

Pouzdanost čeličnih konstrukcija u požaru

Ivica Boko, Bernardin Peroš, Neno Torić

Ključne riječi

čelična konstrukcija, požar, pouzdanost konstrukcija, dvorana „Spaladium“, model zona

Key words

steel structure, fire, structural reliability, Spaladium Hall, zone model

Mots clés

structure en acier, feu, fiabilité structurale, Salle de Spaladium, modèle des zones

Ключевые слова

стальная конструкция, пожар, надежность конструкций, зал „Спаладиум“, модель зон

Schlüsselworte

Stahlkonstruktion, Brand, Zuverlässigkeit von Konstruktionen, Halle "Spaladium", Zonenmodell

I. Boko, B. Peroš, N. Torić

Izvorni znanstveni rad

Pouzdanost čeličnih konstrukcija u požaru

Na primjeru čelične krovne konstrukcije sportske dvorane „Spaladium“ u Splitu prikazan je novi način proračuna nosive konstrukcije na djelovanje požara u velikim zatvorenim prostorima sukladno Eurokodu. Modelom zona dobiveni su odnosi temperatura-vrijeme u zatvorenom prostoru i to za dvije požarne situacije: požar na borilištu i požar na tribinama. Na temelju krivulja temperatura-vrijeme u nosivim elementima čelične konstrukcije analizirana je pouzdanosti krovne konstrukcije.

I. Boko, B. Peroš, N. Torić

Original scientific paper

Reliability of steel structures in case of fire

A new method for analyzing fire resistance of load bearing structures in big indoor spaces, based on Eurocode, is presented through case study of the steel roof structure of the Spaladium Sports Hall. The temperature-time relationships for indoor space are obtained by the zone model, and this for two fire situations: fire in the arena, and fire on the grandstand. The reliability of the roof structure is analyzed based on temperature-time curves in load-bearing elements of the steel structure.

I. Boko, B. Peroš, N. Torić

Ouvrage scientifique original

Fiabilité des structures en acier dans le cas de feu

Une nouvelle méthode de calcul de résistance au feu des structures portantes dans les grands espaces clos, basée sur l'Eurocode, est présentée en utilisant comme exemple la structure en acier du toit de la salle de sports de Spaladium. Les rapports température-temps pour l'espace clos sont obtenus par le modèle des zones, et cela pour deux situations d'incendie: feu dans l'arène et feu sur les tribunes. La fiabilité de la structure de toit est analysée sur la base des courbes température-temps dans les éléments portants de la structure en acier.

И. Бобо, Б. Перош, Н. Торич

Оригинальная научная работа

Надежность стальных конструкций при пожаре

На примере стальной кровельной конструкции спортивного зала «Спаладиум» в г. Сплите приводится новый способ расчета несущей конструкции на пожарное в больших закрытых местах в соответствии с Еврокодом. Посредством моделирования зон получены соотношения температура/время в закрытом месте для двух ситуаций: пожар на спортивной площадке и пожар на трибунах. На базе кривых температура/время в несущих элементов стальной конструкции проведен анализ надежности кровельной конструкции.

I. Boko, B. Peroš, N. Torić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Zuverlässigkeit von Stahlkonstruktionen bei Brand

Am Beispiel der stählernen Dachkonstruktion der Sporthalle "Spaladium" in Split ist eine neue Berechnungsweise der Tragkonstruktion gegen Brandwirkung in grossen geschlossenen Räumen dargestellt, übereinstimmend mit Eurokode. Mit einem Zonenmodell erhielt man die Verhältnisse Temperatur - Zeit im geschlossenen Raum, und zwar für zwei Brandsituationen: Brand am Kampfplatz und Brand an den Tribünen. Auf Grund der Kurven Temperatur - Zeit in den Tragelementen der Stahlkonstruktion analysierte man die Zuverlässigkeit der Dachkonstruktion.

Autori: Doc. dr. sc. **Ivica Boko**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Bernardin Peroš**, dipl. ing. građ.; **Neno Torić**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilište u Splitu, Matice hrvatske 15, Split

1 Uvod

Prihvatanjem europskih normi u građevinskoj regulativi definirana su i opća načela u dijelu projektiranja i građenja na području zaštite od požara. To znači da je djelovanje požara na građevine kao "novo" točno definirano "djelovanje" izjednačeno u europskoj i hrvatskoj zakonskoj i tehničkoj regulativi s ostalim do sada uobičajenim djelovanjima na građevine (Tehnički propisi za betonske, čelične i drvene konstrukcije).

