

Otpornost konstrukcija na djelovanje požara – primjeri proračuna

Bernardin Peroš¹, Ivica Boko¹, Neno Torić¹

¹Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice Hrvatske 15, 21000 Split

Sažetak

Da bi se mogao shvatiti utjecaj požara na konstrukciju, sukladno drugim vrstama ekstremnih djelovanja, potrebna su temeljita znanstvena istraživanja na razini materijala, konstrukcije, kao i samog fenomena požara. Slijedom navedenih činjenica, na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu već se 20-tak godina provode istraživanja u području požarnog inženjerstva, te će se u radu na primjerima proračuna otpornosti konstrukcija na djelovanje požara nekoliko vrlo složenih građevina prezentirati dobiveni rezultati istraživanja sukladno preporukama europskih normi.

Ključne riječi: požar, čelik, model zona, model polja, mehanička svojstva, požarno opterećenje

Fire resistance of structures exposed to fire – examples of calculation

Abstract

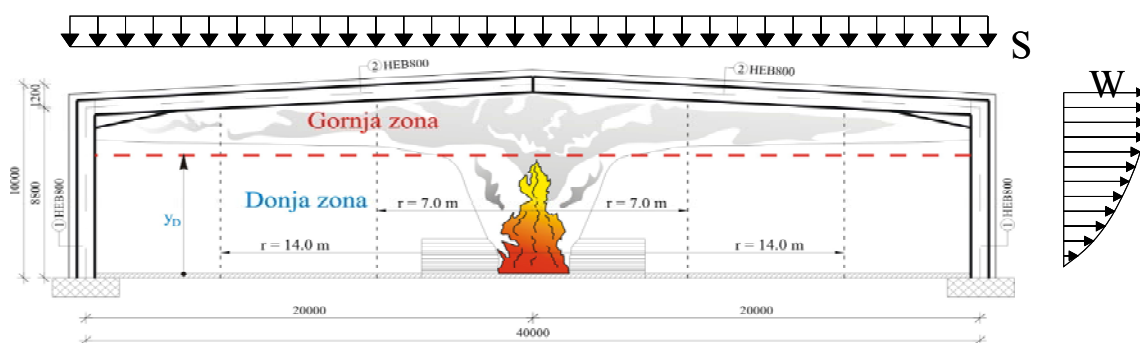
Fire represents one of the extreme conditions during the lifetime of engineering structures. In order to fully understand the impact of fire on the load bearing function of structures, a fundamental research on material and structure behaviour including the fire phenomenon is needed. Consequently, for the past twenty years an extensive research in the field of fire engineering has been done on Faculty of civil engineering, architecture and geodesy in Split. This paper presents several examples of calculation of load bearing resistance of structures exposed to fire which are in accordance with European norms.

Key words: fire, steel, zone model, field model, mechanical properties, fire load

1 Uvod

Prihvatanje europskih normi u hrvatskoj građevinskoj regulativi definiralo je i opća načela u dijelu projektiranja i građenja u području zaštite od požara. To znači da je djelovanje požara na građevine kao "novo" precizno definirano "djelovanje" izjednačeno u europskoj i hrvatskoj zakonskoj i tehničkoj regulativi s ostalim ekstremnim djelovanjima na građevine. Spomenuta činjenica posljedica je svakodnevnih ljudskih i materijalnih gubitaka koje izaziva ovo djelovanje na građevinu. U razvijenijim europskim zemljama (primjerice Njemačka, Engleska) svake godine pogine u požaru od 700 do 800 ljudi, a materijalna šteta na objektima kreće se oko dvije milijarde Eura. Prema podacima Svjetskog statističkog centra u Ženevi, požari svake godine oštete svjetsko gospodarstvo za cca 1% bruto nacionalnog dohotka. Slično stanje je i u Hrvatskoj gdje svake godine pogine u požarima od 30 do 40 ljudi, a šteta na građevinskim objektima doseže vrijednost i do 40 – 50 milijuna Eura. Požare je, dakako, vrlo teško spriječiti, pa jedino što preostaje je projektirati i graditi objekte na način koji omogućuje ostvarenje zahtjeva iz europske i hrvatske regulative. Kod proračuna konstrukcija u slučaju djelovanja požara primjenjuju se sljedeća načela [1,2,3]:

