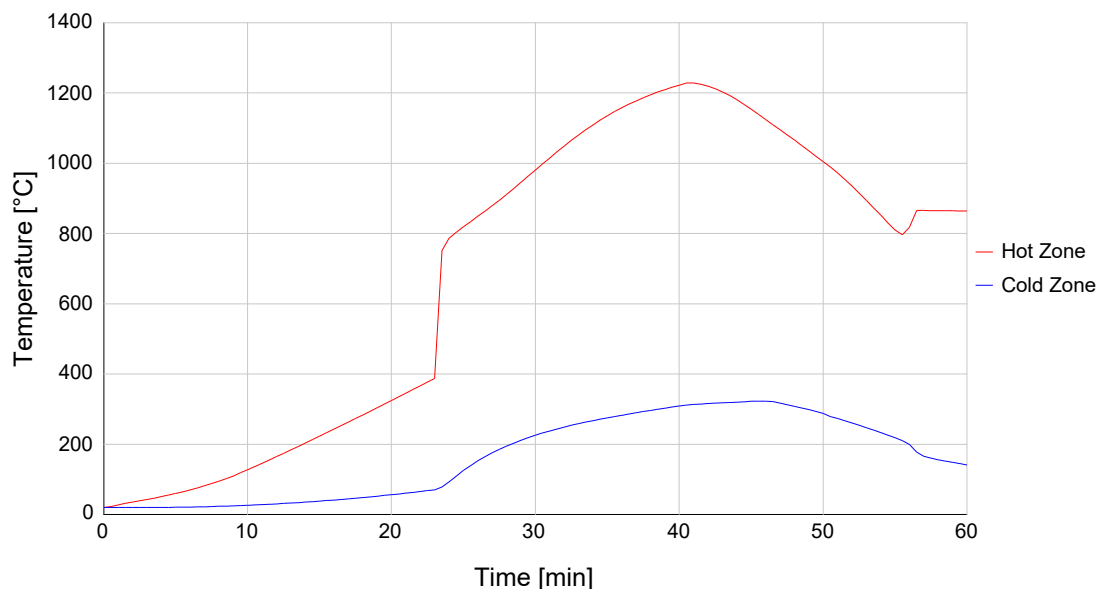
Prelazak iz modela s 2 zone u model s 1 zonom se odvija ako je zadovoljen barem jedan od kriterija [9]:

- Temperatura vrućeg plina $> 500 \text{ }^\circ\text{C}$
- Zapaljiv materijal u zoni dima i temperatura dima $> 300 \text{ }^\circ\text{C}$
- Lokalizirani požar $> 25 \%$ površine odjeljka
- Visina dima $> 80 \%$ ukupne visine odjeljka

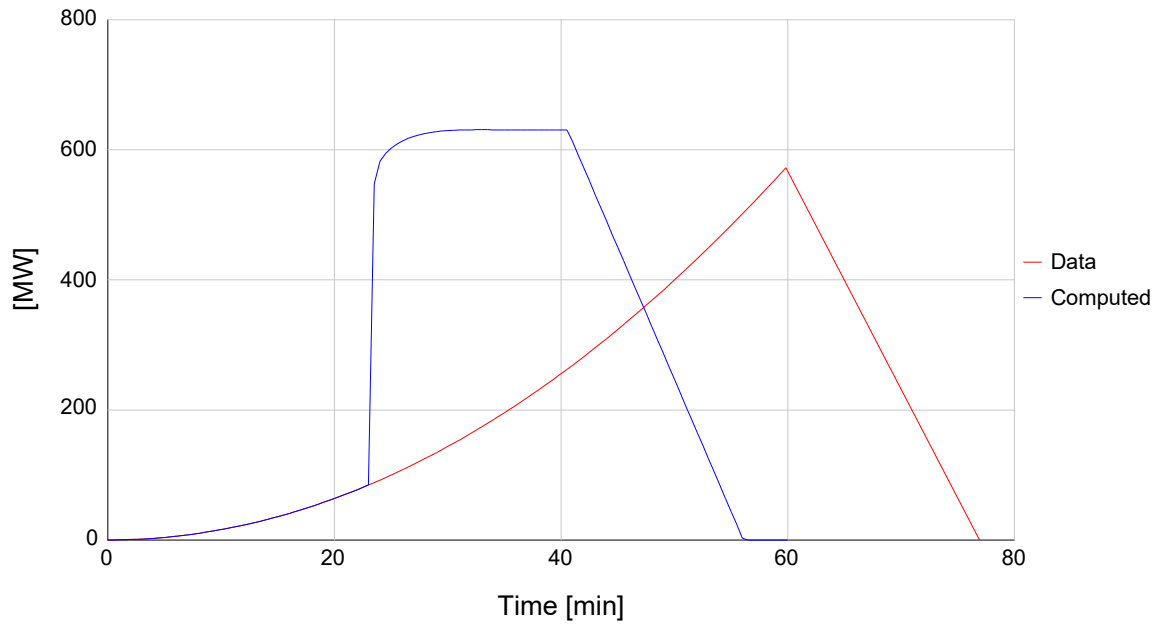
Za model sagorijevanja korišteno je produženo djelovanje požara. Dobiveni rezultati mjerodavni su za proračun temperature i otpornosti elemenata.

Rezultati proračuna

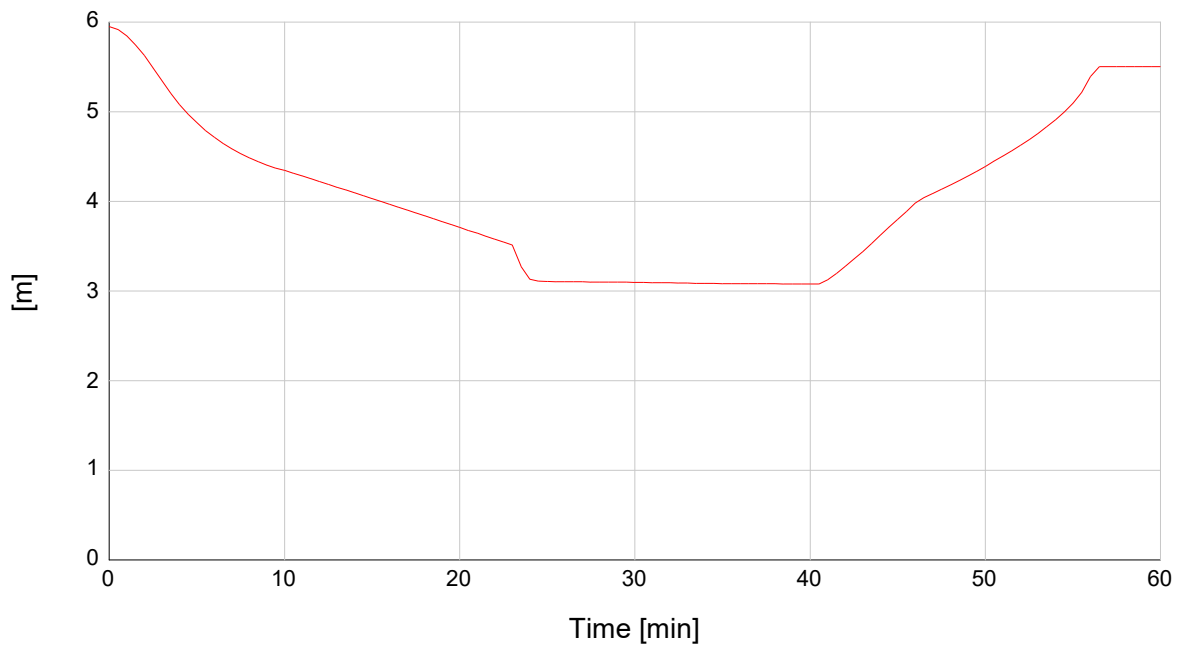
Maksimalna površina požara manja je od 25% površine poda. Požarno opterećenje je lokalizirano, a gornji sloj je manji od 80% visine odjeljka, pa je korišten model s dva područja (dvozonski model).



Slika 21. Temperatura plina ($t_{g,max} = 980 \text{ }^\circ\text{C}$ pri $t = 30\text{min}$)



Slika 22. Brzina otpuštanja topline ($Q_{max} = 631.00$ MW pri $t = 33.0$ min)



Slika 23. Visina granice zona ($h_{max} = 3.08$ m pri $t = 38.5$ min)

7. ODREĐIVANJE REZNIH SILA I DIMENZIONIRANJE NA DJELOVANJE POŽARA

7.1 Opterećenja

7.1.1 Stalno opterećenje

Vlastita težina

Vlastitu težinu nosive čelične konstrukcije i svih elemenata računalni program generira automatski na osnovu zadane geometrije, konstrukcijskih elemenata i karakteristika materijala u skladu sa HRN EN 1991-1-1 [19].

Dodatno stalno

Krov

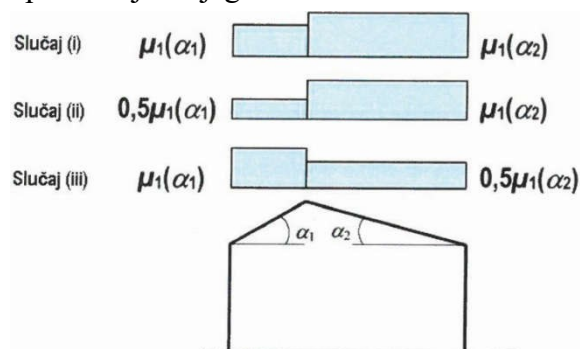
krovni paneli	$\Delta g1 =$	0.25	kN/m ²
instalacije	$\Delta g2 =$	0.10	kN/m ²
Fasade			
fasadni paneli	$\Delta g3 =$	0.25	kN/m ²
potkonstrukcija za panele	$\Delta g4 =$	0.15	kN/m ²

7.1.2 Promjenjiva opterećenja

Snijeg

Opterećenje snijegom na konstrukciju određeno je prema HRN EN 1991-1-3 [20]. Nagib krovne plohe je $\alpha = 6^\circ$.

karakteristično opterećenje snijegom na tlu	$s_k =$	1.0	kN/m ²
koeficijent izloženosti	$C_e =$	1.0	
toplinski koeficijent	$C_t =$	1.0	
koeficijent oblika za krov $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$\mu_1 =$	0.8	
opterećenje snijegom na krovu	$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k =$	0.8	kN/m ²



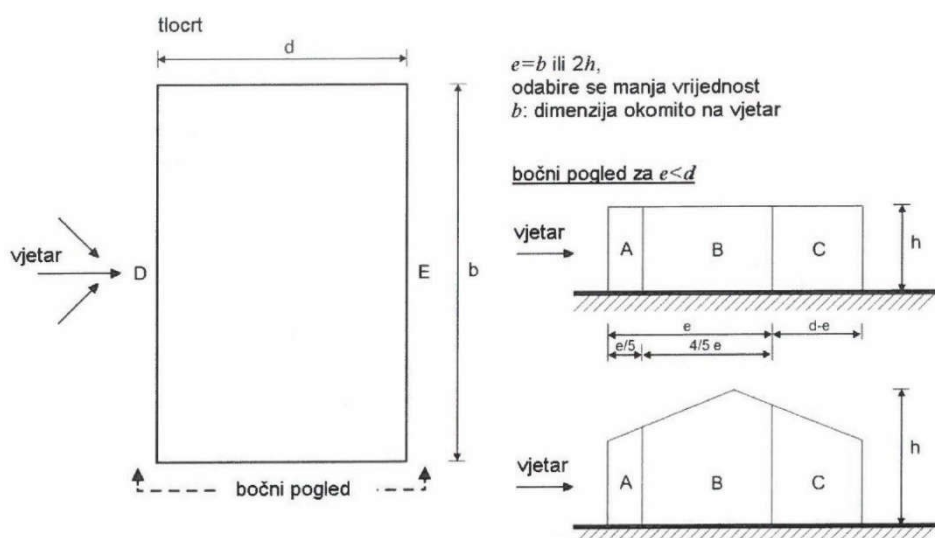
Slika 24. Rasporedi (slučajevi) opterećenja snijegom za dvostrušne krovove

Vjetar

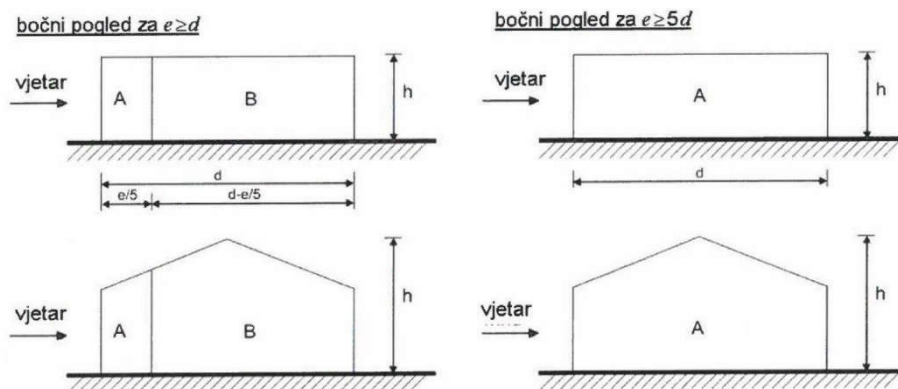
Sukladno HRN EN 1991-1-4 [21] objekt se nalazi u vjetrovnoj zoni s osnovnom brzinom vjetra od 26.2 m/s i na otvorenom području izloženom vjetru.

$V_{b,0}$ - osnovna brzina vjetra[m/s]	26.200
ρ_0 - gustoća zraka[kg/m ³]	1.3
c_{dir} - faktor smjera	1
c_{season} - faktor godišnjeg doba	1
c_o - faktor vertikalne razvedenosti terena	1
$1/p$ - vijek trajanja konstrukcije[year]	50.00
c_{prob} - faktor vjerojatnosti	1
K - faktor oblika	0.2
n - exponent	0.5
Kategorija terena	0
K_r - faktor terena	0.156036
z_0 - duljina hrapavosti[m]	0.003
z_{min} - minimalna visina[m]	1.000
k_1 - faktor turbulencije	1
Tip konstrukcije	Pravokutna zgrada (EC1-1-4, 7.2.2)
Referentna razina terena[m]	0.000

Ime	Dio građevine	Tip krova
WD1	Prednji zid	
WD2	Lijevi zid	
WD3	Krov lijeva streha	Dvostrešan
WD4	Krov desna streha	Dvostrešan
WD5	Desni zid	
WD6	Stražnji zid	

Koeficijenti tlaka za vertikalne zidove

Slika 25. Vjetrovne zone vertikalnih zidova[21]

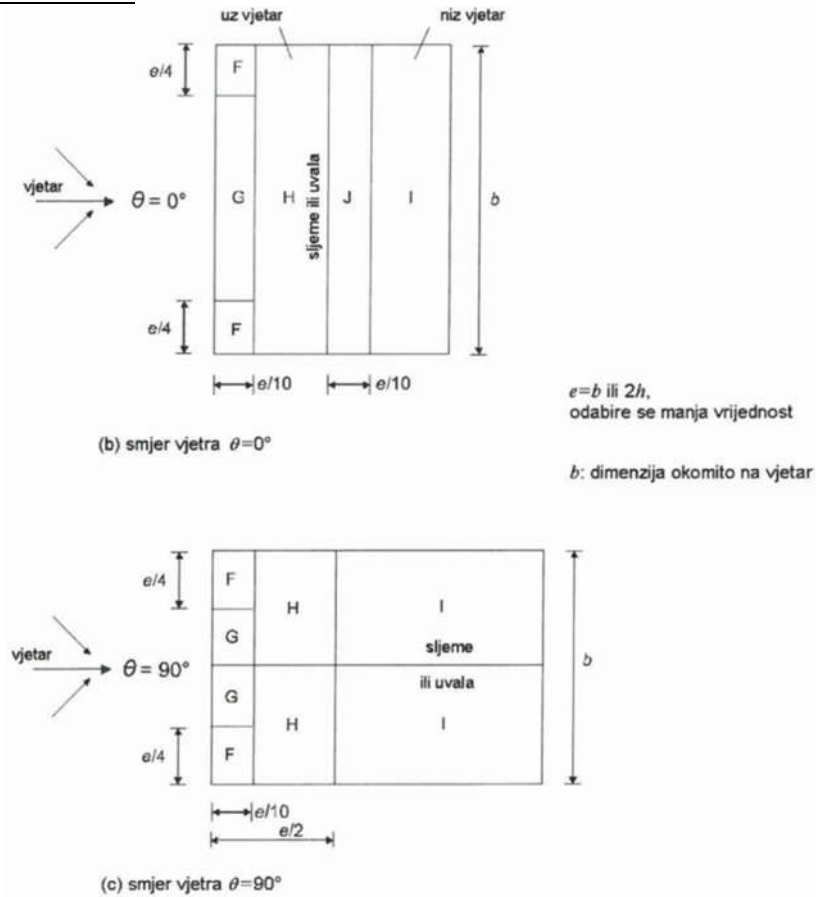


Slika 26. Vjetrovne zone vertikalnih zidova[21]

Ime	Smjer opterećenja	+C _{pi}	-C _{pi}	Područje	Zone	+C _{pe}	-C _{pe}
WD1	0	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
				2	B	-0.8000	-0.8000
				3	C	-0.5000	-0.5000
				4	A	-1.2000	-1.2000
				5	B	-0.8000	-0.8000
				6	C	-0.5000	-0.5000
	90	0.2000	-0.3000	1	E	-0.3000	-0.3000
				2	E	-0.3000	-0.3000
	180	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
				2	B	-0.8000	-0.8000
				3	C	-0.5000	-0.5000
				4	A	-1.2000	-1.2000
				5	B	-0.8000	-0.8000
				6	C	-0.5000	-0.5000
270	0.2000	-0.3000	1	D	0.7000	0.7000	
			2	D	0.7000	0.7000	
WD2	0	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
				2	B	-0.8000	-0.8000
				3	C	-0.5000	-0.5000
				4	A	-1.2000	-1.2000
				5	B	-0.8000	-0.8000
				6	C	-0.5000	-0.5000
	90	0.2000	-0.3000	1	D	0.7000	0.7000
				2	D	0.7000	0.7000
	180	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
				2	B	-0.8000	-0.8000
				3	C	-0.5000	-0.5000
				4	A	-1.2000	-1.2000
				5	B	-0.8000	-0.8000
				6	C	-0.5000	-0.5000
270	0.2000	-0.3000	1	E	-0.3000	-0.3000	
			2	E	-0.3000	-0.3000	
WD5	0	0.2000	-0.3000	1	E	-0.3009	-0.3009
	90	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
				2	B	-0.8000	-0.8000
				3	C	-0.5000	-0.5000
	180	0.2000	-0.3000	1	D	0.7004	0.7004
	270	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
2				B	-0.8000	-0.8000	
3				C	-0.5000	-0.5000	
WD6	0	0.2000	-0.3000	1	D	0.7004	0.7004
	90	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
				2	B	-0.8000	-0.8000
				3	C	-0.5000	-0.5000
	180	0.2000	-0.3000	1	E	-0.3009	-0.3009
	270	0.2000	-0.3000	1	A	-1.2000	-1.2000
2				B	-0.8000	-0.8000	
			3	C	-0.5000	-0.5000	

Tablica 6. Koeficijenti tlakova za vertikalne zidove

Koeficijenti tlaka za krov



Slika 27. Vjetrovne zone za krov[21]

Ime	Smjer opterećenja	+Cpi	-Cpi	Područje	Zone	+Cpe	-Cpe
WD3	0	0.2000	-0.3000	1	J	0.1780	-0.6440
				2	I	-0.5780	-0.5780
	90	0.2000	-0.3000	1	F	-1.5670	-1.5670
				2	G	-1.3000	-1.3000
				3	H	-0.6890	-0.6890
				4	I	-0.5890	-0.5890
	180	0.2000	-0.3000	1	F1	0.0220	-1.6120
				2	F2	0.0220	-1.6120
				3	G	0.0220	-1.1560
				4	H	0.0220	-0.5670
	270	0.2000	-0.3000	1	F	-1.5670	-1.5670
				2	G	-1.3000	-1.3000
3				H	-0.6890	-0.6890	
4				I	-0.5890	-0.5890	
WD4	0	0.2000	-0.3000	1	F1	0.0220	-1.6120
				2	F2	0.0220	-1.6120
				3	G	0.0220	-1.1560
				4	H	0.0220	-0.5670
	90	0.2000	-0.3000	1	F	-1.5670	-1.5670
				2	G	-1.3000	-1.3000
				3	H	-0.6890	-0.6890
				4	I	-0.5890	-0.5890
	180	0.2000	-0.3000	1	J	0.1780	-0.6440
				2	I	-0.5780	-0.5780
	270	0.2000	-0.3000	1	F	-1.5670	-1.5670
				2	G	-1.3000	-1.3000
3				H	-0.6890	-0.6890	
4				I	-0.5890	-0.5890	

Tablica 7. Koeficijenti tlakova za krov

Kombinacije opterećenja

Osnovni slučajevi opterećenja

G, ΔG, G_k - stalna djelovanja

S - snijeg

W - vjetar

Granična stanja nosivosti

Stalne i prolazne kombinacije djelovanja

$\gamma_G \cdot G + \gamma_{Q,1} \cdot Q_1 + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_i$ gdje su G – ukupno stalno djelovanje

Q₁ – vodeće promjenjivo djelovanje

Q_i – prateća promjenjiva djelovanja

γ_i – parcijalni koeficijenti za djelovanja

ψ_{0,i} – faktori za komb. promjenjivih djelovanja

Osnovni slučaj djelovanja		Parcijalni koeficijenti	Faktori za kombinacije
G	nepovoljno	γ _G = 1.35	
	povoljno	γ _G = 1.00	
Q	nepovoljno (0 za povoljno)	γ _Q = 1.35	ψ ₀ = 1.0
S	nepovoljno (0 za povoljno)	γ _Q = 1.50	ψ ₀ = 0.5
W	nepovoljno (0 za povoljno)	γ _Q = 1.50	ψ ₀ = 0.6

Tablica 8. *Parcijalni faktori i faktori kombinacija*

Proračun otpornosti na djelovanje požara

Proračun otpornosti nosive čelične konstrukcije proveden je prema HRN EN 1993-1-1 [22] za stalnu ili prolaznu kombinaciju te prema HRN EN 1993-1-2 [6] za pripadnu izvanrednu kombinaciju opterećenja:

$$\Sigma G_k + A_d + \Sigma \psi_2 Q_k,$$

Djelovanja koja su rezultat industrijskih postupaka, poput rada kрана, se ne uzimaju u obzir. Budući se radi o kombinaciji koja podrazumijeva samo ukupno stalno opterećenje proračun otpornosti konstrukcije na djelovanje požara proveden je za glavne nosive elemente.

Dokaz mehaničke otpornosti i stabilnosti

Dokaz nosivosti i stabilnosti rasponske konstrukcije hale proveden je prema Eurocode-u za kvalitetu čeličnog materijala S275 s nominalnom vrijednošću granice razvlačenja $f_y = 275$ N/mm² i čvrstoće $f_u = 490$ N/mm², te modula elastičnosti $E = 210000$ N/mm².

Parcijalni faktori sigurnosti, γ_{Mi}

otpornost poprečnog presjeka i popuštanja materijala	$\gamma_{M0} = 1.00$
stabilnost elemenata	$\gamma_{M1} = 1.10$
otpornost spojeva	$\gamma_{M2} = 1.25$
otpornost na zamor	$\gamma_{Mf} = 1.15$
otpornost na požar	$\gamma_{M,fi} = 1.00$

Opterećenja

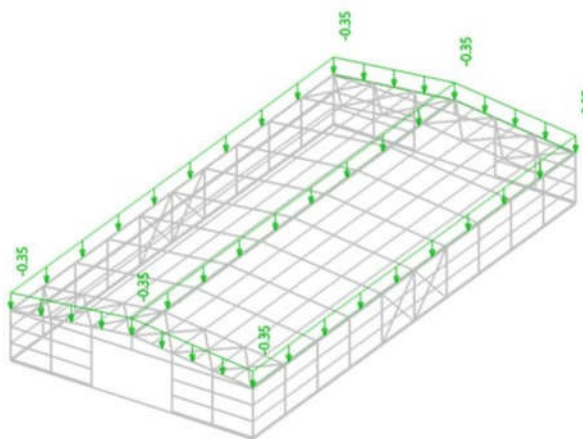
Ime	Opis	Tip opterećenja	Grupa opterećenja
LC1	Vlastita težina	Stalno	LG1
LC2	Dodatno stalno - Krov	Stalno	LG1
LC3	Dodatno stalno - Zid	Stalno	LG1
LC4	Snijeg	Promjenjivo	LG2-Snijeg
LC7	Požar	Promjenjivo	LG4-Požar
Vjetar1	0, + CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar2	0, + CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar3	0, - CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar4	0, - CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar5	90, + CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar6	90, + CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar7	90, - CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar8	90, - CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar9	180, + CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar10	180, + CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar11	180, - CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar12	180, - CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar13	270, + CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar14	270, + CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar15	270, - CPE, + CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
Vjetar16	270, - CPE, - CPI	Promjenjivo	LG3-Vjetar
LC5	Snijeg - lijevo	Promjenjivo	LG2-Snijeg
LC6	Snijeg - desno	Promjenjivo	LG2-Snijeg

Tablica 9. Popis opterećenja

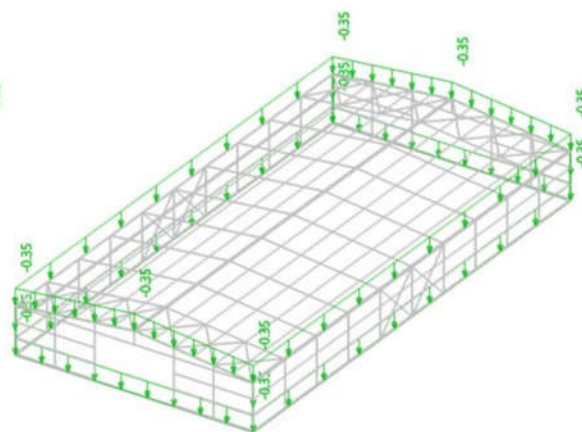
Grupe opterećenja

Ime	Opterećenje	Tip
LG1	Stalno	
LG2-Snijeg	Promjenjivo	Snijeg
LG3-Vjetar	Promjenjivo	Vjetar
LG4-Požar	Izvanredno	

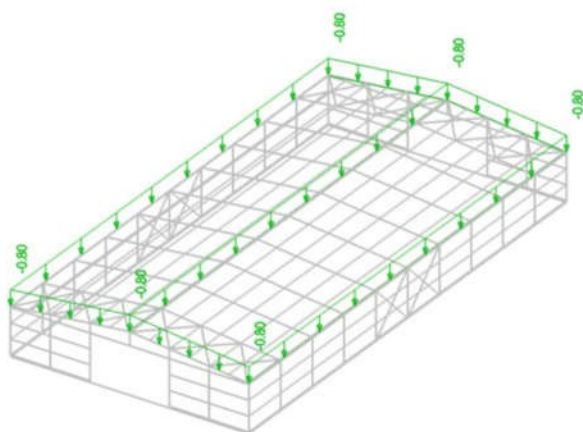
Tablica 10. Grupe opterećenja



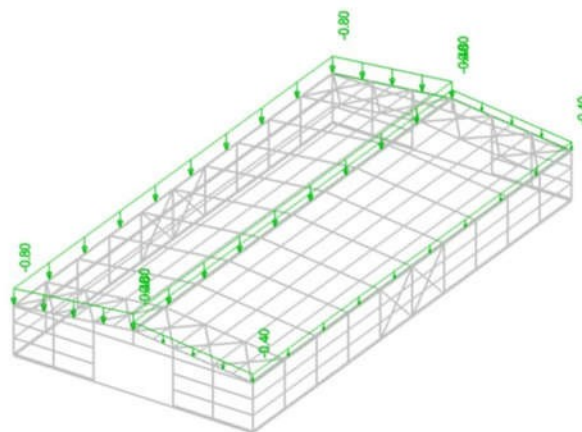
Slika 28.LC2 – dodatno stalno – krov



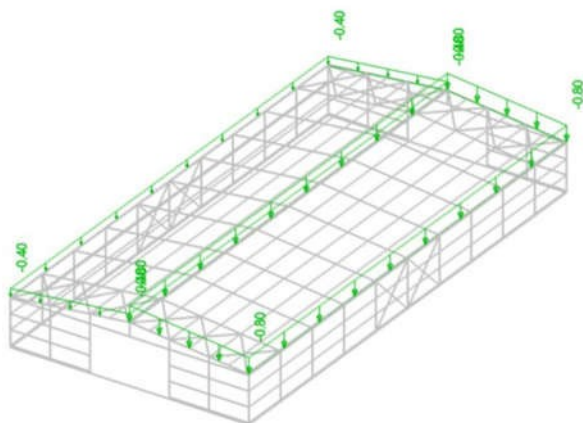
Slika 29.LC3 – dodatno stalno - zidovi



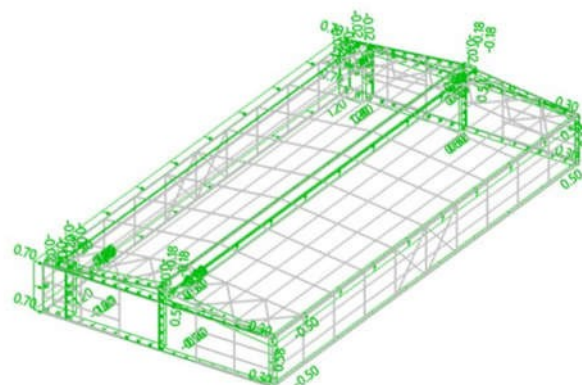
Slika 30.LC4 – snijeg



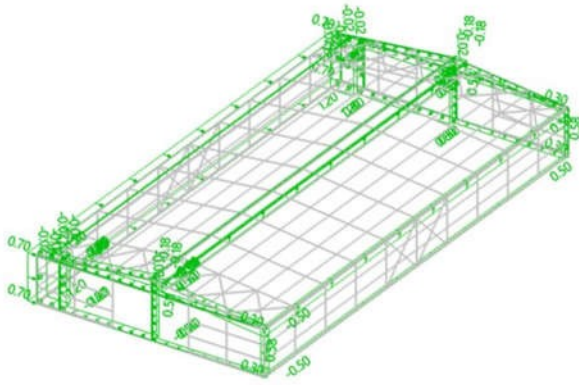
Slika 31.LC5 – snijeg lijeva stana krova