U svijetu su posljednjih godina prisutni veliki znanstvenoistraživački naponi da se shvati proces nastanka, razvoja i širenja požara, tako da danas postoji i jedna grana znanosti koja se naziva *Fire Science*. Na tom tragu na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2007. godine uveden je specijalistički studij Požarno inženjerstvo.

U EN 1991-1-2:2002 obrađena je ova problematika gdje se osim klimatskih temperaturnih promjena računa i djelovanje požara kao toplinsko djelovanje, tj. izvanredno djelovanje u klasifikaciji djelovanja. Ovdje je riječ o novom pristupu jer su u djelovanja uključene i visoke temperature (slučaj požara) za razliku od nekadašnjih propisa gdje se računa samo s temperaturnom promjenom od ± 30 °C kao dopunskim djelovanjem. Toplinska djelovanja definirana su nominalnom krivuljom temperatura-vrijeme i parametarskoj izloženosti požaru (*parametric fire exposure*). Parametarske izloženosti požaru samo su inicirane i ostavljene pojedinim državama da to riješe na nacionalnoj razini u okviru nacionalnih dodataka (eng. *National annex - NA*). Dio tih istraživanja predstavljen je u ovome radu. Glavni zaključak ovih istraživanja vodi k tome da požar u budućnosti neće biti zapreka primjeni pojedinih materijala u novim konstrukcijama. Novi koncept proračuna nosivih konstrukcija na djelovanje realnog požara prikazan je na slici 1.

U radu su dani proračun otpornosti čeličnih konstrukcija i provjera njihove pouzdanosti što će se prikazati na

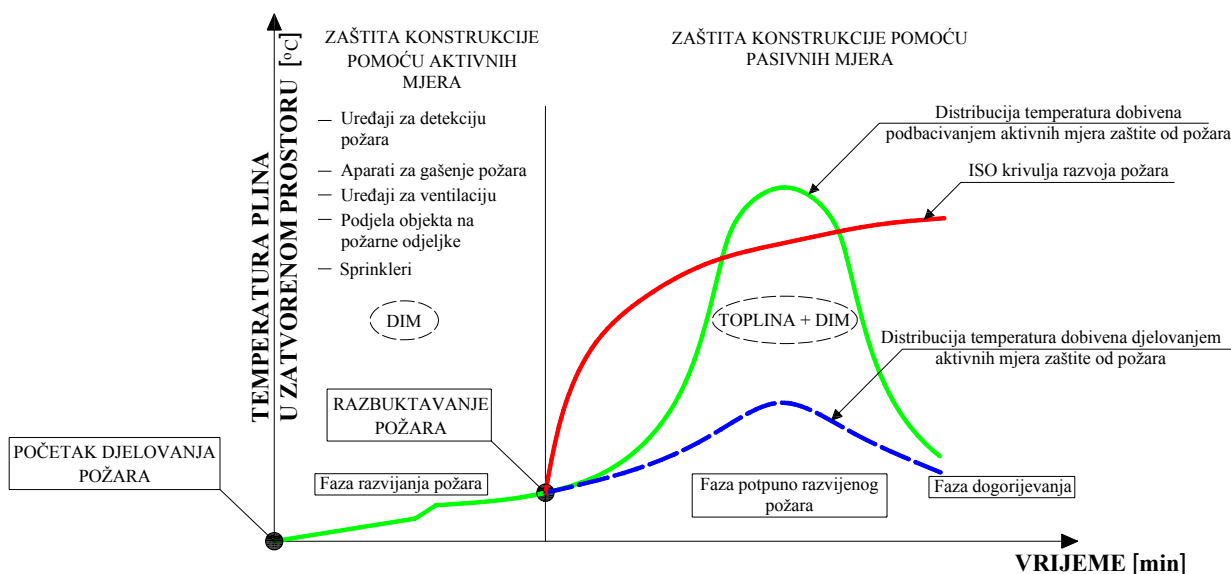


Slika 1. Novi koncept proračuna nosivih konstrukcija na djelovanje realnog požara

krovnoj konstrukciji dvorane „Spaladium“ u Splitu. Ovdje će se osim na čelične konstrukcije koje se smatraju posebno ugroženima u požaru osvrnuti i na ponašanje konstrukcija od ostalih materijala za slučaj djelovanja požara.

2 Modeliranje požara u zatvorenim prostorima

Pod pojmom požara podrazumijeva se svaki proces izgaranja zapaljivih i gorivih materijala bez znanja i kontrole čovjeka. Djelovanje požara u zatvorenim prostorima, uključujući aktivne i pasivne mjere zaštite od požara prikazano je na slici 2.



