



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivan Butigan

**PRORAČUN ČELIČNIH KONSTRUKCIJA
IZLOŽENIH DJELOVANJU POŽARA**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024 godina.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivan Butigan

**PRORAČUN ČELIČNIH KONSTRUKCIJA
IZLOŽENIH DJELOVANJU POŽARA**

ZAVRŠNI ISPIT

Doc.dr.sc. Ivan Ćurković

Zagreb, 2024. godina



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivan Butigan

DESIGN OF STEEL STRUCTURES EXPOSED TO FIRE

FINAL EXAM

Doc.dr.sc. Ivan Ćurković

Zagreb, 2024.

SAŽETAK

Najvažnija zadaća prilikom projektiranja konstrukcija je projektirati konstrukcije na način da se za predviđeni vijek građevine osigura nosivost tokom cijelog vremena. Na konstrukcije djeluju razna opterećenja različitih trajanja. Posebnu pažnju treba obratiti na požarno opterećenje koje izaziva velike materijalne štete i gubitke života. Rad je podijeljen na teoretski i praktični dio. U teoretskom dijelu rada će biti obrađeni utjecaj požara na svojstva čeličnih konstrukcija, načini proračuna čeličnih konstrukcija na požarno opterećenje te metode aktivne i pasivne zaštite elemenata od utjecaja požara. U praktičnom dijelu je napravljen proračun elementa na požarno opterećenje gdje je vidljivo da elementi koji pri normalnim temperaturama bez problema podnose opterećenja konstrukcije, nakon što su kraće vrijeme izloženi požaru značajno gube mehanička svojstva te dolazi do otkazivanja elementa.

Ključne riječi: Požar, požarna analiza, nominalna krivulja temperatura-vrijeme, kritična temperatura, lokalizirani požar, otpornost na požar, mjere zaštite od požara.

SUMMARY

The most important task when designing structures is to design structures in such a way as to ensure load-bearing capacity throughout the entire life of the building. Constructions are subjected to various loads of different durations. Special attention should be paid to the fire load, which causes great material damage and loss of life. The work is divided into a theoretical and practical part. In the theoretical part of the work, the effect of fire on the properties of steel structures, methods of calculation of steel structures under fire load and methods of active and passive protection of elements against the effects of fire will be discussed. In the practical part, the calculation of the element exposed to a fire load was made, where it is evident that the elements, which at normal temperatures can withstand the loads of the structure without problems after being exposed to fire for a short time, significantly lose their mechanical properties and the failure of the element occurs.

Key words: Fire, fire analysis, nominal temperature-time curve, critical temperature, localized fire, fire resistance, fire protection measures.

SADRŽAJ

SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1 UVOD	1
2 METODE I TEHNIKE RADA	2
3 POJEKTIRANJE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA IZLOŽENIH DJELOVANJU POŽARA	3
3.1 Požar kao djelovanje na konstrukciju	3
3.2 Analiza konstrukcija izloženih požaru	4
3.2.1 Računski požar	5
3.2.2 Mehanička analiza utjecaja požara.....	10
3.3 Toplinsko djelovanje za analizu temperature konstrukcijskih elemenata	11
3.3.1 Opća pravila pri prijenosu topline	11
3.3.2 Krivulje temperatura – vrijeme.....	11
3.3.3 Modeli prirodnog požara	13
3.3.3.1 Pojednostavljeni modeli požara	13
3.3.3.2 Napredni modeli požara	14
3.4 Proračun otpornosti konstrukcije na požar	15
3.4.1 Metode dokaza otpornosti konstrukcije izložene požaru	15
3.4.2 Svojstva čelika u slučaju požara	15
3.4.3 Određivanje kritične temperature čeličnog elementa	17
3.4.3.1 Određivanje kombinacije djelovanja za požarnu računsku situaciju	17
3.4.3.2 Klasifikacija poprečnog presjeka na povišenoj temperaturi	18
3.4.3.3 Određivanje proračunske otpornosti čeličnog elementa na sobnoj temperaturi ..	19
3.4.3.4 Određivanje stupnja iskorištenosti čeličnog elementa	19
3.4.3.5 Određivanje kritične temperature čeličnog elementa	20
3.5 Protupožarna zaštita čeličnih konstrukcija	22
3.5.1 Pasivne mjere zaštite od požara	22
3.5.2 Aktivne mjere zaštite od požara	24
4 PRORAČUN ELEMENATA NA DJELOVANJE POŽARA	25
4.1 Primjer 1.....	26
Zadano	26
Proračun	26
4.2 Primjer 2.....	31
Zadano	31

Proračun 31

5 ZAKLJUČAK	36
POPIS LITERATURE	37
POPIS SLIKA	38
POPIS TABLICA.....	39

1 UVOD

Požar je nekontrolirani proces gorenja u prostoru. Nanosi velike materijalne štete i ugrožava ljudske živote. Razni su uzroci požara, a neki od najčešćih su ljudski faktor, prirodne nepogode i eksplozije. Prema procjenama u Europi preko 5000 ljudi godišnje strada u kućnim požarima, a mnogi drugi budu ozlijeđeni. Požari svake godine oštete svjetsko gospodarstvo za cca 1% bruto nacionalnog dohotka prema podacima svjetskog statističkog centra u Ženevi. Posebnu pažnju treba posvetiti čeličnim konstrukcijama koje su izložene djelovanju požara. Čelik je jako dobar vodič topline što uzrokuje brzo zagrijavanje elemenata u slučaju požara.

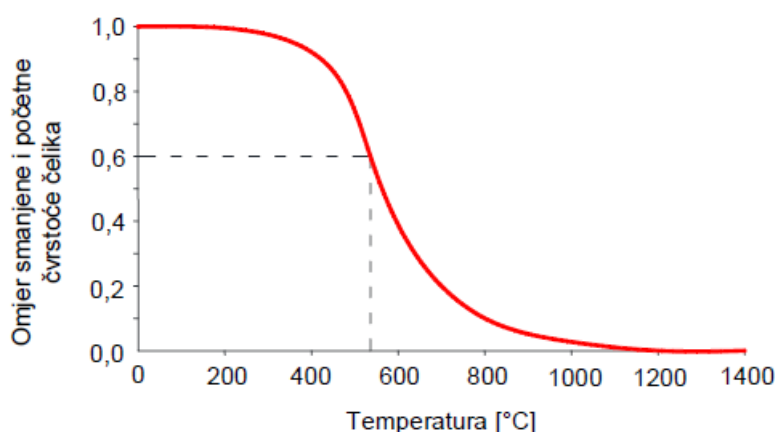
Unutar ovoga rada će se analizirati djelovanje požara na čelične konstrukcije, te objasniti aktivne i pasivne mjere zaštite čelične konstrukcija od požara. Provest će se proračun pouzdanosti čeličnog elementa izloženog požaru. Proračun je napravljen na primjeru proste grede duljine 8 metara. Profil grede koji će se koristiti je profil IPE 270. Stalno opterećenje na gredu iznosi 2,5 kN/m, korisno opterećenje iznosi 4,0 kN/m. Zahtijevana otpornost elementa na požar iznosi R15 (15 minuta).

2 METODE I TEHNIKE RADA

Prilikom izrade rada su korišteni propisi EUROCODE. Kako bi se bolje i razumljivije prikazala metodologija rješavanja slučajeva u kojima su čelični elementi izloženi djelovanjima požara korištena je citirana literatura u kojoj su dijelovi postupka i razlozi pristupa rješavanju problema detaljnije pojašnjeni. U dijelu rada koji se odnosi na proračun korištene su metode objašnjene u teorijskom dijelu rada te je prikazan jednostavan postupak proračuna elementa. Prikazana su dva analitička pristupa proračuna otpornosti čeličnih elemenata izloženih djelovanju požara. U prvom primjeru je izračunato vrijeme da element dosegne kritičnu temperaturu te se uspoređuje sa zahtijevanom otpornosti na požar elementa. U drugom primjeru se određuje koja je temperatura elementa nakon 15 minuta trajanja požara te se granica otpornosti elementa umanjuje za faktor ovisno o temperaturi.

3 POJEKTIRANJE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA IZLOŽENIH DJELOVANJU POŽARA

Čelične konstrukcije su posebno osjetljive na djelovanje požara radi jako visoke toplinske provodljivosti čelika koja je otprilike 25 puta veća od toplinske provodljivosti betona. Posljedica toga je jako brzo zagrijavanje čeličnih elemenata u slučaju požara. Iako čelik nije goriv materijal i točka tališta mu je oko 1400°C, već pri temperaturama od 100°C smanjuje se elastičnost čeličnih elemenata, a pri temperaturama od 400°C dolazi do smanjenja nosivosti elemenata [1].



Slika 1. Graf omjera smanjene i početne čvrstoće čelika po temperaturi čelika [1]

3.1 Požar kao djelovanje na konstrukciju

Konstrukcije trebaju biti projektirane i izgrađene na način da se smanje materijalne štete i osigura sigurnost korisnika i spasilačkih službi. U slučaju nastanka požara konstrukcija mora održati nosivost za određeni vremenski period, spriječiti širenje dima i požara unutar konstrukcije kao i na okolne zgrade. Građevina je tijekom požara i dalje opterećena stalnim i korisnim opterećenjem, požar ima negativno djelovanje na svojstva materijala te može doći do prekoračenja otpornosti građevine. Prekoračenjem otpornosti građevine može doći do rušenja. Ovisno o lokaciji nastanka požara razlikuju se požari otvorenih i zatvorenih prostora, čija se dinamika razvoja razlikuje. U građevinama se koncept zaštite od požara temelji na razvoju požara u zatvorenom prostoru.

Prilikom proračuna otpornosti konstrukcija na požar primjenjuju se znanstvene metode i proračunski modeli na temelju realnog požarnog opterećenja konstrukcije.

Razvoj požara u zgradama može se podijeliti u nekoliko faza, a ove faze obično uključuju [1]:

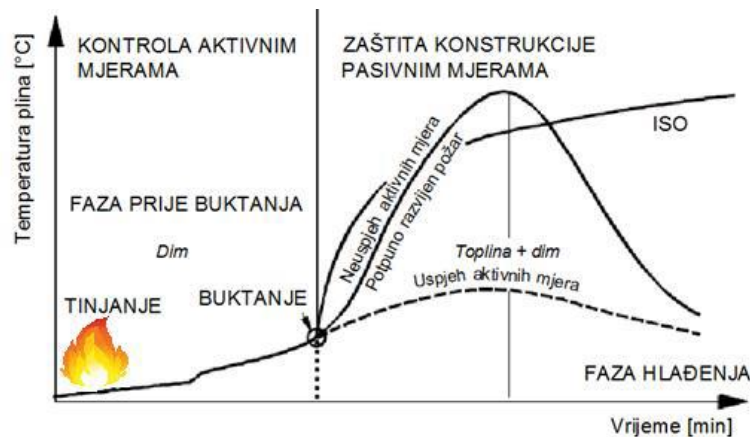
Tinjanje: ovo je početna faza požara, gdje dolazi do zapaljenja gorivog materijala. To može biti uzrokovano električnim kvarom, lošim električnim instalacijama, plinskim curenjem, kratkim spojem, ljudskim djelovanjem ili drugim uzrocima.