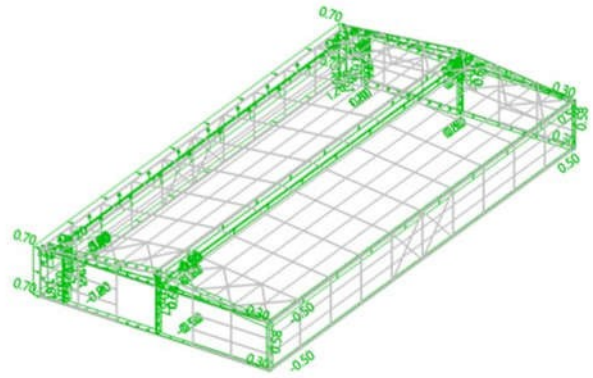
Slika 32.LC6 – snijeg desna stana krova



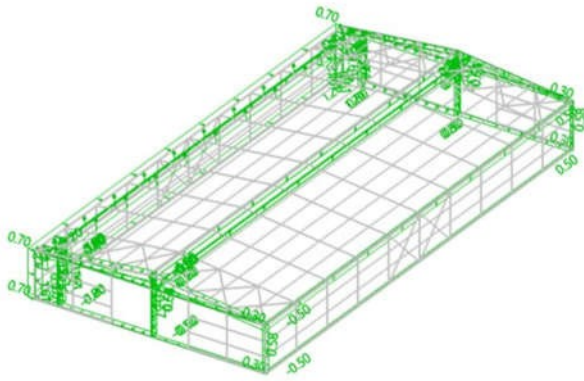
Slika 33.Vijetar1 - 0, + CPE, + CPI



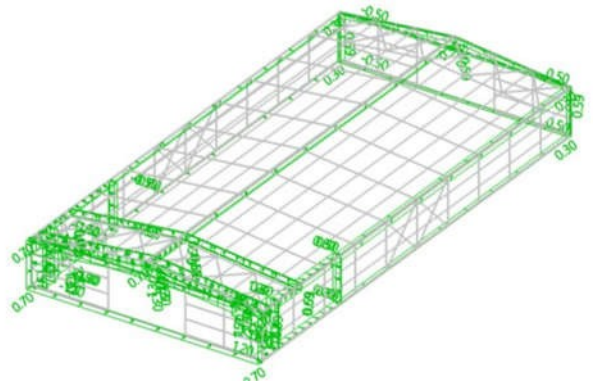
Slika 34. Vijetar2 - 0, + CPE, - CPI



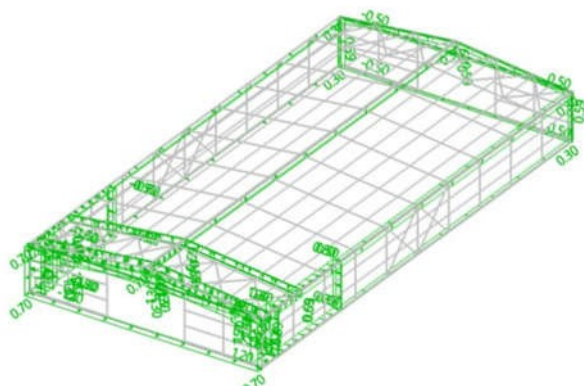
Slika 35. Vijetar3 - 0, - CPE, + CPI



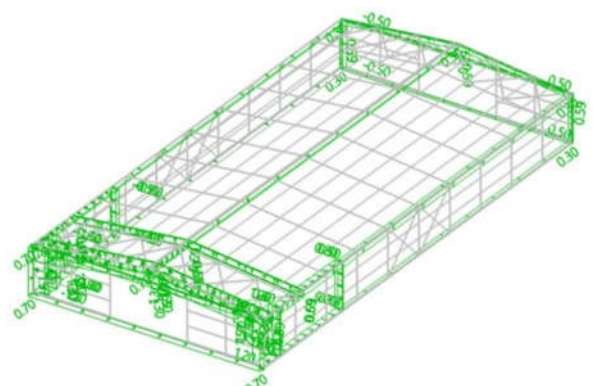
Slika 36. Vijetar4 - 0, - CPE, - CPI



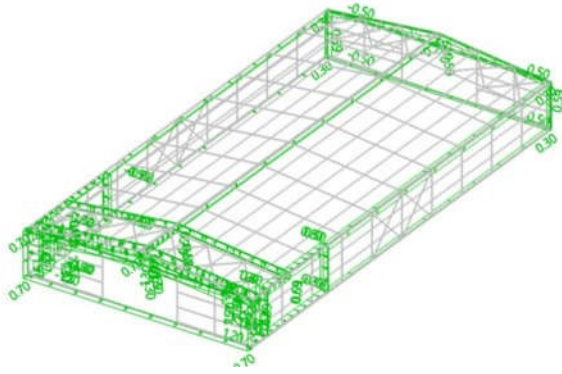
Slika 37. Vijetar5 - 90, + CPE, + CPI



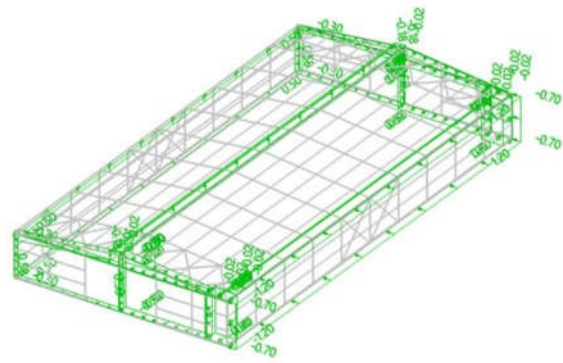
Slika 38. Vijetar6 - 90, + CPE, - CPI



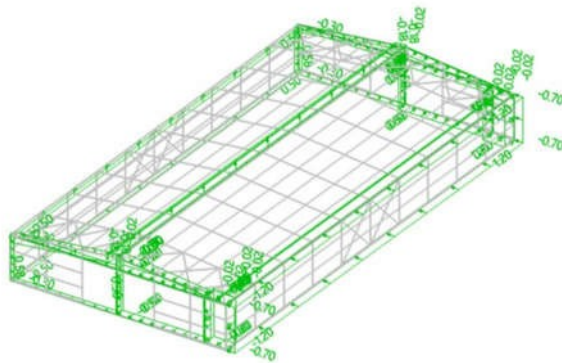
Slika 39. Vijetar7 - 90, - CPE, + CPI



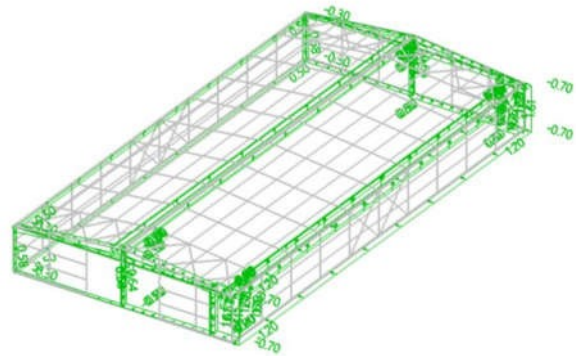
Slika 40. Vijetar8 - 90, - CPE, - CPI



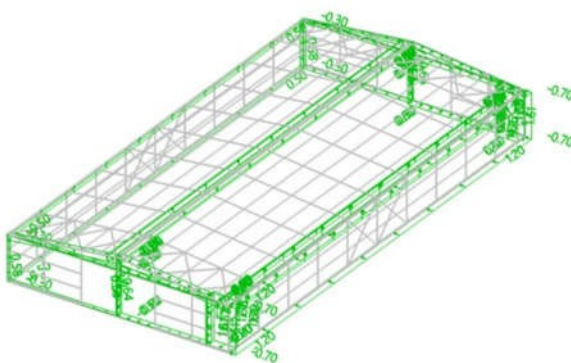
Slika 41. Vijetar9 - 180, + CPE, + CPI



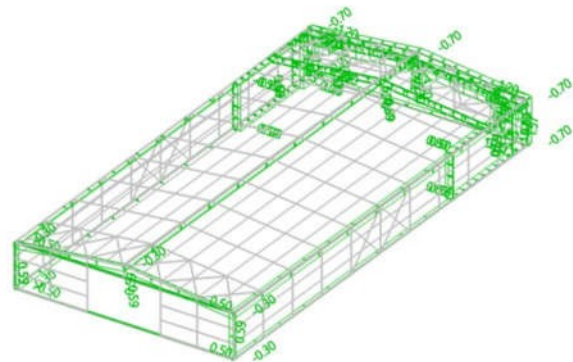
Slika 42. Vijetar10 - 180, + CPE, - CPI



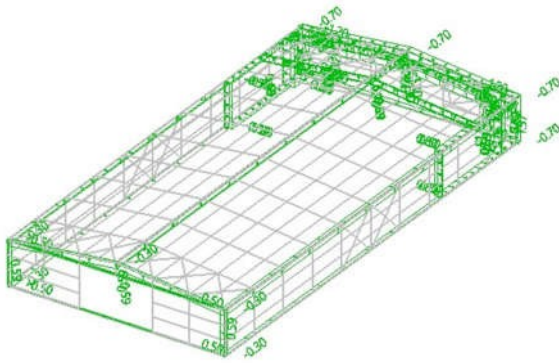
Slika 43. Vijetar11 - 180, - CPE, + CPI



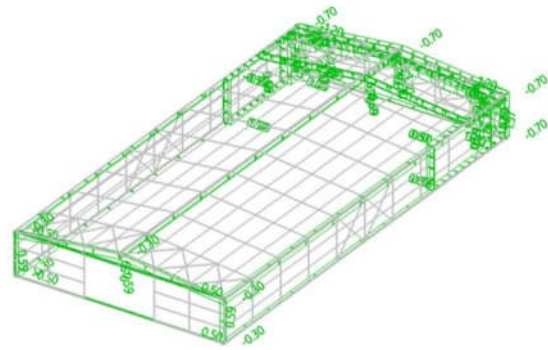
Slika 44. Vijetar12 - 180, - CPE, - CPI



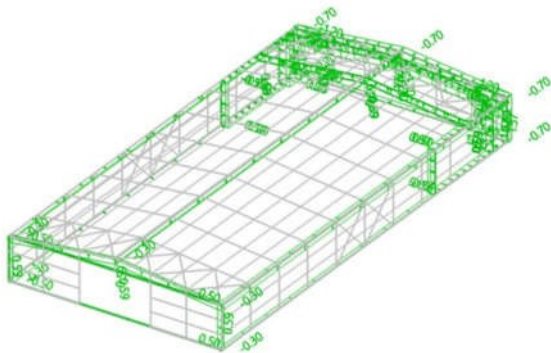
Slika 45. Vijetar13 - 270, + CPE, + CPI



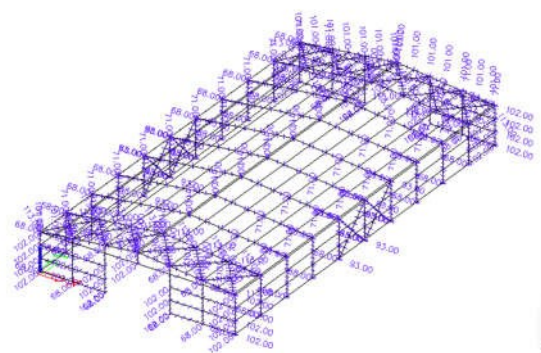
Slika 46. Vijetar14 - 270, + CPE, - CPI



Slika 47. Vijetar15 - 270, - CPE, + CPI



Slika 48. Vijetar16 - 270, - CPE, - CPI



Slika 49. LC 7 – Požar (opterećenje temperaturom)

U nastavku će biti prikazani rezultati za prethodno opisana tri statička sustava (hala s upetim, dvozglonim i trozglonim okvirom). Rezultati će biti prikazani u obliku tablica u kojima će se nalaziti kombinacije korištene za dimenzioniranje te tablica iskoristivosti pojedinih elemenata konstrukcije. Za modele korištene za proračun požarnih situacija neće se prikazivati iskoristivost bočnih podružnica pošto ovi elementi nemaju veliki utjecaj na globalnu stabilnost konstrukcije.

Za svaki okvir su napravljena četiri modela. Najprije je konstrukcija provjerena na „hladno“ stanje odnosno na GSN- redovnu kombinaciju. U ovom modelu su određeni profili svih elemenata (stupova, greda, podružnica) te su ovi modeli poslužili kao usporedba za kasnije modele korištene za požarne situacije.

Zatim je konstrukcija „obložena sa protupožarnom zaštitom karakteristika prikazanih u poglavlju Protupožarne ploče te debljine 12mm. Za ovaj model će se u nastavku koristiti nastavak P koji označava prethodno opisanu protupožarnu zaštitu. Sa ovom zaštitom napravljene su dvije varijacije, u jednoj varijanti je modelirano toplinsko istezanje prouzročeno požarom odnosno temperaturom nastalom u čeličnom profilu dok se u drugoj varijanti ovo djelovanje zanemarilo.

Posljednja (četvrta) varijanta modela je sa debljom protupožarnom zaštitom. U ovom modelu se također koristila zaštita karakteristika iz poglavlja Protupožarne ploče ali sa debljinom od 25mm. Ovaj model ima dodatno oznaku PX radi lakšeg raspoznavanja. Na ovaj model je dodano temperaturno istezanje prouzročeno požarom.

Kod modela konstrukcija opterećenih požarnim opterećenjem i zaštićenih protupožarnom zaštitom od 25mm (PX) uz ove tablice prikazani su i maksimalne rezne sile (anvelope) za izvanrednu (požarnu) kombinacije te je prikazan postupak dimenzioniranja stupa i grede kao dva osnovna elementa konstrukcije.

7.2 Prikaz rezultata dimenzioniranja za model s dvozglornim okvirom

7.2.1 Model s dvozglornim okvirom zaštićen PX protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija

7.2.1.1 Kombinacije

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar11
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar3
EN_GSN - Izvanredno/17	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar9

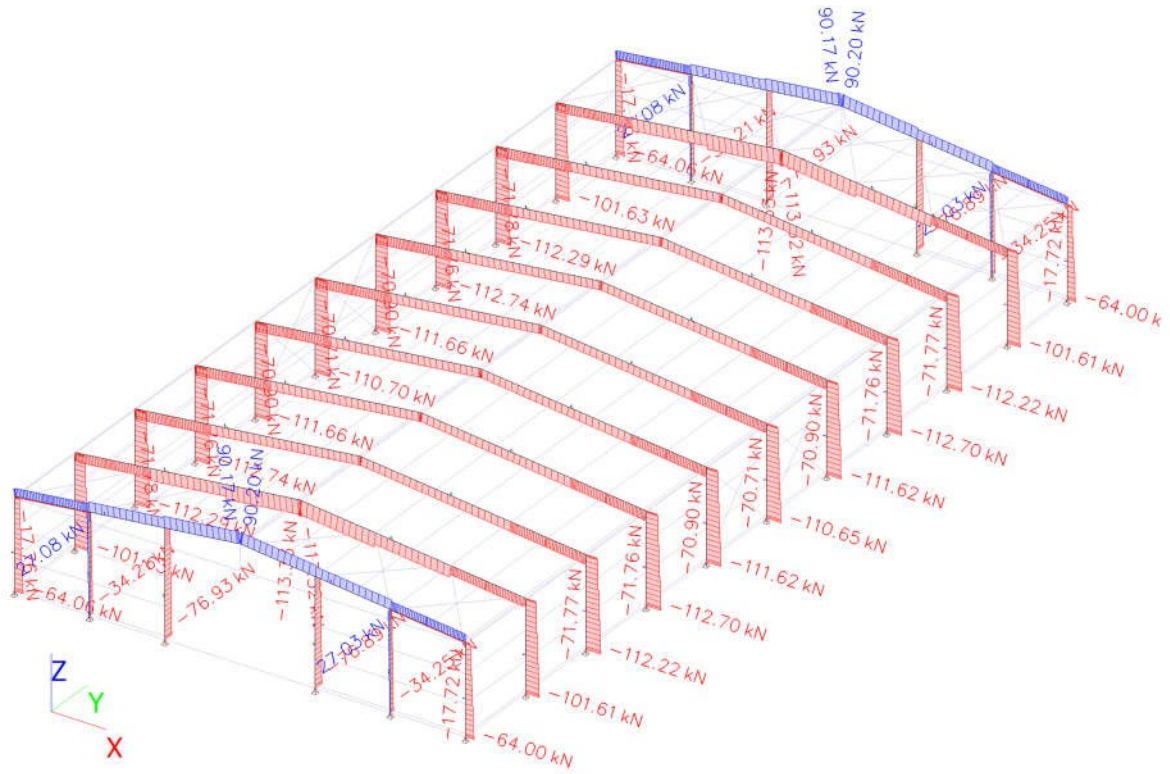
Tablica 11. Mjerodavne kombinacije – dvozglorni okvir PX zaštita

7.2.1.2 Rezne sile za stup i gredu

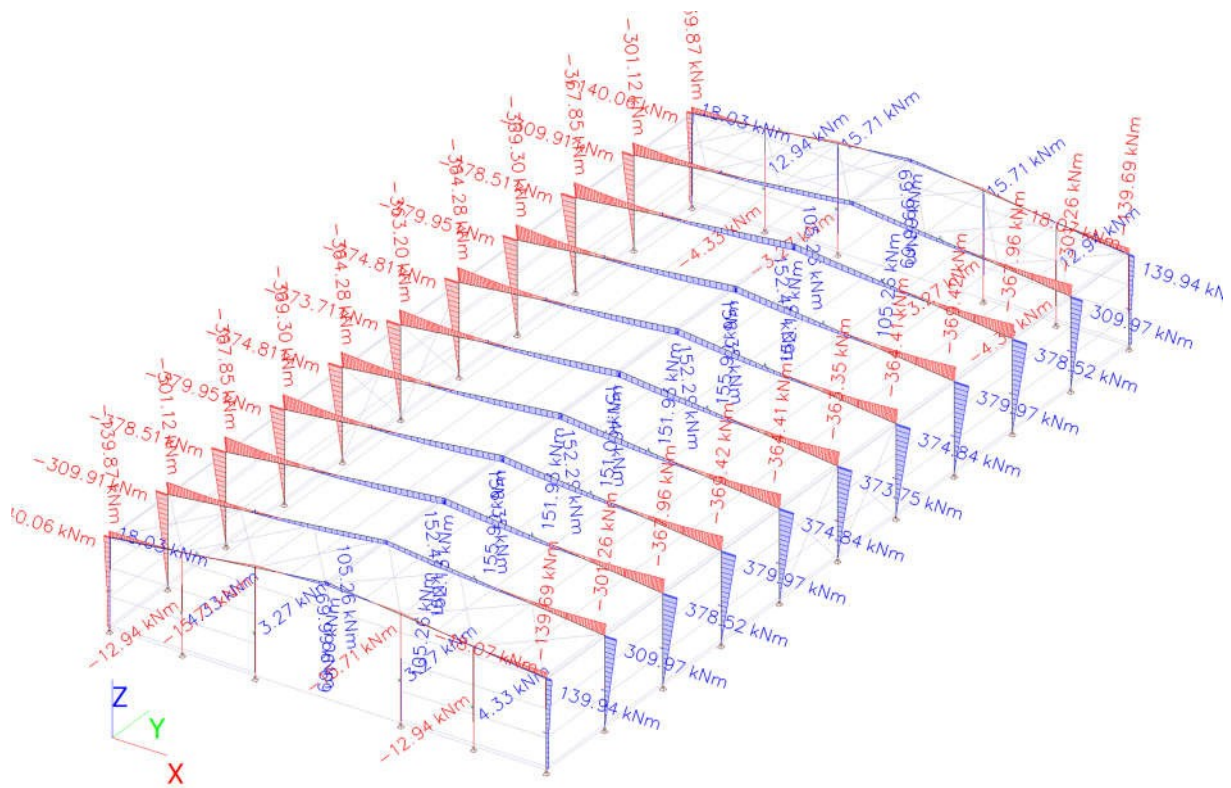
Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
B21	0.000	EN_GSN - Izvanredno/7	Stup - HEA550	-112.74	-0.19	-61.19	0.00	0.00	0.00
B2	6.000	EN_GSN - Izvanredno/22	Stup - HEA550	-5.30	6.91	4.67	0.00	-17.61	1.57
B1	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup - HEA550	-62.58	406.66	-339.25	0.00	0.00	0.00
B2	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup - HEA550	-62.54	406.65	339.23	0.00	0.00	0.00
B10	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/12	Stup - HEA550	-56.91	4.60	40.53	-1.21	235.17	0.13
B42	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/12	Stup - HEA550	-56.91	-4.60	40.53	1.21	235.17	-0.13
B21	6.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup - HEA550	-84.01	-4.34	-63.21	-0.41	-379.95	-0.62
B18	6.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup - HEA550	-83.97	-4.33	63.21	0.42	379.97	-0.62
B49	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/16	Stup - HEA550	-51.43	-406.99	-332.09	0.00	-66.42	-81.40
B1	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/16	Stup - HEA550	-51.43	406.99	-332.09	0.00	-66.42	81.40
B11	0.100-	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-113.33	0.67	11.82	0.46	91.66	3.14
B4	0.000	EN_GSN -	Greda5 - I + I var	90.20	1.97	-14.63	3.26	69.99	3.22

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
		Izvanredno/4	(HEA500; 2.5000e+02)						
B4	14.900 +	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-13.36	-10.46	-11.73	-0.80	-5.06	1.53
B47	14.900 +	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-13.36	10.46	-11.73	0.80	-5.06	-1.53
B19	15.085	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-69.71	0.18	-77.18	-0.08	-356.84	0.20
B20	0.000	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-69.72	-0.06	77.22	0.15	-356.77	0.21
B47	0.000	EN_GSN - Izvanredno/14	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	70.32	-2.44	-12.44	-5.93	58.56	4.88
B4	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	70.32	2.44	-12.44	5.93	58.56	-4.88
B19	15.085	EN_GSN - Izvanredno/4	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-71.76	4.33	-76.79	0.03	-369.42	0.35
B20	14.900 -	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-61.58	-2.03	-0.02	0.00	156.35	-3.17
B47	0.100+	EN_GSN - Izvanredno/22	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	25.04	3.76	-10.75	0.00	44.01	-9.63
B4	0.100+	EN_GSN - Izvanredno/22	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	25.04	-3.76	-10.75	0.00	44.01	9.63
B51	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup1 - HEA200	-76.93	238.04	-1.88	0.00	0.00	0.00
B50	6.533	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	27.08	-0.49	2.18	0.01	-5.32	-3.13
B54	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-5.19	-77.46	-7.41	0.00	0.00	0.00
B55	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-5.19	-77.46	7.41	0.00	0.00	0.00
B51	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-45.55	-0.14	3.94	-0.02	-12.33	-2.43
B58	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-45.55	-0.14	-3.94	0.02	12.33	-2.43
B51	7.067	EN_GSN - Izvanredno/3	Stup1 - HEA200	-45.62	-0.50	-6.98	0.00	-15.71	-2.58
B58	7.067	EN_GSN - Izvanredno/14	Stup1 - HEA200	-45.62	-0.50	6.98	0.00	15.71	-2.58
B53	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/11	Stup1 - HEA200	-71.94	-238.29	-3.82	0.00	-0.76	-47.66
B51	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/14	Stup1 - HEA200	-71.98	238.29	-3.82	0.00	-0.76	47.66

Tablica 12. Maksimalne rezne sile po presjecima– dvozgladni okvir PX zaštita



Slika 50. Rezne sile – uzdužna sila N



Slika 51. Rezne sile – Moment

7.2.1.4 Dimenzioniranje stupa i grede prema HRN EN 1993-1-2

EN 1993-1-2 PROVJERA OTPORNOSTI NA POŽAR - STUP

Element B49 0.200 / 6.000 m HEA550

Kombinacija

EN_GSN - Izvanredno / LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9

Parcijalni koeficijenti sigurnosti

γ_{M0} za otpor poprečnog presjeka	1.00
γ_{M1} za otpornost na stabilnost	1.00
γ_{M2} za otpornost neto površine	1.25
$\gamma_{M,fi}$ za otpornost na požar	1.00

Materijal

Granica popuštanja f_y	275.0	MPa
Vlačna čvrstoća f_u	430.0	MPa
Proizvodnja	Rolanjem	

Otpornost na požar

Provjera na otpornost prema EN 1993-1-2, 4.2.3

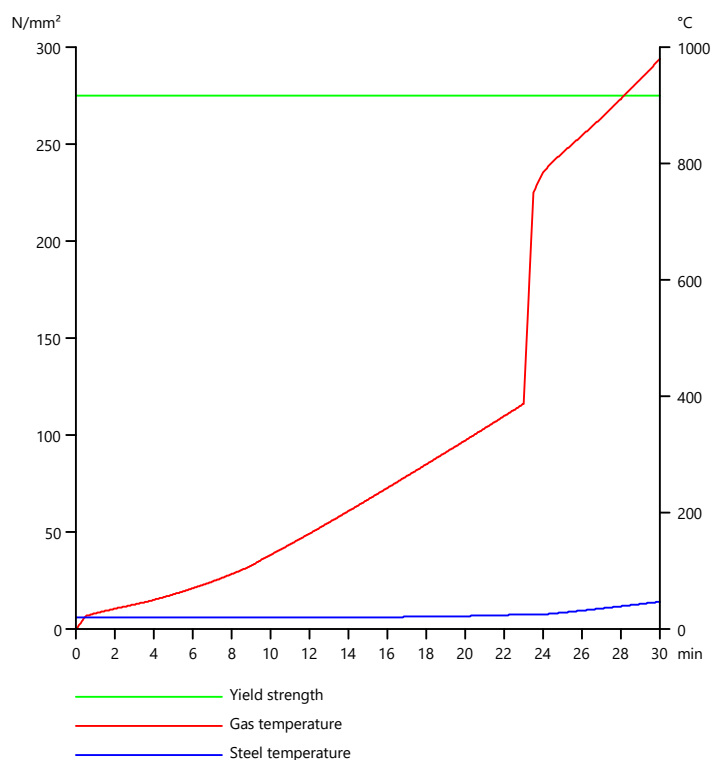
Otpornost na požar

Krivulja temperatura-vrijeme	Zasebno def.	
Koeficijent toplinske provodljivost konvekcijom α_c	25.00	W/m ² K
Zračenje požara u sektoru ϵ_f	1.00	
Zračenje površine konstrukcijskog elementa ϵ_m	0.70	
Konfiguracijski koeficijent za tok topline putem radijacije ϕ	1.00	
Tražena otpornost na požar R	30.00	min
Temperatura plina θ_g	980.54	°C
Temperatura materijala $\theta_{a,t}$	47.58	°C
Izloženost grede	3 strane	
Pokrivena ploha	Gornja ploha	
Faktor prilagodbe za poprečni presjek κ_1	0.85	
Faktor prilagodbe za gredu κ_2	1.00	
Redukcijski faktor za dokaz 0.2% čvrstoće $k_{0.2p,\theta}$	1.00	
Koeficijent redukcije za E modul $k_{E,\theta}$	1.00	

Svojstva izolacije

Ime	Zaštita pločama	
Oblik zaštite	Kutijasti oblik	
Vrsta izolacije	Ploče	
Debljina d_p	2.5000e+01	mm
Gustoća ρ_p	835.0	kg/m ³
Toplinska provodljivost λ_p	1.8900e-01	W/mK
Specifični toplinski kapacitet c_p	1.7000e+00	J/gK
Faktor profila za zaštićene elemente A_p/V	6.5094e+01	1/m

Provjera prikazana u nastavku je izvršena za zahtijevano vrijeme $t = 30.00$ min.