Slika 2. Faze požara u zatvorenim prostorima građevina

Požar u zatvorenim prostorima građevina prolazi kroz tri faze: fazu razvijanja, fazu potpuno razvijenog požara i fazu dogorijevanja. Faza razvijanja požara može se definirati izrazom [1]:

$$\dot{Q} = \alpha_r \cdot t^2 \quad (1)$$

gdje je:

\dot{Q} - snaga požara – RHR (*Rate of Heat Release*) [kW]

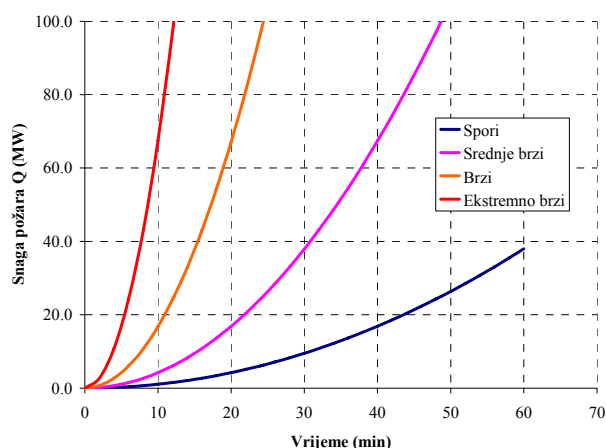
α_r - faktor razvoja požara [kW/s²]

t - vrijeme u sekundama.

Požar opisan izrazom (1) naziva se t^2 – požar (t-kvadrat požar). Prema brzini razvoja požara možemo podijeliti u 4 grupe:

- spori
- srednje brzi
- brzi
- ekstremno brzi.

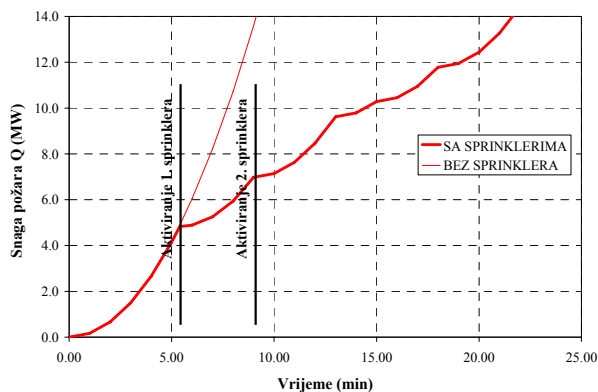
Grafički prikaz pojedine grupe požara prikazan je na slici 3.



Slika 3. Prikaz različitih grupa požara

Aktivni sustavi zaštite od požara djeluju u samoj fazi razvoja požara kako je prikazano na slici 2.

Djelovanje aktivnog sustava zaštite – sprinklera na požar u zatvorenom prostoru prikazano je na slici 4.



Slika 4. Djelovanje aktivnog sustava zaštite – sprinklera

Nakon faze razvijanja požara slijedi faza potpuno razvijenog požara. To je faza u kojoj se razvijaju najviše temperature plina u prostoriji. Faza potpuno razvijenog požara može se definirati izrazom:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\max} \quad (2)$$

Trajanje faze potpuno razvijenog požara može se definirati izrazom [2]:

$$t = 590 \cdot f^{0.30} \quad (s) \quad (3)$$

gdje je f masa goriva, izražena pomoću ekvivalentnog drva po jedinici ploštine poda zatvorenog prostora.

U fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara izgori oko 70 % goriva – gorivog materijala. Na kraju, kad temperature u prostoriji padnu na 80 % od maksimalno razvijene temperature, smatra se da je započela zadnja faza – faza dogorijevanja. U ovoj se fazi pretpostavlja da snaga požara opada linearno s vremenom i da će cjelokupno gorivo izgorjeti. Trajanje faze dogorijevanja određeno je iz uvjeta oslobođene energije (30 % ukupne energije požara):

$$t = \frac{2 \cdot Q}{\dot{Q}} \quad (4)$$

gdje je:

t - vrijeme [s]

Q - požarno opterećenje [MJ]

\dot{Q} - snaga požara - RHR [MW].