Rast i razvoj: u ovoj fazi požar raste i širi se. Gorivo, kisik i toplina sudjeluju u tzv. "vatrenom trokutu". Požar dobiva na snazi, oslobađa se velika količina topline i dima, a temperature u prostoriji znatno rastu.

Buktanje požara (engl. flashover): to je kritična faza u razvoju požara u zatvorenim prostorima. Do buktanja dolazi kada se svi gorivi materijali u prostoriji zagriju na dovoljno visoku temperaturu da se gotovo istovremeno zapale. To može rezultirati eksplozivnim širenjem požara i brzim širenjem plamena.

Faza potpunog požara: u ovoj fazi požar postiže svoj maksimalni intenzitet. Temperatura u prostoriji je vrlo visoka, a plamen i dim mogu biti vrlo gusti. Ova faza obično traje neko vrijeme dok su prisutne dovoljne količine gorivih materijala i kisika.

Faza hlađenja: kada požar iscrpi dostupne gorive materijale u prostoriji ili kada nivo kisika postane nedovoljan, intenzitet požara počinje opadati.



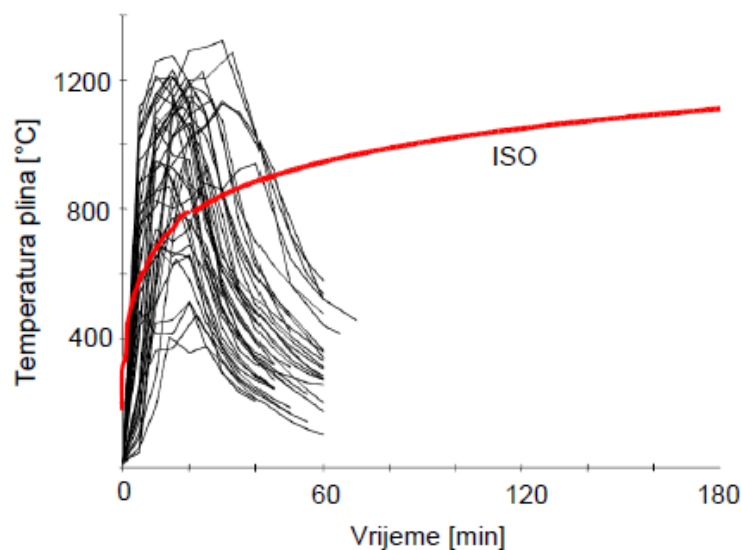
Slika 2. Graf temperature plina tijekom trajanja požara [1]

Prema svojstvima reakcije na požar čelične konstrukcije klasificiramo prema ISO standardnoj krivulji [2]. Otpornost čeličnih elemenata na požar se izražava u jedinicama vremena i označava kao R15, R20, R30, R45, R60, R90, R120. Vremenski parametri predstavljaju izdržljivost čeličnih elemenata u standardnim laboratorijskim uvjetima, što znači da elementi pružaju otpornost s obzirom na požar 15 minuta, 30 minuta, 45 minuta, 60 minuta, 90 minuta, 120 minuta itd.

3.2 Analiza konstrukcija izloženih požaru

Analizi konstrukcija izloženih požaru može se pristupiti na dva načina ovisno o načinu određivanja toplinskog djelovanja. Prva metoda se provodi prema propisanim pravilima koja su utemeljena kako bi reprezentirala požarno djelovanja u obliku standardne krivulje požara i korištenju tabličnih podataka za određivanje požarne otpornosti konstrukcije, dok su složene metode utemeljene na određivanju požarne otpornosti korištenjem modela razvoja požara i modela provođenja topline radi dobivanja realnih požarnih temperatura u čeličnoj konstrukciji.

Druga metoda uključuje detaljnu računsku analizu konstrukcije uzimajući u obzir različite fizikalne i kemijske parametre. Scenarij računskog požara odabire se kako bi se analizirale moguće situacije požara u zgradama, industrijskim postrojenjima ili drugim građevinama. Ovisno o specifičnim potrebama i ciljevima analize, odabiru se različiti scenariji. Na slici 3 je prikazana usporedba ISO nominalne krivulje i krivulje nekih realnih scenarija požara. Scenarijom požara se obuhvaćaju razni podatci o samom požaru kao što su: veličina i tip izvora zapaljenja, raspodjela i vrsta goriva, brzina širenja požara, gustoća požarnog opterećenja, uvjeti ventilacije, vanjski uvjeti okoline, veličine požarnog odjeljka, svojstva zidova požarnog odjeljka i utjecaj aktivnih mjera sprječavanja požara



Slika 3. Krivulje realnih požara i ISO standardna krivulja [2]

3.2.1 Računski požar

Računski požar predstavlja odabrani scenarij razvoja požara koji se usvaja radi proračuna konstrukcije u slučaju nastanka požara. Prvi korak za određivanje računskog požara je određivanje požarnog opterećenja koje djeluje na konstrukciju. Požarno opterećenje određuje se uzimanjem u obzir svih gorivih materijala prisutnih u promatranom prostoru. Svaki materijal ima različitu vrijednost požarnog opterećenja, koja se izražava u kilogramima po kvadratnom metru (kg/m^2) ili kilogramima po kubičnom metru (kg/m^3), što se naziva gustoća požarnog opterećenja i označava se sa $q_{fi,k}$.

Karakteristično požarno opterećenje $Q_{fi,k}$, može se odrediti pomoću izraza (3.1):

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{u,i} \cdot \Psi_i, \quad (3.1)$$

gdje je:

$M_{k,i}$	kg	karakteristična vrijednost gorivog materijala,
$H_{u,i}$	MJ/kg	kalorična vrijednost gorivog materijala,
Ψ_i	-	faktor za procjenu zaštićenog požarnog opterećenja materijala.

Karakteristična vrijednost gustoće požarnog opterećenja može se odrediti pomoću izraza (3.2):

$$q_{fi,k} = \frac{Q_{fi,k}}{A} \quad (3.2)$$

gdje je:

$Q_{fi,k}$	MJ	karakteristično požarno opterećenje,
A	m ²	površina poda u požarnom odjeljku ili referentnom prostoru,
$q_{fi,k}$	MJ/ m ²	karakteristična vrijednost gustoće požarnog opterećenja.

Ovisno o prisutnosti aktivnih mjera sprečavanja požara određuje se računski gustoća požarnog opterećenja $q_{f,d}$. Razlikujemo dva pristupa određivanju računski gustoće požarnog opterećenja $q_{f,d}$.

Probabilistički pristup

Probabilističkim pristupom odredi se faktor gustoće požarnog opterećenja $\gamma_{q,f}$:

$$\gamma_{q,f} = \gamma_{mod} \cdot \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} = 1,05 \cdot \frac{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{qf} \cdot [0,577 + \ln(-\ln\Phi(\alpha_{q,f}\beta_{fi,t}))] \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{qf} \cdot [0,577 + \ln(-\ln 0,8)] \right\}}; \quad (3.3)$$

gdje je:

$q_{f,k}$	MJ/ m ²	karakteristična gustoća požarnog opterećenja odabrana kao 80% fraktila gumbelove raspodjele,
γ_{mod}	-	neizvjesnost kod proračuna učinka djelovanja,
$m_{q,f}$	MJ/ m ²	srednja vrijednost q_f ,
$V_{q,f}$	-	koeficijent varijacije q_f ,
$\alpha_{q,f}$	-	težinski faktor q_f ,
$\beta_{fi,t}$	-	indeks pouzdanosti u slučaju požara.

Semiprobabilistički (normirani) pristup

Računska gustoća požarnog opterećenja $q_{f,d}$ može se odrediti ukoliko se faktor gustoće požarnog opterećenja rastavi na više faktora:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n; \quad (3.4)$$

gdje je:

m	-	faktor izgaranja,
δ_{q1}	-	faktor rizika nastanka požara uslijed veličine odjeljka,
δ_{q2}	-	faktor rizika nastanka požara uslijed namjene prostora,
δ_n	-	faktor aktivnih mjera zaštite od požara.

Semiprobabilistički pristup određivanju gustoće računskog požarnog opterećenja daje rješenja koja su na strani sigurnosti.

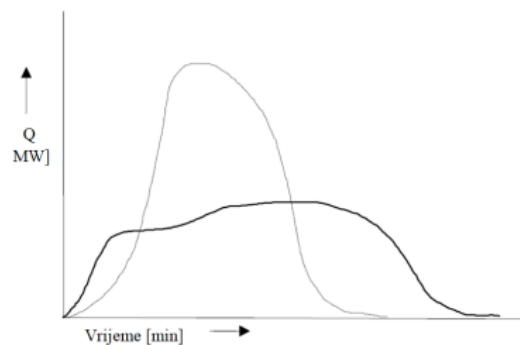
Tablica 1. Vrijednost faktora δ_{q1} i δ_{q2}

Površina sektora [m ²]	δ_{q1}	δ_{q2}	Namjena prostora
25	1,10	0,78	Galerije, muzeji, bazeni
250	1,50	1,00	Stambeni objekti, hoteli, uredi
2500	1,90	1,22	Tvornice motora i strojeva
5000	2,00	1,44	Kemijski laboratoriji, slikarske radionice
10000	2,13	1,66	Tvornice vatrometa ili boja

Tablica 2. Vrijednosti faktora δ_{ni}

δ_{ni}								
Automatsko suzbijanje požara		Automatska detekcija požara		Ručno suzbijanje požara				
Automatski sustav gašenja vodom	Neovisni izvori vode 0/1/2	Automatska detekcija požara i alarm	Automatsko slanje alarma vatrogasnoj postrojbi	Vatrogasna postrojba u blizini	Vatrogasna postrojba je udaljena	Sigurnosni putovi evakuacije	Protupožarni uređaji	Sustav ventilacije dima
0,62	1,0/0,87/0,7	0,87/0,73	0,87	0,61	0,78	0,9 ili 1/1,5	1,0/1,5	1,0/1,5

Osim samog požarnog opterećenja nužno je poznavati i brzinu kojom će požarno opterećenje izgarati. Rata oslobođenja topline, Q označava količinu topline koju požar oslobađa u jedinici vremena. Rata oslobođenja topline može varirati ovisno o vrsti goriva, količini goriva koje je dostupno za sagorijevanje, uvjetima ventilacije i drugim varijablama. Za projektiranje protupožarnih sustava, evakuacijskih planova i procjenu sigurnosti, važno je uzeti u obzir brzinu oslobođenja topline prilikom analize požara. Proračuni brzine oslobođenja topline koriste se za razumijevanje širenja požara, procjenu kritičnih situacija, određivanje potrebnih kapaciteta protupožarnih sustava i projektiranje objekata koji su otporni na požar. S obzirom da isto požarno opterećenje može gorjeti vrlo brzo i može tinjati, dolazimo do zaključka da za isto požarno opterećenje možemo dobiti dvije različite krivulje rate oslobođenja topline što je i vidljivo na slici 4 u nastavku [3].