Slika 56. Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t

...:PROVJERA PRESJEKA:...:

Kritični presjek je na 0.200 m

Rezne sile

$N_{fi,Ed}$	-62.26	kN
$V_{y,fi,Ed}$	-406.66	kN
$V_{z,fi,Ed}$	-339.25	kN
$T_{fi,Ed}$	0.00	kNm
$M_{y,fi,Ed}$	-67.85	kNm
$M_{z,fi,Ed}$	-81.33	kNm

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1675e+02	24	4.357e+04	1.313e+05	0.3	0.5	1.0	4.9	7.1	7.9	11.8	1
3	SO	1.1675e+02	24	-6.419e+03	-9.419e+04								
4	I	4.3800e+02	12.5	1.621e+04	-1.033e+04	-0.6		0.5	35.0	53.9	62.1	71.8	1
5	SO	1.1675e+02	24	-3.769e+04	-1.255e+05								
7	SO	1.1675e+02	24	1.230e+04	1.001e+05	0.1	0.5	1.0	4.9	7.1	7.9	12.2	1

Poprečni presjek je klase 1

Provjera na tlak

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 2.1200 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00} = 5830.00 [kN] \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{|-62.26 [kN]|}{5830.00 [kN]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

Provjera na moment savijanja M_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4.6250 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 275.0 [MPa]}{1.00} = 1271.88 [kNm] \quad (EC3-1-1: 6.13)$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 1271.88 [kNm] \times \frac{1.00}{1.00} = 1271.88 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.8)$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{1271.88 [kNm]}{0.85 \times 1.00} = 1496.32 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.10)$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{-67.85 [kNm]}{1496.32 [kNm]} = 0.05 \leq 1.00 \quad (EC3-1-1: 6.12)$$

Provjera na moment savijanja M_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.1083 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 275.0 [MPa]}{1.00} = 304.79 [kNm] \quad (EC3-1-1: 6.13)$$

$$M_{z,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 304.79 [kNm] \times \frac{1.00}{1.00} = 304.79 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.8)$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{304.79 [kNm]}{0.85 \times 1.00} = 358.58 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.10)$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,t,Rd}} = \frac{-81.33 [kNm]}{358.58 [kNm]} = 0.23 \leq 1.00 \quad (EC3-1-1: 6.12)$$

Provjera na posmik V_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.4894 \cdot 10^{-2} [m^2] \times \frac{275.0 [MPa]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2364.70 [kN] \quad (EC3-1-1: 6.18)$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 2364.70 [kN] \times \frac{1.00}{1.00} = 2364.70 [kN] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{y,Ed}|}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{|-406.66 [kN]|}{2364.70 [kN]} = 0.17 \leq 1.00 \quad (EC3-1-2: 4.16)$$

Provjera na posmik V_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{8.3960 \cdot 10^{-3} [m^2] \times \frac{275.0 [MPa]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1333.04 [kN] \quad (EC3-1-1: 6.18)$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 1333.04 [kN] \times \frac{1.00}{1.00} = 1333.04 [kN] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{z,Ed}|}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{|-339.25[\text{kN}]|}{1333.04[\text{kN}]} = 0.25 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Interakcija savijanja, uzdužne i posmične sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.9.1 i formuli (6.41)

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{1271.88[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 1496.32[\text{kNm}]$$

$$\alpha = 2.00$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{304.79[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 358.58[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.35})$$

$$\beta = 1.00$$

$$\left(\frac{|M_{y,Ed}|}{M_{y,fi,t,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{|M_{z,Ed}|}{M_{z,fi,t,Rd}}\right)^\beta = \left(\frac{|-67.85[\text{kNm}]|}{1496.32[\text{kNm}]}\right)^{2.00} + \left(\frac{|-81.33[\text{kNm}]|}{358.58[\text{kNm}]}\right)^{1.00} = 0.23 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.9})$$

Napomena: Pošto je posmična sila manja od polovične vrijednosti iznosa plastične posmične otpornosti njezin utjecaj na moment otpornosti je zanemaren.

Napomena: Pošto uzdužna sila zadovoljava oba kriterija (6.33) i (6.34) iz EN 1993-1-1, 6.2.9.1(4) njezin utjecaj na moment otpora oko y-y osi je zanemarena.

Napomena: Pošto uzdužna sila zadovoljava kriterij (6.35) iz EN 1993-1-1, 6.2.9.1(4) njezin utjecaj na moment otpora oko z-z osi je zanemaren.

Element zadovoljava PROVJERU PRESJEKA.

....:PROVJERA STABILNOSTI:....**Klasifikacija za provjeru elementa na izvijanje**

Položaj kritičnog presjeka na provjeru stabilnosti: 0.000 m

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1
3	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1
4	I	4.3800e+02	12.5	2.955e+03	2.955e+03	1.0		1.0	35.0	25.9	29.9	33.0	4
5	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1
7	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1

Poprečni presjek je klase 4

Efektivni presjek N-**Izračun efektivne širine**

Prema EN 1993-1-5, 4.4

Id	Tip	b_p [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
3	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
4	I	4.3800e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	4.0	0.7	1.0	4.3800e+02	219	219
5	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		

Id	Tip	b_p [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
7	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		

Efektivni presjek My-
Izračun efektivne širine
 Prema EN 1993-1-5, 4.4

Id	Tip	b_p [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
3	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
4	I	4.3800e+02	2.334e+05	-2.334e+05	-1.0	23.9	0.3	1.0	2.1900e+02	87.6	1.3140e+02
5	SO	1.1675e+02	-2.750e+05	-2.750e+05							
7	SO	1.1675e+02	-2.750e+05	-2.750e+05							

Efektivni presjek Mz-
Izračun efektivne širine
 Prema EN 1993-1-5, 4.4

Id	Tip	b_p [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	1.1675e+02	2.750e+05	6.096e+04	0.2	0.5	0.3	1.0	1.1675e+02		
3	SO	1.1675e+02	-6.096e+04	-2.750e+05							
4	I	4.3800e+02	0.000e+00	0.000e+00							
5	SO	1.1675e+02	-6.096e+04	-2.750e+05							
7	SO	1.1675e+02	2.750e+05	6.096e+04	0.2	0.5	0.3	1.0	1.1675e+02		

Efektivni presjek

Efektivna površina A_{eff} 2.1179e-02 m²
 Efektivni moment inercije $I_{\text{eff},y}$ 1.1195e-03 m⁴ $I_{\text{eff},z}$ 1.0819e-04 m⁴
 Efektivni moment otpora $W_{\text{eff},y}$ 4.1462e-03 m³ $W_{\text{eff},z}$ 7.2128e-04 m³
 Pomak težišta $e_{N,y}$ 0.0000e+00 mm $e_{N,z}$ 0.0000e+00 mm

Provjera elementa na izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 & Annex E i formuli (4.5)

$$N_{\text{cr},y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{\text{cr},y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.1200 \cdot 10^{-3}[\text{m}^4]}{0.200[\text{m}]^2} = 58069456.29[\text{kN}]$$

$$N_{\text{cr},z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{\text{cr},z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.0800 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.200[\text{m}]^2} = 5603937.75[\text{kN}]$$

$$\lambda_y = \frac{l_{\text{cr},y}}{i_y} = \frac{0.200[\text{m}]}{2.2985 \cdot 10^2[\text{mm}]} = 0.87$$

$$\lambda_z = \frac{l_{\text{cr},z}}{i_z} = \frac{0.200[\text{m}]}{7.1375 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 2.80$$

$$\lambda_{\text{rel},y} = \frac{\lambda_y \times \sqrt{\frac{A_{\text{eff}}}{A}}}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{0.87 \times \sqrt{\frac{2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2]}{2.1200 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2]}}}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.01$$

$$\lambda_{\text{rel},z} = \frac{\lambda_z \times \sqrt{\frac{A_{\text{eff}}}{A}}}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{2.80 \times \sqrt{\frac{2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2]}{2.1200 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2]}}}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.03$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.01 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.01 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.03 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.03 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\varphi_y = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.01 - 0.00) + 0.01^2] = 0.50$$

$$\varphi_z = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.03 - 0.00) + 0.03^2] = 0.51$$

$$\chi_{y,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,y}}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.50 + \sqrt{0.50^2 - 0.01^2}}, \frac{1}{0.01}, 1 \right) = \min(0.99, 9970.48, 1) = 0.99 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$\chi_{z,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,z}}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.03^2}}, \frac{1}{0.03}, 1 \right) = \min(0.98, 962.19, 1) = 0.98 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.99 \times 2.1179 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 5789.30 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 5713.35 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \min(N_{b,y,fi,t,Rd}, N_{b,z,fi,t,Rd}) = \min(5789.30 [\text{kN}], 5713.35 [\text{kN}]) = 5713.35 [\text{kN}]$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-62.26 [\text{kN}]|}{5713.35 [\text{kN}]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera elementa na torzijsko savijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 & Annex E i formuli (4.5)

Napomena: Za ovaj I-presjek otpornost na torzijsko savijanje je veće od otpornosti izvijanja. Zato se rezultat provjere ovdje ne prikazuje.

Provjera na bočno torzijsko izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.4 & Annex E i formuli (4.19)

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{I_{cr}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right] = 1.15$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.0800 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]}{6.000 [\text{m}]^2}$$

$$\times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \times \frac{7.1889 \cdot 10^{-6} [\text{m}^6]}{1.0800 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + \frac{6.000 [\text{m}]^2 \times 80769.2 [\text{MPa}] \times 3.5200 \cdot 10^{-6} [\text{m}^4]}{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.0800 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + (0.20 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times -3.0981 \cdot 10^{-13} [\text{mm}])^2} - (0.20 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times -3.0981 \cdot 10^{-13} [\text{mm}]) \right] = 2386.41 [\text{kNm}]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4.1462 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3] \times 275.0 [\text{MPa}]}{2386.41 [\text{kNm}]} = 0.69$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.69 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.69$$

$$\alpha_{LT} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{f_y}} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{275.0[\text{MPa}]}} = 0.60$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.95 + \sqrt{0.95^2 - 0.69^2}}, \frac{1}{0.69^2}, 1 \right) = \min(0.63, 2.09, 1) = 0.63 \quad (\text{EC3-1-1: 6.57})$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{eff,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.63 \times 4.1462 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 715.66[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.55})$$

$$\frac{|M_{y,total,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-67.85[\text{kNm}]|}{715.66[\text{kNm}]} = 0.09 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.54})$$

Napomena: C parametri su određeni prema ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Provjera na interakciju savijanja i uzdužne tlačne sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.5 & Annex E i formuli (4.21c),(4.21d)

$$\chi_{min,fi} = \min(\chi_y, \chi_z) = \min(0.99, 0.98) = 0.98$$

$$\chi_{z,fi} = \min(\chi_{z,fi}, \chi) = \min(0.98, 1.00) = 0.98$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.95 + \sqrt{0.95^2 - 0.69^2}}, \frac{1}{0.69^2}, 1 \right) = \min(0.63, 2.09, 1) = 0.63$$

$$\beta_{M,y} = 1.8 - 0.7 \times \psi_y = 1.8 - 0.7 \times 0.00 = 1.80$$

$$\mu_y = \min[(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min(\lambda_{rel,\theta,y}, 1.1) + 0.44 \times \beta_{M,y} + 0.29, 0.8] = \min[(2 \times 1.80 - 5) \times \min(0.01, 1.1) + 0.44 \times 1.80 + 0.29, 0.8] = \min[1.07, 0.8] = 0.80$$

$$k_y = \min \left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.80 \times 62.26[\text{kN}]}{0.99 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3 \right) = \min(0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,z} = 1.8 - 0.7 \times \psi_z = 1.8 - 0.7 \times 0.00 = 1.80$$

$$\mu_z = \min[(1.2 \times \beta_{M,z} - 3) \times \lambda_{rel,\theta,z} + 0.71 \times \beta_{M,z} - 0.29, 0.8] = \min[(1.2 \times 1.80 - 3) \times 0.03 + 0.71 \times 1.80 - 0.29, 0.8] = \min[0.96, 0.8] = 0.80$$

$$k_z = \min \left(1 - \frac{\mu_z \times N_{Ed}}{\chi_z \times A_{eff} \times k_{z,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.80 \times 62.26[\text{kN}]}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3 \right) = \min(0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,LT} = 1.40$$

$$\mu_{LT} = \min(0.15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0.15, 0.9) = \min(0.15 \times 0.03 \times 1.40 - 0.15, 0.9) = \min(-0.14, 0.9) = -0.14$$

$$k_{LT} = \min \left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1 \right) = \min \left(1 - \frac{-0.14 \times 62.26[\text{kN}]}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 1 \right) = \min(1.00, 1) = 1.00$$

(EC3-1-2: 4.21c)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21c)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{min,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_y \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{eff,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{eff,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{|62.26[\text{kN}]| \times 1.00}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-67.85[\text{kNm}]| \times 1.00}{4.1462 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-81.33[\text{kNm}]| \times 1.00}{7.2128 \cdot 10^{-4}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.48 \leq 1.00} \end{aligned}$$

(EC3-1-2: 4.21d)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21d)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{eff,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{eff,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{|62.26[\text{kN}]| \times 1.00}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-67.85[\text{kNm}]| \times 1.00}{0.63 \times 4.1462 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-81.33[\text{kNm}]| \times 1.00}{7.2128 \cdot 10^{-4}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.51 \leq 1.00} \end{aligned}$$

Provjera na posmično izbočavanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-5, 5 & 7.1 i formuli (5.10) & (7.1)

$$h_w/t = \frac{h_w}{t} = \frac{4.9200 \cdot 10^2[\text{mm}]}{1.2500 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 39.36$$

$$\text{limit } h_w/t = \frac{72 \times \varepsilon}{\eta} = \frac{72 \times 0.79}{1.20} = 47.15$$

Napomena: Vitkost ploče je takva da se efekti posmičnog izbočavanja mogu zanemariti

Prema EN 1993-1-5, 5.1(2).

Element zadovoljava PROVJERU STABILNOSTI.

EN 1993-1-2 PROVJERA OTPORNOSTI NA POŽAR - GREDA**Element B19 15.085 / 15.085 m I + I var (HEA500; 2.5000e+02)****Kombinacija**

EN_GSN - Izvanredno / LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7

Parcijalni koeficijenti sigurnosti

γ_{M0} za otpor poprečnog presjeka	1.00
γ_{M1} za otpornost na stabilnost	1.00
γ_{M2} za otpornost neto površine	1.25
$\gamma_{M,fi}$ za otpornost na požar	1.00

Materijal

Granica	275.0	MPa
popuštanja f_y		
Vlačna čvrstoća f_u	430.0	MPa
Proizvodnja	Zavareno	

Otpornost na požar

Provjera na otpornost prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Otpornost na požar

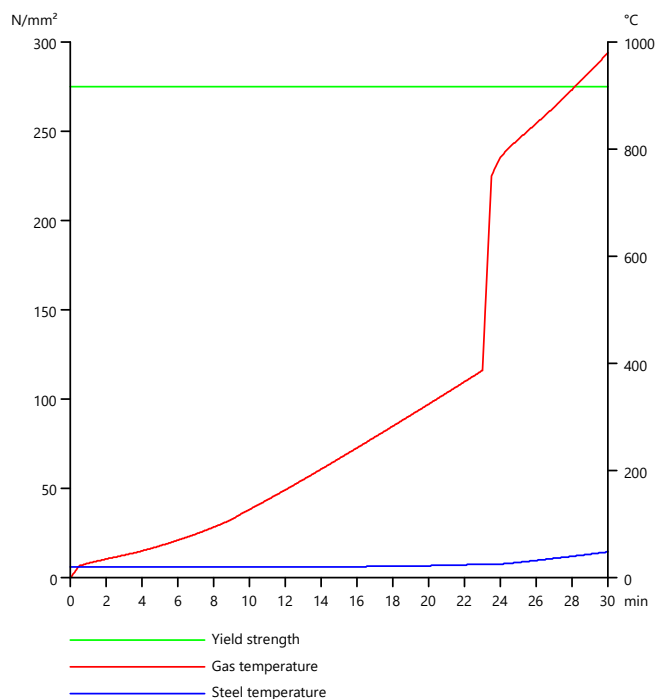
Krivulja temperatura-vrijeme	Zasebno def.	
Koeficijent toplinske provodljivost konvekcijom α_c	25.00	W/m ² K
Zračenje požara u sektoru ϵ_f	1.00	
Zračenje površine konstrukcijskog elementa ϵ_m	0.70	
Konfiguracijski koeficijent za tok topline putem radijacije φ	1.00	
Tražena otpornost na požar R	30.00	min
Temperatura plina θ_g	980.54	°C
Temperatura materijala $\theta_{a,t}$	48.78	°C
Izloženost grede	Sve strane	
Faktor prilagodbe za poprečni presjek κ_1	0.85	
Faktor prilagodbe za gredu κ_2	1.00	
Koeficijent redukcije za granicu popuštanja $k_{\epsilon,\theta}$	1.00	
Koeficijent redukcije za E modul $k_{E,\theta}$	1.00	

Napomena: izloženost na tri strane nije podržana za ovaj poprečni presjek

Svojstva izolacije

Ime	Zaštita pločama	
Oblik zaštite	Kutijasti oblik	
Vrsta izolacije	Ploče	
Debljina d_p	2.5000e+01	mm
Gustoća ρ_p	835.0	kg/m ³
Toplinska provodljivost λ_p	1.8900e-01	W/mK
Specifični toplinski kapacitet c_p	1.7000e+00	J/gK
Faktor profila za zaštićene elemente A_p/V	7.0015e+01	1/m

Provjera prikazana u nastavku je izvršena za zahtijevano vrijeme $t = 30.00$ min.



Slika 57. Temperature plina i temperature čelika u gredi u vremenu t

....:PROVJERA PRESJEKA:....

Kritični presjek je na 15.085 m

Rezne sile

$N_{fi,Ed}$	-71.76	kN
$V_{y,fi,Ed}$	4.33	kN
$V_{z,fi,Ed}$	-76.79	kN
$T_{fi,Ed}$	0.03	kNm
$M_{y,fi,Ed}$	-369.42	kNm
$M_{z,fi,Ed}$	0.35	kNm

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1700e+02	23	1.606e+04	1.580e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.9	1
3	SO	1.1700e+02	23	1.621e+04	1.648e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.8	1
4	I	3.9000e+02	12	9.799e+03	-5.441e+04	-5.6		0.2	32.5	185.4	213.7	752.3	1
5	SO	1.1700e+02	23	-6.068e+04	-6.041e+04								
7	SO	1.1700e+02	23	-6.083e+04	-6.109e+04								
8	I	2.0000e+02	12	5.096e+04	1.803e+04	0.4		1.0	16.7	25.9	29.9	41.9	1
9	SO	1.1700e+02	23	5.723e+04	5.696e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.9	1
11	SO	1.1700e+02	23	5.738e+04	5.764e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.8	1

Poprečni presjek je klase 1

Svojstva presjeka

A	2.9708e-02 m ²		
A_y/A	0.67	A_z/A	0.32
I_y	2.2447e-03 m ⁴	I_z	1.5551e-04 m ⁴
I_{yz}	2.1684e-19 m ⁴	I_t	4.0631e-06 m ⁴
I_w	1.3708e-05 m ⁶		
$W_{el,y}$	5.6803e-03 m ³	$W_{el,z}$	1.0367e-03 m ³
$W_{pl,y}$	6.7873e-03 m ³	$W_{pl,z}$	1.5882e-03 m ³
c_y	1.5000e+02 mm	c_z	3.4483e+02 mm
d_y	6.1674e-14 mm	d_z	1.0619e+01 mm

Provjera na tlak

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 2.9708 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00} = 8169.72 [kN] \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{|-71.76 [kN]|}{8169.72 [kN]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

Provjera na moment savijanja M_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6.7873 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 275.0 [MPa]}{1.00} = 1866.52 [kNm] \quad (EC3-1-1: 6.13)$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 1866.52 [kNm] \times \frac{1.00}{1.00} = 1866.52 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.8)$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{1866.52[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 2195.90[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.10})$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{-369.42[\text{kNm}]}{2195.90[\text{kNm}]} = \mathbf{0.17} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Provjera na moment savijanja M_x

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.5882 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 436.76[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.13})$$

$$M_{z,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 436.76[\text{kNm}] \times \frac{1.00}{1.00} = 436.76[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.8})$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{436.76[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 513.84[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.10})$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,t,Rd}} = \frac{0.35[\text{kNm}]}{513.84[\text{kNm}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Provjera na posmik V_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$\tau_{Vy,fi,Ed} = |V_{y,Ed}| \times \tau_{Vy,Ed,unit} = |4333.02| \times 7.246 \cdot 10^{-2}[\text{kN/m}^2] = 0.3[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{Vy,fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{0.3[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na posmik V_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$\tau_{Vz,fi,Ed} = |V_{z,Ed}| \times \tau_{Vz,Ed,unit} = |-76790.67| \times 1.336 \cdot 10^{-1}[\text{kN/m}^2] = 10.3[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{Vz,fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{10.3[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.06} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na torziju

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.7 i formuli (6.23)

$$\tau_{fi,Ed} = |T_{Ed}| \times \tau_{Ed,unit} = |28.10| \times 5.661[\text{kN/m}^2] = 0.2[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{0.2[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.23})$$

Napomena: Provjera na torziju je manja od granične vrijednosti od 0.05. Zato se utjecaj torzije smatra malenim te se zanemaruje u interakcijskim provjerama.

Interakcija savijanja, uzdužne i posmične sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.1(5) i formuli (6.1)

$$\sigma_{N,fi,Ed} = \frac{-N_{Ed}}{A} = \frac{-71.76[\text{kN}]}{2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2]} = 2.4[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{M_y,fi,Ed} = \frac{M_{y,Ed} \times z}{I_y} = \frac{-369.42[\text{kNm}] \times 3.9517 \cdot 10^2[\text{mm}]}{2.2447 \cdot 10^{-3}[\text{m}^4]} = -65.0[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{M_z,fi,Ed} = \frac{M_{z,Ed} \times y}{I_z} = \frac{0.35[\text{kNm}] \times -1.5000 \cdot 10^2[\text{mm}]}{1.5551 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]} = -0.3[\text{MPa}]$$

$$\bar{\sigma}_{tot,fi,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{M_y,Ed} + \sigma_{M_z,Ed} + \sigma_{w,Ed} = 2.4[\text{MPa}] + -65.0[\text{MPa}] + -0.3[\text{MPa}] + 0.0[\text{MPa}] = -63.0[\text{MPa}]$$

$$\tau_{V_y,fi,Ed} = |V_{y,Ed} \times \tau_{V_y,Ed,unit}| = |4333.02 \times 0.000[\text{kN/m}^2]| = 0.0[\text{MPa}]$$

$$\tau_{V_z,fi,Ed} = |V_{z,Ed} \times \tau_{V_z,Ed,unit}| = |-76790.67 \times 3.553 \cdot 10^{-17}[\text{kN/m}^2]| = 0.0[\text{MPa}]$$

$$\tau_{t,fi,Ed} = |M_{xp,Ed} \times \tau_{t,Ed,unit}| = |28.10 \times 5.661[\text{kN/m}^2]| = 0.2[\text{MPa}]$$

$$\bar{\tau}_{tot,fi,Ed} = \tau_{V_z,Ed} + \tau_{V_y,Ed} + \tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed} = 0.0[\text{MPa}] + 0.0[\text{MPa}] + 0.2[\text{MPa}] + 0.0[\text{MPa}] = 0.2[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{von\ Mises,fi,Ed} = \sqrt{\sigma_{tot,Ed}^2 + 3 \times \tau_{tot,Ed}^2} = \sqrt{-63.0[\text{MPa}]^2 + 3 \times 0.2[\text{MPa}]^2} = 63.0[\text{MPa}]$$

$$\frac{\sigma_{von\ Mises,fi,Ed} \times \gamma_{M,fi}}{f_y \times k_{y,\theta}} = \frac{63.0[\text{MPa}] \times 1.00}{275.0[\text{MPa}] \times 1.00} = \mathbf{0.23} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.1})$$

Napomena: Za ovaj presjek plastična posmična otpornost i pripadajuća Rho vrijednost se ne mogu odrediti. Zbog toga se elastična granica popuštanja prema EN 1993-1-1, 6.2.1(5) provjerava.

Element zadovoljava PROVJERU PRESJEKA.

....:PROVJERA STABILNOSTI:....

Klasifikacija za provjeru elementa na izvijanje

Napomena: Za ovaj presjek klasifikacija iz provjere poprečnog presjeka je također korištena za provjeru elementa na savijanje.

=> Presjek je klasificiran kao klasa 1 za provjeru elementa na savijanje.