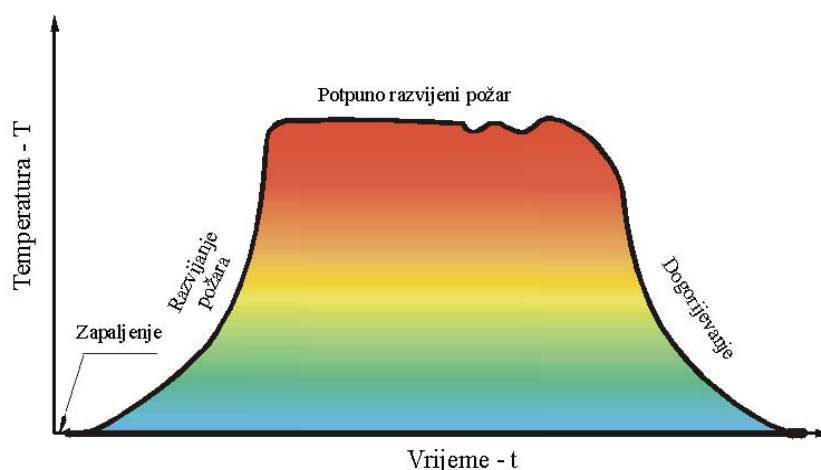
- Analiza dostatne nosivosti konstrukcija u požaru temelji se na konceptu proračuna kao i za normalne temperature s tim što se ovdje u kombinaciji opterećenja uzima i djelovanje požara kao izvanredno (udesno) djelovanje (slika 1).
- Utjecaj djelovanja požara na konstrukcije u nekom prostoru određuje se vrijednošću maksimalne ostvarene temperature u tom prostoru ovisno o požarnom opterećenju, veličini i ventilaciji prostora.
- Realno djelovanje požara na konstrukcije iskazuje se parametarskom krivuljom temperatura–vrijeme koja se odredi na temelju relevantnih fizičkih parametara i za koju se izračuna otpornost konstrukcije primjenom računskih modela po načelima termodinamike.
- U proračunu se također uzima smanjenje otpornosti presjeka uslijed degradacije svojstva materijala na visokim temperaturama.



Slika 1. Sheme opterećenja glavne nosive konstrukcije industrijske hale

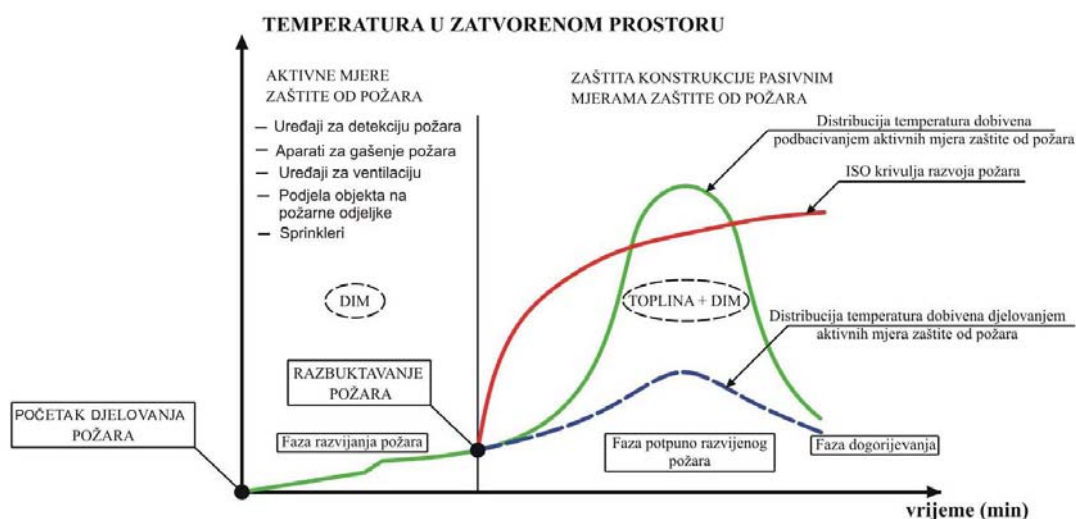
2 Modeliranje razvoja požara u zatvorenim prostorima

Požar u zatvorenim prostorima građevina prolazi kroz tri faze: fazu razvijanja, fazu potpuno razvijenog požara i fazu dogorijevanja. Faze razvoja požara prikazane su na slici 2.