Slika 4. Graf krivulja različitih rata oslobođenja topline za isto požarno opterećenje [3]

Rata oslobođenja topline Q je izvor porasta temperature plina. Razlikujemo dvije mogućnosti kontrole požara:

- Prvi slučaj

U slučajevima kada nije ograničen dotok zraka u prostor rata oslobođenja topline Q bit će ograničena s raspoloživim požarnim opterećenjem. Tada govorimo o požaru koji je kontroliran gorivom.

$$Q_{max} = 0,001 \cdot A_{fi} \cdot RHR_f; \quad (3.5)$$

gdje je:

A_{fl}	m^2	maksimalna površina požara u odjeljku,
RHR_f	MJ/m^2	maksimalna rata oslobođenja topline po m^2 za požare kontrolirane gorivom.

- Drugi slučaj

U slučajevima kada prostor u kojem nastaje požar nije dobro ventiliran dolazi do manjka raspoloživog kisika nakon izbijanja požara. U ovom slučaju požar je pod kontrolom ventilacije. Rata oslobođenja topline Q biti će ograničena količinom dostupnog kisika.

$$Q_{max} = 0,10 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot h_{eq}^{1/2}; \quad (3.6)$$

gdje je:

A_v	m^2	površina otvora u odjeljku,
h_{eq}	m	srednja visina otvora.

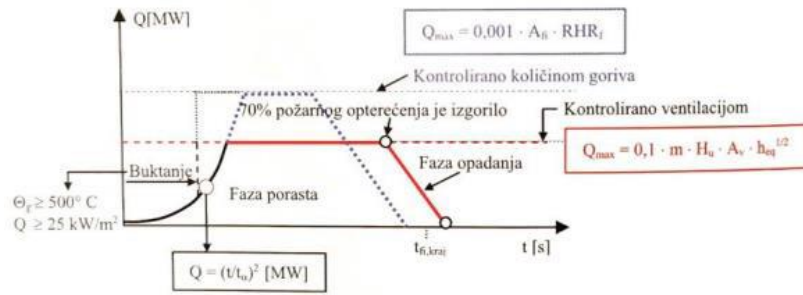
Snaga požara raste do maksimuma koji odgovara RHR_f , maksimumu po $1 m^2$ pomnoženom s površinom izloženom požaru koja može biti A_f (cijela površina) ili A_{fl} (lokalna površina). Rata oslobođenja topline požara za vrijeme razvijanja požara može se definirati izrazom (3.7):

$$Q = 10^6 \cdot \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 \quad (3.7)$$

gdje je:

Q	W	rata oslobođenja topline požara za vrijeme razvoja,
t	s	vrijeme,
t_α	s	vrijeme potrebno za dostizanje rate oslobođenja topline Q od 1 MW.

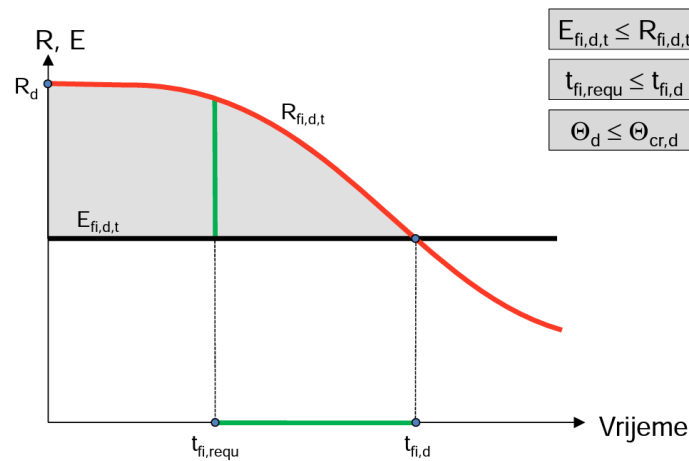
Faza opadanja požara nastaje kada je utrošeno približno 70% ukupnog požarnog opterećenja [4]. Prijedlog određivanja računskog razvoja rate oslobođenja topline požara prikazan je na slici 5.



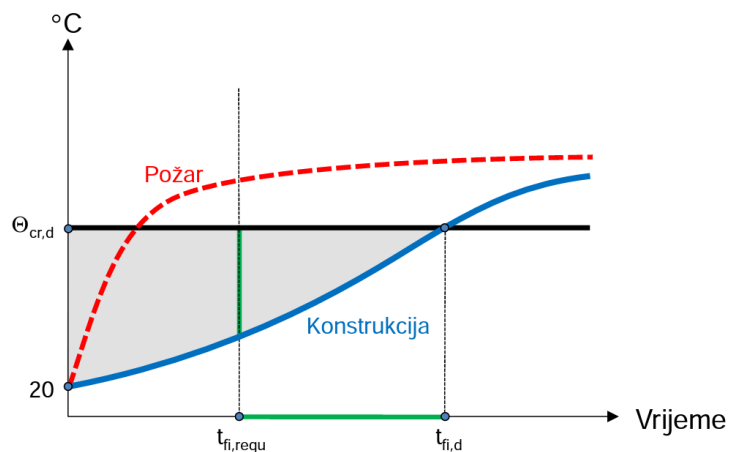
Slika 5. Graf rate oslobodjenja topline Q ovisno o vremenu [4]

3.2.2 Mehanička analiza utjecaja požara

Mehanička analiza utjecaja požara je proces proučavanja fizičkih i mehaničkih posljedica koje požar može imati na konstrukciju, komponente ili materijale. Dokaz pouzdanosti konstrukcijskih elemenata se može izvesti dokazom u domeni vremena, čvrstoće ili temperature kao što je prikazano na slikama 6 i 7[5].



Slika 6. Graf dokaza otpornosti konstrukcije u domeni čvrstoće i vremena [5]



Slika 7. Graf dokaza otpornosti konstrukcije u domeni temperature [5]

3.3 Toplinsko djelovanje za analizu temperature konstrukcijskih elemenata

3.3.1 Opća pravila pri prijenosu topline

Toplina se unutar konstrukcije prenosi strujanjem između elemenata i isijavanjem koje se odvija između plinova, plamena, okoline i elementa. Tok topline na površini elementa dobiva se zbrajanjem topline prenesene strujanjem i isijavanjem:

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (3.8)$$

Gdje je:

$\dot{h}_{net,d}$	W/m ²	tok topline u element,
$\dot{h}_{net,c}$	W/m ²	tok topline u element uslijed strujanja,
$\dot{h}_{net,r}$	W/m ²	tok topline u element uslijed zračenja.

Prijenos topline dodirrom računa se prema izrazu(3.9):

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (3.9)$$

gdje je:

α_c	W/m ² K	koeficijent prijenosa topline strujanjem,
θ_g	°C	temperatura plina,
θ_m	°C	temperatura na površini elementa.

Prijenos topline isijavanjem računa se prema izrazu (3.10):

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (3.10)$$

gdje je:

Φ	-	faktor oblika,
ε_m	-	zračenje požara u sektoru,
ε_r	-	zračenje površine konstrukcijskog elementa,
σ	W/m ² K ⁴	Stephan-Boltzmann-ova konstanta,
θ_r	°C	efektivno isijavanje temperature požara u sektoru.

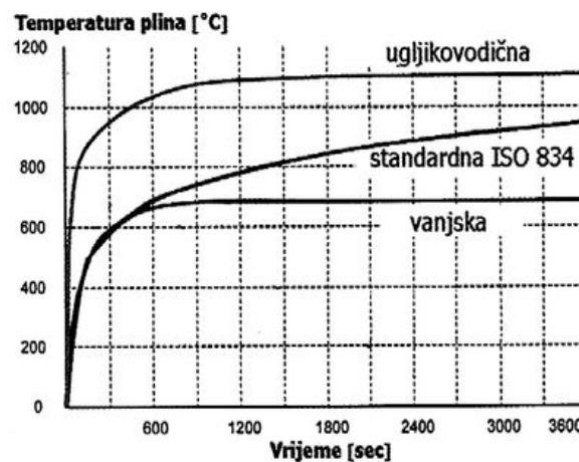
3.3.2 Krivulje temperatura – vrijeme

Svaki je požar jedinstven, nemoguće je ispitati i procijeniti performanse svakog proizvoda za zaštitu od požara u odnosu na beskonačan broj mogućih vremensko-temperaturnih krivulja. Zato su nastojanja po pitanju standardizacije protupožarnih ispitivanja stalno prisutna od samog početka, odnosno početka 20. stoljeća do danas. U skladu sa normom HRN EN 1991-1-

2 za proračun toplinskih djelovanja na konstrukciju koriste se nominalne krivulje temperatura – vrijeme i parametarske krivulje temperatura – vrijeme.

Nominalne krivulje temperatura – vrijeme služe za određivanje vremena u kojem će biti osigurana nosivost elemenata konstrukcije. Uvedene su za potrebe ispitivanja elemenata pri jedinstvenim uvjetima. Nedostatci krivulja su što ne predstavljaju uvjete prirodnog požara, nema faze hlađenja i činjenica da standardni požar ne daje uvijek mjerodavne uvjete.

Postoje tri vrste nominalnih krivulja: krivulja standardnog požara, krivulja vanjskog požara i krivulje ugljikovodika koje su prikazane na slici 8.



Slika 8. Graf nominalnih krivulja temperatura-vrijeme

Standardna krivulja požara je opisana izrazom (3.11):

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log(8t + 1) \quad (3.11)$$

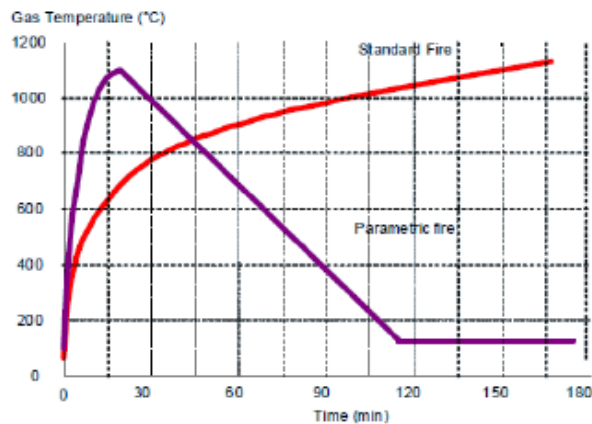
Krivulja vanjskog požara je opisana izrazom (3.12):

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-3,8t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t}) + 20 \quad (3.12)$$

Ugljikovodična krivulja je opisana izrazom (3.13):

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20 \quad (3.13)$$

Parametarske krivulje se temelje na uvođenju fizikalnih parametara kao što su požarno opterećenje, geometrija požara, svojstva zidova požarnog sektora itd. Parametarska krivulja prikazuje bolje rezultate kada je gustoća gorivog materijala mala, te kada je primjena nominalnih krivulja nepotrebno konzervativna [6]. Parametarske krivulje se primjenjuju za požarne sektore koji su manji od 500 m². Na slici 9 je prikazana usporedba standardne i parametarske krivulje temperatura vrijeme.