Provjera elementa na izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 2.2447 \cdot 10^{-3}[\text{m}^4]}{12.873[\text{m}]^2} = 28073.40[\text{kN}]$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.5551 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.184[\text{m}]^2} = 9475242.53[\text{kN}]$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{12.873[\text{m}]}{2.7488 \cdot 10^2[\text{mm}]} = 46.83$$

$$\lambda_z = \frac{l_{cr,z}}{i_z} = \frac{0.184[\text{m}]}{7.2351 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 2.55$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{46.83}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.54$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{2.55}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.03$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.54 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.54 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.03 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.03 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\varphi_y = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.54 - 0.00) + 0.54^2] = 0.81$$

$$\varphi_z = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.03 - 0.00) + 0.03^2] = 0.51$$

$$\chi_{y,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,y}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.81 + \sqrt{0.81^2 - 0.54^2}}, \frac{1}{0.54^2}, 1 \right) = \min(0.71, 3.44, 1) = 0.71 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$\chi_{z,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,z}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.03^2}}, \frac{1}{0.03^2}, 1 \right) = \min(0.98, 1159.80, 1) = 0.98 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.71 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 5800.09[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.98 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 8027.96[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \min(N_{b,y,fi,t,Rd}, N_{b,z,fi,t,Rd}) = \min(5800.09[\text{kN}], 8027.96[\text{kN}]) = 5800.09[\text{kN}]$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-71.76[\text{kN}]|}{5800.09[\text{kN}]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera elementa na torzijsko savijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \times \left(G \times I_t + \frac{\pi^2 \times E \times I_w}{l_{cr}^2} \right) = \frac{1}{2.8444 \cdot 10^2[\text{mm}^2]} \times \left(80769.2[\text{MPa}] \times 4.0631 \cdot 10^{-6}[\text{m}^4] + \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.3708 \cdot 10^{-5}[\text{m}^6]}{15.085[\text{m}]^2} \right) = 5599.53[\text{kN}]$$

$$N_{cr,TF} = 5599.52[\text{kN}]$$

$$\lambda_{rel,T} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 275.0[\text{MPa}]}{5599.52[\text{kN}]}} = 1.21$$

$$\lambda_{rel,\theta} = \lambda_{rel,T} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.21 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 1.21$$

$$\chi_{fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_{rel,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.59 + \sqrt{1.59^2 - 1.21^2}}, \frac{1}{1.21^2}, 1 \right) = \min(0.38, 0.69, 1) = 0.38$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.38 \times 2.9708 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 3106.30 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.47})$$

$$\text{Unity check} = \frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-71.76 [\text{kN}]|}{3106.30 [\text{kN}]} = 0.02 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera na bočno torzijsko izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.11)

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{iT}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k_w}{k_y} \right)^2 \times \frac{l_w}{l_z} + \frac{l_{iT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right] = 3.45$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.5551 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]}{15.085 [\text{m}]^2}$$

$$\times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \times \frac{1.3708 \cdot 10^{-5} [\text{m}^6]}{1.5551 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + \frac{15.085 [\text{m}]^2 \times 80769.2 [\text{MPa}] \times 4.0631 \cdot 10^{-6} [\text{m}^4]}{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.5551 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + (0.47 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times 4.6136 \cdot 10^1 [\text{mm}])^2} - (0.47 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times 4.6136 \cdot 10^1 [\text{mm}]) \right]$$

$$= 2996.42 [\text{kNm}]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{6.7873 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3] \times 275.0 [\text{MPa}]}{2996.42 [\text{kNm}]} = 0.79$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.79 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.79$$

$$\alpha_{LT} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{f_y}} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{275.0 [\text{MPa}]} = 0.60$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.05 + \sqrt{1.05^2 - 0.79^2}}, \frac{1}{0.79^2}, 1 \right) = \min(0.58, 1.61, 1) = 0.58 \quad (\text{EC3-1-1: 6.57})$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.58 \times 6.7873 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 1073.37 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.55})$$

$$\text{Unity check} = \frac{|M_{y,total,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-369.42 [\text{kNm}]|}{1073.37 [\text{kNm}]} = 0.34 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.54})$$

Napomena: C parametri su određeni prema ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Provjera na interakciju savijanja i uzdužne tlačne sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.5 i formuli (4.21a),(4.21b)

$$\chi_{min,fi} = \min(\chi_y, \chi_z) = \min(0.71, 0.38) = 0.38$$

$$\chi_{z,fi} = \min(\chi_{z,fi}, \chi) = \min(0.98, 0.38) = 0.38$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.05 + \sqrt{1.05^2 - 0.79^2}}, \frac{1}{0.79^2}, 1 \right) = \min(0.58, 1.61, 1) = 0.58$$

$$\beta_{M,y} = 1.8 - 0.7 \times \psi_y + \frac{M_{Q,y} \times [\beta_{M,Q} - (1.8 - 0.7 \times \psi_y)]}{\delta_y M_y} = 1.8 - 0.7 \times -0.37 + \frac{146.65 [\text{kNm}] \times [1.30 - (1.8 - 0.7 \times -0.37)]}{506.47 [\text{kNm}]} = 1.84$$

$$\mu_y = \min [(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min (\lambda_{rel,\theta,y}, 1.1) + 0.44 \times \beta_{M,y} + 0.29, 0.8] = \min [(2 \times 1.84 - 5) \times \min (0.54, 1.1) + 0.44 \times 1.84 + 0.29, 0.8] \\ = \min [0.39, 0.8] = 0.39$$

$$k_y = \min \left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.39 \times 71.76[\text{kN}]}{0.71 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3 \right) = \min (1.00, 3) = 1.00$$

$$\beta_{M,z} = 1.8 - 0.7 \times \psi_z = 1.8 - 0.7 \times -0.79 = 2.35$$

$$\mu_z = \min [(1.2 \times \beta_{M,z} - 3) \times \lambda_{rel,\theta,z} + 0.71 \times \beta_{M,z} - 0.29, 0.8] = \min [(1.2 \times 2.35 - 3) \times 0.03 + 0.71 \times 2.35 - 0.29, 0.8] = \min [1.37, 0.8] = 0.80$$

$$k_z = \min \left(1 - \frac{\mu_z \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.80 \times 71.76[\text{kN}]}{0.98 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3 \right) = \min (0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,LT} = 1.8 - 0.7 \times \psi_{LT} + \frac{M_{Q,LT} \times [\beta_{M,Q} - (1.8 - 0.7 \times \psi_{LT})]}{\delta, M_{LT}} = 1.8 - 0.7 \times -0.37 + \frac{146.65[\text{kNm}] \times [1.30 - (1.8 - 0.7 \times -0.37)]}{506.47[\text{kNm}]} = 1.84$$

$$\mu_{LT} = \min (0.15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0.15, 0.9) = \min (0.15 \times 0.03 \times 1.84 - 0.15, 0.9) = \min (-0.14, 0.9) = -0.14$$

$$k_{LT} = \min \left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1 \right) = \min \left(1 - \frac{-0.14 \times 71.76[\text{kN}]}{0.98 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 1 \right) = \min (1.00, 1) = 1.00$$

(EC3-1-2: 4.21a)

$$\text{Unity check (4.21a)} = \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{min,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_y \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ = \frac{71.76[\text{kN}] \times 1.00}{0.38 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-369.42[\text{kNm}]}{6.7873 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |0.35[\text{kNm}]}{1.5882 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ = 0.22 \leq 1.00$$

(EC3-1-2: 4.21b)

$$\text{Unity check (4.21b)} = \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ = \frac{71.76[\text{kN}] \times 1.00}{0.38 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-369.42[\text{kNm}]}{0.58 \times 6.7873 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |0.35[\text{kNm}]}{1.5882 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ = 0.37 \leq 1.00$$

Element zadovoljava PROVJERU STABILNOSTI.

7.2.2 Model s dvozglornim okvirom – GSN – osnovna kombinacija

Ime	Tip	Kombinacija
EN_GSN/1	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*Vjetar3
EN_GSN/2	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*Vjetar11
EN_GSN/3	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar6
EN_GSN/4	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar2
EN_GSN/5	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar10
EN_GSN/6	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar14
EN_GSN/7	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC6 + 1.50*Vjetar1
EN_GSN/8	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar1
EN_GSN/9	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar9
EN_GSN/10	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC5 + 1.50*Vjetar9
EN_GSN/11	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar14
EN_GSN/12	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar6
EN_GSN/13	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC6 + 0.90*Vjetar14
EN_GSN/14	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC6 + 0.90*Vjetar2
EN_GSN/15	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC 5+ 0.90*Vjetar10
EN_GSN/16	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*Vjetar5
EN_GSN/17	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*Vjetar13

Tablica 14. Mjerodavne kombinacije– dvozglorni okvir GSN

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B97	1.700	EN_GSN/6	Bocni sekundarci - IPE220	S 235	0.92
B40	0.000	EN_GSN/5	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	S 275	0.96
B141	7.711	EN_GSN/12	Hor dijagonala - RD20	S 235	0.91
B71	3.000-	EN_GSN/5	Podroznica - IPE220	S 235	0.92
B37	1.150-	EN_GSN/5	Stup - HEA550	S 275	0.89
B58	4.000+	EN_GSN/8	Stup1 - HEA200	S 275	0.86
B143	8.485	EN_GSN/17	Ver dijagonala - RD19	S 235	0.92

Tablica 15. Iskoristivost poprečnih presjeka– dvozglorni okvir GSN

7.2.3 Model s dvozglornim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar12
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar4
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar11
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar3

Tablica 16. Mjerodavne kombinacije– dvozglorni okvir P zaštita

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B48	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	S 275	0.58
B137	7.765	EN_GSN - Izvanredno/5	Hor dijagonala - RD48	S 275	0.91
B65	0.000	EN_GSN - Izvanredno/6	Podroznica - IPE220	S 235	0.95
B45	2.100-	EN_GSN - Izvanredno/5	Stup - HEB550	S 275	0.89
B58	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup1 - HEB200	S 275	3.69
B144	8.485	EN_GSN - Izvanredno/6	Ver dijagonala - RD45	S 275	0.99

Tablica 17. Iskoristivost poprečnih presjeka– dvozglojni okvir P zaštita

7.2.4 Model s dvozglobnim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija bez temperaturnog djelovanja

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/17	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/18	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar14

Tablica 18. Mjerodavne kombinacije– dvozglojni okvir P zaštita, bez temp. istezanja

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B36	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	S 275	0.37
B138	0.000	EN_GSN - Izvanredno/7	Hor dijagonala - RD20	S 235	0.27
B64	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Podroznica - IPE220	S 235	0.40
B41	6.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup - HEA550	S 275	0.48
B58	7.067	EN_GSN - Izvanredno/7	Stup1 - HEA200	S 275	0.35
B145	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Ver dijagonala - RD19	S 235	0.08

Tablica 19. Iskoristivost poprečnih presjeka– dvozglojni okvir P zaštita, bez temp. istezanja

7.3 Prikaz rezultata dimenzioniranja za model s upetim okvirom

7.3.1 Model s upetim okvirom zaštićen PX protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija

7.3.1.1 Kombinacije

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar4
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar3
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar12
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar11
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar11
EN_GSN - Izvanredno/17	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/18	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/19	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar9

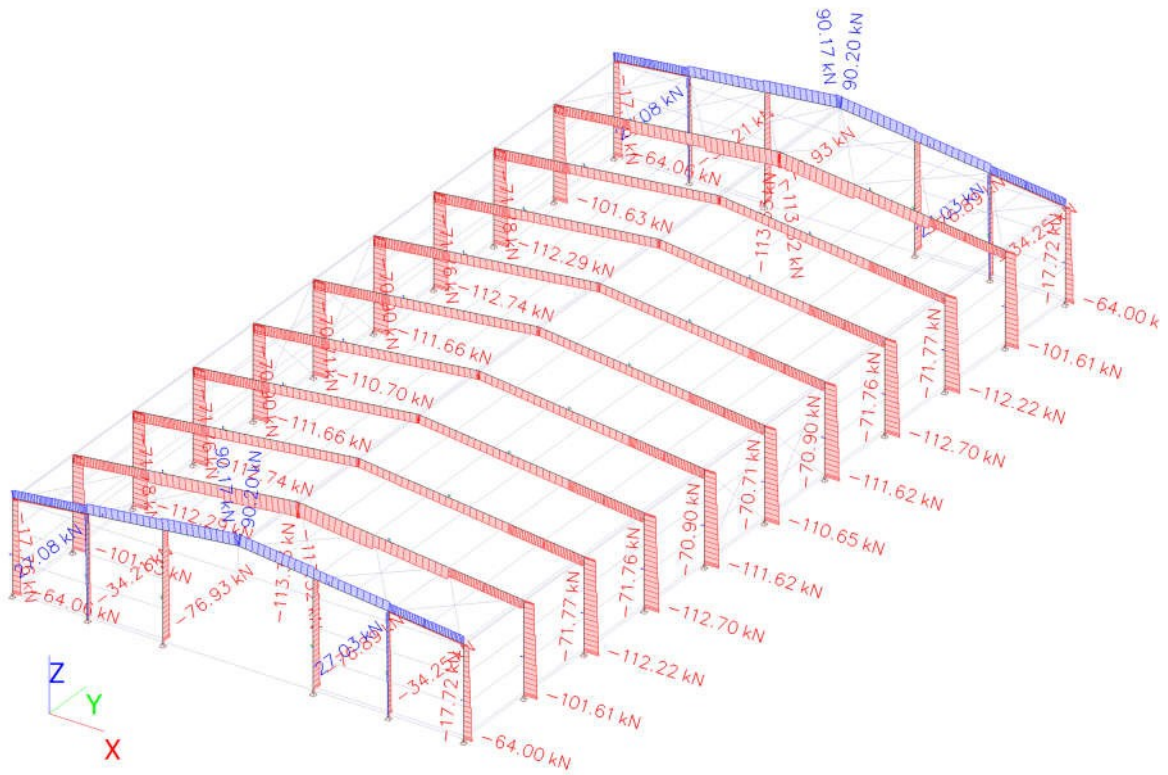
Tablica 20. Mjerodavne kombinacije – upeti okvir PX zaštitna

7.3.1.2 Rezne sile za stup i gredu

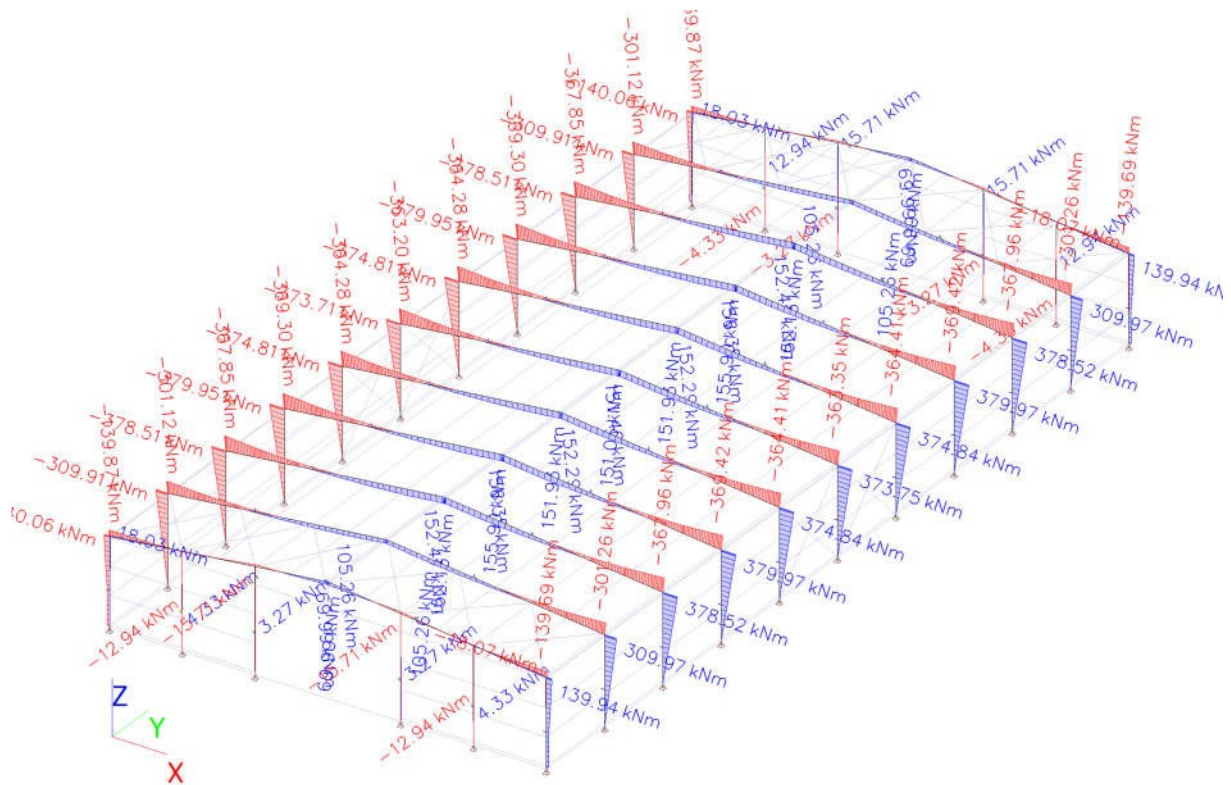
Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
B21	0.000	EN_GSN - Izvanredno/7	Stup - HEA550	-112.74	-0.19	-61.19	0.00	0.00	0.00
B2	6.000	EN_GSN - Izvanredno/22	Stup - HEA550	-5.30	6.91	4.67	0.00	-17.61	1.57
B1	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup - HEA550	-62.58	406.66	-339.25	0.00	0.00	0.00
B2	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup - HEA550	-62.54	406.65	339.23	0.00	0.00	0.00
B10	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/12	Stup - HEA550	-56.91	4.60	40.53	-1.21	235.17	0.13
B42	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/12	Stup - HEA550	-56.91	-4.60	40.53	1.21	235.17	-0.13
B21	6.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup - HEA550	-84.01	-4.34	-63.21	-0.41	-379.95	-0.62
B18	6.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup - HEA550	-83.97	-4.33	63.21	0.42	379.97	-0.62
B49	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/16	Stup - HEA550	-51.43	-406.99	-332.09	0.00	-66.42	-81.40
B1	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/16	Stup - HEA550	-51.43	406.99	-332.09	0.00	-66.42	81.40
B11	0.100-	EN_GSN -	Greda5 - I + I	-113.33	0.67	11.82	0.46	91.66	3.14

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
		Izvanredno/7	var (HEA500; 2.5000e+02)						
B4	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	90.20	1.97	-14.63	3.26	69.99	3.22
B4	14.900+	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-13.36	-10.46	-11.73	-0.80	-5.06	1.53
B47	14.900+	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-13.36	10.46	-11.73	0.80	-5.06	-1.53
B19	15.085	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-69.71	0.18	-77.18	-0.08	-356.84	0.20
B20	0.000	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-69.72	-0.06	77.22	0.15	-356.77	0.21
B47	0.000	EN_GSN - Izvanredno/14	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	70.32	-2.44	-12.44	-5.93	58.56	4.88
B4	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	70.32	2.44	-12.44	5.93	58.56	-4.88
B19	15.085	EN_GSN - Izvanredno/4	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-71.76	4.33	-76.79	0.03	-369.42	0.35
B20	14.900-	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	-61.58	-2.03	-0.02	0.00	156.35	-3.17
B47	0.100+	EN_GSN - Izvanredno/22	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	25.04	3.76	-10.75	0.00	44.01	-9.63
B4	0.100+	EN_GSN - Izvanredno/22	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	25.04	-3.76	-10.75	0.00	44.01	9.63
B51	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup1 - HEA200	-76.93	238.04	-1.88	0.00	0.00	0.00
B50	6.533	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	27.08	-0.49	2.18	0.01	-5.32	-3.13
B54	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-5.19	-77.46	-7.41	0.00	0.00	0.00
B55	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-5.19	-77.46	7.41	0.00	0.00	0.00
B51	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-45.55	-0.14	3.94	-0.02	-12.33	-2.43
B58	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA200	-45.55	-0.14	-3.94	0.02	12.33	-2.43
B51	7.067	EN_GSN - Izvanredno/3	Stup1 - HEA200	-45.62	-0.50	-6.98	0.00	-15.71	-2.58
B58	7.067	EN_GSN - Izvanredno/14	Stup1 - HEA200	-45.62	-0.50	6.98	0.00	15.71	-2.58
B53	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/11	Stup1 - HEA200	-71.94	-238.29	-3.82	0.00	-0.76	-47.66
B51	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/14	Stup1 - HEA200	-71.98	238.29	-3.82	0.00	-0.76	47.66

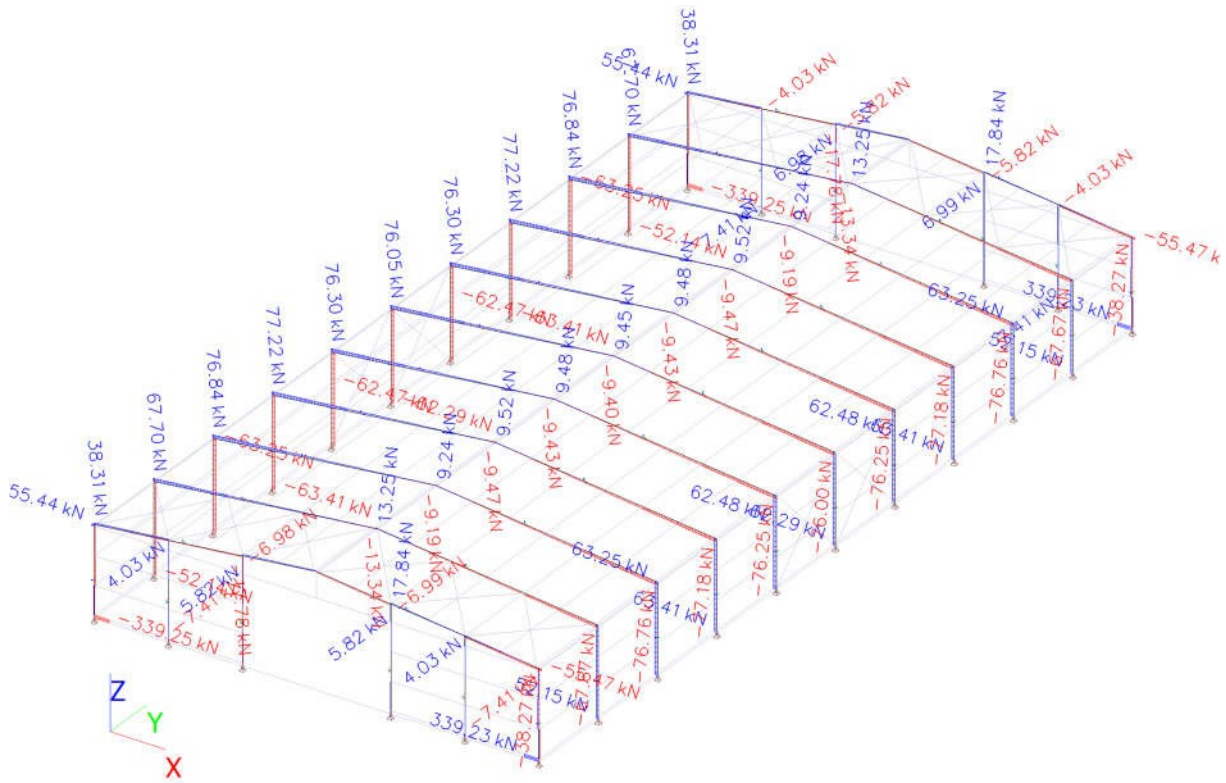
Tablica 21. Maksimalne rezne sile po presjecima – upeti okvir PX zaštita



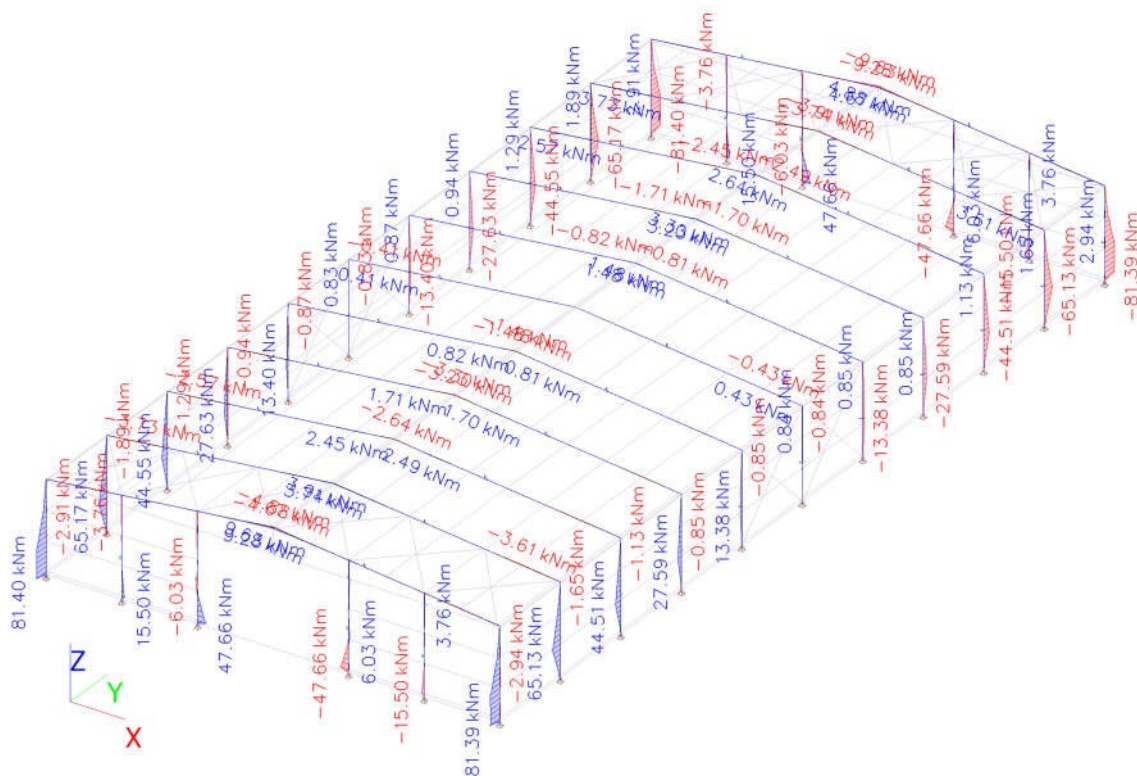
Slika 58. Rezne sile – uzdužna sila N



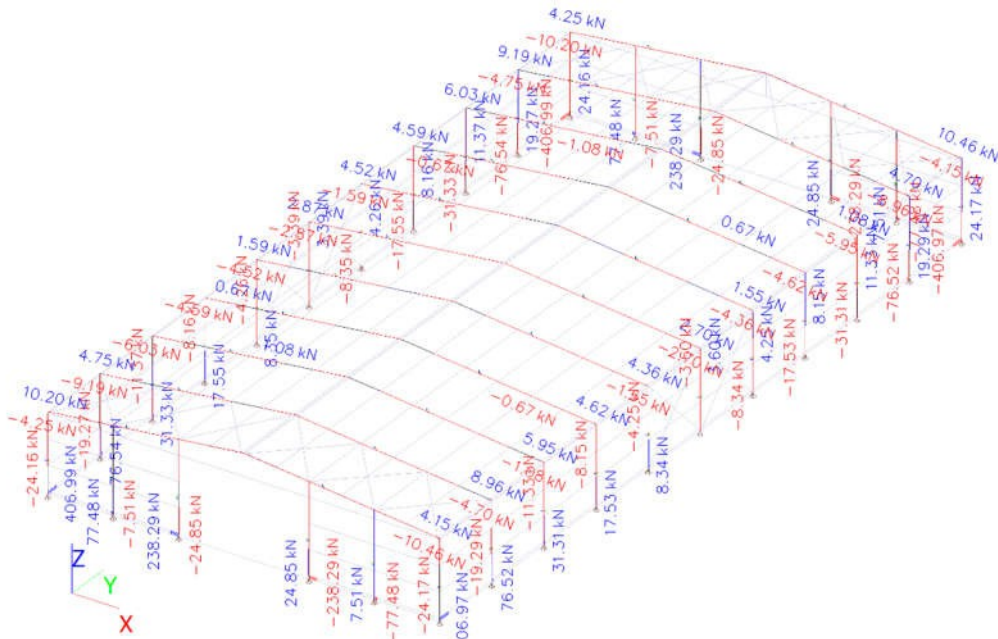
Slika 59. Rezne sile – Moment



Slika 60. Rezne sile – poprečna sila



Slika 61. Rezne sile – Moment

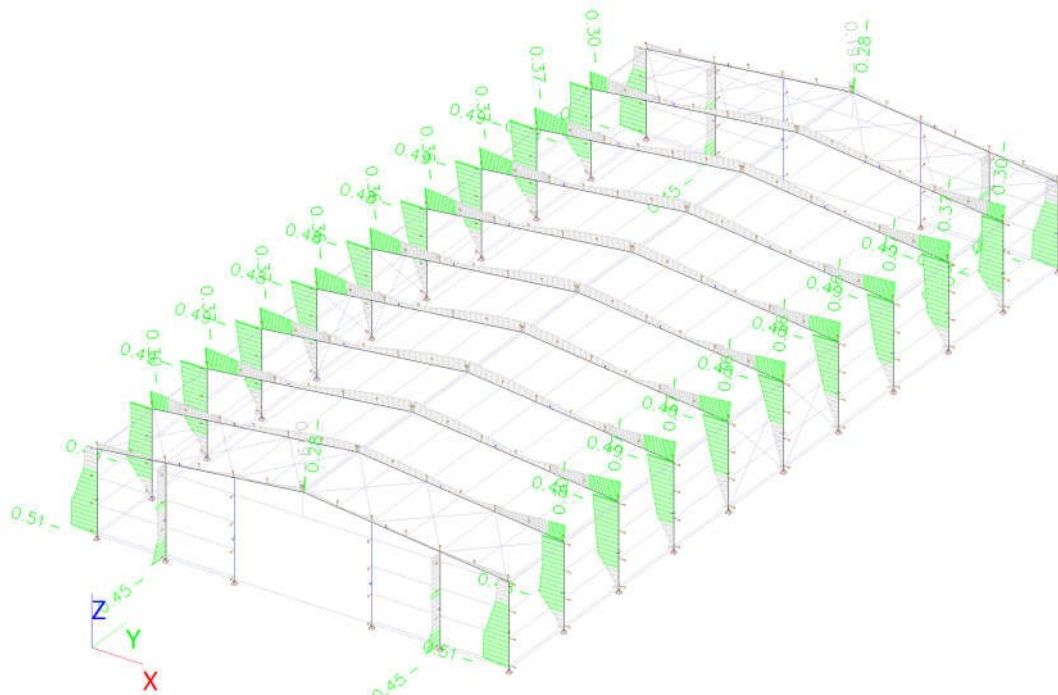


Slika 62. Rezne sile – poprečna sila

7.3.1.3 Iskoristivost elemenata

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B48	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	S 275	0.39
B141	0.000	EN_GSN - Izvanredno/11	Hor dijagonala - RD20	S 235	0.45
B64	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Podroznica - IPE2000	S 235	0.46
B45	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Stup - HEM500	S 275	0.91
B59	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup1 - HEA180	S 275	0.83
B145	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Ver dijagonala - RD8	S 235	0.71

Tablica 22. Iskoristivost poprečnih presjeka – upeti okvir PX zaštita



Slika 63. Iskoristivost elemenata (grede i stupa)

7.3.1.4 Dimenzioniranje stupa i grede prema HRN EN 1993-1-2

EN 1993-1-2 PROVJERA OTPORNOSTI NA POŽAR - STUP

Element B49 0.200 / 6.000 m HEA550

Kombinacija

EN_GSN - Izvanredno / LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9

Parcijalni koeficijenti sigurnosti

γ_{M0} za otpor poprečnog presjeka	1.00
γ_{M1} za otpornost na stabilnost	1.00
γ_{M2} za otpornost neto površine	1.25
$\gamma_{M,fi}$ za otpornost na požar	1.00

Materijal

Granica popuštanja f_y	275.0	MPa
Vlačna čvrstoća f_u	430.0	MPa
Proizvodnja	Rolanjem	

Otpornost na požar

Provjera na otpornost prema EN 1993-1-2, 4.2.3

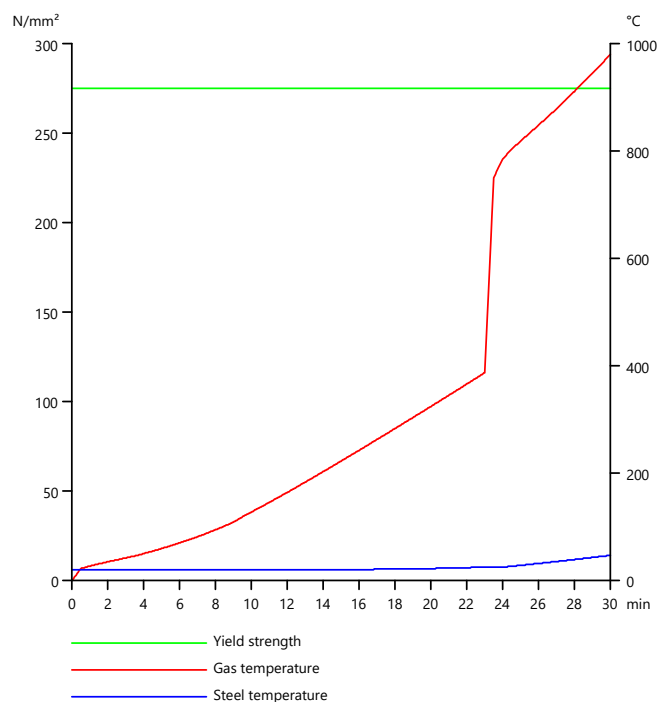
Otpornost na požar

Krivulja temperatura-vrijeme	Zasebno def.	
Koeficijent toplinske provodljivost konvekcijom α_c	25.00	W/m ² K
Zračenje požara u sektoru ϵ_f	1.00	
Zračenje površine konstrukcijskog elementa ϵ_m	0.70	
Konfiguracijski koeficijent za tok topline putem radijacije ϕ	1.00	
Tražena otpornost na požar R	30.00	min
Temperatura plina θ_g	980.54	°C
Temperatura materijala $\theta_{a,t}$	47.58	°C
Izloženost grede	3 strane	
Pokrivena ploha	Gornja ploha	
Faktor prilagodbe za poprečni presjek κ_1	0.85	
Faktor prilagodbe za gredu κ_2	1.00	
Redukcijski faktor za dokaz 0.2% čvrstoće $k_{0.2p,0}$	1.00	
Koeficijent redukcije za E modul $k_{E,0}$	1.00	

Svojstva izolacije

Ime	Zaštita pločama	
Oblik zaštite	Kutijasti oblik	
Vrsta izolacije	Ploče	
Debljina d_p	2.5000e+01	mm
Gustoća ρ_p	835.0	kg/m ³
Toplinska provodljivost λ_p	1.8900e-01	W/mK
Specifični toplinski kapacitet c_p	1.7000e+00	J/gK
Faktor profila za zaštićene elemente A_p/V	6.5094e+01	1/m

Provjera prikazana u nastavku je izvršena za zahtijevano vrijeme $t = 30.00$ min.