Općenito, požar se modelira primjenom modela polja i modela zona. Modeli polja su mnogo složeniji od modela zona. Jednadžbe koje se primjenjuju u ovim modelima opisuju vremensku promjenu sastava i temperature plinske sredine u svakoj točki prostora. Kao rezultat ovih modela dobiju se temperaturna polja, polja brzine i koncentracije plinova u prostoriji u svakoj točki prostora. Ovi modeli daju bolje rezultate pri modeliranju požara u zatvorenim prostorima gdje je primaran razvoj dima, te se podrazumijeva poznavanje velikog broja ulaznih parametara, a zbog veličine problema potrebna su računala velikih kapaciteta, tako da se takvi modeli još uvijek rijetko rabe. Za određivanje temperatura u zatvorenim prostorima, gdje je primaran razvoj temperatura, modeli zona pokazali su se dovoljno dobri i kao takvi našli su primjenu za istraživanje požara, što je prihvaćeno kod više istraživača [3]. Za proračun temperatura u zatvorenoj prostoriji zbog djelovanja požara polazi se od pretpostavke da se zatvoreni prostor može podijeliti u određeni broj zona tako da svaka zona ima približno jednake fizikalne karakteristike (masu, gustoću, temperaturu, tlak i unutarnju energiju) jer je realno simuliranje veoma složena zadaća pri numeričkom modeliranju, pa se zato

uvode određena pojednostavljena. Modeliranje požara u zonama polazi od sustava diferencijalnih jednadžbi koje su izvedene koristeći se zakonom održanja mase (jednadžba kontinuiteta), zakonom održanja energije (prvi zakon termodinamike) i zakonom idealnih plinova. Ovi se zakoni postavljaju za svaku pojedinu zonu. Najčešće se zatvoreni prostor dijeli u dvije zone: gornju zonu - zonu vrućih plinova i dima i donju zonu - zonu u kojoj se zadržavaju sobna temperatura i sobni tlak. Međusobna djelovanja zona posljedica su izmjene mase i energije. U takvom modeliranju uvode se još i pojednostavljena:

- specifični toplinski kapacitet c_p pri konstantnom tlaku i specifični toplinski kapacitet c_v pri konstantnom volumenu uzimaju se konstantni
- hidrostatski uvjeti su zanemareni – zakon idealnih plinova.

Istraživanja su pokazala da modeliranje požara u zonama može biti opisano s dvije formulacije: konzervativnom i aproksimativnom. Konzervativna formulacija [4, 5] ekvivalentna je zakonima održanja koji se postavljaju za svaku zonu. Plinovi u svakoj zoni okarakterizirani su:

m_i - masom

E_i - unutarnjom energijom

ρ_i - gustoćom,

T_i - temperaturom

V_i - volumenom

p - tlakom

gdje indeks i dobiva oznaku d za donju zonu i oznaku g za gornju zonu. Tlak je u cjelokupnom zatvorenom prostoru obilježen sa p . Ovih jedanaest varijabli međusobno je povezano prinudnim jednadžbama kako slijedi:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \text{ (gustoća)} \quad (5)$$

$$E_i = c_v \cdot m_i \cdot T_i \text{ (unutarnja energija)} \quad (6)$$

$$p = R \cdot \rho_i \cdot T_i \text{ (zakon idealnih plinova)} \quad (7)$$

$$V = V_d + V_g \text{ (ukupan volumen plina)} \quad (8)$$

gdje je:

V_d – volumen plina u donjoj zoni,

V_g – volumen plina u gornjoj zoni.

Aproksimativne formulacije [4,5] pretpostavljaju da tlak u prostoriji i temperatura u donjoj zoni ostaju sobni. Uz ove pretpostavke, za razliku od konzervativne formula-

cije, dobiva se sustav od dviju diferencijalnih jednadžbi s dvije nepoznanice:

- diferencijalna jednadžba zakona održanja mase gornje zone:

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_i \quad (9)$$

- diferencijalna jednadžba za energiju gornje zone:

$$\frac{d(y_e - y) \rho T A c_v}{dt} = \sum \dot{q}_i + p A \frac{dy}{dt} \quad (10)$$

gdje je:

\dot{m}_i - mjera pritjecanja mase (promjena mase u vremenu)

y_c - visina stropa

y - visina donje površine gornje zone

ρ - gustoća plinova gornje zone

T - temperatura plinova gornje zone

A - ploština prostorije

p - apsolutni tlak

c_v - specifična toplina pri konstantnom volumenu

\dot{q}_i - entalpija gornje zone

t - vrijeme.

Prikazani model dviju zona primjenjivat će se za određivanje temperatura u pojedinoj zoni u zatvorenom prostoru (požarnom odjeljku) sportske dvorane „Spaladium“ radi određivanja pouzdanosti nosive čelične krovne konstrukcije.