Slika 9. Graf standardne i parametarske krivulje temperatura-vrijeme [6]

3.3.3 Modeli prirodnog požara

Modeli prirodnog požara pokrivaju razvoj požara koji je realan i za kojeg se očekuje da će se pojaviti. Tim modelima se uzimaju u obzir glavni parametri koji utječu na širenje požara. Razlikujemo pojednostavljene i napredne modele požara.

3.3.3.1 Pojednostavljeni modeli požara

Požar u sektoru

Postoje dvije metode proračuna temperature plina za ovaj model požara. To su metoda koja uzima u obzir jednoliku temperaturu plina u odjeljku (opisan je u dodatku A HRN EN 1991-1-2 [11]) i metoda proračuna zagrijavanja vanjskih elemenata konstrukcije koji su izloženi požaru preko otvora na fasadi (opisana u aneksu B EN 1991-1-2 [11]). Metoda opisana u aneksu A primjenjuje se na požarne sektore površine do 500 m², bez otvora na krovu i maksimalne visine 4 m. Metoda opisana u aneksu B se koristi za određivanje toplinskih djelovanja na vanjske elemente konstrukcije. Primjena metode B je ograničena na požarno opterećenje minimalne vrijednosti 200 MJ/m² te maksimalnih dimenzija odjeljka: širina 18 m, duljina 70 m i visina 5 m.

Lokalizirani požar

Model lokaliziranog požara se koristi za scenarije požara kod kojih ne postoji ili je jako mala vjerojatnost buktanja požara. Metoda proračuna toplinskog djelovanja lokaliziranog požara je opisana u aneksu C norme HRN EN 1991-1-2 [11]. U modelu lokaliziranog požara temperatura plamena i njegove okoline razlikuje se po visini plamena i potrebno ju je odrediti za svaki dio zasebno. To je glavna razlika u odnosu na požare kojim se proračunavaju toplinska djelovanja za fazu razbuktavanja gdje se pretpostavlja jednolika temperatura u cijelom odjeljku. Razlikujemo mali i veliki požar ovisno o veličini požara, a za oba slučaja su opisani proračuni u

normi HRN EN 1991-1-2 [11]. Ograničenja ovog pristupa su da promjer požara ne smije biti veći od 10 metara i rata oslobođenja ne smije biti veća od 50 MW.

3.3.3.2 Napredni modeli požara

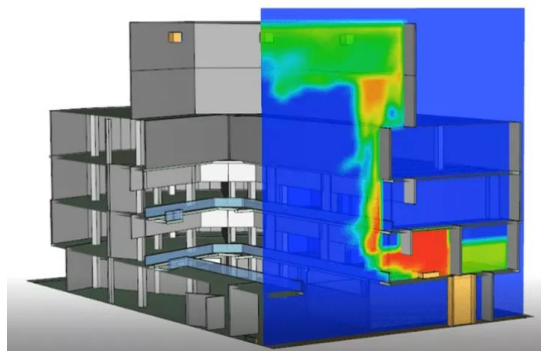
Napredni modeli požara se dijele u dva tipa modela: modeli polja (CFD modeli) i modeli zona. Modeli zona se dalje dijele na modele jedne zone i na modele dviju zona.

Modeli zona

Modeli jedne zone pretpostavljaju jedinstveni zatvoreni prostor i mogu se primjenjivati za simulacije potpuno razvijenih požara. Pretpostavljaju se približno jednake fizikalne karakteristike za sve zone. Modeliranje se temelji na sustavima diferencijalnih jednačbi za zakon mase, zakon održavanja energije i zakon idealnih plinova. Model dvije zone se zasniva na činjenici da se vrući zrak kreće prema stropu odjeljka, a hladni zrak se nalazi ispod vrućeg zraka. Modeli jedne zone imaju primjenu kod manjih i jednostavnijih slučajeva te zahtijevaju manje podataka za provedbu analize i ubrzavaju ju. Model dvije zone se primjenjuje kod analize kompleksnijih i većih prostorija i daje preciznije rezultate u odnosu na model jedne zone, ali analiza modela dvije zone duže traje.

Modeli polja

Modeli polja su najnapredniji od svih modela. Daju razvoj temperatura u sektoru u potpunosti u ovisnosti o vremenu i prostoru. CFD modeli umjesto korištenja dva ili tri kontrolna volumena su sastavljeni od velikog broja kontrolnih volumena čime se postiže bolja razina rezolucija u odnosu na modele zona, ali zahtijevaju više vremena. CFD modeli se rijetko koriste jer su složeni, zahtijevaju mnogo vremena i snažna računala. Na slici 10 je prikazan primjer CFD modela požara zgrade.



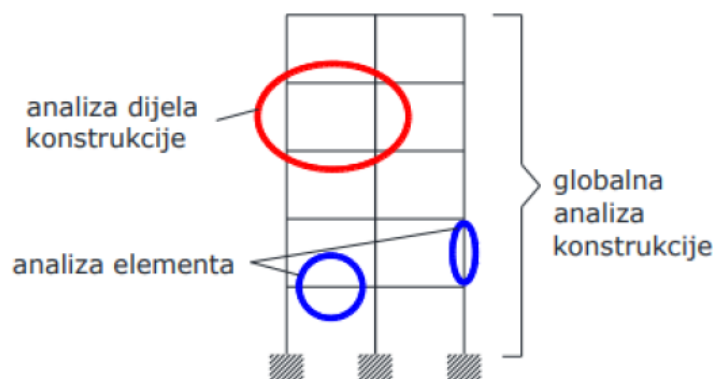
Slika 10. CFD model požara

3.4 Proračun otpornosti konstrukcije na požar

Postoji više načina proračuna otpornosti konstrukcije. Jednostavni načini se temelje na Nominalnim krivuljama temperatura-vrijeme i tablicama i dijagramima sadržanim u EUROCODE-u. Napredniji proračuni se rade pomoću nelinearnih analiza, 3D modela i softvera za proračun požara. Napredniji proračuni daju preciznije rezultate od jednostavnih, ali se u praksi većinom koriste jednostavni modeli jer su brži u primjeni, ne zahtijevaju posebnu opremu ili softvere. Ovisno o kompleksnosti projekta mogu se koristiti jednostavniji ili složeniji proračuni. Prilikom proračuna mehaničke otpornosti čelične konstrukcije u slučaju požara mora se dokazati nosivost konstrukcije za vrijeme trajanja požara.

3.4.1 Metode dokaza otpornosti konstrukcije izložene požaru

Postoje tri pristupa određivanju mehaničkog odgovora konstrukcije pri požaru koji su i prikazani na slici 14. [4]. Analizom zasebnih elemenata se proračunava otpornost svakog elementa izloženog požaru zasebno. Analizom dijela konstrukcije se proračunava otpornost dijela konstrukcije neovisno o ostatku konstrukcije. Globalnom analizom konstrukcije promatra se utjecaj požara na cijelu konstrukciju.



Slika 11. Različiti pristupi analizi konstrukcije izložene požaru [4]

3.4.2 Svojstva čelika u slučaju požara

Računske vrijednosti mehaničkih svojstava čelika $X_{d,fi}$ definiraju se na način:

$$X_{d,fi} = \frac{k_{\theta} \cdot X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.15)$$

gdje je:

X_k - karakteristična vrijednost čvrstoće ili svojstva deformabilnosti pri normalnoj temperaturi prema EN 1993-1-1,

k_{θ} - faktor redukcije za čvrstoću ili svojstva deformabilnosti ($X_{k\theta}/X_k$), ovisno o temperaturi materijala,

$\gamma_{M,fi}$ - parcijalni faktor za mjerodavno svojstvo materijala u slučaju požara (preporučena vrijednost $\gamma_{M,fi} = 1,0$).

U slučajevima izvanrednog graničnog stanja među koje spada i požar u skladu sa EUROCOD-om EN1993-1-2 [7] preporučena granica popuštanja je definirana kao zaostala deformacija koja iznosi 2% ukupne deformacije, u odnosu na zaostalu deformaciju od 0,2% koja se koristi kao granica popuštanja prilikom uobičajenih proračuna graničnih stanja. Iznimka tome su poprečni presjeci klase 4 za koje je prema dodatku E norme EN 1993-1-2 [7] granica popuštanja dogovorna granica popuštanja pri 0,2%-tnoj zaostaloj deformaciji.

Povišene temperature imaju negativan utjecaj na mehaničke karakteristike materijala što je prikazano na slici 12 gdje se vidi odnos naprezanja i deformacije u čeličnom elementu pri različitim napreznjima pa se uvode faktori redukcije za granicu popuštanja, proporcionalnosti i modul elastičnosti [5].

- Granica popuštanja

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (3.16)$$

- granica proporcionalnosti

$$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y} \quad (3.17)$$

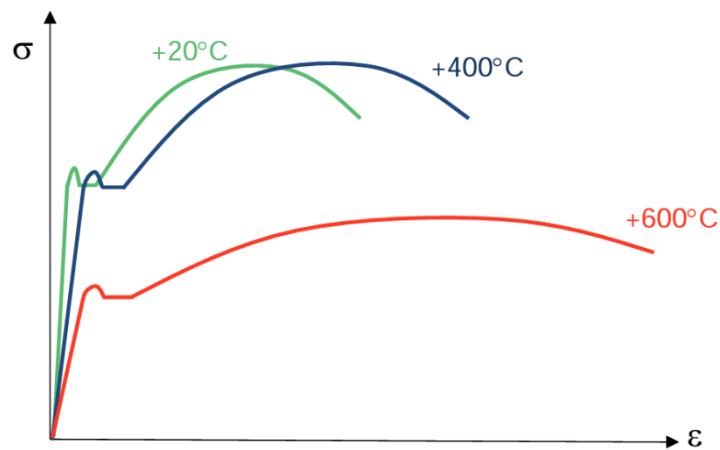
- modul elastičnosti

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \quad (3.18)$$

gdje je:

f_y	N/mm ²	granica popuštanja pri normalnoj temperaturi,
$f_{y,\theta}$	N/mm ²	granica popuštanja pri povišenim temperaturama,
$k_{y,\theta}$	-	faktor redukcije granice popuštanja,
f_y	N/mm ²	granica proporcionalnosti pri normalnoj temperaturi,
$f_{p,\theta}$	N/mm ²	granica proporcionalnosti pri povišenim temperaturama,
$k_{p,\theta}$	-	faktor redukcije granice proporcionalnosti,
E_a	N/mm ²	modul elastičnosti pri normalnoj temperaturi,
$E_{a,\theta}$	N/mm ²	modul elastičnosti pri povišenim temperaturama,
$k_{E,\theta}$	-	faktor redukcije modula elastičnosti.