Slika 64. Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t

....:PROVJERA PRESJEKA:....

Kritični presjek je na 0.200 m

Rezne sile

$N_{fi,Ed}$	-62.26	kN
$V_{y,fi,Ed}$	-406.66	kN
$V_{z,fi,Ed}$	-339.25	kN
$T_{fi,Ed}$	0.00	kNm
$M_{y,fi,Ed}$	-67.85	kNm
$M_{z,fi,Ed}$	-81.33	kNm

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1675e+02	24	4.357e+04	1.313e+05	0.3	0.5	1.0	4.9	7.1	7.9	11.8	1
3	SO	1.1675e+02	24	-6.419e+03	-9.419e+04								
4	I	4.3800e+02	12.5	1.621e+04	-1.033e+04	-0.6		0.5	35.0	53.9	62.1	71.8	1
5	SO	1.1675e+02	24	-3.769e+04	-1.255e+05								
7	SO	1.1675e+02	24	1.230e+04	1.001e+05	0.1	0.5	1.0	4.9	7.1	7.9	12.2	1

Poprečni presjek je klase 1

Provjera na tlak

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 2.1200 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00} = 5830.00 [kN] \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{|-62.26 [kN]|}{5830.00 [kN]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

Provjera na moment savijanja M_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4.6250 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 275.0 [MPa]}{1.00} = 1271.88 [kNm] \quad (EC3-1-1: 6.13)$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 1271.88 [kNm] \times \frac{1.00}{1.00} = 1271.88 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.8)$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{1271.88 [kNm]}{0.85 \times 1.00} = 1496.32 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.10)$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{-67.85 [kNm]}{1496.32 [kNm]} = 0.05 \leq 1.00 \quad (EC3-1-1: 6.12)$$

Provjera na moment savijanja M_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.1083 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 275.0 [MPa]}{1.00} = 304.79 [kNm] \quad (EC3-1-1: 6.13)$$

$$M_{z,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 304.79 [kNm] \times \frac{1.00}{1.00} = 304.79 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.8)$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{304.79 [kNm]}{0.85 \times 1.00} = 358.58 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.10)$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,t,Rd}} = \frac{-81.33 [kNm]}{358.58 [kNm]} = 0.23 \leq 1.00 \quad (EC3-1-1: 6.12)$$

Provjera na posmik V_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.4894 \cdot 10^{-2} [m^2] \times \frac{275.0 [MPa]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2364.70 [kN] \quad (EC3-1-1: 6.18)$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 2364.70 [kN] \times \frac{1.00}{1.00} = 2364.70 [kN] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{y,Ed}|}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{|-406.66 [kN]|}{2364.70 [kN]} = 0.17 \leq 1.00 \quad (EC3-1-2: 4.16)$$

Provjera na posmik V_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{8.3960 \cdot 10^{-3} [m^2] \times \frac{275.0 [MPa]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1333.04 [kN] \quad (EC3-1-1: 6.18)$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 1333.04[\text{kN}] \times \frac{1.00}{1.00} = 1333.04[\text{kN}] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{z,Ed}|}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{|-339.25[\text{kN}]|}{1333.04[\text{kN}]} = 0.25 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Interakcija savijanja, uzdužne i posmične sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.9.1 i formuli (6.41)

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{1271.88[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 1496.32[\text{kNm}]$$

$$\alpha = 2.00$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{304.79[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 358.58[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.35})$$

$$\beta = 1.00$$

$$\left(\frac{|M_{y,Ed}|}{M_{y,fi,t,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{|M_{z,Ed}|}{M_{z,fi,t,Rd}} \right)^\beta = \left(\frac{|-67.85[\text{kNm}]|}{1496.32[\text{kNm}]} \right)^{2.00} + \left(\frac{|-81.33[\text{kNm}]|}{358.58[\text{kNm}]} \right)^{1.00} = 0.23 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.9})$$

Napomena: Pošto je posmična sila manja od polovične vrijednosti iznosa plastične posmične otpornosti njezin utjecaj na moment otpornosti je zanemaren.

Napomena: Pošto uzdužna sila zadovoljava oba kriterija (6.33) i (6.34) iz EN 1993-1-1, 6.2.9.1(4) njezin utjecaj na moment otpora oko y-y osi je zanemarena.

Napomena: Pošto uzdužna sila zadovoljava kriterij (6.35) iz EN 1993-1-1, 6.2.9.1(4) njezin utjecaj na moment otpora oko z-z osi je zanemaren.

Element zadovoljava PROVJERU PRESJEKA.

....:PROVJERA STABILNOSTI:....

Klasifikacija za provjeru elementa na izvijanje

Položaj kritičnog presjeka na provjeru stabilnosti: 0.000 m

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1
3	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1
4	I	4.3800e+02	12.5	2.955e+03	2.955e+03	1.0		1.0	35.0	25.9	29.9	33.0	4
5	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1
7	SO	1.1675e+02	24	2.955e+03	2.955e+03	1.0	0.4	1.0	4.9	7.1	7.9	11.0	1

Poprečni presjek je klase 4

Efektivni presjek N-
Izračun efektivne širine
 Prema EN 1993-1-5, 4.4

Id	Tip	b_p [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
3	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
4	I	4.3800e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	4.0	0.7	1.0	4.3800e+02	2.1900e+02	2.1900e+02
5	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
7	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		

Efektivni presjek My-
Izračun efektivne širine
 Prema EN 1993-1-5, 4.4

Id	Tip	b_p [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
3	SO	1.1675e+02	2.750e+05	2.750e+05	1.0	0.4	0.3	1.0	1.1675e+02		
4	I	4.3800e+02	2.334e+05	-2.334e+05	-1.0	23.9	0.3	1.0	2.1900e+02	87.6	1.3140e+02
5	SO	1.1675e+02	-2.750e+05	-2.750e+05							
7	SO	1.1675e+02	-2.750e+05	-2.750e+05							

Efektivni presjek Mz-
Izračun efektivne širine
 Prema EN 1993-1-5, 4.4

Id	Tip	b_p [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	1.1675e+02	2.750e+05	6.096e+04	0.2	0.5	0.3	1.0	1.1675e+02		
3	SO	1.1675e+02	-6.096e+04	-2.750e+05							
4	I	4.3800e+02	0.000e+00	0.000e+00							
5	SO	1.1675e+02	-6.096e+04	-2.750e+05							
7	SO	1.1675e+02	2.750e+05	6.096e+04	0.2	0.5	0.3	1.0	1.1675e+02		

Efektivni presjek							
Efektivna površina	A_{eff}	2.1179e-02	m ²				
Efektivni moment inercije	$I_{eff,y}$	1.1195e-03	m ⁴	$I_{eff,z}$	1.0819e-04	m ⁴	
Efektivni moment otpora	$W_{eff,y}$	4.1462e-03	m ³	$W_{eff,z}$	7.2128e-04	m ³	
Pomak težišta	$e_{N,y}$	0.0000e+00	mm	$e_{N,z}$	0.0000e+00	mm	

Provjera elementa na izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 & Annex E i formuli (4.5)

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.1200 \cdot 10^{-3}[\text{m}^4]}{0.200[\text{m}]^2} = 58069456.29[\text{kN}]$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.0800 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.200[\text{m}]^2} = 5603937.75[\text{kN}]$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{0.200[\text{m}]}{2.2985 \cdot 10^2[\text{mm}]} = 0.87$$

$$\lambda_z = \frac{l_{cr,z}}{i_z} = \frac{0.200[\text{m}]}{7.1375 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 2.80$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y \times \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{0.87 \times \sqrt{\frac{2.1179 \cdot 10^{-2} [m^2]}{2.1200 \cdot 10^{-2} [m^2]}}}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0 [MPa]}{275.0 [MPa]}}} = 0.01$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z \times \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{2.80 \times \sqrt{\frac{2.1179 \cdot 10^{-2} [m^2]}{2.1200 \cdot 10^{-2} [m^2]}}}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0 [MPa]}{275.0 [MPa]}}} = 0.03$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.01 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.01 \quad (EC3-1-2: 4.7)$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.03 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.03 \quad (EC3-1-2: 4.7)$$

$$\varphi_y = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.01 - 0.00) + 0.01^2] = 0.50$$

$$\varphi_z = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.03 - 0.00) + 0.03^2] = 0.51$$

$$\chi_{y,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,y}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.50 + \sqrt{0.50^2 - 0.01^2}}, \frac{1}{0.01^2}, 1 \right) = \min(0.99, 9970.48, 1) = 0.99 \quad (EC3-1-2: 4.6)$$

$$\chi_{z,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,z}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.03^2}}, \frac{1}{0.03^2}, 1 \right) = \min(0.98, 962.19, 1) = 0.98 \quad (EC3-1-2: 4.6)$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.99 \times 2.1179 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00} = 5789.30 [kN] \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00} = 5713.35 [kN] \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \min(N_{b,y,fi,t,Rd}, N_{b,z,fi,t,Rd}) = \min(5789.30 [kN], 5713.35 [kN]) = 5713.35 [kN]$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-62.26 [kN]|}{5713.35 [kN]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

Provjera elementa na torzijsko savijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 & Annex E i formuli (4.5)

Napomena: Za ovaj I-presjek otpornost na torzijsko savijanje je veće od otpornosti izvijanja. Zato se rezultat provjere ovdje ne prikazuje.

Provjera na bočno torzijsko izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.4 & Annex E i formuli (4.19)

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{iT}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{I_{iT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_i)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_i) \right] = 1.15$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0 [MPa] \times 1.0800 \cdot 10^{-4} [m^4]}{6.000 [m]^2}$$

$$\times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \times \frac{7.1889 \cdot 10^{-6} [m^6]}{1.0800 \cdot 10^{-4} [m^4]} + \frac{6.000 [m]^2 \times 80769.2 [MPa] \times 3.5200 \cdot 10^{-6} [m^4]}{\pi^2 \times 210000.0 [MPa] \times 1.0800 \cdot 10^{-4} [m^4]} + (0.20 \times 0.0000 [mm] - 1.00 \times -3.0981 \cdot 10^{-13} [mm])^2} - (0.20 \times 0.0000 [mm] - 1.00 \times -3.0981 \cdot 10^{-13} [mm]) \right]$$

$$= 2386.41 [kNm]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4.1462 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 275.0 [MPa]}{2386.41 [kNm]}} = 0.69$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.69 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.69$$

$$\alpha_{LT} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{f_y}} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{275.0 [MPa]}} = 0.60$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.95 + \sqrt{0.95^2 - 0.69^2}}, \frac{1}{0.69^2}, 1 \right) = \min (0.63, 2.09, 1) = 0.63 \quad (EC3-1-1: 6.57)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{eff,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.63 \times 4.1462 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00} = 715.66 [kNm] \quad (EC3-1-1: 6.55)$$

$$\frac{|M_{y,total,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-67.85 [kNm]|}{715.66 [kNm]} = 0.09 \leq 1.00 \quad (EC3-1-1: 6.54)$$

Napomena: C parametri su određeni prema ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Provjera na interakciju savijanja i uzdužne tlačne sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.5 & Annex E i formuli (4.21c),(4.21d)

$$\chi_{min,fi} = \min (\chi_y, \chi_z) = \min (0.99, 0.98) = 0.98$$

$$\chi_{z,fi} = \min (\chi_{z,fi}, \chi) = \min (0.98, 1.00) = 0.98$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.95 + \sqrt{0.95^2 - 0.69^2}}, \frac{1}{0.69^2}, 1 \right) = \min (0.63, 2.09, 1) = 0.63$$

$$\beta_{M,y} = 1.8 - 0.7 \times \psi_y = 1.8 - 0.7 \times 0.00 = 1.80$$

$$\mu_y = \min [(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min (\lambda_{rel,\theta,y}, 1.1) + 0.44 \times \beta_{M,y} + 0.29, 0.8] = \min [(2 \times 1.80 - 5) \times \min (0.01, 1.1) + 0.44 \times 1.80 + 0.29, 0.8] = \min [1.07, 0.8] = 0.80$$

$$k_y = \min \left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.80 \times 62.26 [kN]}{0.99 \times 2.1179 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00}}, 3 \right) = \min (0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,z} = 1.8 - 0.7 \times \psi_z = 1.8 - 0.7 \times 0.00 = 1.80$$

$$\eta^z = \omega_{pl} [(1.5 \times \lambda_{rel,z} - 3) \times \gamma^{1.0} + 0.11 \times \lambda_{rel,z} - 0.5 \times 0.8] = \omega_{pl} [(1.5 \times 1.80 - 3) \times 0.03 + 0.11 \times 1.80 - 0.5 \times 0.8] = \omega_{pl} [0.09 - 0.8] = 0.80$$

$$k_z = \min \left(1 - \frac{\mu_z \times N_{Ed}}{\chi_z \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.80 \times 62.26 [kN]}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00}}, 3 \right) = \min (0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,LT} = 1.40$$

$$\mu_{LT} = \min(0.15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0.15, 0.9) = \min(0.15 \times 0.03 \times 1.40 - 0.15, 0.9) = \min(-0.14, 0.9) = -0.14$$

$$k_{LT} = \min \left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1 \right) = \min \left(1 - \frac{-0.14 \times 62.26[\text{kN}]}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 1 \right) = \min(1.00, 1) = 1.00$$

(EC3-1-2: 4.21c)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21c)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{min,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_y \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{eff,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{eff,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{62.26[\text{kN}] \times 1.00}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-67.85[\text{kNm}]| \times 1.00}{4.1462 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-81.33[\text{kNm}]| \times 1.00}{7.2128 \cdot 10^{-4}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.48 \leq 1.00} \end{aligned}$$

(EC3-1-2: 4.21d)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21d)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{eff,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{eff,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{62.26[\text{kN}] \times 1.00}{0.98 \times 2.1179 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-67.85[\text{kNm}]| \times 1.00}{0.63 \times 4.1462 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-81.33[\text{kNm}]| \times 1.00}{7.2128 \cdot 10^{-4}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.51 \leq 1.00} \end{aligned}$$

Provjera na posmično izbočavanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-5, 5 & 7.1 i formuli (5.10) & (7.1)

$$h_w/t = \frac{h_w}{t} = \frac{4.9200 \cdot 10^2[\text{mm}]}{1.2500 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 39.36$$

$$\text{limit } h_w/t = \frac{72 \times \varepsilon}{\eta} = \frac{72 \times 0.79}{1.20} = 47.15$$

Napomena: Vitkost ploče je takva da se efekti posmičnog izbočavanja mogu zanemariti

Prema EN 1993-1-5, 5.1(2).

Element zadovoljava PROVJERU STABILNOSTI.

EN 1993-1-2 PROVJERA OTPORNOSTI NA POŽAR - GREDA**Element B19 15.085 / 15.085 m I + I var (HEA500; 2.5000e+02)****Kombinacija**

EN_GSN - Izvanredno / LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7

Parcijalni koeficijenti sigurnosti

γ_{M0} za otpor poprečnog presjeka	1.00
γ_{M1} za otpornost na stabilnost	1.00
γ_{M2} za otpornost neto površine	1.25
$\gamma_{M,fi}$ za otpornost na požar	1.00

Materijal

Granica popuštanja f_y	275.0	MPa
Vlačna čvrstoća f_u	430.0	MPa
Proizvodnja	Zavareno	

Otpornost na požar

Provjera na otpornost prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Otpornost na požar

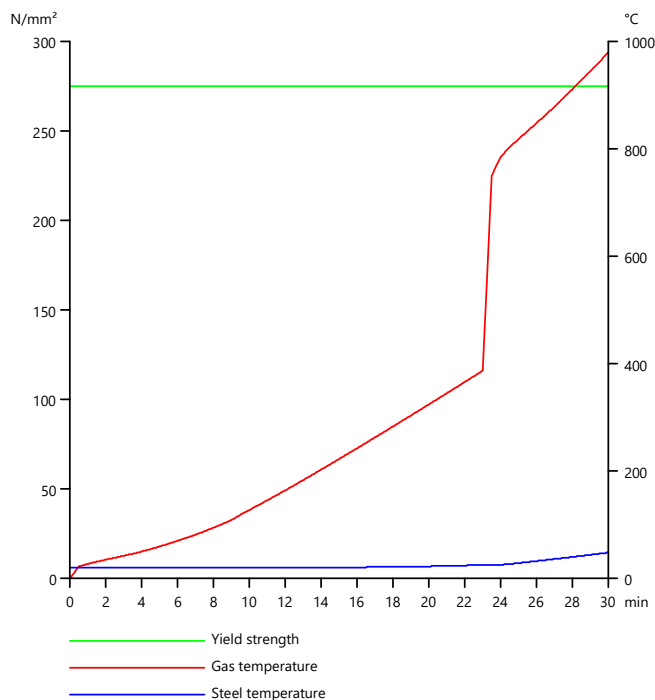
Krivulja temperatura-vrijeme	Zasebno def.	
Koeficijent toplinske provodljivost konvekcijom α_c	25.00	W/m ² K
Zračenje požara u sektoru ϵ_f	1.00	
Zračenje površine konstrukcijskog elementa ϵ_m	0.70	
Konfiguracijski koeficijent za tok topline putem radijacije ϕ	1.00	
Tražena otpornost na požar R	30.00	min
Temperatura plina θ_g	980.54	°C
Temperatura materijala $\theta_{a,t}$	48.78	°C
Izloženost grede	Sve strane	
Faktor prilagodbe za poprečni presjek κ_1	0.85	
Faktor prilagodbe za gredu κ_2	1.00	
Koeficijent redukcije za granicu popuštanja $k_{y,\theta}$	1.00	
Koeficijent redukcije za E modul $k_{E,\theta}$	1.00	

Napomena: izloženost na tri strane nije podržana za ovaj poprečni presjek

Svojstva izolacije

Ime	Zaštita pločama	
Oblik zaštite	Kutijasti oblik	
Vrsta izolacije	Ploče	
Debljina d_p	2.5000e+01	mm
Gustoća ρ_p	835.0	kg/m ³
Toplinska provodljivost λ_p	1.8900e-01	W/mK
Specifični toplinski kapacitet c_p	1.7000e+00	J/gK
Faktor profila za zaštićene elemente A_p/V	7.0015e+01	1/m

Provjera prikazana u nastavku je izvršena za zahtijevano vrijeme $t = 30.00$ min.



Slika 65. Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t

...:PROVJERA PRESJEKA:...:

Kritični presjek je na 15.085 m

Rezne sile

$N_{fi,Ed}$	-71.76	kN
$V_{y,fi,Ed}$	4.33	kN
$V_{z,fi,Ed}$	-76.79	kN
$T_{fi,Ed}$	0.03	kNm
$M_{y,fi,Ed}$	-369.42	kNm
$M_{z,fi,Ed}$	0.35	kNm

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1700e+02	23	1.606e+04	1.580e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.9	1
3	SO	1.1700e+02	23	1.621e+04	1.648e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.8	1
4	I	3.9000e+02	12	9.799e+03	-5.441e+04	-5.6		0.2	32.5	185.4	213.7	752.3	1
5	SO	1.1700e+02	23	-6.068e+04	-6.041e+04								
7	SO	1.1700e+02	23	-6.083e+04	-6.109e+04								
8	I	2.0000e+02	12	5.096e+04	1.803e+04	0.4		1.0	16.7	25.9	29.9	41.9	1
9	SO	1.1700e+02	23	5.723e+04	5.696e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.9	1
11	SO	1.1700e+02	23	5.738e+04	5.764e+04	1.0	0.4	1.0	5.1	7.1	7.9	10.8	1

Poprečni presjek je klase 1

Svojstva presjeka

A	2.9708e-02 m ²	A_z/A	0.32
A_y/A	0.67	I_z	1.5551e-04 m ⁴
I_y	2.2447e-03 m ⁴	I_t	4.0631e-06 m ⁴
I_{yz}	2.1684e-19 m ⁴	$W_{el,y}$	5.6803e-03 m ³
I_w	1.3708e-05 m ⁶	$W_{el,z}$	1.0367e-03 m ³
$W_{el,y}$	5.6803e-03 m ³	$W_{pl,y}$	6.7873e-03 m ³
$W_{pl,y}$	6.7873e-03 m ³	$W_{pl,z}$	1.5882e-03 m ³
c_y	1.5000e+02 mm	c_z	3.4483e+02 mm
d_y	6.1674e-14 mm	d_z	1.0619e+01 mm

Provjera na tlak

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 2.9708 \cdot 10^{-2} [m^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [MPa]}{1.00} = 8169.72 [kN] \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{|-71.76 [kN]|}{8169.72 [kN]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (EC3-1-2: 4.5)$$

Provjera na moment savijanja M_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6.7873 \cdot 10^{-3} [m^3] \times 275.0 [MPa]}{1.00} = 1866.52 [kNm] \quad (EC3-1-1: 6.13)$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 1866.52 [kNm] \times \frac{1.00}{1.00} = 1866.52 [kNm] \quad (EC3-1-2: 4.8)$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{1866.52[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 2195.90[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.10})$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{-369.42[\text{kNm}]}{2195.90[\text{kNm}]} = \mathbf{0.17} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Provjera na moment savijanja M_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.5882 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 436.76[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.13})$$

$$M_{z,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 436.76[\text{kNm}] \times \frac{1.00}{1.00} = 436.76[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.8})$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{436.76[\text{kNm}]}{0.85 \times 1.00} = 513.84[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.10})$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,t,Rd}} = \frac{0.35[\text{kNm}]}{513.84[\text{kNm}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Provjera na posmik V_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$\tau_{Vy,fi,Ed} = |V_{y,Ed}| \times \tau_{Vy,Ed,unit} = |4333.02| \times 7.246 \cdot 10^{-2}[\text{kN/m}^2] = 0.3[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{Vy,fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{0.3[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na posmik V_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$\tau_{Vz,fi,Ed} = |V_{z,Ed}| \times \tau_{Vz,Ed,unit} = |-76790.67| \times 1.336 \cdot 10^{-1}[\text{kN/m}^2] = 10.3[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{Vz,fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{10.3[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.06} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na torziju

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.7 i formuli (6.23)

$$\tau_{fi,Ed} = |T_{Ed}| \times \tau_{Ed,unit} = |28.10| \times 5.661[\text{kN/m}^2] = 0.2[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{0.2[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.23})$$

Napomena: Provjera na torziju je manja od granične vrijednosti od 0.05. Zato se utjecaj torzije smatra malenim te se zanemaruje u interakcijskim provjerama.

Interakcija savijanja, uzdužne i posmične sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.1(5) i formuli (6.1)

$$\sigma_{N,fi,Ed} = \frac{-N_{Ed}}{A} = \frac{-71.76[\text{kN}]}{2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2]} = 2.4[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{M_y,fi,Ed} = \frac{M_{y,Ed} \times z}{I_y} = \frac{-369.42[\text{kNm}] \times 3.9517 \cdot 10^2[\text{mm}]}{2.2447 \cdot 10^{-3}[\text{m}^4]} = -65.0[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{M_z,fi,Ed} = \frac{M_{z,Ed} \times y}{I_z} = \frac{0.35[\text{kNm}] \times -1.5000 \cdot 10^2[\text{mm}]}{1.5551 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]} = -0.3[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{\text{tot},fi,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{M_y,Ed} + \sigma_{M_z,Ed} + \sigma_{w,Ed} = 2.4[\text{MPa}] + -65.0[\text{MPa}] + -0.3[\text{MPa}] + 0.0[\text{MPa}] = -63.0[\text{MPa}]$$

$$\tau_{V_y,fi,Ed} = |V_{y,Ed} \times \tau_{V_y,Ed,unit}| = |4333.02 \times 0.000[\text{kN/m}^2]| = 0.0[\text{MPa}]$$

$$\tau_{V_z,fi,Ed} = |V_{z,Ed} \times \tau_{V_z,Ed,unit}| = |-76790.67 \times 3.553 \cdot 10^{-17}[\text{kN/m}^2]| = 0.0[\text{MPa}]$$

$$\tau_{t,fi,Ed} = |M_{xp,Ed} \times \tau_{t,Ed,unit}| = |28.10 \times 5.661[\text{kN/m}^2]| = 0.2[\text{MPa}]$$

$$\tau_{\text{tot},fi,Ed} = \tau_{V_z,Ed} + \tau_{V_y,Ed} + \tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed} = 0.0[\text{MPa}] + 0.0[\text{MPa}] + 0.2[\text{MPa}] + 0.0[\text{MPa}] = 0.2[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{\text{von Mises},fi,Ed} = \sqrt{\sigma_{\text{tot},Ed}^2 + 3 \times \tau_{\text{tot},Ed}^2} = \sqrt{-63.0[\text{MPa}]^2 + 3 \times 0.2[\text{MPa}]^2} = 63.0[\text{MPa}]$$

$$\frac{\sigma_{\text{von Mises},fi,Ed} \times \gamma_{M,fi}}{f_y \times k_{y,\theta}} = \frac{63.0[\text{MPa}] \times 1.00}{275.0[\text{MPa}] \times 1.00} = 0.23 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.1})$$

Napomena: Za ovaj presjek plastična posmična otpornost i pripadajuća Rho vrijednost se ne mogu odrediti. Zbog toga se elastična granica popuštanja prema EN 1993-1-1, 6.2.1(5) provjerava.

Element zadovoljava PROVJERU PRESJEKA.

....PROVJERA STABILNOSTI:....**Klasifikacija za provjeru elementa na izvijanje**

Napomena: Za ovaj presjek klasifikacija iz provjere poprečnog presjeka je također korištena za provjeru elementa na savijanje.

=> Presjek je klasificiran kao klasa 1 za provjeru elementa na savijanje.