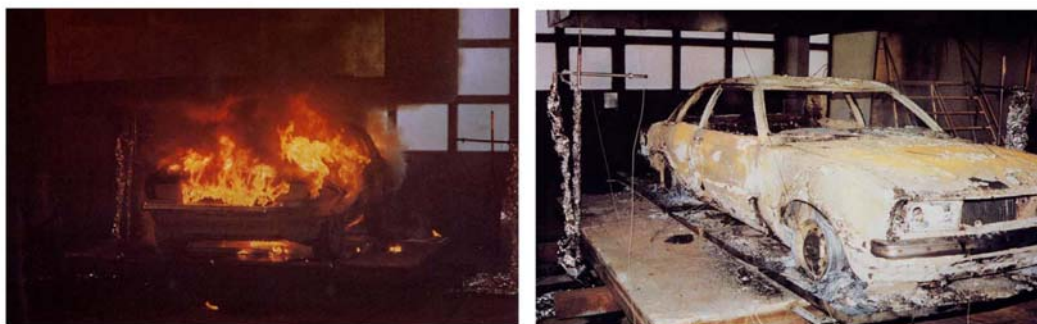
Slika 2. Faze razvoja požara

Ovisno o karakteristikama objekta i požarnom opterećenju te mjerama i smjernicama za zaštitu ljudi i imovine može se izraditi scenario razvoja požara u objektu, koji je prikazan na slici 3.



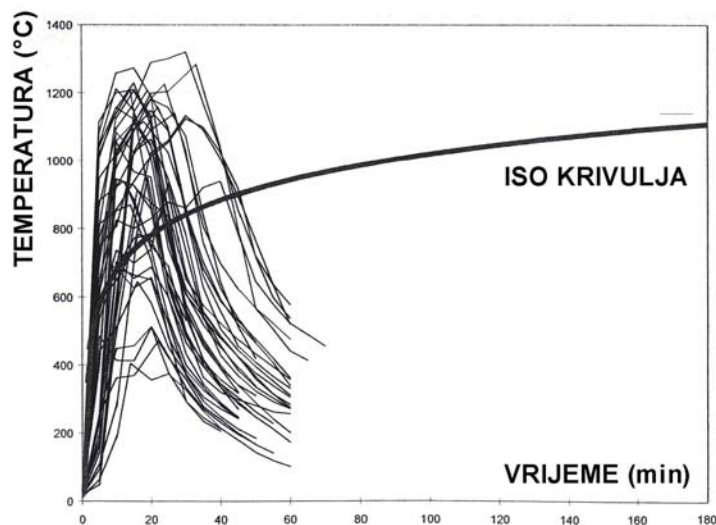
Slika 3. Scenario razvoja požara u objektu [4]

Posljednjih 20-tak godina intenzivno se provode ispitivanja realnog požarnog djelovanja u zatvorenim prostorima u više laboratorija i instituta u Europi i svijetu (slika 4).



Slika 4. Prikaz ispitivanja realnog požarnog djelovanja u garažama

Ovo je rezultiralo dobivanjem egzaktnih zakonitosti o realnom požaru u zatvorenim prostorima na razini parametarskih krivulja temperatura-vrijeme.



Slika 5. Usporedba ISO standardne temperaturne krivulje i parametarskih krivulja realnog požara u skladišnim prostorima (50 požarnih testova)

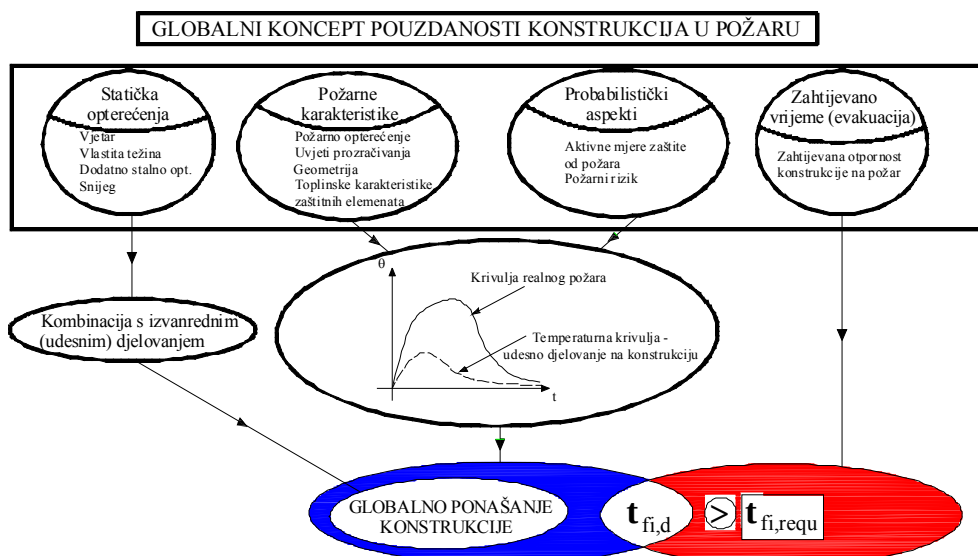
Sam postupak modeliranja realnog požara je vrlo složena zadaća i vodi nas u interdisciplinarno znanstveno područje gdje se koriste razni računalni modeli koji se mogu podijeliti na dva temeljna tipa: deterministički model (modeliranje požara uz korištenje poznatih fizikalno – kemijskih zakonitosti) te probabilistički model (predviđanje razvoja požara na temelju zakona vjerojatnosti). Najčešće se koriste deterministički modeli razvoja požara koji se dijele na modele zona i modele polja. Primjenom modela polja se domena zatvorenog prostora dijeli na niz sub-volumena, na koje se primjenjuju temeljni zakoni očuvanja: zakon očuvanja mase, zakon očuvanja količine gibanja, zakon očuvanja energije i pripadajuće konstitutivne relacije (jednadžba idealnog plina, Fourierov zakon i dr.) [5]. Primjenom modela zona se domena zatvorenog prostora dijeli u određeni broj zona tako da svaka zona ima približno jednake fizikalne karakteristike (masu, gustoću, temperaturu, tlak i unutarnju energiju). Zakoni očuvanja se primjenjuju za svaku pojedinu zonu [6].