σ-ε dijagram



Slika 12. Graf krivulja naprezanje-deformacija za čelik na različitim temperaturama [5]

3.4.3 Određivanje kritične temperature čeličnog elementa

Postupak određivanja kritične temperature čeličnog elementa može se podijeliti u 5 dijelova:

- Određivanje kombinacije djelovanja za požarnu računsku situaciju $E_{fi,d,t}$;
- Klasifikacija poprečnog presjeka na povišenoj temperaturi ;
- Određivanje proračunske otpornosti čeličnog elementa na sobnoj temperaturi $R_{fi,d,0}$;
- Određivanje stupnja iskorištenosti čeličnog elementa μ_0 ;
- Određivanje kritične temperature čeličnog elementa θ_{cr} .

3.4.3.1 Određivanje kombinacije djelovanja za požarnu računsku situaciju

Kombinacija djelovanja za izvanredne situacije među koje spada i požar propisana je normom HRN EN 1990:2023 [2]:

$$E_{fi,d,t} = \sum_{i \geq 1} G_{k,i} + (\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,j} \cdot Q_{k,j} \quad (3.19)$$

gdje je:

$G_{k,i}$	N	karakteristična vrijednost stalnog opterećenja,
$Q_{k,i}$	N	karakteristična vrijednost promjenjivog opterećenja,
$\psi_{1,1}$	-	koeficijent kombinacije za učestale vrijednosti,
$\psi_{2,1}$	-	koeficijent kombinacije za nazovistalne vrijednosti.

Učinak djelovanja se može izračunati pomoću učinka djelovanja za normalnu temperaturu:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (3.20)$$

gdje je:

η_{fi}	-	faktor redukcije,
$E_{fi,d,t}$	N/mm ²	računski učinak djelovanja u slučaju požara.

U proračun se uvodi faktor redukcije η_{fi} za proračun pri požaru koji se može odrediti izrazom (3.21):

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + (\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}} \quad (3.21)$$

3.4.3.2 Klasifikacija poprečnog presjeka na povišenoj temperaturi

U EN 1993-1-1 [7] su definirane četiri klase poprečnog presjeka:

Klasa 1 -Posjeduje izrazitu rotacijsku sposobnost koja dozvoljava proračun unutarnjih sila i momenata savijanja statičkih sustava prema teoriji plastičnosti. Otpornost ovakvih konstrukcijskih elemenata računa se također prema teoriji plastičnosti.

Klasa 2 (kompaktni poprečni presjek) - Ovi presjeci imaju ograničenu rotacijsku sposobnost. Proračun unutarnjih sila i momenata savijanja statičkih sustava provodi se prema teoriji elastičnosti, a otpornost ovakvih konstrukcijskih elemenata računa se prema teoriji plastičnosti.

Klasa 3 (nekompaktni poprečni presjeci) - Ovi presjeci ne posjeduju rotacijsku sposobnost. Proračun unutarnjih sila i momenata savijanja statičkih sustava provodi se prema teoriji elastičnosti, a otpornost ovakvih konstrukcijskih elemenata računa se također prema teoriji elastičnosti.

Klasa 4 (vitki poprečni presjeci) - Ovi presjeci također ne posjeduju rotacijsku sposobnost. Proračun unutarnjih sila i momenata savijanja statičkih sustava provodi se prema teoriji elastičnosti, a otpornost ovakvih konstrukcijskih elemenata računa se također prema teoriji elastičnosti, ali uzevši u obzir redukciju poprečnog presjeka zbog lokalnog izbočavanja.

Klase poprečnih presjeka su prikazane na slici 13.

	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4
Metoda globalne analize				
	Plastična	Elastična	Elastična	Elastična
Kriva M-φ				
Nosivost poprečnog preseka				
	Plastična (M_{pl})	Plastična (M_{pl})	Elastična (M_{el})	Elastična - efektni presjek
Kapacitet rotacije	Značajan	Ograničen	Ne postoji	Ne postoji

Slika 13. Klase poprečnih presjeka [1]

Povećane temperature imaju negativan utjecaj na krutost i čvrstoću te je rizik od lokaog izbočavanja povećan pa je potrebno redefinirati klasu čeličnog elementa. Faktor redukcije iznosi:

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.22)$$

U EN 1993-1-2 [7] dana je preporučena vrijednost koeficijenta 0,85 koji uzima u obzir utjecaj temperature kod klasifikacije poprečnog presjeka, a svi ostali parametri ostaju nepromijenjeni.

3.4.3.3 Određivanje proračunske otpornosti čeličnog elementa na sobnoj temperaturi

U trećem dijelu se procjenjuje otpornost čeličnog elementa u trenutku $t=0$. Kod elemenata koji nisu podložni izvijanju procjena se odnosi samo na poprečni presjek. Za elemente kod kojih postoji rizik od izvijanja prilikom proračuna otpornosti radi se provjera stabilnosti. Ovisno o klasifikaciji poprečnog presjeka provodi se plastičan ili elastičan proračun otpornosti.

3.4.3.4 Određivanje stupnja iskorištenosti čeličnog elementa

Stupanj iskorištenosti čeličnog elementa je omjer stvarno primijenjenog naprezanja (opterećenja) na čelični element i najvećeg dopuštenog naprezanja koje taj element može podnijeti prije nego što dođe do njegovog kolapsa. Za određivanje stupnja iskorištenosti vrijedi:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d,t}}{R_{fi,d,0}} \quad (3.23)$$

gdje je:

$E_{fi,d,t}$	N/mm ²	računski učinak djelovanja u slučaju požara,
$R_{fi,d,0}$	N/mm ²	računska vrijednost otpornosti elementa,
μ_0	-	stupanj iskorištenosti.

Vrijednost μ_0 se određuje s obzirom na požarnu otpornost u trenutku $t=0$ na sobnoj temperaturi, ali se dodaje faktor $\gamma_{M,fi}$ za požarnu situaciju.

Pomoću izraza (3.23) nije moguće izračunati kritičnu temperaturu i stupanj iskorištenosti za elemente kod kojih može doći do izvijanja. U Nacionalnom dodatku E EUROCOD-a HRN EN 1993-1-2 [7] su dana alternativna rješenja te se elemente klase poprečnog presjeka 4 prihvaća preporučena vrijednost od 350°C [7]. Za klase 1,2 i 3 poprečnih presjeka se koriste izrazi (3.24), (3.25) i (3.26) u nastavku:

$$\mu_{0,M} = \frac{M_{fi,d,t}}{M_{pl,fl,0}} \quad (3.24)$$

koristi se za klase poprečnog presjeka 1 i 2 za nosače izložene savijanju;

$$\mu_{0,M} = \frac{M_{fi,d,t}}{M_{el,fl,0}} \quad (3.25)$$

koristi se za klase poprečnog presjeka 3 za nosače izložene savijanju;

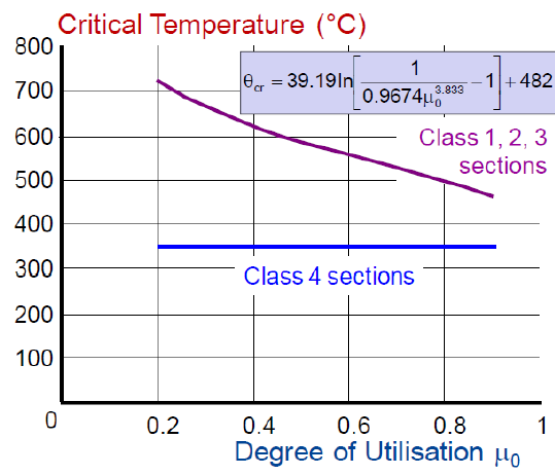
$$\mu_{0,M} = \frac{N_{fi,d,t}}{N_{pl,fl,0}} \quad (3.26)$$

koristi se za stupove izložene izvijanju.

3.4.3.5 Određivanje kritične temperature čeličnog elementa

Postupak određivanja kritične temperature čeličnog elementa se razlikuje za elemente koji su skloni ili nisu skloni nestabilnostima.

Za određivanje kritične temperature čeličnih elemenata koji nisu skloni nestabilnostima koriste se tablice. Svaka vrsta čelika ima zasebnu tablicu u kojoj su definirane kritične temperature.. Za ostale čelične elemente se ne primjenjuje metoda kritične temperature.



Slika 14. Graf ovisnosti kritične temperature i stupnja iskorištenosti za različite klase poprečnog presjeka čeličnih elemenata [3]

Kritične temperature čeličnih elemenata koji su skloni nestabilnostima mogu se odrediti direktno iz tablica. Svaka vrsta čelika ima zasebnu tablicu u kojoj su definirane kritične temperature.

Kako bi se utvrdilo ima li promatrani element dovoljnu otpornost na požar potrebno je odrediti temperaturu elementa nakon zahtijevanog trajanja požara te ju usporediti sa kritičnom temperaturom elementa. Određivanje temperature elementa provodi se za slučajeve zaštićenih i nezaštićenih elemenata.

3.5 Protupožarna zaštita čeličnih konstrukcija

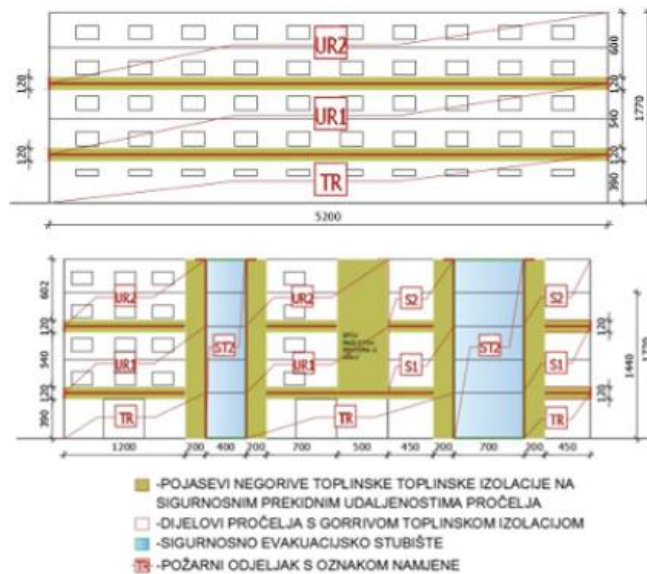
Radi negativnih utjecaja koje visoke temperature imaju na mehanička svojstva čelika potrebno je čelične elemente zaštititi od utjecaja požara. Protupožarna zaštita je skup mjera i postupaka koji se poduzimaju radi sprječavanja nastanka i širenja požara, utvrđivanja i uklanjanja uzroka požara, otkrivanja i gašenja požara, te pružanja pomoći pri uklanjanju posljedica uzrokovanih požarom. Nije moguće konstrukcije u potpunosti zaštititi od požara pa zato protupožarna zaštita ima za cilj usporiti zagrijavanje čeličnih elemenata kako bi se produžilo vrijeme potrebno da elementi dosegnu kritičnu temperaturu pri kojoj čelik može izgubiti nosivost. Protupožarnu zaštitu dijelimo na pasivnu i aktivnu.