Provjera elementa na izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 2.2447 \cdot 10^{-3}[\text{m}^4]}{12.873[\text{m}]^2} = 28073.40[\text{kN}]$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.5551 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.184[\text{m}]^2} = 9475242.53[\text{kN}]$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{12.873[\text{m}]}{2.7488 \cdot 10^2[\text{mm}]} = 46.83$$

$$\lambda_z = \frac{l_{cr,z}}{i_z} = \frac{0.184[\text{m}]}{7.2351 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 2.55$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{46.83}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.54$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{2.55}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.03$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.54 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.54 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.03 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.03 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\varphi_y = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.54 - 0.00) + 0.54^2] = 0.81$$

$$\varphi_z = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.03 - 0.00) + 0.03^2] = 0.51$$

$$\chi_{y,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,y}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.81 + \sqrt{0.81^2 - 0.54^2}}, \frac{1}{0.54^2}, 1 \right) = \min(0.71, 3.44, 1) = 0.71 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$\chi_{z,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,z}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.03^2}}, \frac{1}{0.03^2}, 1 \right) = \min(0.98, 1159.80, 1) = 0.98 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.71 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 5800.09[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.98 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 8027.96[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \min(N_{b,y,fi,t,Rd}, N_{b,z,fi,t,Rd}) = \min(5800.09[\text{kN}], 8027.96[\text{kN}]) = 5800.09[\text{kN}]$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-71.76[\text{kN}]|}{5800.09[\text{kN}]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera elementa na torzijsko savijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \times \left(G \times I_t + \frac{\pi^2 \times E \times I_w}{l_{cr}^2} \right) = \frac{1}{2.8444 \cdot 10^2[\text{mm}]^2} \times \left(80769.2[\text{MPa}] \times 4.0631 \cdot 10^{-6}[\text{m}^4] + \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.3708 \cdot 10^{-5}[\text{m}^6]}{15.085[\text{m}]^2} \right) = 5599.53[\text{kN}]$$

$$N_{cr,TF} = 5599.52[\text{kN}]$$

$$\lambda_{rel,T} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 275.0[\text{MPa}]}{5599.52[\text{kN}]}} = 1.21$$

$$\lambda_{rel,\theta} = \lambda_{rel,T} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.21 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 1.21$$

$$\chi_{fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_{rel,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.59 + \sqrt{1.59^2 - 1.21^2}}, \frac{1}{1.21^2}, 1 \right) = \min(0.38, 0.69, 1) = 0.38$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.38 \times 2.9708 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 3106.30 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.47})$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-71.76 [\text{kN}]|}{3106.30 [\text{kN}]} = 0.02 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera na bočno torzijsko izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.11)

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \times \frac{l_w}{I_z} + \frac{l_{cr}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2 - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)} \right] = 3.45$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.5551 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]}{15.085 [\text{m}]^2}$$

$$\times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \times \frac{1.3708 \cdot 10^{-5} [\text{m}^6]}{1.5551 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + \frac{15.085 [\text{m}]^2 \times 80769.2 [\text{MPa}] \times 4.0631 \cdot 10^{-6} [\text{m}^4]}{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.5551 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + (0.47 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times 4.6136 \cdot 10^1 [\text{mm}])^2 - (0.47 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times 4.6136 \cdot 10^1 [\text{mm}])} \right]$$

$$= 2996.42 [\text{kNm}]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{6.7873 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3] \times 275.0 [\text{MPa}]}{2996.42 [\text{kNm}]} = 0.79$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.79 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.79$$

$$\alpha_{LT} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{f_y}} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{275.0 [\text{MPa}]} = 0.60$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.05 + \sqrt{1.05^2 - 0.79^2}}, \frac{1}{0.79^2}, 1 \right) = \min (0.58, 1.61, 1) = 0.58 \quad (\text{EC3-1-1: 6.57})$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.58 \times 6.7873 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 1073.37 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.55})$$

$$\frac{|M_{y,total,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-369.42 [\text{kNm}]|}{1073.37 [\text{kNm}]} = 0.34 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.54})$$

Napomena: C parametri su određeni prema ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Provjera na interakciju savijanja i uzdužne tlačne sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.5 i formuli (4.21a),(4.21b)

$$\chi_{min,fi} = \min (\chi_y, \chi_z) = \min (0.71, 0.38) = 0.38$$

$$\chi_{z,fi} = \min (\chi_{z,fi}, \chi) = \min (0.98, 0.38) = 0.38$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.05 + \sqrt{1.05^2 - 0.79^2}}, \frac{1}{0.79^2}, 1 \right) = \min (0.58, 1.61, 1) = 0.58$$

$$\beta_{M,y} = 1.8 - 0.7 \times \psi_y + \frac{M_{Q,y} \times [\beta_{M,Q} - (1.8 - 0.7 \times \psi_y)]}{\delta_1 M_y} = 1.8 - 0.7 \times -0.37 + \frac{146.65 [\text{kNm}] \times [1.30 - (1.8 - 0.7 \times -0.37)]}{506.47 [\text{kNm}]} = 1.84$$

$$\mu_y = \min [(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min (\lambda_{rel,\theta,y}, 1.1) + 0.44 \times \beta_{M,y} + 0.29, 0.8] = \min [(2 \times 1.84 - 5) \times \min (0.54, 1.1) + 0.44 \times 1.84 + 0.29, 0.8]$$

$$= \min [0.39, 0.8] = 0.39$$

$$k_y = \min \left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.39 \times 71.76[\text{kN}]}{0.71 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3 \right) = \min(1.00, 3) = 1.00$$

$$\beta_{M,z} = 1.8 - 0.7 \times \psi_z = 1.8 - 0.7 \times -0.79 = 2.35$$

$$\mu_z = \min [(1.2 \times \beta_{M,z} - 3) \times \lambda_{rel,\theta,z} + 0.71 \times \beta_{M,z} - 0.29, 0.8] = \min [(1.2 \times 2.35 - 3) \times 0.03 + 0.71 \times 2.35 - 0.29, 0.8] = \min [1.37, 0.8] = 0.80$$

$$k_z = \min \left(1 - \frac{\mu_z \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.80 \times 71.76[\text{kN}]}{0.98 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3 \right) = \min(0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,LT} = 1.8 - 0.7 \times \psi_{LT} + \frac{M_{Q,LT} \times [\beta_{M,Q} - (1.8 - 0.7 \times \psi_{LT})]}{\delta, M_{LT}} = 1.8 - 0.7 \times -0.37 + \frac{146.65[\text{kNm}] \times [1.30 - (1.8 - 0.7 \times -0.37)]}{506.47[\text{kNm}]} = 1.84$$

$$\mu_{LT} = \min (0.15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0.15, 0.9) = \min (0.15 \times 0.03 \times 1.84 - 0.15, 0.9) = \min (-0.14, 0.9) = -0.14$$

$$k_{LT} = \min \left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1 \right) = \min \left(1 - \frac{-0.14 \times 71.76[\text{kN}]}{0.98 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 1 \right) = \min(1.00, 1) = 1.00$$

(EC3-1-2: 4.21a)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21a)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{min,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_y \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{71.76[\text{kN}] \times 1.00}{0.38 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-369.42[\text{kNm}] \times 1.00}{6.7873 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |0.35[\text{kNm}] \times 1.00}{1.5882 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.22 \leq 1.00} \end{aligned}$$

(EC3-1-2: 4.21b)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21b)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{71.76[\text{kN}] \times 1.00}{0.38 \times 2.9708 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-369.42[\text{kNm}] \times 1.00}{0.58 \times 6.7873 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |0.35[\text{kNm}] \times 1.00}{1.5882 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.37 \leq 1.00} \end{aligned}$$

Element zadovoljava PROVJERU STABILNOSTI.

7.3.2 Model s upetim okvirom – GSN – osnovna kombinacija

Ime	Tip	Kombinacija
EN_GSN/1	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar6
EN_GSN/2	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar10
EN_GSN/3	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar2
EN_GSN/4	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar14

Tablica 23. Mjerodavne kombinacije– upeti okvir GSN

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B97	1.700	EN_GSN/4	Bocni sekundarci - IPE220	S 235	0.86
B48	14.900+	EN_GSN/4	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	S 275	0.87
B139	7.828	EN_GSN/3	Hor dijagonala - RD20	S 235	0.74
B71	2.500	EN_GSN/2	Podroznica - IPE2000	S 235	0.94
B41	3.367-	EN_GSN/3	Stup - HEA500	S 275	0.92
B58	0.000	EN_GSN/4	Stup1 - HEA180	S 275	0.84
B143	8.485	EN_GSN/4	Ver dijagonala - RD8	S 235	0.86

Tablica 24. Iskoristivost poprečnih presjeka– upeti okvir GSN

7.3.3 Model s upetim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar3
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar11
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar12
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar4
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13

Tablica 25. Mjerodavne kombinacije– upeti okvir P zaštita

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B47	14.900-	EN_GSN - Izvanredno/4	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	S 275	0.98
B137	0.000	EN_GSN - Izvanredno/10	Hor dijagonala - RD60	S 235	1.82
B65	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Podroznica - IPE2000	S 235	2.66
B33	0.200+	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup - HEM1000	S 275	0.93
B58	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup1 - HEA280	S 275	6.83
B145	0.000	EN_GSN - Izvanredno/11	Ver dijagonala - RD24	S 235	2.82

Tablica 26. Iskoristivost poprečnih presjeka– upeti okvir P zaštita

7.3.4 Model s upetim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija bez temperaturnog djelovanja

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar14

Tablica 27. Mjerodavne kombinacije– upeti okvir P zaštita, bez temp. istezanja

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B40	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Greda5 - I + I var (HEA500; 2.5000e+02)	S 275	0.35
B138	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Hor dijagonala - RD20	S 235	0.24
B64	0.000	EN_GSN - Izvanredno/3	Podroznica - IPE2000	S 235	0.37
B41	6.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup - HEA500	S 275	0.48
B56	7.067	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup1 - HEA180	S 275	0.34
B145	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Ver dijagonala - RD8	S 235	0.13

Tablica 28. Iskoristivost poprečnih presjeka– upeti okvir P zaštita, bez temp. istezanja

7.4 Prikaz rezultata dimenzioniranja za model s trozglobnim okvirom

7.4.1 Model s trozglobnim okvirom zaštićen PX protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija

7.4.1.1 Kombinacije

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar3
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar11
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar12
EN_GSN - Izvanredno/17	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/18	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/19	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar4
EN_GSN - Izvanredno/20	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/21	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/22	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar9

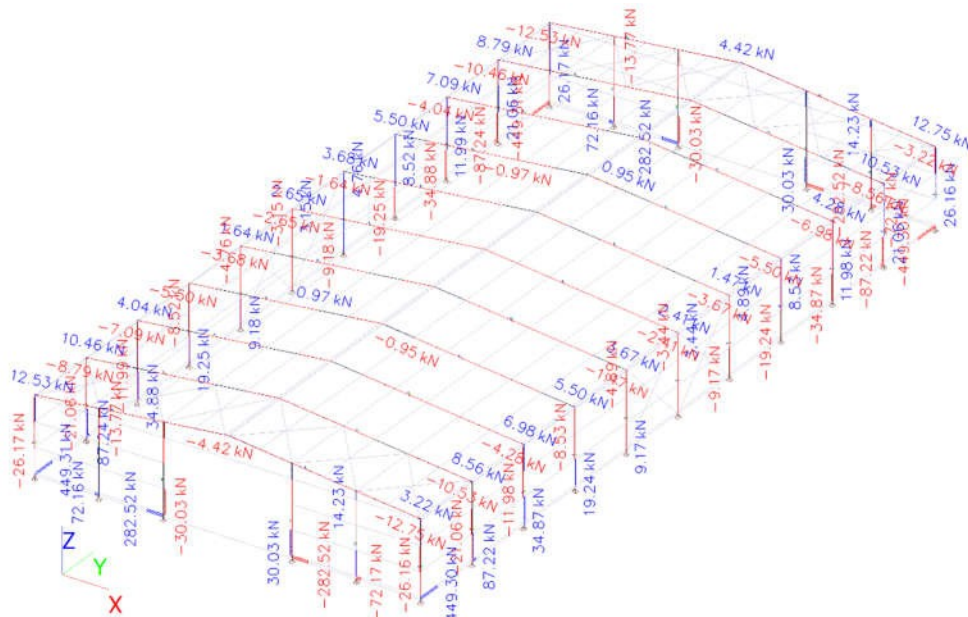
Tablica 29. Mjerodavne kombinacije – trozglobni okvir PX zaštitna

7.4.1.2 Rezne sile za stup i gredu

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
B29	0.000	EN_GSN - Izvanredno/6	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-120.35	0.00	-84.62	0.00	0.50	0.00
B1	6.000	EN_GSN - Izvanredno/21	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-14.28	8.23	-24.89	-0.27	4.29	2.41
B1	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-95.14	448.98	-395.60	-1.87	0.40	0.00
B2	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-95.27	448.96	395.58	1.87	-0.40	0.00
B21	6.000	EN_GSN - Izvanredno/6	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-87.82	-0.69	-85.90	-0.15	-492.14	0.18
B18	6.000	EN_GSN - Izvanredno/6	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-87.77	-0.64	85.90	0.15	492.08	0.06

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
B49	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/9	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-81.37	-449.31	-387.29	1.87	-77.12	-89.86
B1	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/9	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	-81.37	449.31	-387.29	-1.87	-77.12	89.86
B12	14.900+	EN_GSN - Izvanredno/6	Greda - HEB400	-157.80	1.18	-16.56	-0.35	3.10	5.51
B3	15.085	EN_GSN - Izvanredno/5	Greda - HEB400	43.01	-1.62	9.80	-2.93	2.24	2.38
B4	14.900+	EN_GSN - Izvanredno/6	Greda - HEB400	-41.45	-12.75	-21.49	-0.17	-20.73	-0.56
B47	14.900+	EN_GSN - Izvanredno/6	Greda - HEB400	-41.45	12.75	-21.49	0.17	-20.73	0.56
B19	15.085	EN_GSN - Izvanredno/5	Greda - HEB400	-94.25	5.07	-78.18	-0.20	-481.70	1.55
B20	0.000	EN_GSN - Izvanredno/5	Greda - HEB400	-94.25	-5.18	78.23	0.33	-481.47	1.56
B47	0.000	EN_GSN - Izvanredno/7	Greda - HEB400	24.66	-2.97	-7.23	-6.67	0.00	5.05
B4	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Greda - HEB400	24.66	2.97	-7.23	6.67	0.00	-5.05
B19	15.085	EN_GSN - Izvanredno/6	Greda - HEB400	-94.73	0.64	-78.16	-0.24	-483.52	0.32
B4	10.057+	EN_GSN - Izvanredno/10	Greda - HEB400	5.33	-0.59	-50.05	0.33	35.93	-0.53
B47	0.100+	EN_GSN - Izvanredno/22	Greda - HEB400	4.71	2.49	-8.36	0.04	-0.64	-8.54
B4	0.100+	EN_GSN - Izvanredno/22	Greda - HEB400	4.71	-2.49	-8.36	-0.04	-0.64	8.54
B51	0.000	EN_GSN - Izvanredno/5	Stup1 - HEA220	-86.19	282.13	-1.98	0.00	0.00	0.00
B50	6.533	EN_GSN - Izvanredno/11	Stup1 - HEA220	59.80	-9.26	0.47	0.01	-8.01	-7.52
B50	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup1 - HEA220	23.93	72.14	-7.99	0.00	0.00	0.00
B59	0.000	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup1 - HEA220	23.93	72.14	7.99	0.00	0.00	0.00
B51	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA220	-52.62	-10.87	3.95	-0.02	-13.83	0.97
B58	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup1 - HEA220	-52.62	-10.87	-3.95	0.02	13.83	0.97
B51	7.067	EN_GSN - Izvanredno/5	Stup1 - HEA220	-64.22	-14.62	-0.69	-0.02	-16.67	-14.53
B58	7.067	EN_GSN - Izvanredno/5	Stup1 - HEA220	-64.22	-14.62	0.69	0.02	16.67	-14.53
B53	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/11	Stup1 - HEA220	-79.84	-282.52	-3.95	0.00	-0.79	-56.50
B51	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/10	Stup1 - HEA220	-80.62	282.52	-3.95	0.00	-0.79	56.50

Tablica 30. Maksimalne rezne sile po presjecima– trozglobni okvir PX zaštita

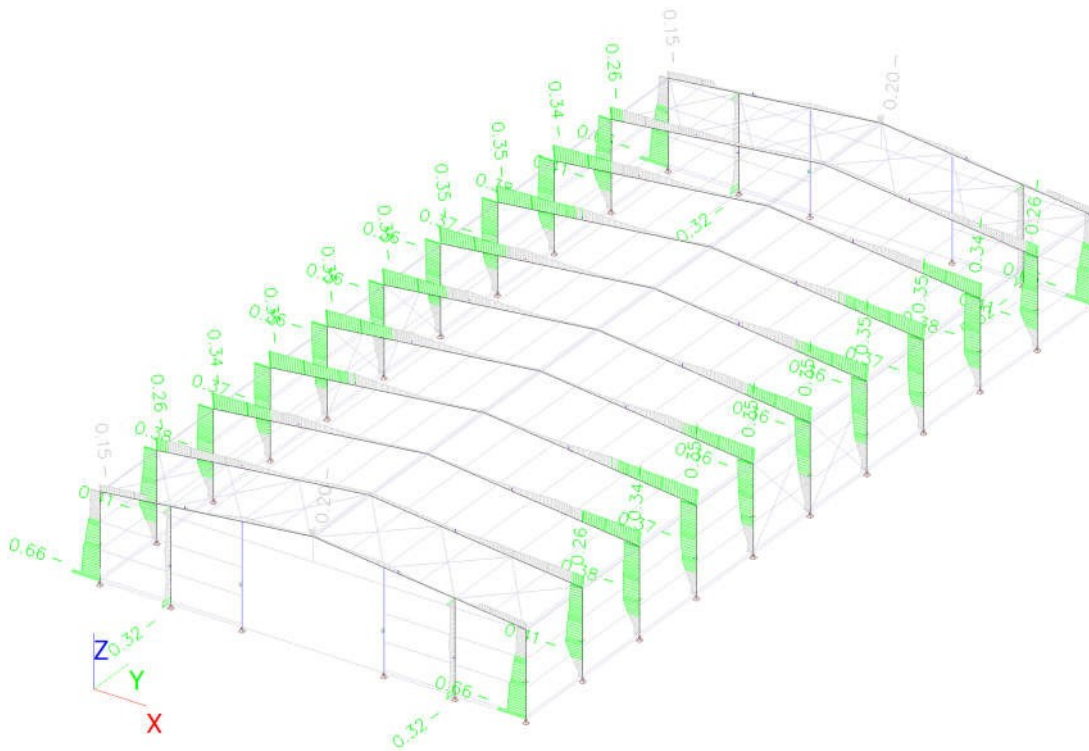


Slika 70. Rezne sile – poprečna sila

7.4.1.3 Iskoristivost elemenata

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B36	0.000	EN_GSN - Izvanredno/5	Greda - HEB400	S 275	0.35
B138	0.000	EN_GSN - Izvanredno/6	Hor dijagonala - RD24	S 235	0.28
B64	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Podroznica - IPE220	S 235	0.44
B59	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/9	Stup1 - HEA220	S 275	0.32
B49	0.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	S 275	0.66
B143	0.000	EN_GSN - Izvanredno/20	Ver dijagonala - RD18	S 235	0.39

Tablica 31. Iskoristivost poprečnih presjeka – trozglobni okvir PX zaštita



Slika 71. Iskoristivost elemenata (grede i stupa)

7.4.1.4 Dimenzioniranje stupa i grede prema HRN EN 1993-1-2

EN 1993-1-2 PROVJERA OTPORNOSTI NA POŽAR - STUP

Element B1 0.000 / 6.000 m I var (HEA600; 3.0000e+02)

Kombinacija

EN_GSN - Izvanredno / LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9

Parcijalni koeficijenti sigurnosti

γ_{M0} za otpornost poprečnog presjeka	1.00
γ_{M1} za otpornost na stabilnost	1.00
γ_{M2} za otpornost neto površine	1.25
$\gamma_{M,fi}$ za otpornost na požar	1.00

Materijal

Granica popuštanja f_y	275.0	MPa
Vlačna čvrstoća f_u	430.0	MPa
Proizvodnja	Zavareno	

Otpornost na požar

Provjera na otpornost prema EN 1993-1-2, 4.2.3

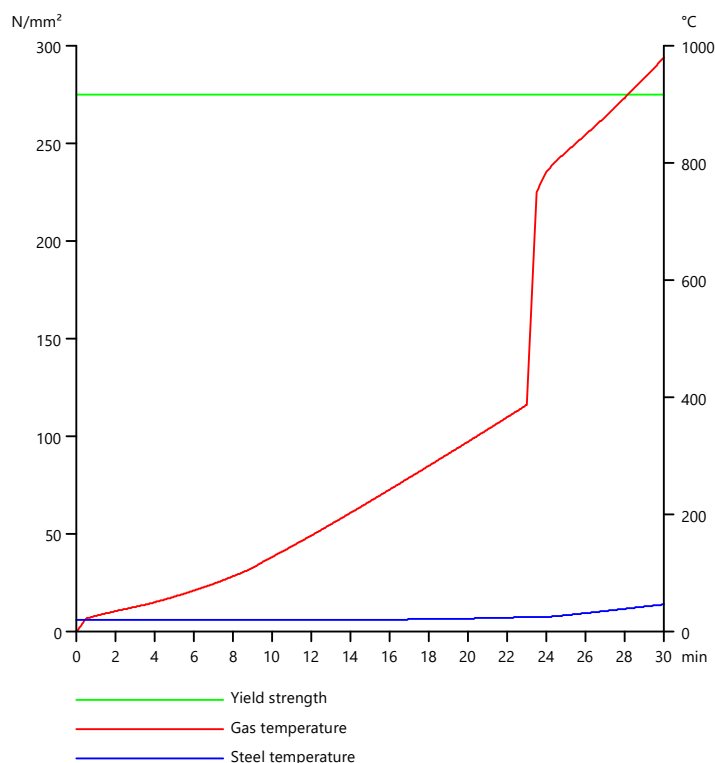
Otpornost na požar

Krivulja temperatura-vrijeme	Zasebno def.	
Koeficijent toplinske provodljivost konvekcijom α_c	25.00	W/m ² K
Zračenje požara u sektoru ϵ_f	1.00	
Zračenje površine konstrukcijskog elementa ϵ_m	0.70	
Konfiguracijski koeficijent za tok topline putem radijacije ϕ	1.00	
Tražena otpornost na požar R	30.00	min
Temperatura plina θ_g	980.54	°C
Temperatura materijala $\theta_{a,t}$	47.18	°C
Izloženost grede	Sve strane	
Faktor prilagodbe za poprečni presjek κ_1	1.00	
Faktor prilagodbe za gredu κ_2	1.00	
Koeficijent redukcije za granicu popuštanja $k_{y,\theta}$	1.00	
Koeficijent redukcije za E modul $k_{E,\theta}$	1.00	

Svojstva izolacije

Ime	Zaštita pločama	
Oblik zaštite	Kutijasti oblik	
Vrsta izolacije	Ploče	
Debljina d_p	2.5000e+01	mm
Gustoća ρ_p	835.0	kg/m ³
Toplinska provodljivost λ_p	1.8900e-01	W/mK
Specifični toplinski kapacitet c_p	1.7000e+00	J/gK
Faktor profila za zaštićene elemente A_p/V	6.3534e+01	1/m

Provjera prikazana u nastavku je izvršena za zahtijevano vrijeme $t = 30.00$ min.

Slika 72. Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t

....:PROVJERA PRESJEKA:....

Kritični presjek je na 0.000 m

Rezne sile

$N_{fi,Ed}$	-95.14	kN
$V_{y,fi,Ed}$	448.98	kN
$V_{z,fi,Ed}$	-395.60	kN
$T_{fi,Ed}$	-1.87	kNm
$M_{y,fi,Ed}$	0.40	kNm
$M_{z,fi,Ed}$	0.00	kNm

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1650e+02	25	4.864e+03	4.864e+03	1.0	0.4	1.0	4.7	7.1	7.9	11.0	1
3	SO	1.1650e+02	25	4.864e+03	4.864e+03	1.0	0.4	1.0	4.7	7.1	7.9	11.0	1
4	I	1.9600e+02	13	4.914e+03	5.165e+03	1.0		1.0	15.1	25.9	29.9	33.5	1
5	SO	1.1650e+02	25	5.215e+03	5.215e+03	1.0	0.4	1.0	4.7	7.1	7.9	11.0	1
7	SO	1.1650e+02	25	5.215e+03	5.215e+03	1.0	0.4	1.0	4.7	7.1	7.9	11.0	1

Poprečni presjek je klase 1

Svojstva presjeka

A	1.8887e-02 m ²		
A _y /A	0.76	A _z /A	0.22
I _y	3.1033e-04 m ⁴	I _z	1.1266e-04 m ⁴
I _{yz}	2.7105e-19 m ⁴	I _t	3.7657e-06 m ⁴
I _w	2.1270e-06 m ⁶		
W _{el,y}	2.0689e-03 m ³	W _{el,z}	7.5109e-04 m ³
W _{pl,y}	2.3414e-03 m ³	W _{pl,z}	1.1436e-03 m ³
c _y	1.5000e+02 mm	c _z	1.5000e+02 mm
d _y	3.6247e-13 mm	d _z	2.1606e-13 mm

Provjera na tlak

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 1.8887 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 5194.03 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{|-95.14 [\text{kN}]|}{5194.03 [\text{kN}]} = 0.02 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera na moment savijanja M_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2.3414 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3] \times 275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 643.89 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.13})$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 643.89 [\text{kNm}] \times \frac{1.00}{1.00} = 643.89 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.8})$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{643.89 [\text{kNm}]}{1.00 \times 1.00} = 643.89 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.10})$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{0.40 [\text{kNm}]}{643.89 [\text{kNm}]} = 0.00 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Provjera na posmik V_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.5637 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2482.77 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 2482.77 [\text{kN}] \times \frac{1.00}{1.00} = 2482.77 [\text{kN}] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{y,Ed}|}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{|448.98 [\text{kN}]|}{2482.77 [\text{kN}]} = 0.18 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na posmik V_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{3.9000 \cdot 10^{-3} [\text{m}^2] \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 619.21 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 619.21 [\text{kN}] \times \frac{1.00}{1.00} = 619.21 [\text{kN}] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{z,Ed}|}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{|-395.60 [\text{kN}]|}{619.21 [\text{kN}]} = 0.64 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na torziju

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.7 i formuli (6.23)

$$\tau_{fi,Ed} = |T_{Ed}| \times \tau_{Ed,unit} = |-1870.76| \times 6.639[\text{kN/m}^2] = 12.4[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{12.4[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.08} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.23})$$

Provjera na posmik V_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{y,fi,t,Rd} = \times V_{pl,y,Rd} = 0.97 \times 2482.77[\text{kN}] = 2403.83[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.26})$$

$$\frac{|V_{y,Ed}|}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{448.98[\text{kN}]}{2403.83[\text{kN}]} = \mathbf{0.19} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na posmik V_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{z,fi,t,Rd} = \times V_{pl,z,Rd} = 0.97 \times 619.21[\text{kN}] = 599.52[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.26})$$

$$\frac{|V_{z,Ed}|}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{|-395.60[\text{kN}]|}{599.52[\text{kN}]} = \mathbf{0.66} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Interakcija savijanja, uzdužne i posmične sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.9.1 & 6.2.8 i formuli (6.31),(6.30)

$$\rho_z = \left(\frac{2 \times |V_{z,Ed}|}{V_{pl,T,z,Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \times |-395.60[\text{kN}]|}{599.52[\text{kN}]} - 1 \right)^2 = 0.10$$

$$M_{V,y,fi,t,Rd} = \min \left\{ \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho_z \times (h_w \times t_w)^2}{4 \times t_w} \right] \times k_{y,\theta} \times f_y}{\gamma_{M,fi} \times \kappa_1 \times \kappa_2}, M_{y,fi,t,Rd} \right\}$$

$$= \min \left\{ \frac{\left[2.3414 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] - \frac{0.10 \times (2.5000 \cdot 10^2[\text{mm}] \times 1.3000 \cdot 10^1[\text{mm}])^2}{4 \times 1.3000 \cdot 10^1[\text{mm}]} \right] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]}{1.00 \times 1.00 \times 1.00}, 643.89[\text{kNm}] \right\}$$

$$= \min \{ 638.18[\text{kNm}], 643.89[\text{kNm}] \} = 638.18[\text{kNm}]$$

$$\frac{|M_{y,Ed}|}{M_{V,y,fi,t,Rd}} = \frac{0.40[\text{kNm}]}{638.18[\text{kNm}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.31})$$

Napomena: Pošto uzdužna sila zadovoljava oba kriterija (6.33) i (6.34) iz EN 1993-1-1, 6.2.9.1(4) njezin utjecaj na moment otpora oko y-y osi je zanemarena.

Element zadovoljava PROVJERU PRESJEKA.

....:PROVJERA STABILNOSTI:....

Klasifikacija za provjeru elementa na izvijanje

Napomena: Za ovaj presjek klasifikacija iz provjere poprečnog presjeka je također korištena za provjeru elementa na savijanje.

=> Presjek je klasificiran kao klasa 1 za provjeru elementa na savijanje.