3 Provođenje topline u čeličnoj konstrukciji

Nakon određivanja temperatura u zatvorenom prostoru potrebno je odrediti ovisnost temperature u vremenu u nosivoj čeličnoj konstrukciji. Ovaj se problem rješava primjenom nestacionarnoga nelinearnog modela provođenja topline u čeličnoj konstrukciji.

Izmjena topline između tijela različitih temperatura događa se na dva načina koji se po fizikalnom obliku načelno razlikuju:

- provođenjem i konvekcijom, što ovisi o materiji u kojoj se odvija izmjena topline
- toplinskim zračenjem.

Toplina struji u smjeru pada temperature, dakle najjače u smjeru normale na nivo - plohu polja temperature. Gustoća toplinskog toka u nekoj promatranoj točki za taj smjer jest:

$$\dot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (11)$$

gdje je:

k - koeficijent toplinske provodljivosti (W/mK)

T - temperatura

n - smjer normale na nivo-plohu polja temperature.

U smjeru osi x toplinski tok ulazi i izlazi iz volumena kroz granične plohe dy i dz . Promjena odvedene topline prema dovedenoj u vremenu dt za taj smjer iznosi:

$$d\dot{q}_x (dydz) dt = \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} dx dy dz dt = \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} dV dt \quad (12)$$

Energija akumulirana u materijalu na temperaturi T ili specifična obujamska entalpija jest:

$$e = \int_{T_0}^T c \rho dT \quad (13)$$

gdje je:

c - specifični toplinski kapacitet (J/kgK)

ρ - materijalna gustoća kontinuuma

T_0 - početna temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

U elementarnom volumenu dV može se pojaviti toplinski izvor sa specifičnom izdašnosti Q (dovođenje ili odvođenje topline u materijalnom kontinuumu), tako da u općenitom slučaju dobivamo Fourierovu diferencijalnu jednadžbu provođenja topline u izotropnom tijelu:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = Q \quad (14)$$

Toplinski tok na rubovima kontinuuma, koji nastaje zbog razlike temperature kontinuuma i okolnog zraka, sastoji se od dva dijela: toplinski tok zbog konvekcije i toplinski tok zbog zračenja.

Modeliranje ovog fenomena vrlo je složeno, tako da se u modelu primjenjuju približne formule. Toplinski tok poradi konvekcije određuje se iz izraza:

$$q_n^k = \beta (T_p - T_{pe})^\gamma \quad (15)$$

a toplinski tok zbog zračenja iz izraza:

$$q_n^z = \varepsilon_r \sigma (T_p^4 - T_{pe}^4) \quad (16)$$

gdje je:

β - koeficijent prijenosa topline konvekcijom ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)

T_p - temperatura plina u okolini elementa (K)

T_{pe} - temperatura površine elementa (K)

γ - koeficijent konvekcije

ε_r - rezultatni emisijski koeficijent

σ - Stefan - Boltzmanova konstanta $5,667 \cdot 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4)$.

Provođenje topline u konstrukciji zbog djelovanja požara definira se kao nestacionarni proces.

Pod nestacionarnim procesom podrazumijeva se pojava koja ima vremensku promjenjivost. Takva se pojava prati od nekog poznatoga stanja, tj. početnih uvjeta. Tehnika konačnih elemenata dovodi do diskretnog sustava običnih nelinearnih diferencijalnih jednadžbi [6]:

$$\frac{d}{dt}(\underline{E}) = -\underline{K}^* \underline{E} + \underline{F} \quad (17)$$

gdje je

$$\underline{F} = \underline{F}_q + \underline{F}_Q \quad (18)$$

Primjenom približnog oblika poučka o srednjoj vrijednosti na izraz (17) dobiva se sljedeći izraz:

$$\theta \underline{K}_{t+\Delta t}^* \underline{E}_{t+\Delta t} + (1-\theta) \underline{K}_t^* \underline{E}_t + \frac{\underline{E}_{t+\Delta t} - \underline{E}_t}{\Delta t} = \theta \underline{F}_{t+\Delta t} + (1-\theta) \underline{F}_t \quad (19)$$

gdje je:

t - početak vremenskog intervala

$t + \Delta t$ - kraj vremenskog intervala

θ - interpolacijski parametar.

Izborom dovoljno bliskih vremenskih stanja može se pretpostaviti da je podintegralna funkcija monotona u širem smislu unutar vremenskog intervala Δt , tako da se vrijednost interpolacijskog parametra kreće u granicama $0 \leq \theta \leq 1$.