3 Formati proračuna otpornosti konstrukcija na požar

Koncept pouzdanosti konstrukcija u požaru očituje se u sljedećem [2]:

- Primjenom znanstvenih metoda u proračunu realnog požarnog opterećenja u objektima treba odrediti stupanj sigurnosti nosivih konstrukcija.
- Odrediti vrijeme otpornosti (sigurnosti) konstrukcije na realni požar $t_{fi,d}$.
- S aspekta sigurnosti konstrukcije odrediti zahtijevano vrijeme potrebno za evakuiranje ljudi i zaštitu imovine $t_{fi,req}$ (rad vatrogasnih i specijalnih jedinica za intervencije u slučaju požara).

Format pouzdanosti konstrukcije u požaru iskazuje se odnosom $t_{fi,d} > t_{fi,req}$, što je prikazano na slici 6.



Slika 6. Globalni koncept pouzdanosti konstrukcija u požaru

Navedeni prikaz uvodi nas u novi pristup proračunu otpornosti konstrukcija na požar gdje se primjenom znanstvenih metoda i proračunskih modela na temelju realnog požarnog opterećenja provodi proračun konstrukcija izloženih požaru (visoke temperature – izvanredno djelovanje na konstrukcije). Proračun se sukladno preporukama Eurokoda provodi dokazom u tri područja: vremenu, temperaturi i nosivosti (čvrstoći).

Ovaj koncept temelji se metodološki na statističkim analizama i podrazumijeva primjenu suvremenih probabilističkih metoda, tj. daje mogućnost inženjerskog pristupa u proračunu zaštite i sigurnosti konstrukcija od požara. Riječ je o analizi realnog požara i proračunu parametarskih krivulja temperatura-vrijeme. Slijedom ovakvog pristupa moguća je i kvantifikacija i procjena rizika kod otkazivanja nosivosti konstrukcija u slučaju djelovanja požara.

Dokaz otpornosti konstrukcija u području nosivosti vodi nas na formiranje jednadžbi krajnjeg graničnog stanja u obliku koji je prikazan na slici 7 [7].

$$\varphi \left[\gamma_G \cdot G_K + \psi \left(\gamma_Q \cdot Q_K \right) + \gamma_A \cdot A_K \right] \leq \frac{R_K}{\gamma_R}$$

The diagram shows the breakdown of the structural resistance equation. Red arrows point from each term in the equation to its characteristic value: $\gamma_G \cdot G_K$ to 'Karakteristicna vrijednost stalnog djelovanja', $\psi \left(\gamma_Q \cdot Q_K \right)$ to 'Karakteristicna vrijednost promjenjivog djelovanja', and $\gamma_A \cdot A_K$ to 'Karakteristicna vrijednost izvanrednog djelovanja'. The right side of the equation, $\frac{R_K}{\gamma_R}$, is labeled 'Karakteristicna vrijednost otpornosti'. From 'Karakteristicna vrijednost otpornosti', two arrows point to 'degradacija presjeka' and 'degradacija mehaničkih karakteristika'. From 'Karakteristicna vrijednost izvanrednog djelovanja', an arrow points to 'mehanicko djelovanje'.