Provjera elementa na izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 3.1033 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.200[\text{m}]^2} = 16120946.09[\text{kN}]$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.1266 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.200[\text{m}]^2} = 5845307.00[\text{kN}]$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{0.200[\text{m}]}{1.2818 \cdot 10^2[\text{mm}]} = 1.56$$

$$\lambda_z = \frac{l_{cr,z}}{i_z} = \frac{0.200[\text{m}]}{7.7234 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 2.59$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{1.56}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.02$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{2.59}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.03$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.02 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.02 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.03 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.03 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\varphi_y = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.02 - 0.00) + 0.02^2] = 0.51$$

$$\varphi_z = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.03 - 0.00) + 0.03^2] = 0.51$$

$$\chi_{y,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,y}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.02^2}}, \frac{1}{0.02^2}, 1 \right) = \min(0.99, 3103.74, 1) = 0.99 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$\chi_{z,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,z}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.03^2}}, \frac{1}{0.03^2}, 1 \right) = \min(0.98, 1125.39, 1) = 0.98 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.99 \times 1.8887 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 5138.59[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.98 \times 1.8887 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 5102.56[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \min(N_{b,y,fi,t,Rd}, N_{b,z,fi,t,Rd}) = \min(5138.59[\text{kN}], 5102.56[\text{kN}]) = 5102.56[\text{kN}]$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-95.14[\text{kN}]|}{5102.56[\text{kN}]} = 0.02 \leq 1.00$$

(EC3-1-2: 4.5)

Provjera elementa na torzijsko savijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

Napomena: Za ovaj I-presjek otpornost na torzijsko savijanje je veće od otpornosti izvijanja. Zato se rezultat provjere ovdje ne prikazuje.**Provjera na bočno torzijsko izvijanje**

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.11)

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{LT}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right] = 1.78$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.1266 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.200[\text{m}]^2}$$

$$\times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00}\right)^2 \times \frac{2.1270 \cdot 10^{-6}[\text{m}^6]}{1.1266 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]} + \frac{0.200[\text{m}]^2 \times 80769.2[\text{MPa}] \times 3.7657 \cdot 10^{-6}[\text{m}^4]}{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.1266 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]} + (0.00 \times 0.0000[\text{mm}] - 1.00 \times 3.1978 \cdot 10^{-13}[\text{mm}])^2} - (0.00 \times 0.0000[\text{mm}] - 1.00 \times 3.1978 \cdot 10^{-13}[\text{mm}]) \right] = 1425893.14[\text{kNm}]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2.3414 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 275.0[\text{MPa}]}{1425893.14[\text{kNm}]} = 0.02$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.02 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.02$$

$$\alpha_{LT} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{f_y}} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{275.0[\text{MPa}]} = 0.60$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.02^2}}, \frac{1}{0.02^2}, 1 \right) = \min(0.99, 2214.51, 1) = 0.99 \text{ (EC3-1-1: 6.57)}$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.99 \times 2.3414 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 635.77[\text{kNm}] \quad \text{(EC3-1-1: 6.55)}$$

$$\frac{|M_{y,total,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|0.40[\text{kNm}]|}{635.77[\text{kNm}]} = 0.00 \leq 1.00$$

(EC3-1-1: 6.54)

Napomena: C parametri su određeni prema ECCS 119 2006 / Galea 2002.**Provjera na interakciju savijanja i uzdužne tlačne sile**

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.5 i formuli (4.21a),(4.21b)

$$\chi_{min,fi} = \min(\chi_y, \chi_z) = \min(0.99, 0.98) = 0.98$$

$$\chi_{z,fi} = \min(\chi_{z,fi}, \chi) = \min(0.98, 1.00) = 0.98$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.02^2}}, \frac{1}{0.02^2}, 1 \right) = \min(0.99, 2214.51, 1) = 0.99$$

$$\beta_{M,y} = 1.8 - 0.7 \times \psi_y = 1.8 - 0.7 \times -0.01 = 1.80$$

$$\mu_y = \min [(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min (\lambda_{rel,\theta,y}, 1.1) + 0.44 \times \beta_{M,y} + 0.29, 0.8] = \min [(2 \times 1.80 - 5) \times \min (0.02, 1.1) + 0.44 \times 1.80 + 0.29, 0.8] \\ = \min [1.06, 0.8] = 0.80$$

$$k_y = \min \left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = \min \left(1 - \frac{0.80 \times 95.14[\text{kN}]}{0.99 \times 1.8887 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3 \right) = \min (0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,LT} = 1.8 - 0.7 \times \psi_{LT} = 1.8 - 0.7 \times -0.01 = 1.80$$

$$\mu_{LT} = \min (0.15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0.15, 0.9) = \min (0.15 \times 0.03 \times 1.80 - 0.15, 0.9) = \min (-0.14, 0.9) = -0.14$$

$$k_{LT} = \min \left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1 \right) = \min \left(1 - \frac{-0.14 \times 95.14[\text{kN}]}{0.98 \times 1.8887 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 1 \right) = \min (1.00, 1) = 1.00$$

(EC3-1-2: 4.21a)

$$\text{Unity check (4.21a)} = \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{min,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_y \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ = \frac{95.14[\text{kN}] \times 1.00}{0.98 \times 1.8887 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |0.40[\text{kNm}]| \times 1.00}{2.3414 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |0.00[\text{kNm}]| \times 1.00}{1.1436 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ = \mathbf{0.02 \leq 1.00}$$

(EC3-1-2: 4.21b)

$$\text{Unity check (4.21b)} = \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ = \frac{95.14[\text{kN}] \times 1.00}{0.98 \times 1.8887 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |0.40[\text{kNm}]| \times 1.00}{0.99 \times 2.3414 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |0.00[\text{kNm}]| \times 1.00}{1.1436 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ = \mathbf{0.02 \leq 1.00}$$

Provjera na posmično izbočavanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-5, 5 & 7.1 i formuli (5.10) & (7.1)

$$h_w/t = \frac{h_w}{t} = \frac{2.5000 \cdot 10^2[\text{mm}]}{1.3000 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 19.23$$

$$\text{limit } h_w/t = \frac{72 \times \varepsilon}{\eta} = \frac{72 \times 0.79}{1.20} = 47.15$$

Napomena: Vitkost ploče je takva da se efekti posmičnog izbočavanja mogu zanemariti

Prema EN 1993-1-5, 5.1(2).

Element zadovoljava PROVJERU STABILNOSTI.

EN 1993-1-2 PROVJERA OTPORNOSTI NA POŽAR - GREDA**Element B35 15.085 / 15.085 m I var****Kombinacija**

EN_GSN - Izvanredno / LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7

Parcijalni koeficijenti sigurnosti

γ_{M0} za otpornost poprečnog presjeka	1.00
γ_{M1} za otpornost na stabilnost	1.00
γ_{M2} za otpornost neto površine	1.25
$\gamma_{M,fi}$ za otpornost na požar	1.00

Materijal

Granica popuštanja f_y	275.0	MPa
Vlačna čvrstoća f_u	430.0	MPa
Proizvodnja	Zavareno	

Otpornost na požar

Provjera na otpornost prema EN 1993-1-2, 4.2.3

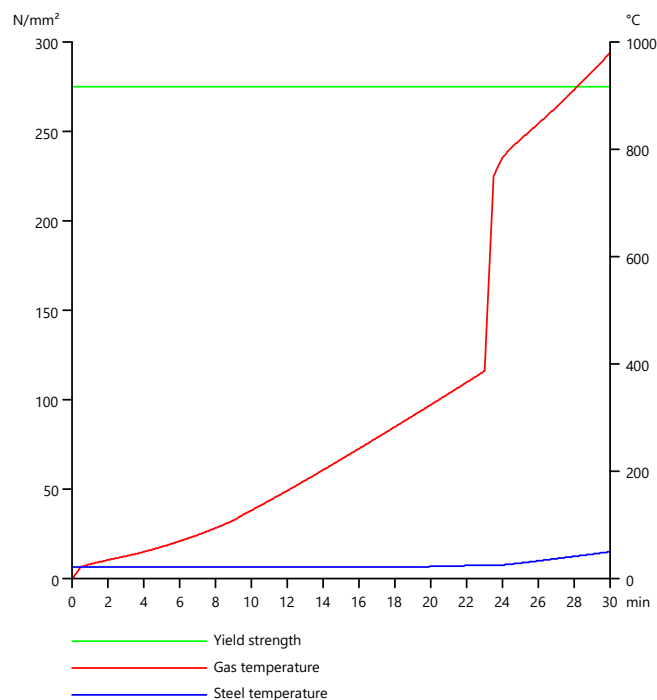
Otpornost na požar

Krivulja temperatura-vrijeme	Zasebno def.	
Koeficijent toplinske provodljivost konvekcijom α_c	25.00	W/m ² K
Zračenje požara u sektoru ϵ_f	1.00	
Zračenje površine konstrukcijskog elementa ϵ_m	0.70	
Konfiguracijski koeficijent za tok topline putem radijacije ϕ	1.00	
Tražena otpornost na požar R	30.00	min
Temperatura plina θ_g	980.54	°C
Temperatura materijala $\theta_{a,t}$	50.83	°C
Izloženost grede	Sve strane	
Faktor prilagodbe za poprečni presjek κ_1	1.00	
Faktor prilagodbe za gredu κ_2	1.00	
Koeficijent redukcije za granicu popuštanja $k_{y,\theta}$	1.00	
Koeficijent redukcije za E modul $k_{E,\theta}$	1.00	

Svojstva izolacije

Ime	Zaštita pločama	
Oblik zaštite	Kutijasti oblik	
Vrsta izolacije	Ploče	
Debljina d_p	2.5000e+01	mm
Gustoća ρ_p	835.0	kg/m ³
Toplinska provodljivost λ_p	1.8900e-01	W/mK
Specifični toplinski kapacitet c_p	1.7000e+00	J/gK
Faktor profila za zaštićene elemente A_p/V	7.9453e+01	1/m

Provjera prikazana u nastavku je izvršena za zahtijevano vrijeme $t = 30.00$ min.

Slika 73. Temperature plina i temperature čelika u stupu u vremenu t

...:PROVJERA PRESJEKA:...

Kritični presjek je na 15.085 m

Rezne sile

$N_{fi,Ed}$	-94.25	kN
$V_{y,fi,Ed}$	-5.07	kN
$V_{z,fi,Ed}$	-78.18	kN
$T_{fi,Ed}$	0.20	kNm
$M_{y,fi,Ed}$	-481.70	kNm
$M_{z,fi,Ed}$	-1.55	kNm

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija prema EN 1993-1-2, 4.2.2

Klasifikacija unutarnjih i isturenih dijelova prema EN 1993-1-1 Tablica 5.2

Id	Tip	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Klasa 1 Granica [-]	Klasa 2 Granica [-]	Klasa 3 Granica [-]	
1	SO	1.1525e+02	30	4.353e+04	4.486e+04	1.0	0.4	1.0	3.8	7.1	7.9	10.8	1
3	SO	1.1525e+02	30	4.274e+04	4.141e+04	1.0	0.4	1.0	3.8	7.1	7.9	11.0	1
4	I	9.3600e+02	15.5	3.981e+04	-3.426e+04	-0.9		0.5	60.4	55.0	63.4	85.5	2
5	SO	1.1525e+02	30	-3.799e+04	-3.931e+04								
7	SO	1.1525e+02	03	-3.719e+04	-3.587e+04								

Poprečni presjek je klase 2

Svojstva presjeka

A	3.3982e-02 m ²		
A _y /A	0.52	A _z /A	0.48
I _y	6.0888e-03 m ⁴	I _z	1.3545e-04 m ⁴
I _{yz}	4.7705e-18 m ⁴	I _t	7.2303e-06 m ⁴
I _w	3.5113e-05 m ⁶		
W _{el,y}	1.1598e-02 m ³	W _{el,z}	9.0298e-04 m ³
W _{pl,y}	1.3290e-02 m ³	W _{pl,z}	1.4183e-03 m ³
c _y	1.5000e+02 mm	c _z	5.2500e+02 mm
d _y	6.0905e-13 mm	d _z	5.4575e-13 mm

Provjera na tlak

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{fi,t,Rd} = A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 3.3982 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 9345.16 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{fi,t,Rd}} = \frac{|-94.25 [\text{kN}]|}{9345.16 [\text{kN}]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera na moment savijanja M_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.3290 \cdot 10^{-2} [\text{m}^3] \times 275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 3654.61 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.13})$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 3654.61 [\text{kNm}] \times \frac{1.00}{1.00} = 3654.61 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.8})$$

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{3654.61 [\text{kNm}]}{1.00 \times 1.00} = 3654.61 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.10})$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,fi,t,Rd}} = \frac{-481.70 [\text{kNm}]}{3654.61 [\text{kNm}]} = 0.13 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Provjera na moment savijanja M_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.10)

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.4183 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3] \times 275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 390.03 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.13})$$

$$M_{z,fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times M_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 390.03 [\text{kNm}] \times \frac{1.00}{1.00} = 390.03 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.8})$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{390.03 [\text{kNm}]}{1.00 \times 1.00} = 390.03 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.10})$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,fi,t,Rd}} = \frac{-1.55 [\text{kNm}]}{390.03 [\text{kNm}]} = 0.00 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Provjera na posmik V_y

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.8637 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2959.08 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$V_{y,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,y,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 2959.08 [\text{kN}] \times \frac{1.00}{1.00} = 2959.08 [\text{kN}] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{y,Ed}|}{V_{y,fi,t,Rd}} = \frac{|-5.07[\text{kN}]|}{2959.08[\text{kN}]} = \mathbf{0.00} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na posmik V_z

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.16)

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.8414 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2923.62[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$V_{z,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl,z,Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 2923.62[\text{kN}] \times \frac{1.00}{1.00} = 2923.62[\text{kN}] \quad (4.16)$$

$$\frac{|V_{z,Ed}|}{V_{z,fi,t,Rd}} = \frac{|-78.18[\text{kN}]|}{2923.62[\text{kN}]} = \mathbf{0.03} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.16})$$

Provjera na torziju

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.7 i formuli (6.23)

$$\tau_{fi,Ed} = |T_{Ed}| \times \tau_{Ed,unit} = |200.50| \times 4.149[\text{kN}/\text{m}^2] = 0.8[\text{MPa}]$$

$$\tau_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \tau_{Rd} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1.00 \times 158.8[\text{MPa}] \times \frac{1.00}{1.00} = 158.8[\text{MPa}]$$

$$\frac{\tau_{fi,Ed}}{\tau_{fi,t,Rd}} = \frac{0.8[\text{MPa}]}{158.8[\text{MPa}]} = \mathbf{0.01} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.23})$$

Napomena: Provjera na torziju je manja od granične vrijednosti od 0.05. Zato se utjecaj torzije smatra malenim te se zanemaruje u interakcijskim provjerama.

Interakcija savijanja, uzdužne i posmične sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-1, 6.2.9.1 i formuli (6.41)

$$M_{y,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{3654.61[\text{kNm}]}{1.00 \times 1.00} = 3654.61[\text{kNm}]$$

$$\alpha = 2.00$$

$$M_{z,fi,t,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}}{\kappa_1 \times \kappa_2} = \frac{390.03[\text{kNm}]}{1.00 \times 1.00} = 390.03[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.35})$$

$$\beta = 1.00$$

$$\left(\frac{|M_{y,Ed}|}{M_{y,fi,t,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{|M_{z,Ed}|}{M_{z,fi,t,Rd}} \right)^\beta = \left(\frac{|-481.70[\text{kNm}]|}{3654.61[\text{kNm}]} \right)^{2.00} + \left(\frac{|-1.55[\text{kNm}]|}{390.03[\text{kNm}]} \right)^{1.00} = \mathbf{0.02} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-2: 4.9})$$

Napomena: Pošto je posmična sila manja od polovične vrijednosti iznosa plastične posmične otpornosti njezin utjecaj na moment otpornosti je zanemaren.

Napomena: Pošto uzdužna sila zadovoljava oba kriterija (6.33) i (6.34) iz EN 1993-1-1, 6.2.9.1(4) njezin utjecaj na moment otpora oko y-y osi je zanemarena.

Napomena: Pošto uzdužna sila zadovoljava kriterij (6.35) iz EN 1993-1-1, 6.2.9.1(4) njezin utjecaj na moment otpora oko z-z osi je zanemaren.

Element zadovoljava PROVJERU PRESJEKA.

...:PROVJERA STABILNOSTI:...:

Klasifikacija za provjeru elementa na izvijanje

Napomena: Za ovaj presjek klasifikacija iz provjere poprečnog presjeka je također korištena za provjeru elementa na savijanje.

=> Presjek je klasificiran kao klasa 2 za provjeru elementa na savijanje.

Provjera elementa na izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{l_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 6.0888 \cdot 10^{-3}[\text{m}^4]}{14.194[\text{m}]^2} = 62642.20[\text{kN}]$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.3545 \cdot 10^{-4}[\text{m}^4]}{0.185[\text{m}]^2} = 8214489.81[\text{kN}]$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{14.194[\text{m}]}{4.2329 \cdot 10^2[\text{mm}]} = 33.53$$

$$\lambda_z = \frac{l_{cr,z}}{i_z} = \frac{0.185[\text{m}]}{6.3133 \cdot 10^1[\text{mm}]} = 2.93$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{33.53}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.39$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{2.93}{\pi \times \sqrt{\frac{210000.0[\text{MPa}]}{275.0[\text{MPa}]}}} = 0.03$$

$$\lambda_{rel,\theta,y} = \lambda_{rel,y} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.39 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.39 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\lambda_{rel,\theta,z} = \lambda_{rel,z} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.03 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 0.03 \quad (\text{EC3-1-2: 4.7})$$

$$\varphi_y = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,y} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,y}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.39 - 0.00) + 0.39^2] = 0.69$$

$$\varphi_z = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{rel,\theta,z} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel,\theta,z}^2] = 0.5 \times [1 + 0.60 \times (0.03 - 0.00) + 0.03^2] = 0.51$$

$$\chi_{y,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{rel,\theta,y}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,y}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.69 + \sqrt{0.69^2 - 0.39^2}}, \frac{1}{0.39^2}, 1 \right) = \min(0.79, 6.70, 1) = 0.79 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$\chi_{z,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{rel,\theta,z}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta,z}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.03^2}}, \frac{1}{0.03^2}, 1 \right) = \min(0.98, 879.01, 1) = 0.98 \quad (\text{EC3-1-2: 4.6})$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \chi_{y,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.79 \times 3.3982 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 7398.23[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.98 \times 3.3982 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00} = 9159.32[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \min(N_{b,y,fi,t,Rd}, N_{b,z,fi,t,Rd}) = \min(7398.23[\text{kN}], 9159.32[\text{kN}]) = 7398.23[\text{kN}]$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-94.25[\text{kN}]|}{7398.23[\text{kN}]} = 0.01 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera elementa na torzijsko savijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.2 i formuli (4.5)

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \times \left(G \times I_t + \frac{\pi^2 \times E \times I_w}{l_{cr}^2} \right) = \frac{1}{4.2797 \cdot 10^2 [\text{mm}]^2} \times \left(80769.2 [\text{MPa}] \times 7.2303 \cdot 10^{-6} [\text{m}^4] + \frac{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 3.5113 \cdot 10^{-5} [\text{m}^6]}{15.085 [\text{m}]^2} \right) = 4934.45 [\text{kN}]$$

$$\lambda_{rel,T} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3.3982 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 275.0 [\text{MPa}]}{4934.45 [\text{kN}]} = 1.38$$

$$\lambda_{rel,\theta} = \lambda_{rel,T} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.38 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 1.38$$

$$\chi_{fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_{rel,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.86 + \sqrt{1.86^2 - 1.38^2}}, \frac{1}{1.38^2}, 1 \right) = \min(0.32, 0.53, 1) = 0.32$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.32 \times 3.3982 \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 3002.71 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.47})$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-94.25[\text{kN}]|}{3002.71[\text{kN}]} = 0.03 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-2: 4.5})$$

Provjera na bočno torzijsko izvijanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.3 i formuli (4.11)

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{cr}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{cr}^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_y)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_y) \right] = 2.73$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.3545 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]}{15.085 [\text{m}]^2}$$

$$\times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \times \frac{3.5113 \cdot 10^{-5} [\text{m}^6]}{1.3545 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + \frac{15.085 [\text{m}]^2 \times 80769.2 [\text{MPa}] \times 7.2303 \cdot 10^{-6} [\text{m}^4]}{\pi^2 \times 210000.0 [\text{MPa}] \times 1.3545 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4]} + (0.26 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times -8.2535 \cdot 10^{-13} [\text{mm}])^2} - (0.26 \times 0.0000 [\text{mm}] - 1.00 \times -8.2535 \cdot 10^{-13} [\text{mm}]) \right] = 2884.91 [\text{kNm}]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1.3290 \cdot 10^{-2} [\text{m}^3] \times 275.0 [\text{MPa}]}{2884.91 [\text{kNm}]} = 1.13$$

$$\lambda_{rel,LT,\theta} = \lambda_{rel,LT} \times \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.13 \times \sqrt{\frac{1.00}{1.00}} = 1.13$$

$$\alpha_{LT} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{f_y}} = 0.65 \times \sqrt{\frac{235000000}{275.0 [\text{MPa}]} = 0.60$$

$$\chi_{LT,fi} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.47 + \sqrt{1.47^2 - 1.13^2}}, \frac{1}{1.13^2}, 1 \right) = \min(0.41, 0.79, 1) = 0.41 \quad (\text{EC3-1-1: 6.57})$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.41 \times 1.3290 \cdot 10^{-2} [\text{m}^3] \times 1.00 \times \frac{275.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 1510.47 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.55})$$

$$\frac{|M_{y,total,Ed}|}{M_{b,fi,t,Rd}} = \frac{|-481.70 [\text{kNm}]|}{1510.47 [\text{kNm}]} = 0.32 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.54})$$

Napomena: C parametri su određeni prema ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Provjera na interakciju savijanja i uzdužne tlačne sile

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3.5 i formuli (4.21a),(4.21b)

$$\chi_{\min,fi} = \min(\chi_y, \chi_z) = \min(0.79, 0.32) = 0.32$$

$$\chi_{z,fi} = \min(\chi_{z,fi}, \chi) = \min(0.98, 0.32) = 0.32$$

$$\chi_{LT,fi} = \min\left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT,\theta}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,LT,\theta}^2}, 1\right) = \min\left(\frac{1}{1.47 + \sqrt{1.47^2 - 1.13^2}}, \frac{1}{1.13^2}, 1\right) = \min(0.41, 0.79, 1) = 0.41$$

$$\beta_{M,y} = 1.8 - 0.7 \times \psi_y + \frac{M_{Q,y} \times [\beta_{M,Q} - (1.8 - 0.7 \times \psi_y)]}{\delta, M_y} = 1.8 - 0.7 \times 0.00 + \frac{144.15[\text{kNm}] \times [1.30 - (1.8 - 0.7 \times 0.00)]}{485.17[\text{kNm}]} = 1.65$$

$$\mu_y = \min[(2 \times \beta_{M,y} - 5) \times \min(\lambda_{rel,\theta,y}, 1.1) + 0.44 \times \beta_{M,y} + 0.29, 0.8] = \min[(2 \times 1.65 - 5) \times \min(0.39, 1.1) + 0.44 \times 1.65 + 0.29, 0.8] = \min[0.36, 0.8] = 0.36$$

$$k_y = \min\left(1 - \frac{\mu_y \times N_{Ed}}{\chi_y \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3\right) = \min\left(1 - \frac{0.36 \times 94.25[\text{kN}]}{0.79 \times 3.3982 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3\right) = \min(1.00, 3) = 1.00$$

$$\beta_{M,z} = 1.8 - 0.7 \times \psi_z = 1.8 - 0.7 \times 0.40 = 1.52$$

$$\mu_z = \min[(1.2 \times \beta_{M,z} - 3) \times \lambda_{rel,\theta,z} + 0.71 \times \beta_{M,z} - 0.29, 0.8] = \min[(1.2 \times 1.52 - 3) \times 0.03 + 0.71 \times 1.52 - 0.29, 0.8] = \min[0.75, 0.8] = 0.75$$

$$k_z = \min\left(1 - \frac{\mu_z \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3\right) = \min\left(1 - \frac{0.75 \times 94.25[\text{kN}]}{0.98 \times 3.3982 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 3\right) = \min(0.99, 3) = 0.99$$

$$\beta_{M,LT} = 1.8 - 0.7 \times \psi_{LT} + \frac{M_{Q,LT} \times [\beta_{M,Q} - (1.8 - 0.7 \times \psi_{LT})]}{\delta, M_{LT}} = 1.8 - 0.7 \times 0.00 + \frac{144.15[\text{kNm}] \times [1.30 - (1.8 - 0.7 \times 0.00)]}{485.17[\text{kNm}]} = 1.65$$

$$\mu_{LT} = \min(0.15 \times \lambda_{rel,\theta,z} \times \beta_{M,LT} - 0.15, 0.9) = \min(0.15 \times 0.03 \times 1.65 - 0.15, 0.9) = \min(-0.14, 0.9) = -0.14$$

$$k_{LT} = \min\left(1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{Ed}}{\chi_z \times A \times k_{y,\theta} \times \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1\right) = \min\left(1 - \frac{-0.14 \times 94.25[\text{kN}]}{0.98 \times 3.3982 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times \frac{275.0[\text{MPa}]}{1.00}}, 1\right) = \min(1.00, 1) = 1.00$$

(EC3-1-2: 4.21a)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21a)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{\min,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_y \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{94.25[\text{kN}] \times 1.00}{0.32 \times 3.3982 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-481.70[\text{kNm}]| \times 1.00}{1.3290 \cdot 10^{-2}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-1.55[\text{kNm}]| \times 1.00}{1.4183 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.17 \leq 1.00} \end{aligned}$$

(EC3-1-2: 4.21b)

$$\begin{aligned} \text{Unity check (4.21b)} &= \frac{|N_{fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{z,fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_{LT} \times |M_{y,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{\chi_{LT,fi} \times W_{pl,y} \times k_{y,\theta} \times f_y} + \frac{k_z \times |M_{z,fi,Ed}| \times \gamma_{M,fi}}{W_{pl,z} \times k_{y,\theta} \times f_y} \\ &= \frac{94.25[\text{kN}] \times 1.00}{0.32 \times 3.3982 \cdot 10^{-2}[\text{m}^2] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{1.00 \times |-481.70[\text{kNm}]| \times 1.00}{0.41 \times 1.3290 \cdot 10^{-2}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} + \frac{0.99 \times |-1.55[\text{kNm}]| \times 1.00}{1.4183 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 1.00 \times 275.0[\text{MPa}]} \\ &= \mathbf{0.35 \leq 1.00} \end{aligned}$$

Provjera na posmično izbočavanje

Prema EN 1993-1-2, 4.2.3

Prema EN 1993-1-5, 5 & 7.1 i formuli (5.10) & (7.1)

$$h_w/t = \frac{h_w}{t} = \frac{9.9000 \cdot 10^2 [\text{mm}]}{1.5500 \cdot 10^1 [\text{mm}]} = 63.87$$

$$\text{limit } h_w/t = \frac{72 \times \varepsilon}{\eta} = \frac{72 \times 0.79}{1.20} = 47.15$$

$$\lambda_{w,\theta} = \frac{h_w}{86.4 \times t \times \varepsilon} \times = \frac{9.9000 \cdot 10^2 [\text{mm}]}{86.4 \times 1.5500 \cdot 10^1 [\text{mm}] \times 0.79} \times 0.85 = 0.80 \quad (\text{EC3-1-5: 5.5})$$

$$\chi_{w,\theta} = \frac{0.83}{\lambda_w} = \frac{0.83}{0.80} = 1.04$$

$$V_{b,f,i,t,Rd} = \frac{\chi_w \times f_{yw} \times h_w \times t}{\sqrt{3} \times \gamma_{M,fi}} = \frac{1.04 \times 275.0 [\text{MPa}] \times 9.9000 \cdot 10^2 [\text{mm}] \times 1.5500 \cdot 10^1 [\text{mm}]}{\sqrt{3} \times 1.00} = 2528.69 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-5: 5.2})$$

$$M_{f,i,t,Rd} = \frac{h_f \times A_{f2} \times f_{y2} \times k_{y,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \times = \frac{1.0200 \cdot 10^3 [\text{mm}] \times 9.0000 \cdot 10^3 [\text{mm}^2] \times 275.0 [\text{MPa}] \times 1.00}{1.00} \times 0.98 = 2476.43 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-5: 5.9})$$

$$c = a \times \left(0.25 + \frac{1.6 \times b_f \times t_f^2 \times f_{yf}}{t \times h_w^2 \times f_{yw}} \right) = 15.085 [\text{m}] \times \left(0.25 + \frac{1.6 \times 3.0000 \cdot 10^2 [\text{mm}] \times 3.0000 \cdot 10^1 [\text{mm}]^2 \times 275.0 [\text{MPa}]}{1.5500 \cdot 10^1 [\text{mm}] \times 9.9000 \cdot 10^2 [\text{mm}]^2 \times 275.0 [\text{MPa}]} \right) = 4.200 [\text{m}]$$

(EC3-1-5: 5.8)

$$V_{b,f,i,t,Rd} = \frac{b_f \times t_f^2 \times f_{yf}}{c \times \gamma_{M,fi}} \times \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{3.0000 \cdot 10^2 [\text{mm}] \times 3.0000 \cdot 10^1 [\text{mm}]^2 \times 275.0 [\text{MPa}]}{4.200 [\text{m}] \times 1.00} \times \left[1 - \left(\frac{-481.70 [\text{kNm}]}{2476.43 [\text{kNm}]} \right)^2 \right] = 17.01 [\text{kN}]$$

$$V_{b,f,i,t,Rd,limit} = \frac{\eta \times f_{yw} \times h_w \times t}{\sqrt{3} \times \gamma_{M,fi}} = \frac{1.20 \times 275.0 [\text{MPa}] \times 9.9000 \cdot 10^2 [\text{mm}] \times 1.5500 \cdot 10^1 [\text{mm}]}{\sqrt{3} \times 1.00} = 2923.62 [\text{kN}]$$

(EC3-1-5: 5.1)

$$V_{b,f,i,t,Rd} = \min (V_{b,Rd} + V_{b,f,Rd}, V_{b,Rd,limit}) = \min (2528.69 [\text{kN}] + 17.01 [\text{kN}], 2923.62 [\text{kN}]) = \min (2545.69 [\text{kN}], 2923.62 [\text{kN}]) = 2545.69 [\text{kN}]$$

$$M_{pl,f,i,t,Rd} = 3654.61 [\text{kNm}]$$

$$\eta_{3,bar} = \frac{|V_{Ed}|}{V_{b,Rd}} = \frac{|-78.18 [\text{kN}]|}{2528.69 [\text{kN}]} = 0.03$$

$$\text{Unity check} = \frac{|V_{Ed}|}{V_{b,Rd}} = \frac{|-78.18 [\text{kN}]|}{2545.69 [\text{kN}]} = \mathbf{0.03} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-5: 5.10})$$

Napomena: Interakciju između savijanja i posmičnog izbočavanja ne treba provjeriti jer je iskoristivost na posmik manja od 0.5.