3.5.1 Pasivne mjere zaštite od požara

Pasivne mjere zaštite od požara čeličnih konstrukcija odnose se na primjenu materijala, obloga i konstrukcijskih rješenja koja povećavaju otpornost čeličnih elemenata na požar, sprječavaju širenje požara i omogućuju sigurno evakuiranje ljudi u slučaju požara. Ove mjere su obično integrirane u samu konstrukciju i ne zahtijevaju aktivno održavanje. Pasivne mjere zaštite od požara dijele se u dvije kategorije, ne-reaktivni tip i reaktivni tip. U ne-reaktivni tip mjera zaštite spadaju materijali koji zadržavaju početna svojstva u slučaju djelovanja požara, primjer takvih mjera su protupožarne pregrade, pločaste obloge i zaštitni sprejevi. U reaktivni tip mjera zaštite spadaju materijali čija se svojstva mijenjaju u slučaju djelovanja požara, primjer takvih mjera su zaštitni premazi.

Zaštita sprejevima nanosi se prskanjem na elemente što može izazvati dosta nereda. Zaštita sprejevima se primjenjuje na izloženim dijelovima koji zahtijevaju dodatnu obradu gipsanjem i pločama.

Požarne pregrade kao što su požarne zidne i stropne obloge, postavljaju se između odvojenih dijelova zgrade kako bi spriječile širenje požara s jednog dijela na drugi. Pregrade mogu biti izrađene od vatrootpornih materijala koji se sastoje od gipsa, kamene vune, staklene vune ili sličnih materijala. Prolazi i otvori u čeličnim konstrukcijama mogu biti opasna mjesta za širenje požara. Postavljanjem odgovarajućih požarnih pregrada oko tih područja može se spriječiti širenje požara iz jednog dijela zgrade na drugi.



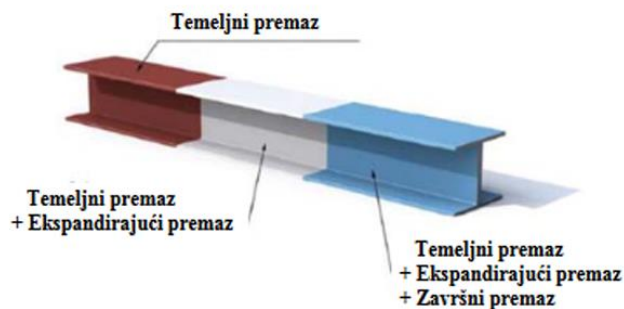
Slika 15. Shema podjele konstrukcije na požarne sektore požarnim pregradama

Pločaste obloge se dijele na dva tipa lagane i teške pločaste obloge. Lagane ploče se koriste da mjestima gdje nije bitna estetika jer nisu prikladne za finu završnu obradu. Teške pločaste obloge se koriste na vidljivim elementima gdje je bitna estetika jer su pogodne za dekorativnu završnu obradu.



Slika 16. Zaštita čeličnih elemenata pločastim elementima

Zaštitni premazi su materijali koji su inertni na niskim temperaturama. Premazi reagiraju na vrućinu tako što bubre na kontrolirani način izrazito povećavajući svoj volumen. Prilikom bubrenja nastaje veliki broj mjehurića koji formiraju ugljenu čađu koja kao izolacijski sloj štiti podlogu. Prednost zaštitnih premaza je što se mogu nanositi u tvornici i na gradilištu.



Slika 17. Zaštita čeličnog elementa protupožarnim premazima

3.5.2 Aktivne mjere zaštite od požara

Aktivne mjere zaštite od požara su interaktivni sustavi i tehnologije koji se aktiviraju i reagiraju na prisutnost požara ili dima kako bi suzbili požar, zaštilili ljude i imovinu te omogućili brzu intervenciju vatrogasaca. Aktivne mjere zaštite uključuju različite sustave detekcije, dojave, gašenja i kontrole požara. Neke od aktivnih mjera zaštite su:

Automatski sustavi dojave uključuju različite senzore i detektore koji prate uvjete okoline, uključujući temperaturu, dim i plamen. Kad sustav detektira abnormalne uvjete automatski aktivira alarme i obavještava vlasnike ili nadležne osobe.



Slika 18. Sustavi dojave požara

Sprinkler sustavi su automatski sustavi za gašenje požara koji se sastoje od cjevovoda, raspršivača (sprinklera) i kontrolnih komponenata. Raspršivači sprinkler sustava su osjetljivi na toplinu te kada detektiraju povišenu temperaturu obično oko 68-79°C automatski počinju gasiti požar. Razlikujemo suhe i mokre sprinkler sustave. Suhi sprinkler sustavi nisu konstanto ispunjeni vodom jer se koriste u prostorima koji nisu klimatizirani jer kod mokrih sustava postoji rizik od smrzavanja vode u cijevima prilikom niskih temperatura. Sprinkler sustavi pružaju niz prednosti, uključujući brzu reakciju na požar, automatsko gašenje požara čim se detektira toplina, smanjenje širenja dima i topline, te omogućavaju siguran izlazak ljudima iz zgrade. Ovi sustavi su vrlo pouzdani i često se koriste u komercijalnim, industrijskim i stambenim zgradama kao sastavni dio općeg plana zaštite od požara.



Slika 19. Sprinkler sustav

Protupožarni aparati su prenosivi uređaji koji sadrže sredstvo za gašenje požara. Protupožarni aparati mogu sadržavati različita sredstva za gašenje kao što su ABC prah, CO₂ i AFFF pjena. Koriste se za suzbijanje manjih požara prije nego što se prošire. Ovi aparati omogućuju brzu i lokaliziranu intervenciju u ranoj fazi požara što može spriječiti širenje požara, štetu na imovini i ozljede ljudi.



Slika 20. Protupožarni aparat

4 PRORAČUN ELEMENATA NA DJELOVANJE POŽARA

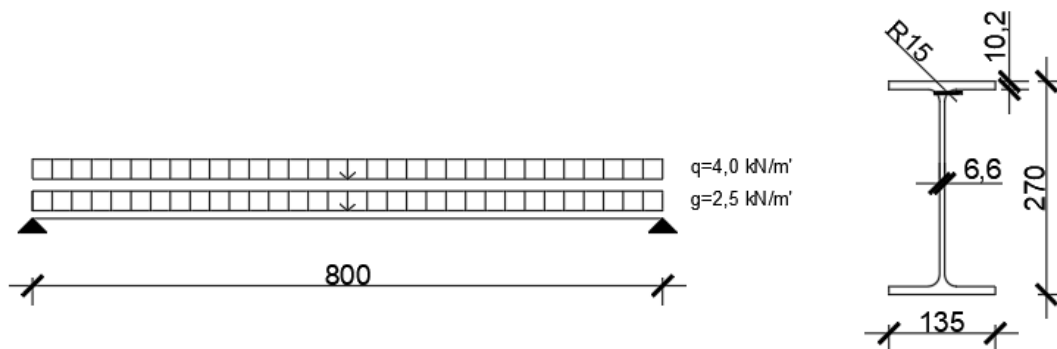
Potrebno je odrediti otpornost na požar nosača od vruće valjanog profila koji je dio međukatne konstrukcije nekog uredskog prostora. Budući da je profil pridržan u gornjem pojasu betonskom pločom, spriječeno je bočno torzijsko izvijanje. Poprečni presjek (element) je nezaštićen. Zahtijevana otpornost obzirom na požar u oba primjera iznosi R15.

4.1 Primjer 1

U ovom primjeru će se zahtijevana otpornost dokazati proračunom vremena potrebnog da element dostigne kritičnu temperaturu i usporedbom sa zahtijevanom otpornosti na požar.

Zadano

Na slici je zadan statički sustav i poprečni presjek nosača međukatne konstrukcije.



Slika 21. Prikaz statičkog sustava i poprečnog presjeka nosača

Karakteristično stalno opterećenje: $g_k = 2,5 \text{ kN/m}$

Karakteristično promjenjivo opterećenje: $q_k = 4,0 \text{ kN/m}$

Kvaliteta čelika S 275: $f_y = 275 \text{ n/mm}^2$

Parcijalni faktori: $\gamma_G = 1,35$

$\gamma_Q = 1,50$

$\gamma_{M0} = 1,00$

Proračun

1. Klasifikacija poprečnog presjeka

$$\frac{c}{t_f} = \frac{49,20}{10,2} = 4,82$$

$$\varepsilon = 0,85 \left(\frac{235}{f_y} \right)^{0,5} = 0,85 \cdot \left(\frac{235}{275} \right)^{0,5} = 0,785$$

Uvjet za klasu presjeka 1

Pojasnica:

$$\frac{c}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon$$

$$4,82 \leq 9 \cdot 0,785$$

$$4,82 \leq 7,07$$

Pojasnica zadovoljava klasu 1.

Hrbat:

$$\frac{d}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27$$

$$33,27 \leq 72 \cdot 0,785$$

$$33,27 \leq 56,52$$

Hrbat zadovoljava klasu 1.

Zaključak: presjek se svrstava u klasu presjeka 1.

2. Dokaz nosača pri normalnoj temperaturi

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} (g_k \cdot \gamma_G + q_k \cdot \gamma_Q) \cdot L^2$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} (2,5 \cdot 1,35 + 4,0 \cdot 1,5) \cdot 8^2 = 75 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} (g_k \cdot \gamma_G + q_k \cdot \gamma_Q) \cdot L$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} (2,5 \cdot 1,35 + 4,0 \cdot 1,5) \cdot 8 = 37,5 \text{ kN}$$

Krajnje granično stanje

Dokaz:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{484,0 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 133,1 \text{ kNm}$$

$$\frac{75,00}{133,1} \leq 1$$

$$0,56 \leq 1 \quad \text{Zadovoljava}$$

Dokaz:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{2214 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 351,52 \text{ kN}$$

$$\frac{37,50}{351,52} \leq 1$$

$$0,11 \leq 1 \quad \text{Zadovoljava}$$

Granično stanje uporabivosti

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{(g_k + q_k) \cdot l^4}{EI_y} = \frac{5}{384} \frac{(2,5 + 4,0) \cdot 8000^4}{210000 \cdot 57,90 \cdot 10^6} = 28,51 \text{ mm}$$

Zahtijeva se:

$$\delta_{lim} = \frac{l}{250} = \frac{8000}{250} = 32,0 \text{ mm}$$

Dokaz:

$$\delta \leq \delta_{lim}$$

$$28,51 \text{ mm} \leq 32,00 \quad \text{Zadovoljava}$$


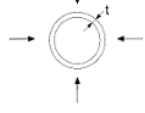


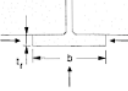
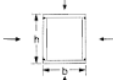
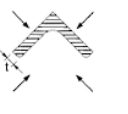
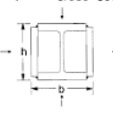
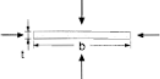

3. Dokaz nosača u slučaju požara

Faktor redukcije za razinu računskog opterećenja:

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_{f,i} \cdot q_k}{g_k \cdot \gamma_G + q_k \cdot \gamma_Q} = \frac{2,5 + 0,3 \cdot 4,0}{2,5 \cdot 1,35 + 4,0 \cdot 1,5} = 0,395$$

Faktor $\psi_{f,i}$ odabran je za prostorije ureda i iznosi $\psi_{2,1} = 0,3$.