Za $\theta = 0$ u jednadžbi (19) dobije se eksplicitna formula:

$$\underline{E}_{t+\Delta t} = \underline{E}_t + (\underline{F}_t - \underline{K}_t^* \underline{E}_t) \Delta t \quad (20)$$

Primjenom modela nestacionarnoga nelinearnog provođenja topline dobiva se temperaturno polje u presjeku čeličnog elementa i u čitavom elementu. Dobivene temperature u pojedinom čeličnom elementu rabe se kao temperaturno djelovanje na elementu odnosno na cijeloj konstrukciji.

4 Dokaz požarne otpornosti konstrukcija

4.1 Globalni koncept pouzdanosti konstrukcija u požaru

Globalni koncept pouzdanosti konstrukcija u požaru očituje se u sljedećem:

- Polazi se od toga da su karakteristike građevine relevantne za razvoj požara (scenarij razvoja požara, požarno opterećenje, brzina razvoja požara, predviđeni požarni odjeljci i uvjeti ventilacije).

- Rizik nastajanja požara povećava se s veličinom požarnog odjeljka, ali i smanjenjem razine mjera i smjernica za zaštitu ljudi i imovine u slučaju požara.
 - Analiza rizika temelji se na statističkim podacima parametara nastanka požara te na pretpostavkama i simulacijama realnoga požarnoga procesa.
 - Određivanjem parametarske temperaturne krivulje kao funkcije realnoga požarnog opterećenja gdje se uzima izravno i rizik pojave požara.
 - Analiziranjem globalnog ponašanja konstrukcije pod utjecajem parametarske temperaturne krivulje u konstrukciji s ostalim statičkim djelovanjima na konstrukciju u slučaju požara.
 - Određivanjem vremena proračunske otpornosti konstrukcije na realni požar $t_{fi,d}$.
- Vrijednost $t_{fi,d}$ može biti beskonačna kada konstrukcija ima takvu otpornost da izdrži statička opterećenja i nakon kraja požara.
- Određivanjem zahtijevanog vremena (aspekt pouzdanosti konstrukcija) potrebnog za evakuiranje ljudi i zaštitu imovine $t_{fi,requ}$ (rad vatrogasnih i specijalnih jedinica za intervencije u slučaju požara).
 - Zahtijevano vrijeme $t_{fi,requ}$ određuje se nacionalnim dokumentom za djelovanje požara.
 - Definiranjem formata pouzdanosti konstrukcije u požaru iskazanog odnosom $t_{fi,d} > t_{fi,requ}$ [7].

Slijedom navedenoga novog koncepta pouzdanosti konstrukcija u požaru, vjerojatnost nastanka požara kao izvanrednog djelovanja može se napisati prema izrazu:

$$P_{f,fi} \cdot P_{fi} \leq P_t \tag{21}$$

gdje je:

$P_{f,fi}$ - vjerojatnost otkazivanja u slučaju požara

P_{fi} - vjerojatnost nastanka požara,

P_t - normirana vjerojatnost otkazivanja za hladno stanje.

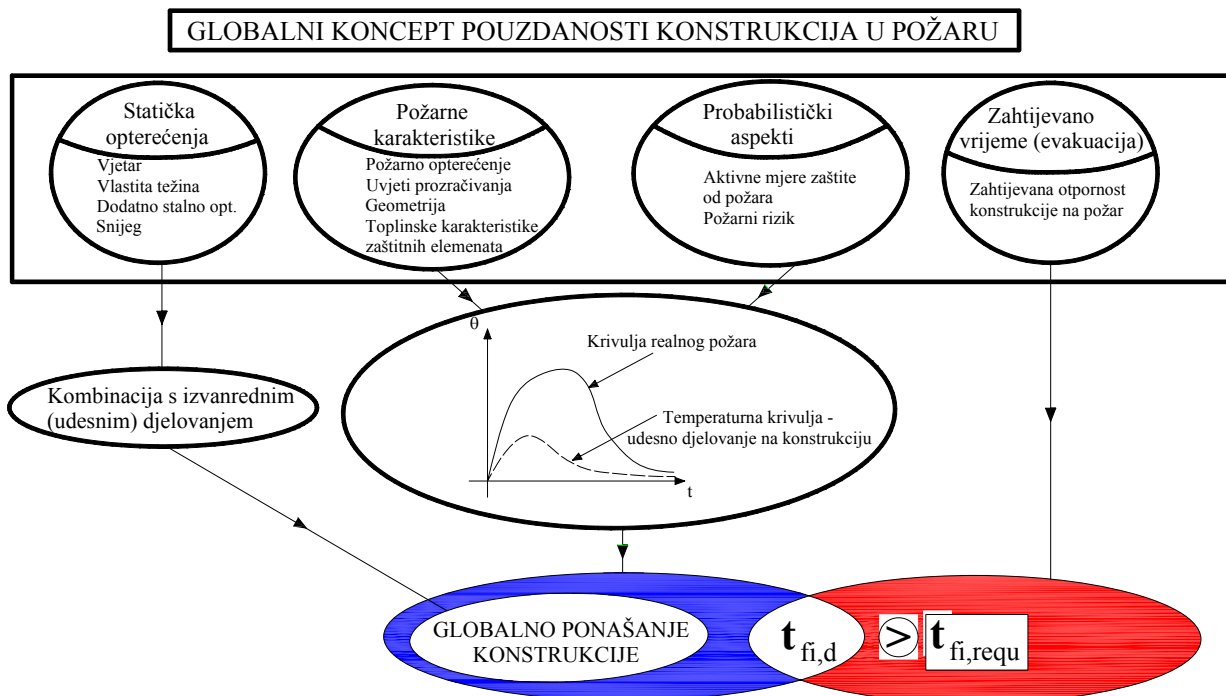
U sređenome se obliku izraz (21) može napisati kako slijedi:

$$P_{f,fi} \leq \left(\frac{P_t}{P_{fi}} \right) \tag{22}$$

Izraz (22) može se, dakle, objasniti na sljedeći način. U slučaju požara normirani indeks pouzdanosti β nije više 3,8, nego je promjenjiv i ovisi o različitim varijablama koje utječu na vjerojatnost nastanka požara P_{fi} , što se može vidjeti iz izraza (21). U ovome slučaju taj se promjenjivi indeks pouzdanosti označuje sa β_{fi} jer ovisi o P_{fi} . U skladu s teorijom iz inženjerstva pouzdanosti, za indeks pouzdanosti β_{fi} vrijedi izraz:

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1} \left(\frac{P_t}{P_{fi}} \right) = \Phi^{-1} \left(\frac{7,25 \cdot 10^{-5}}{P_{fi}} \right) \tag{23}$$

U izrazu (23) Φ je standardna normalna razdioba. Dakle, u slučaju vjerojatnosti nastanka požara zahtijeva



Slika 5. Globalni koncept pouzdanosti konstrukcija u požaru

se različita veličina indeksa pouzdanosti u odnosu na vjerojatnost otkazivanja nego u slučaju kada ne postoji mogućnost nastanka požara. Normirana vrijednost p_t (jedna godina) trebala bi se prema nekim prijedlozima razlikovati u ovisnosti o mogućnostima evakuacije ljudi te se navodi:

$$p_t = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ za uobičajenu evakuaciju}$$

$$p_t = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ za otežanu evakuaciju}$$

$$p_t = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ nemogućnost evakuacije.}$$

Vjerojatnost nastanka požara p_{fi} definirana je izrazom [8]:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot A_{fi} \quad (24)$$

gdje je:

- p_1 – vjerojatnost nastanka potpuno razvijenog požara uključujući učinke intervencija korisnika i vatrogasne brigade (za 1 m² tlocrta konstrukcije i za jednu godinu)
- p_2 – faktor redukcije ovisan o tipu vatrogasne službe i vremenu koje protekne od početka alarma do dolaska vatrogasaca
- p_3 – faktor redukcije za slučaj automatske dojave požara (pojavom dima ili topline)
- p_4 – vjerojatnost otkazivanja sprinklera (ako postoje)
- A_{fi} – ploština požarnog odjeljka.

4.2 Koncept proračuna djelovanja požara prema eurokodu

Kod čeličnih konstrukcija djelovanje požara – visoke temperature mogu imati za posljedicu povećanje sile (naprezanja) u konstrukciji zbog spriječenosti deformacija konstrukcije ili smanjenje nosivosti zbog degradacije presjeka i smanjenja otpornosti (velike deformacije). Zbog visokih temperatura slično ponašanje događa se i kod armiranobetonskih konstrukcija, dok kod drvenih konstrukcija povećanje sile nije značajno.

Proračun djelovanja požara na nosive konstrukcije prema eurokodu zasniva se na semiprobabilističkom konceptu dokaza pouzdanosti, obrađenom u europskoj normi EN 1990:2002. Proračun djelovanja požara prema EN 1991-1-2:2002 može se provesti u 3 različita područja: vremena, čvrstoće i temperature. Proračun u području vremena provodi se prema izrazu:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (25)$$

gdje je:

$t_{fi,d}$ – proračunska vrijednost otpornosti na požar izražena u vremenu

$t_{fi,requ}$ – zahtijevano vrijeme otpornosti na požar.