Element zadovoljava PROVJERU STABILNOSTI.

7.4.2 Model s trozglobnim okvirom – GSN – osnovna kombinacija

Ime	Tip	Kombinacija
EN_GSN/1	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar10
EN_GSN/2	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar2
EN_GSN/3	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 1.50*LC4 + 0.90*Vjetar6
EN_GSN/4	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar6
EN_GSN/5	Stalna / Prolazna	1.35*LC1 + 1.35*LC2 + 1.35*LC3 + 0.75*LC4 + 1.50*Vjetar14

Tablica 32. Mjerodavne kombinacije– trozglobni okvir GSN

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B95	10.000+	EN_GSN/5	Bocni sekundarci - IPE2200	S 235	0.64
B36	0.100+	EN_GSN/1	Greda - HEB400	S 275	0.98
B139	7.828	EN_GSN/2	Hor dijagonala - RD24	S 235	0.95
B63	51.000-	EN_GSN/2	Podroznica - IPE220	S 235	0.87
B56	5.900+	EN_GSN/1	Stup1 - HEA220	S 275	0.88
B37	6.000	EN_GSN/1	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	S 275	0.89
B142	8.485	EN_GSN/4	Ver dijagonala - RD18	S 235	0.94

Tablica 33. Iskoristivost poprečnih presjeka– trozglobni okvir GSN

7.4.3 Model s trozglobnim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar12
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar4
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar11
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar3

Tablica 34. Mjerodavne kombinacije– trozglobni okvir P zaštita

Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B32	0.100-	EN_GSN - Izvanredno/8	Greda - HEB400	S 275	0.96
B131	7.765	EN_GSN - Izvanredno/12	Hor dijagonala - RD60	S 275	0.98
B66	0.000	EN_GSN - Izvanredno/9	Podroznica - IPE220	S 235	0.98
B59	0.200-	EN_GSN - Izvanredno/2	Stup1 - HEA240	S 275	0.89
B33	5.900+	EN_GSN - Izvanredno/8	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	S 275	0.93
B144	8.485	EN_GSN - Izvanredno/3	Ver dijagonala - RD52	S 275	0.98

Tablica 35. Iskoristivost poprečnih presjeka– trozglobni okvir P zaštita

7.4.4 Model s trozglobnim okvirom zaštićen P protupožarnom zaštitom – Požarna kombinacija – bez temperaturnog djelovanja

Ime	Kombinacija
EN_GSN - Izvanredno/1	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/2	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/3	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/4	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4
EN_GSN - Izvanredno/5	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*LC4 + LC7
EN_GSN - Izvanredno/6	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/7	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar14
EN_GSN - Izvanredno/8	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/9	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC6
EN_GSN - Izvanredno/10	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*LC5
EN_GSN - Izvanredno/11	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar10
EN_GSN - Izvanredno/12	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar13
EN_GSN - Izvanredno/13	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar2
EN_GSN - Izvanredno/14	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar5
EN_GSN - Izvanredno/15	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar9
EN_GSN - Izvanredno/16	LC1 + LC2 + LC3 + LC7 + 0.20*Vjetar1
EN_GSN - Izvanredno/17	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar6
EN_GSN - Izvanredno/18	LC1 + LC2 + LC3 + 0.20*Vjetar14

Tablica 36. Mjerodavne kombinacije– trozglobni okvir P zaštita, bez temp. istezanja

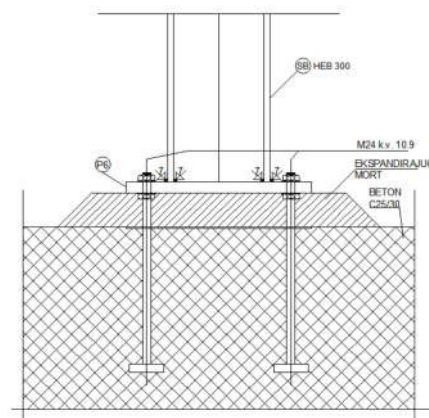
Ime	dx [m]	Komb.	Poprečni presjek	Materijal	UC _{Iskorist} [-]
B48	0.000	EN_GSN - Izvanredno/6	Greda - HEB400	S 275	0.42
B138	0.000	EN_GSN - Izvanredno/4	Hor dijagonala - RD24	S 235	0.28
B63	50.500	EN_GSN - Izvanredno/4	Podroznica - IPE220	S 235	0.42
B58	7.067	EN_GSN - Izvanredno/4	Stup1 - HEA220	S 275	0.50
B49	6.000	EN_GSN - Izvanredno/1	Stup2 - I var (HEA600; 3.0000e+02)	S 275	0.44
B144	8.485	EN_GSN - Izvanredno/8	Ver dijagonala - RD18	S 235	0.11

Tablica 37. Iskoristivost poprečnih presjeka– trozglobni okvir P zaštita, bez temp. istezanja

8. DISKUSIJA REZULTATA

Različiti parametri različito utječu na temperature požarnog odjeljka te samim time i na dimenzioniranje i odabir profila konstrukcije. Samo požarno opterećenje znatno varira s drugačijim odabirom npr. vrste i raspodjele (površine i visine) goriva, maksimalnoj rati oslobađanja topline (RHRf) ili vremena potrebnog za dostizanje rate oslobađanja topline od 1MW. Uz to i različiti geometrijski podaci znatno utječu na razvoj požara kao što su dimenzije požarnog sektora te dimenzija i položaja otvora.

Također i modeliranje konstrukcije ima utjecaj na rezultate. Odabir vrste veza, način izračuna duljine izvijanja tlačnog elementa, način pridržanja gornje pojasnice samo su neki od parametara modeliranja s čijim variranjem utječemo na rezultate. Za primjer možemo navesti modeliranje veze stup-temelj. Jedan od češćih rješenja ovog spoja je u obliku sidrenih vijaka. Na slici ispod je shematski prikazan jedan primjer ovog spoja.



Slika 74. Spoj stup-temelj u obliku sidrenih vijaka

Variranjem položaja i broja vijaka ovaj priključak se može smatrati potpuno krutim, djelomično popustljivim ili zglobnim. U slučaju pozicioniranja dvaju vijaka u središte stupa u smjeru okomitom na ravninu vijaka se veza može smatrati zglobnom dok je u drugom smjeru upeta. No kada se odaberu 4 vijaka na dovoljno velikoj udaljenosti sa dovoljno velikom duljinom sidrenja tada se veza može smatrati upetom u oba smjera.

Pošto je tema ovog rada analiza različitih statičkih sustava tijekom izrade ovog rada svi ovi prethodno spomenuti parametri uz još druge nespomenute su se držali konstantnim za sve modele te se proučavao samo utjecaj brojeva stupnja slobode okvira konstrukcije na količinu čelika. U nastavku su prikazani rezultati dimenzioniranja u obliku potrebne količine čelika po m² za izradu hale.

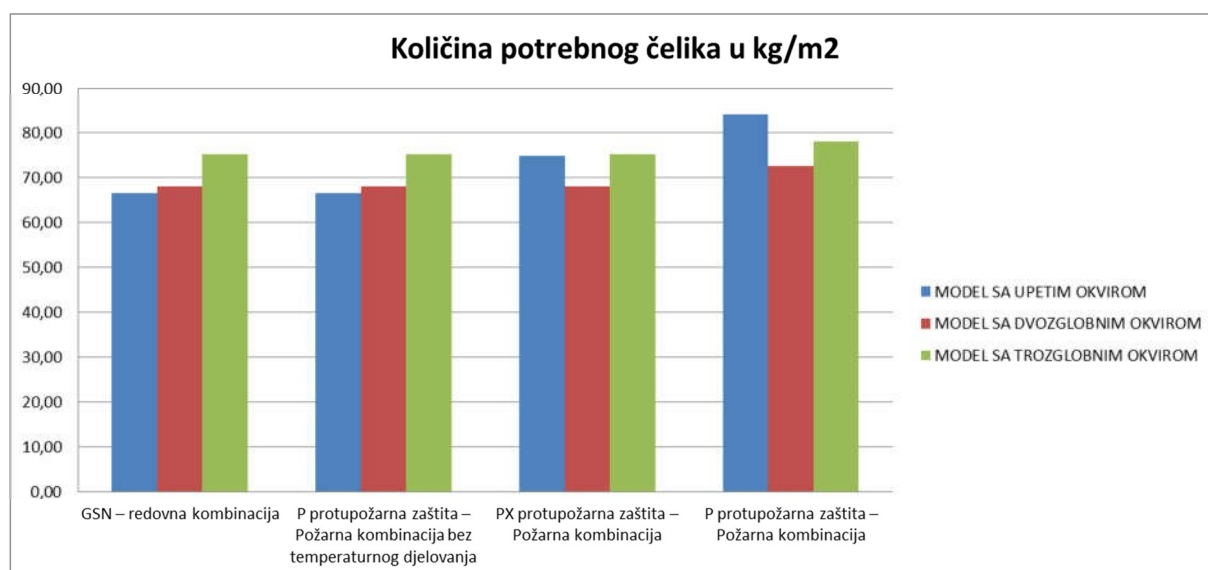
MODEL S UPETIM OKVIROM				
	Količina	Količina po m ²	Razlika u odnosu na GSN	Razlika po m ²
GSN – osnovna kombinacija	119597,00	66,44	-	-
P protupožarna zaštita – Požarna kombinacija bez temperaturnog djelovanja	119597,00	66,44	0,00	0,00
PX protupožarna zaštita – Požarna kombinacija	134756,60	74,86	15159,60	8,42
P protupožarna zaštita – Požarna kombinacija	151219,30	84,01	31622,30	17,57

MODEL S DVOZGLOBNIM OKVIROM				
	Količina	Količina po m ²	Razlika u odnosu na GSN	Razlika po m ²
GSN – osnovna kombinacija	122458,00	68,03	-	-
P protupožarna zaštita – Požarna kombinacija bez temperaturnog djelovanja	122458,00	68,03	0,00	0,00
PX protupožarna zaštita – Požarna kombinacija	122458,00	68,03	0,00	0,00
P protupožarna zaštita – Požarna kombinacija	130740,70	72,63	8282,70	4,60

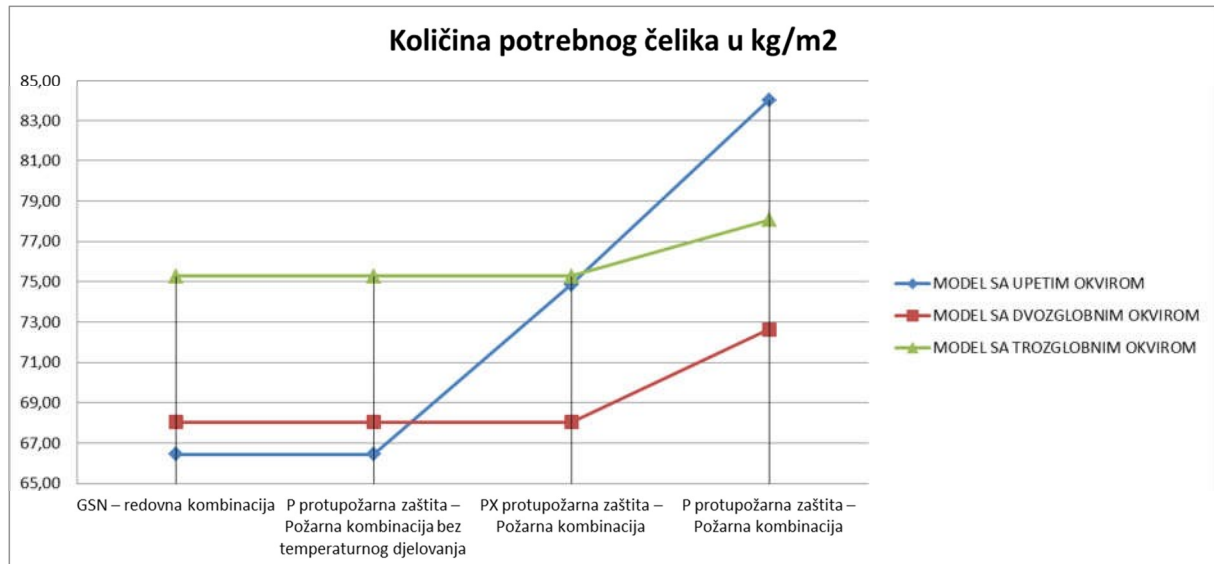
MODEL S TROZGLOBNIM OKVIROM				
	Količina	Količina po m ²	Razlika u odnosu na GSN	Razlika po m ²
GSN – osnovna kombinacija	135515,50	75,29	-	-
P protupožarna zaštita – Požarna kombinacija bez temperaturnog djelovanja	135515,50	75,29	0,00	0,00
PX protupožarna zaštita – Požarna kombinacija	135515,50	75,29	0,00	0,00
P protupožarna zaštita – Požarna kombinacija	140518,90	78,07	5003,40	2,78

Tablica 38. Količine potrebnog čelika – usporedba

Ovi rezultati se mogu prikazati i u obliku grafa:

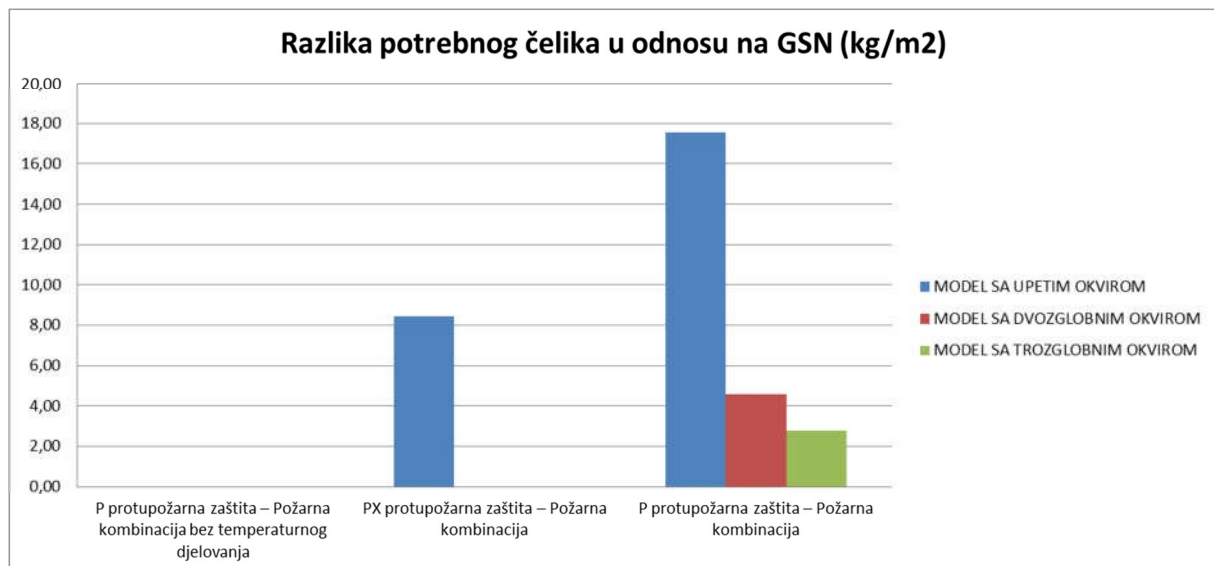


Slika 75. Količina potrebnog čelika – usporedba statičkih sustava sa različitim protupožarnom zaštitom

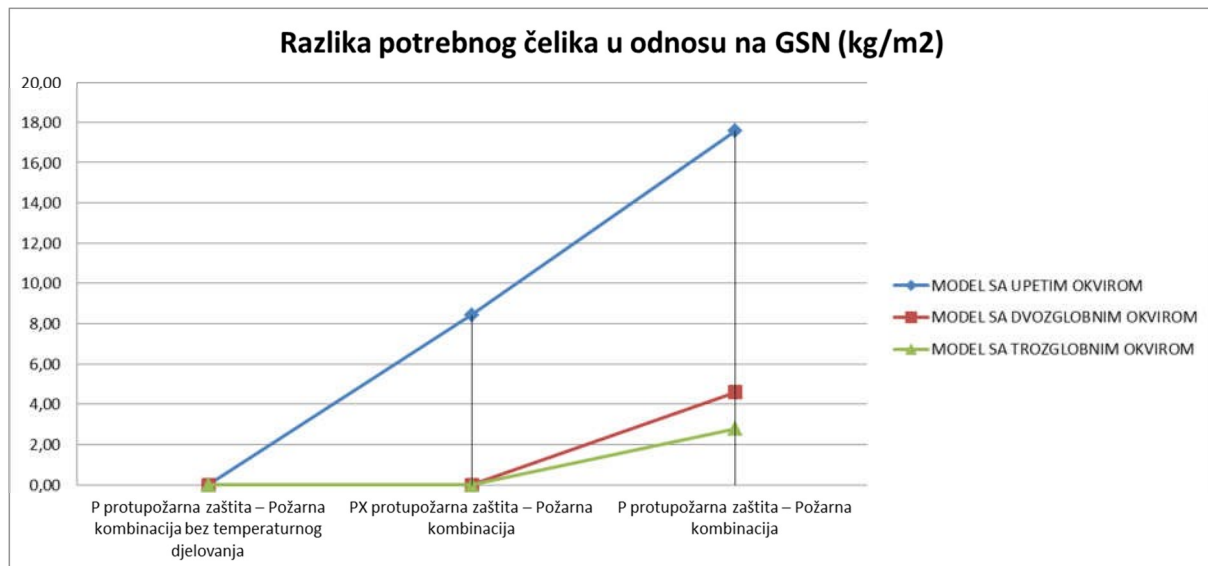


Slika 76. Prikaz prirasta količine potrebnog čelika smanjenjem protupožarne zaštite za različite statičke sustave

U prethodnom grafu se za GSN – redovnu kombinaciju može uočiti različita potrebna količina čelika za različite statičke sustave. Da bi se lakše analiziralo različito ponašanje statičkih sustava na požarno opterećenje prikazana je razlika (dodatna količina) potrebnog čelika kod izvanredne (požarne) kombinacije u odnosu na GSN redovnu kombinaciju:



Slika 77. Razlika potrebnog čelika kod izvanredne (požarne) komb. u odnosu na GSN redovnu komb. – usporedba statičkih sustava sa različitim protupožarnom zaštitom

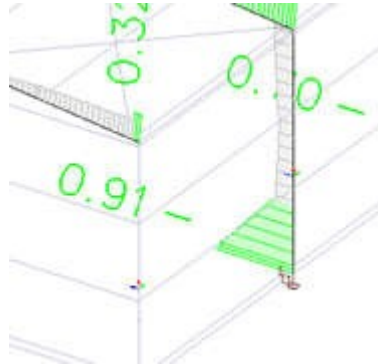


Slika 78. Prikaz prirasta razlike količine potrebnog čelika smanjenjem protupožarne zaštite za različite statičke sustave kod izvanredne (požarne) komb. u odnosu na GSN redovnu komb

Iz ovog grafa se može uočiti kako kod modela kod kojih požarno opterećenje nije modelirano sa dodatnim toplinskim istežanjem (nastalog zbog temperature u čeliku tijekom požara) nema dodatnog povećanja reznih sila te nema dodatne potrebne količine čelika. Razlike nema zbog vrlo male temperature u čeličnim profilima za zadano požarno opterećenje koje iznosi otprilike oko 130°C. Na ovoj temperaturi još ne dolazi većih gubitaka svojstava materijala (čelika) pa samim time prethodno određeni čelični profili zadovoljavaju nosivost i u požarnoj kombinaciji.

Također se iz grafova može vidjeti utjecaj debljine protupožarne zaštite. Kod modela sa debljom zaštitom (PX - ploče debljine 25mm) ili gotovo da nema ili je mala potreba za ojačanjem (povećanjem) profila čelika u odnosu na model sa slabijom zaštitom (P - ploče debljine 12mm). Ova razlika se također može objasniti preko temperature čelika tijekom požara. Kod deblje zaštite temperatura unutar čelika je mala, oko 50°C a u slučaju tanje zaštite ona je oko 130°C. Zbog ovoga dolazi do varijacije u svojstvima čelika (pri većim temperaturama oni opadaju) te u toplinskom istežanju koji daje veće rezne sile sa većom temperaturom a samim time i veće potrebne profile.

Djelovanje požara na upeti model je izraženije u odnosu na dvozglobne i trozglobne okvire. Manji broj stupnjeva slobode u upetom okviru daje veće rezne sile zbog temperaturnog istežanja. Ovo se najviše izrazilo pri dnu stupa, na spoju stupa-temelja gdje dolazi do pojave velikog momenta zbog čega se moralo odabrati osjetno veći profil stupa. Pri odabiru većeg profila dobar dio gornje polovice stupa je ostao slabo iskorišten što je na kraju znatno doprinijelo povećanju potrebne količine čelika kod ovog modela.



Slika 79. Iskoristivost stupa kod upetog okvira

Kod dvozglobnog i trozglobnog modela rezne sile odnosno čelični profili pri temperaturnom djelovanju požara su manji jer konstrukcija, zbog većeg broja stupnjeva slobode, lakše „diše“ odnosno temperaturno isteže.

9. ZAKLJUČAK

Za predmetne konstrukcije na kojoj je provedena požarna analiza primjenom realnog požara, uočena je velika razlika između različitih statičkih sustava okvira hale.

Upeti okvir se pokazao kao najlošije rješenje za konstrukciju hale u uvjetima požarnog djelovanja. Da bi se zadovoljila nosivost na požarnu kombinaciju daleko je potrebna veća količina čelika kod upetog okvira nego kod dvozglobnih i trozglobnih okvira.

Kao jedno od dobrih rješenja se preporuča korištenje zglobnih veza stup-temelj pošto se pokazalo da su se upravo na ovom mjestu javljale velike rezne sile kod upetog okvira te samim time i veće potrebne količine čelika.

Nadalje, tijekom analiza različitih tipova konstrukcije uočeno je kako količina potrebnog čelika jako varira s obzirom na zadavanje temperaturnog istezanja nastalog požarnim djelovanjem. Ova razlika je naročito bila izražena kod upetog modela. U realnoj situaciji dolazi do istezanja čelika tijekom povećanja temperature tako da je ovu pojavu potrebno modelirati u obliku dodatnog opterećenja koje ulazi u požarnu kombinaciju. Sa ovakvim modelom se dolazi do rezultata bližih realnom scenariju djelovanja požara na konstrukciju. Djelovanje temperaturnog istezanja se naročito preporuča modelirati kod konstrukcija sa manjim stupnjevima slobode.

Primjenom deblje protupožarne zaštite postigla se osjetno manja potreba za količinom čelika. Ovo je jedno od dobrih rješenja za ostvarivanje nosivosti konstrukcije u pogledu ekonomičnosti.

Uspoređujući ova tri statička sustava vidljivo je da sustav sa najmanjim stupnjem slobode ima najmanju nosivost na požarno opterećenje. Zbog ovoga se preporuča odabir dvozglobnih ili trozglobnih okvira tijekom projektiranja hala za skladištenje lako zapaljivog materijala. Jedno od dobrih rješenja je odabir zglobne veze za spoj stup-temelj čime se ostvaruje dvozglobni okvir. Ovakvo rješenje se može dodatno kombinirati sa optimizacijom protupožarne zaštite što daje daleko povoljniju nosivost konstrukcije a samim time je i konstrukcija hale financijski isplativija.

10. LITERATURA

- [1] Ivica Boko, Sigurnost nosivih konstrukcija, Predavanje na poslijediplomskom specijalističkom studiju požarnog inženjerstva (2018.)
- [2] Ivica Boko, Modeliranje razvoja požara, Predavanje na poslijediplomskom specijalističkom studiju požarnog inženjerstva (2018.)
- [3] HRN EN 1991-1-2:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-2: Opća djelovanja -- Djelovanja na konstrukcije izložene požaru (EN 1991-1-2:2002+ AC:2009), HZN, 2012.
- [4] Jozo Vukadin: Požarna analiza nosive čelične konstrukcije montažne dvorane primjenom HRN EN 1993-1-2 (2015.)
- [5] Ivica Boko, Bernardin Peroš, Neno Torić: Pouzdanost čeličnih konstrukcija u požaru. Građevinar. Vol.64. No.5, 389-400, 2010.
- [6] HRN EN 1993-1-2:2012, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara (EN 1993-1-2:2005+ AC:2009), HZN, 2014.
- [7] HRN EN 1990:2011, Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010), HZN, 2011.
- [8] W. I. Simms: Fire resistance design of steel framed buildings (2012.)
- [9] Skejić, I. D. (2020). Općenito o proračunu konstrukcija na požar - Predavanje na poslijediplomskom specijalističkom studiju požarnog inženjerstva (2020.)
- [10] Boris Androić, Darko Dujmović, Ivica Džeba: Čelične konstrukcije 1 (2009.)
- [11] Darko Dujmović, Boris Androić, Ivica Džeba: Modeliranje konstrukcija prema eurocode 3 (2004.)
- [12] Promat: <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/62958/protupožarna-zastita-nosive-konstrukcije-uvod/> (pristupljeno 10.10.2023.)
- [13] Promat: Protupožarna zaštita nosivih čeličnih konstrukcija (2019.)
- [14] Skejić, D.: Odabir premaza sa aspekta proračuna čeličnih konstrukcija kod djelovanja požara (2019.)
- [15] Promat: <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/39721/odabir-odgovarajuceg-sustava-za-protupožarnu-zastitu-celicnih-konstrukcija/> (pristupljeno 10.10.2023.)

- [16] Ministarstvo unutarnjih poslova: Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima (NN/93/08), (29. srpnja 2008.)
- [17] Särndqvist, Stefan: Initial Fires. RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests (Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, 1993.)
- [18] O.Vassart, B.Zhao, L.G.Cajot, F.Robert, U.Meyer,A.Frangi: Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design (2014.)
- [19] HRN EN 1991-1-1:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-1: Opća djelovanja -Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada (EN 1991-1-1:2002+AC:2009), HZN, 2012.
- [20] HRN EN 1991-1-3:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-3: Opća djelovanja – Opterećenja snijegom (EN 1991-1-3:2003+ AC:2009), HZN, 2012.
- [21] HRN EN 1991-1-4:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-4: Opća djelovanja -- Djelovanja vjetra (EN 1991-1-4:2005+ AC:2010+A1:2010), HZN, 2012.
- [22] HRN EN 1993-1-1:2012, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2005+ AC:2009), HZN, 2014.
- [23] Programski paket SCIA Engineer 19.1.5018.64, Nemetscheck Company
- [24] Programski paket OZone V 3.0.4