Slika 7. Dokaz otpornosti konstrukcija u području nosivosti

Kod dokaza nosivosti čeličnih nosivih elemenata proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala (naponska i deformacijska svojstva) $X_{d,fi}$ definiraju se na sljedeći način [8]:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \frac{X_k}{\gamma_{m,fi}} \quad (1)$$

gdje je: $X_{d,fi}$ - karakteristična vrijednost naponskog i deformacijskog svojstva (granica popuštanja ili modul elastičnosti), za proračun konstrukcije pri atmosferskoj temperaturi, k_{θ} - koeficijent redukcije naponskog i deformacijskog svojstva, koji ovisi o promatranoj temperaturi u odnosu na atmosfersku temperaturu, $\gamma_{m,fi}$ - parcijalni faktor sigurnosti za odgovarajuće svojstvo materijala, za slučaj požara (=1.00).

Koeficijent redukcije za naponsko-deformacijska svojstva čelika na požarnim temperaturama dan je u tablici 1.

Tablica 1. Koeficijenti redukcije mehaničkih svojstava čelika na požarnim temperaturama

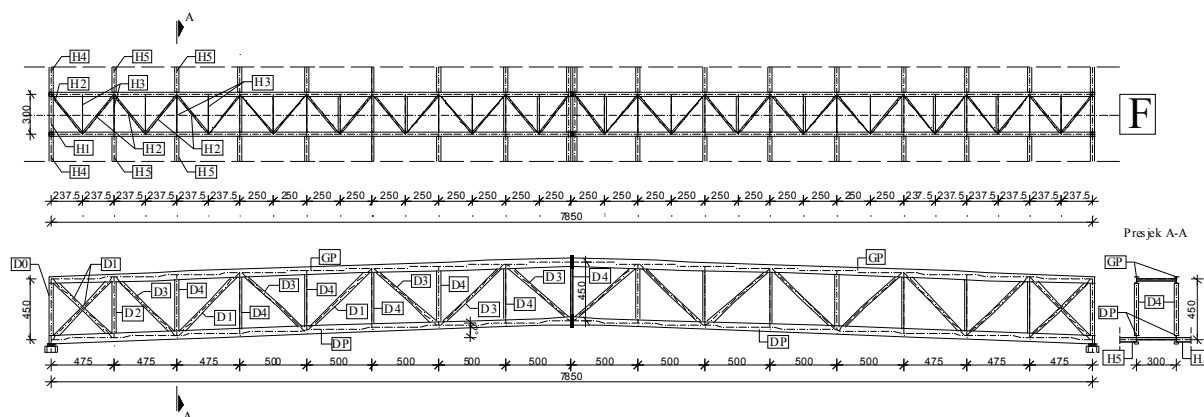
Temperatura čelika θ_a [°C]	Koeficijenti redukcije			
	Koeficijent redukcije za efektivnu granicu popuštanja $k_{y,\theta}=f_{y,\theta}/f_y$	Modificirani koeficijent kriterija deformacije $k_{x,\theta}=f_{x,\theta}/f_y$	Koeficijent redukcije za granicu proporcionalnosti $k_{p,\theta}=f_{p,\theta}/f_y$	Koeficijent redukcije za početni modul elastičnosti $k_{E,\theta}=E_{a,\theta}/E_a$
20	1.000	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000	1.000
200	1.000	0.922	0.807	0.900
300	1.000	0.845	0.613	0.800
400	1.000	0.770	0.420	0.700
500	0.780	0.615	0.360	0.600
600	0.470	0.354	0.180	0.310
700	0.230	0.167	0.075	0.130
800	0.110	0.087	0.050	0.090
900	0.060	0.051	0.0375	0.0675
1000	0.040	0.034	0.025	0.045
1100	0.020	0.017	0.0125	0.0225
1200	0.000	0.000	0.000	0.000