Za čelični profil izložen požaru sa tri strane treba odrediti faktor presjeka A_m/V prema tablici 4.2 u HRN EN 1993-1-2 [7].

<p>Open section exposed to fire on all sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perimeter}}{\text{cross-section area}}$ 	<p>Tube exposed to fire on all sides: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>Open section exposed to fire on three sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{surface exposed to fire}}{\text{cross-section area}}$ 	<p>Hollow section (or welded box section of uniform thickness) exposed to fire on all sides:</p> <p>If $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>I-section flange exposed to fire on three sides:</p> $A_m/V = (b + 2t_f)/(bt_f)$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$</p> 	<p>Welded box section exposed to fire on all sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{cross-section area}}$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>Angle exposed to fire on all sides:</p> $A_m/V = 2/t$ 	<p>I-section with box reinforcement, exposed to fire on all sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{cross-section area}}$ 
<p>Flat bar exposed to fire on all sides:</p> $A_m/V = 2(b + t)/(bt)$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$</p> 	<p>Flat bar exposed to fire on three sides:</p> $A_m/V = (b + 2t)/(bt)$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 

Slika 22. Tablica za izračun faktora presjeka prema HRN EN 1993-1-2 [7]

$$\left(\frac{A_m}{V}\right)_b = 147 \text{ m}^{-1}$$

Ako se zanemari utjecaj učinka zasjenjenja faktor korekcije $k_{sh} = 1,0$, što rezultira konzervativnim rješenjem. Za I – presjek faktor k_{sh} iznosi:

$$k_{sh} = 0,9 \cdot \frac{\left[\frac{A_m}{V}\right]_b}{\left[\frac{A_m}{V}\right]}$$

Uzimajući u obzir utjecaj učinka zasjenjenja (shadow effect) faktor presjeka $(A_m/V)_b$ može se modificirati i odrediti prema izrazu:

$$\left(\frac{A_m}{V}\right)_{sh} = 0,9 \cdot \left(\frac{A_m}{V}\right)_b = 0,9 \cdot 147 = 132,3 \text{ m}^{-1}$$

$k_1 = 0,7$ - nezaštićen nosač izložen požaru sa tri strane

$k_2 = 1,0$ - statički određen sustav

Dokaz u domeni vremena:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,req}$$

Pošto je zahtijevana otpornost elementa R15 znači da je $t_{fi,req} = 15 \text{ min}$

Određivanje kritične temperature čelika:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482$$

Da bi se odredila kritična temperatura $\theta_{a,cr}$ potrebno je prvo odrediti razinu iskoristivosti opterećenja za vrijeme $t = 0$:

$$\mu_0 = \frac{\eta_{fi}}{[\gamma_{M,fi}/\gamma_{M1}]} \cdot k_1 \cdot k_2$$

$$\gamma_{M,fi} = 1,0$$

$$\gamma_{M1} = 1,0$$

$$\mu_0 = \eta_{fi} \cdot k_1 \cdot k_2 = 0,395 \cdot 0,70 \cdot 1,0 = 0,277$$

Sada se može odrediti kritična temperatura $\theta_{a,cr}$

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot 0,277^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 675^\circ\text{C}$$

Za izračunatu kritičnu temperaturu čelika $\theta_{a,cr} = 675^\circ\text{C}$ i izračunati faktor presjeka

$\left(\frac{A_m}{V}\right)_{sh} = 132 \text{ m}^{-1}$ očita se iz nomograma vremena otpornosti pri požaru $t_{fi,d}$. To je vrijeme u kojemu će biti dosegnuta kritična temperatura.

Dokaz

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,req}$$

$$16 \text{ min} \geq 15 \text{ min}$$

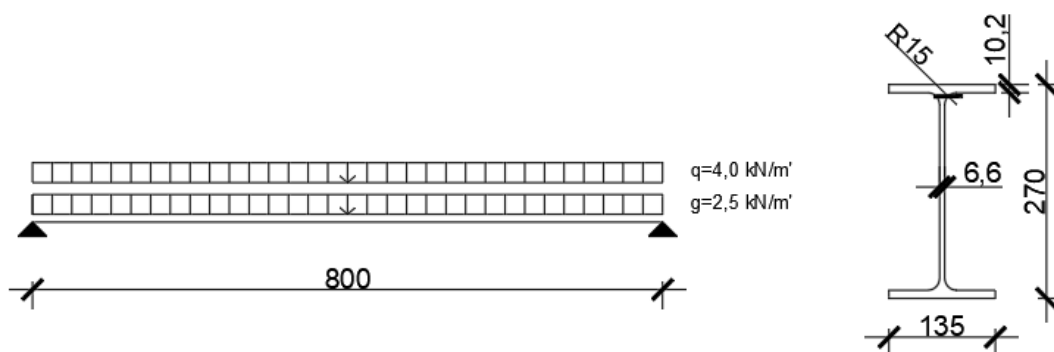
Zaključak: Otpornost presjeka obzirom na požar u nezaštićenj izvedbi zadovoljava R15 bez dodavanja zaštite.

4.2 Primjer 2

U primjeru će se raditi proračun istog elementa kao u primjeru 1, ali je dokaz proračuna obzirom na požar potrebno provesti za nezaštićeni poprečni presjek nosača koji je izložen standardnoj krivulji temperatura-vrijeme.

Zadano

Na slici je zadan statički sustav i poprečni presjek nosača međukatne konstrukcije.



Slika 23. Prikaz statičkog sustava i poprečnog presjeka nosača

Proračun

1. Klasifikacija poprečnog presjeka

Poprečni presjek se klasificira kao klasa 1 kako je navedeno u primjeru 1.

2. Dokaz nosača pri normalnoj temperaturi

Dokazi zadovoljavaju kako je navedeno u primjeru 1.

3. Dokaz nosača u slučaju požara

Faktor redukcije za razinu računskog opterećenja

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_{f,i} \cdot q_k}{g_k \cdot \gamma_G + q_k \cdot \gamma_Q} = \frac{2,5 + 0,3 \cdot 4,0}{2,5 \cdot 1,35 + 4,0 \cdot 1,5} = 0,395$$

Faktor $\psi_{f,i}$ odabran je za prostorije ureda i iznosi $\psi_{2,1} = 0,3$.

Računske vrijednosti momenta i poprečne sile za slučaj požara

$$M_{fi,Ed} = \eta_{fi} \cdot M_{Ed} = 0,395 \cdot 75 = 29,63 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Ed} = \eta_{fi} \cdot V_{Ed} = 0,395 \cdot 37,5 = 14,81 \text{ kN}$$

Određivanje temperature plina prema standardnoj krivulji temperatura-vrijeme

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

Određivanje temperature nosača

Povećanje temperature čeličnog poprečnog presjeka za vremenske intervale $\Delta t = 5$ sek određuje se prema izrazu:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \dot{h}_{net} \cdot \Delta t$$

Faktor korekcije za učinak zasjenjenja za IPE presjek određuje se prema izrazu:

$$k_{sh} = 0,9 \cdot \frac{\left[\frac{A_m}{V}\right]_b}{\left[\frac{A_m}{V}\right]}$$

$$\left[\frac{A_m}{V}\right] = \frac{3b + 2(h - t_w - 4r) + 2\pi r}{A} =$$

$$= \frac{3 \cdot 135 + 2(270 - 6,6 - 4 \cdot 15) + 2 \cdot \pi \cdot 15}{4590} = 0,197 \text{mm}^{-1} = 197 \text{m}^{-1}$$

$$\left[\frac{A_m}{V}\right]_b = \frac{b + 2h}{A} = \frac{135 + 2 \cdot 270}{4590} = 0,147 \text{mm}^{-1} = 147 \text{m}^{-1}$$

$$k_{sh} = 0,9 \cdot \frac{0,147}{0,197} = 0,9 \cdot 0,746 = 0,671$$

Pomoću krivulje temperatura-vrijeme za čelik za plin određena je temperatura u čeličnom presjeku nakon $t = 15$ minuta iznosi: $\theta_{a,t} = 635^\circ\text{C}$

Dokaz u domeni otpornosti

1. Klasifikacija presjeka pri povišenoj temperaturi

Pojas u tlaku:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{49,20}{10,2} = 4,82$$

$$\varepsilon = 0,85 \left(\frac{235}{f_y}\right)^{0,5} = 0,85 \cdot \left(\frac{235}{275}\right)^{0,5} = 0,785 \text{ Uvjet za klasu presjeka 1}$$

Pojasnica:

$$\frac{c}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon$$

$$4,82 \leq 9 \cdot 0,785$$

$$4,82 \leq 7,07$$

Pojasnica zadovoljava klasu 1.

Hrbat:

$$\frac{d}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27$$

$$33,27 \leq 72 \cdot 0,785$$

$$33,27 \leq 56,52$$

Hrbat zadovoljava klasu 1.