4 Primjeri proračuna

4.1 Spaladium arena – Split

4.1.1 Nosiva konstrukcija

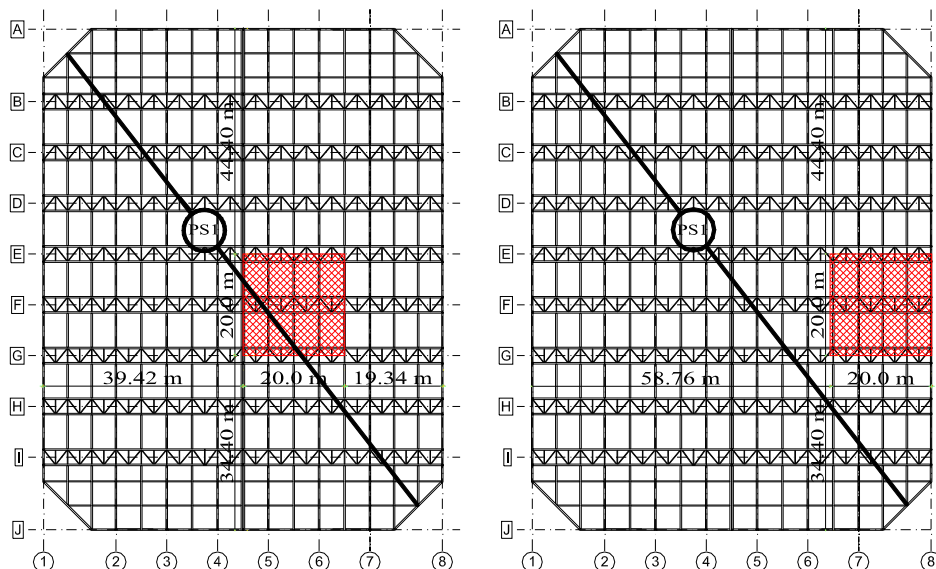
Krovna konstrukcija dvorane natkriva prostor koji predstavlja jedinstveni požarni odjeljak kvadratičnog oblika dimenzija 80x100 m, visine 30 m. Svijetla visina objekta do donjeg pojasa rešetkaste konstrukcije iznosi 24.5 m, a od najviše točke tribina do najniže točke donjeg pojasa nosive konstrukcije 6.2 m. Na slici 8 prikazan je uzdužni i poprečni presjek karakterističnog segmenta krovne rešetkaste konstrukcije.



Slika 8. Uzdužni i poprečni presjek krovne konstrukcije Spaladium arene

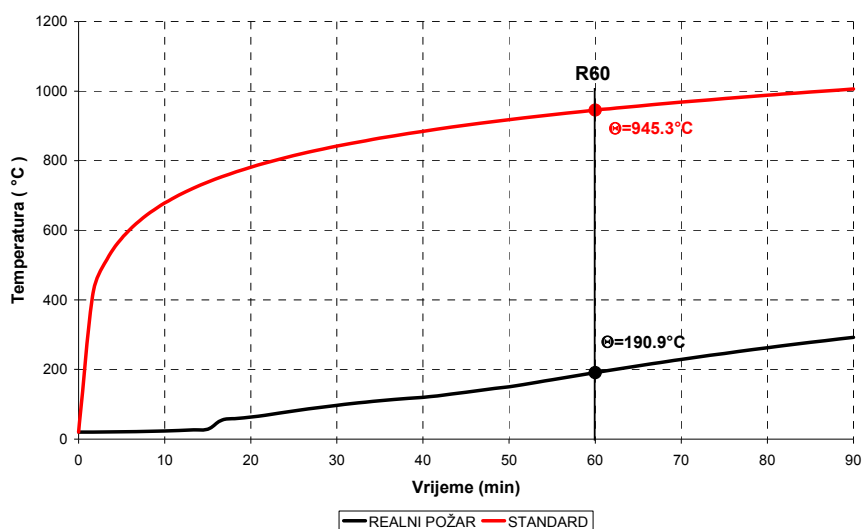
4.1.2 Rezultati proračuna

Za analizu otpornosti konstrukcije simulirane su dvije požarne situacije: požar na borilištu (požar u sredini) te požar na vrhu tribina (požar na rubu). Prema projektnom zadatku, zahtjevana vatrootpornost konstrukcije je 60 minuta (R60).

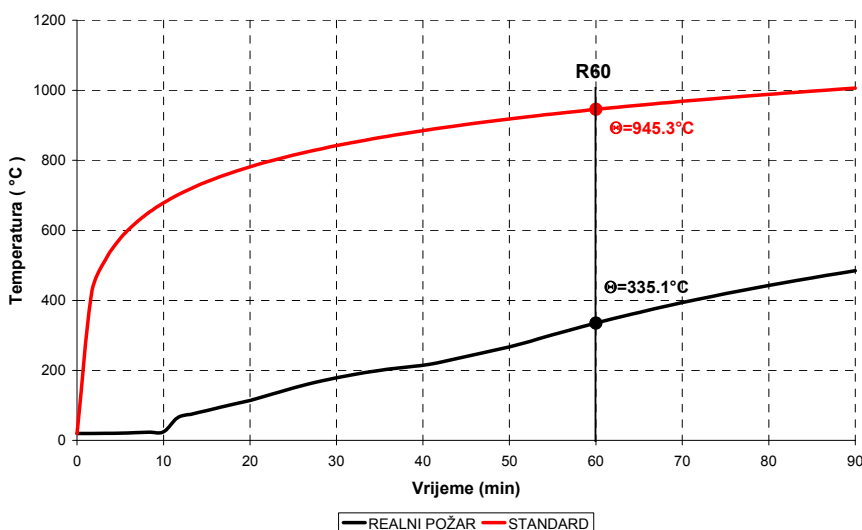


Slika 9. Požarne situacije – požar u sredini i požar na rubu dvorane

Grafički prikaz odnosa temperatura – vrijeme za Standardnu krivulju ISO-834 i krivulju realnog požara (dobivenu simulacijom realnog požara modelom zona [6]) za požar na rubu dan je na slikama 10 i 11 [2].



Slika 10. Temperatura u prostoru – razina gornjeg pojasa rešetke (GP)



Slika 11. Temperatura u prostoru – razina donjeg pojasa rešetke (DP)

Dokaz nosivosti prema Eurokodu (semiprobabilistička metoda razine I) provodi se ovisno o proračunskoj situaciji za krajnje granično stanje gdje je potrebno dokazati odnos: $E_d / R_d \leq 1.0$, gdje je E_d – proračunska rezna sila u elementu konstrukcije a R_d – proračunska otpornost elementa. Omjer E_d / R_d predstavlja iskorištenost pojedinog elementa konstrukcije. U nastavku su dani samo rezultati proračuna karakterističnih štapova (tablica 2.) za mjerodavnu kombinaciju opterećenja (izvanrednu kombinaciju) koja uključuje stalno djelovanje i požarno djelovanje (požar na rubu).

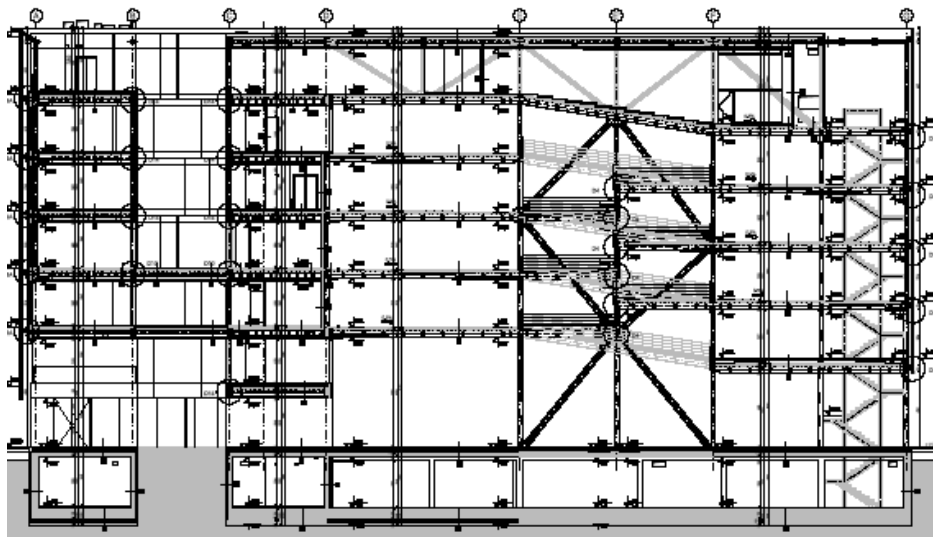
Tablica 2. Rezultati dokaza nosivosti prema Eurokodu za karakteristične elemente rešetkaste konstrukcije – slučaj realnog požara