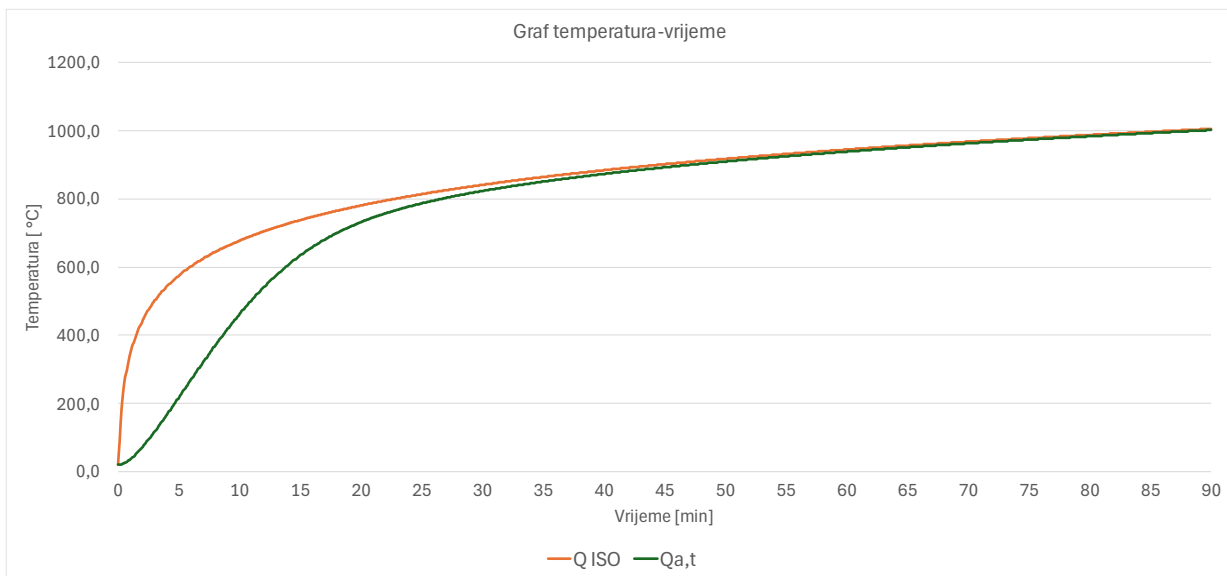
Pri povišenim temperaturama poprečni se presjek može svrstati u klasu 1.

2. Računska otpornost pri povišenoj temperaturi

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{k_1 \cdot k_2} \frac{k_{y,\theta} W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Tablica 3. Izračunavanje temperature čelika

min	sek	t min	θ_g °C	$\dot{h}_{net,r}$ W/m ²	$\dot{h}_{net,c}$ W/m ²	$\dot{h}_{net,d}$ W/m ²	Ca J/kg °C	$\Delta\theta_{a,t}$ °C	$\theta_{a,t}$ °C
	0	0,000	20,0	0	0	0	440	0,0	20,0
	5	0,083	96,5	447,6	1913,4	2361,1	440	0,45	20,0
	10	0,167	147,0	940,1	3162,5	4102,6	440,22	0,78	20,5
	15	0,250	184,6	1442,9	4084,3	5527,2	440,61	1,06	21,2
	20	0,333	214,7	1943,1	4809,5	6752,7	441,14	1,29	22,3
...
14	40	14,667	735,2	15057,5	2724,3	17781,8	667,19	2,24	626,3
14	45	14,750	736,1	14934,6	2689,2	17623,8	667,76	2,22	628,5
14	50	14,833	736,9	14811,9	2654,6	17466,5	668,32	2,20	630,7
14	55	14,917	737,7	14689,4	2620,4	17309,8	668,87	2,18	632,9
15	00	15,000	738,6	14567,1	2586,6	17153,7	669,42	2,16	635,1
15	5	15,083	739,4	14445,2	2553,3	16998,4	669,96	2,14	637,3



Slika 24. ISO požarna krivulja rasta temperature čelika i plina u prostoriji

Faktor redukcije $k_{y,\theta}$, za temperaturu čelika $\theta_a = 635^\circ\text{C}$ iznosi:

$$k_{y,\theta} = 0,386$$

Odgovarajući faktori prilagodbe:

$$k_1 = 0,7 - \text{nezaštićen nosač izložen požaru sa tri strane}$$

$$k_2 = 1,0 - \text{statički određen sustav}$$

Računska otpornost na savijanje pri temperaturi $\theta_a = 635^\circ\text{C}$ glasi:

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{k_1 \cdot k_2} \frac{k_{y,\theta} W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{0,7 \cdot 1,0} \frac{0,386 \cdot 484,0 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 73,40 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,t,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{29,63}{73,40} \leq 1$$

$$0,40 \leq 1 \quad \text{Zadovoljava}$$

Računska vrijednost posmične otpornosti glasi:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M,fi}} = 0,386 \frac{2214 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 135,69 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{fi,Ed}}{V_{fi,t,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{14,81}{135,69} \leq 1$$

$0,11 \leq 1$ *Zadovoljava*

Zaključak: Proračun poprečnog presjeka za slučaj požara zadovoljava.

Proračunom je također moguće odrediti pri kojoj temperaturi će doći do otkazivanja elementa.

Računska otpornost na savijanje pri temperaturi $\theta_a = 891,6^\circ\text{C}$ glasi:

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{k_1 \cdot k_2} \frac{k_{y,\theta} W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{0,7 \cdot 1,0} \frac{0,1558 \cdot 484,0 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 29,62 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,t,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{29,63}{29,62} \leq 1$$

$1.0003 > 1$ *NE Zadovoljava*

Element će otkazati u trenutku kada temperatura elementa dosegne $891,6^\circ\text{C}$. Faktor redukcije za granicu popuštanja će iznositi 0,1558. Prema grafu vrijeme potrebno da element dosegne tu temperaturu iznosi 44 minute i 35 sekundi.

5 ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio analizirati utjecaj požara kao djelovanja na čelične konstrukcije i prikazati metode proračuna. Požar kao djelovanje se ne može predvidjeti, zato i spada u izvanredna djelovanja, ali se konstrukcije mogu projektirati na način da u slučaju nastanka požara šteta i gubitak života budu što manji. Konstrukcija se treba dovoljno dugo opirati djelovanju požara kako bi mogli sigurno evakuirati ljude i omogućiti spasilačkim službama da ugase požar na siguran način. Na primjeru proračuna je prikazan proračun jednostavne proste grede izložene požaru preko dvije metode. Prvom metodom je proračunato vrijeme potrebno da čelični element dosegne kritičnu temperaturu za zadano opterećenje te se to vrijeme usporedilo sa zahtijevanim vremenom otpornosti elementa. Dokazano je da je vrijeme potrebno da element dosegne kritičnu temperaturu veće od traženog razreda otpornosti na požar R15 koje je bilo zadano u primjeru. Drugom metodom je u proračunu bila umanjena otpornost čeličnog elementa u skladu sa izračunatom temperaturom u elementu nakon trajanja požara 15 minuta. U drugom proračunu je također dokazano da element zadovoljava proračun, ali je proračunom dobivena temperatura bila niža od kritične temperature u 1. primjeru. Obe metode su dale približno iste rezultate pri izračunu temperature u trenutku 15 minuta ali su kritične temperature pri kojima dolazi do otkazivanja elementa drugačije.. U prvom primjeru je vidljivo da iako pri normalnim temperaturama iskoristivost presjeka je bila samo 28% nakon 16 minuta djelovanja požara dolazi do otkazivanja elementa, dok u drugoj metodi temperaturu koju postiže element prije otkazivanja iznosi 891,6°C te proračunom dobiveno vrijeme da se dosegne ta temperatura iznosi 44 minute i 35 sekundi. U oba primjerka je vidljivo da elementi koji nisu pod velikim opterećenjima u normalnom stanju naprezanja nakon što su direktno izloženi požaru jako brzo gube svoju otpornost. To pokazuje važnost kvalitetnog pristupa zaštiti od požara gdje se zahtijevaju otpornosti pojedinih elemenata u vremenu od 30, 60, 90 i više minuta. Time se osigurava dovoljan vremenski period za evakuaciju ljudi i rad hitnih službi.

POPIS LITERATURE

- [1] Milanović, M.; Rogić, I.; Šitum, A.: „Procjena metoda za proračun požarne otpornosti čeličnog nosača“, Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.
- [2] HRN EN 1990
- [3] Vassart, O.; Zhao, B.; Cajot, L.G.; Robert, F.; Meyer, U.; Frangi, A.: „Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design“, JRC Science and Policy Reports, Luxembourg, 2014.
- [4] Androić, B.; Dujmović, D.; Džeba, I.: „Čelične konstrukcije 1“, IA Projektiranje, Zagreb, 2009.
- [5] Lukačević, I.; Skejić, D.: Predavanje iz kolegija Metalne konstrukcije 1 na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu „Zaštita od požara“, 2023.
- [6] „STEEL BUILDINGS IN EUROPE, Multy – Storey Steel Buildings, Part 6: Fire Engineering“
- [7] HRN EN 1993
- [8] Peroš, B.; Boko, I.: „Otpornost konstrukcija na požar“, Građevinsko – Arhitektonski fakultet, Split, 2009.
- [9] Boko, I.; Peroš, B.; Torić, N.: „Pouzdanost čeličnih konstrukcija u požaru“, Građevinar 62 (2010) 5, 389-400
- [10] Development of Skills Facilitating Implementation of Structural Eurocodes: Handbook 5, Design of buildings for the fire situation, Leonardo da Vinci Pilot Project, Luxembourg, 2005.
- [11] HRN EN 1991
- [12] Klepić, M.: diplomski rad „Pouzdanost čelične konstrukcije višekatne zgrade izložene požaru“, 2022.

POPIS SLIKA

Slika 1. Graf omjera smanjene i početne čvrstoće čelika po temperaturi čelika [1]	3
Slika 2. Graf temperature plina tijekom trajanja požara [1]	4
Slika 3. Krivulje realnih požara i ISO standardna krivulja [2]	5
Slika 4. Graf krivulja različitih rata oslobođenja topline za isto požarno opterećenje [3]	8
Slika 5. Graf rate oslobođenja topline Q ovisno o vremenu [4]	10
Slika 6. Graf dokaza otpornosti konstrukcije u domeni čvrstoće i vremena [5]	10
Slika 7. Graf dokaza otpornosti konstrukcije u domeni temperature [5]	10
Slika 8. Graf nominalnih krivulja temperatura-vrijeme	12
Slika 9. Graf standardne i parametarske krivulje temperatura-vrijeme [6].....	13
Slika 10. CFD model požara	14
Slika 11. Različiti pristupi analizi konstrukcije izložene požaru [4]	15
Slika 12. Graf krivulja naprezanje-deformacija za čelik na različitim temperaturama [5].....	17
Slika 13. Klase poprečnih presjeka [1]	19
Slika 14. Graf ovisnosti kritične temperature i stupnja iskorištenosti za različite klase poprečnog presjeka čeličnih elemenata [3].....	21
Slika 15. Shema podjele konstrukcije na požarne sektore požarnim pregradama.....	23
Slika 16. Zaštita čeličnih elemenata pločastim elementima.....	23
Slika 17. Zaštita čeličnog elementa protupožarnim premazima	24
Slika 18. Sustavi dojava požara	24
Slika 19. Sprinkler sustav	25
Slika 20. Protupožarni aparat	25
Slika 21. Prikaz statičkog sustava i poprečnog presjeka nosača	26
Slika 22. Tablica za izračun faktora presjeka prema HRN EN 1993-1-2 [7]	29
Slika 23. Prikaz statičkog sustava i poprečnog presjeka nosača	31
Slika 24. ISO požarna krivulja rasta temperature čelika i plina u prostoriji	34

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednost faktora δq_1 i δq_2	7
Tablica 2. Vrijednosti faktora δn_i	8
Tablica 3. Izračunavanje temperature čelika	33