Oznaka elementa	Iskorištenost (Eurokod)
GP	0.03
DP	0.05
H2	0.99

4.2 Garaža u Zagrebu

4.2.1 Nosiva konstrukcija

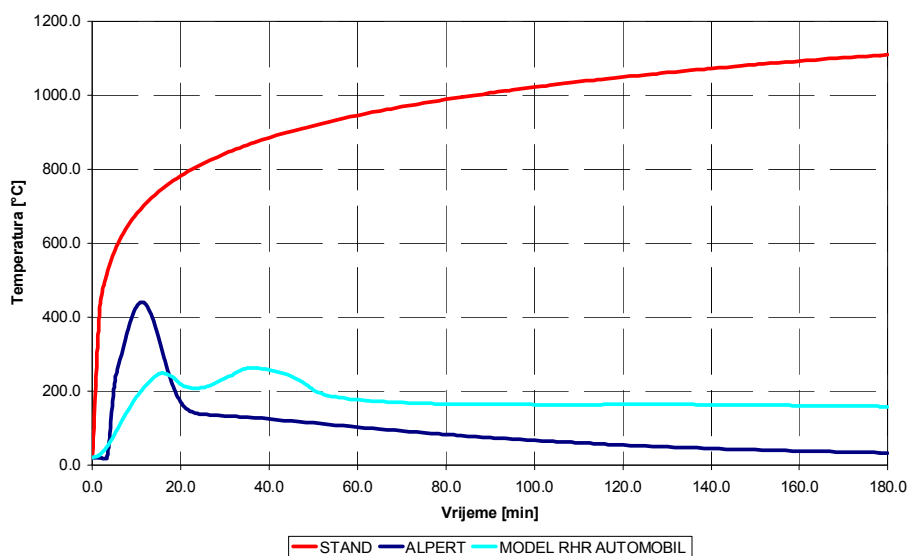
Nosiva konstrukcija garaže sastoji se od 5 etaža, površine 36,4x45,9 m te spada u otvoreni tip garaže. Nosiva međukatna konstrukcija garaže je spregnuta konstrukcija koja se sastoji od čeličnih profila HE450B te sekundarnih profila IPE270. Svijetla visina od poda garaže do donje pojasnice profila HE450B iznosi 3.0 m.



Slika 12. Poprečni presjek konstrukcije garaže

4.2.2 Rezultati proračuna

Na četvrtoj etaži je predviđena dvorana za okupljanje te je iz tog razloga prema projektnom zadatku, zahtjevana vatrootpornost konstrukcije 120 minuta (R120). Dokaz otpornosti konstrukcije garaže proveden je na temelju numeričkog modeliranja razvoja realnog požara primjenom modela zona i analitičkog izraza (Alpert). Grafički prikaz odnosa temperatura – vrijeme za slučaj primjene nekoliko tipova modela požara dan je na slici 13.



Slika 13. Temperature u prostoru garaže

U nastavku su dani samo rezultati proračuna za međukatnu konstrukciju garaže (tablica 3.) u slučaju primjene različitih tipova modela požara.

Tablica 3. Rezultati dokaza nosivosti prema Eurokodu za međukatnu konstrukciju garaže u slučaju primjene različitih tipova modela požara

Tip požara	Iskorištenost (Eurokod)
ISO-834	1.78
Analitički izraz (Alpert)	0.90
Model zona	0.89

5 Zaključak

Izložene su osnovne postavke o problematici čeličnih konstrukcija u požaru. Elaboriran je dosadašnji pristup problematici požara, te prikazan novi koncept proračuna konstrukcija u požaru sukladno preporukama Eurokoda.

Primjena novog pristupa proračuna konstrukcija u požaru prikazana je na primjeru čelične krovne konstrukcije dvorane „Spaladium“ te na primjeru čelične konstrukcije garaže. Dobivene vrijednosti primjenom semiprobabilističke metode razine I [7,8] ukazuju da nose čelične konstrukcije imaju dostatnu otpornost za zahtijevano vrijeme požarne otpornosti od 60 i 120 minuta (R60 i R120) za djelovanje realnog požara.

Literatura

- [1] Boko, I. & Peroš, B.: Sigurnost čeličnih konstrukcija pri djelovanju požara, *Građevinar*, 54, pp. 643-656, 2002.
- [2] Boko, I., Peroš, B. & Torić, N.: Pouzdanost čeličnih konstrukcija u požaru, *Građevinar*, 62, pp. 389-400, 2010.
- [3] Torić, N., Harapin, A. & Boko, I.: Numerički model ponašanja konstrukcija uslijed požara, *Građevinar*, 64, pp. 1-13, 2012.
- [4] Schleich, J. B.: Fire actions in buildings: Natural fire or conventional fire, Zbornik međnarodnega seminarja o požarni varnosti jeklenih konstrukcij, Ljubljana, 2006.
- [5] Yeoh, G. H. & Yuen, K. K.: *Computational fluid dynamics in fire engineering, First edition*, Butterworth-Heinemann, 2009.
- [6] Davis, W. D.: The Zone Fire Model JET: A Model for the Prediction of Detector Activation and Gas Temperature in the Presence of a Smoke Layer, NIST - National Institute of Standards and Tehnology, 1999.
- [7] EN 1991-1-2:2002, Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-2: General actions -- Actions on structures exposed to fire, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- [8] EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.