Proračun u području čvrstoće provodi se prema izrazu:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (26)$$

gdje je:

$E_{fi,d,t}$ – proračunska vrijednost mjerodavnog učinka djelovanja u požarnoj situaciji u vremenu t

$R_{fi,d,t}$ – proračunska vrijednost otpornosti konstrukcijskog elementa u požarnoj situaciji u vremenu t .

Proračun u području temperature provodi se prema izrazu:

$$\Theta_d \leq \Theta_{cr,d} \quad (27)$$

gdje je:

Θ_d – proračunska vrijednost temperature materijala

$\Theta_{cr,d}$ – proračunska vrijednost kritične temperature materijala.

Dokaz ponašanja čeličnih konstrukcija u požarnoj situaciji provodi se prema EN 1993-1-2:2005 i to u području čvrstoće prema izrazu (26). Mjerodavna kombinacija opterećenja s aspekta graničnog stanja nosivosti u slučaju djelovanja požara prema EN 1990:2002 dana je izrazom:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } A_d \text{ "+" } (\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (28)$$

gdje je:

$G_{k,j}$ – karakteristična vrijednost stalnog djelovanja

P – djelovanje od prednapinjanja,

A_d – proračunska vrijednost temperaturnog djelovanja zbog požara

$Q_{k,1}$ – karakteristična vrijednost prevladavajućega promjenjivog djelovanja

$Q_{k,i}$ – karakteristične vrijednosti ostalih promjenjivih djelovanja

$\psi_{1,1}$ – faktor za učestalu vrijednost promjenjivog djelovanja (prema tablici A1.1 u EN 1990)

$\psi_{2,i}$ – faktori za kvazistalne vrijednosti promjenjivih djelovanja (prema tablici A1.1 u EN 1990).

Prema preporuci eurokoda proračunske vrijednosti koeficijentata ψ potrebno je da u okviru nacionalnih dokumenata svaka država odredi za sebe, tj. usvoji nacionalni dodatak.

Proračunske vrijednosti toplinskih i mehaničkih karakteristika materijala prema EN 1993-1-2:2005 dane su izrazima:

- a) toplinska svojstva za toplinsku analizu konstrukcije:
 - ako povećanje svojstava djeluje povoljno na pouzdanost konstrukcije:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (29)$$

- ako povećanje svojstava djeluje nepovoljno na pouzdanost konstrukcije:

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,\theta} \quad (30)$$

b) svojstva naprezanja i deformacije za analizu konstrukcije:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (31)$$

gdje je:

- $X_{k,\theta}$ - karakteristična vrijednost svojstva koja u općem slučaju ovisi o temperaturi materijala
- X_k - karakteristična vrijednost svojstva naprezanja i deformacije (f_k ili E_k), za proračun konstrukcije pri atmosferskoj temperaturi
- k_{θ} - koeficijent redukcije svojstva naprezanja i deformacije ($X_{k,\theta} / X_k$), koji ovisi o promatranoj temperaturi u odnosu na atmosfersku temperaturu
- $\gamma_{M,fi}$ - parcijalni koeficijent za odgovarajuće svojstvo materijala, za slučaj požara.

Parcijalni koeficijenti za toplinska svojstva i za mehanička svojstva za slučaj požara prema preporuci trebaju se uzeti $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

Ovisnost ponašanja mehaničkih karakteristika čelika na visokim temperaturama prikazana je u tablici 1.

5 Primjer proračuna čelične krovne konstrukcije dvorane „Spaladium“ u Splitu

Na temelju navedenih postavki vezanih za dokaz požarne otpornosti konstrukcija, ovdje će se prikazati proračun požarne otpornosti čelične krovne konstrukcije sportske dvorane „Spaladium“ u Splitu.

Krovna konstrukcija dvorane natkriva prostor koji je označen kao požarni odjeljak PS1 kvadratičnog oblika dimenzija 80 x 100 m, visine 30 m. Svijetla visina građevine do donjeg pojasa rešetkaste konstrukcije iznosi 24,5 m, a od najviše točke tribina do najniže točke donjeg pojasa nosive konstrukcije 6,2 m.

Tablica 2. Oznake pozicija elemenata krovne konstrukcije (karakterističan rešetkasti krovni nosač)	
Pozicija	Profil
GP	HE 600B
DP	HE 600B
D0	HE 300B
D1	HE 280B
D2	HE 200A
D3	HE 260A
D4	IPE 200
H1	HE 300B
H2	IPE220
H3	IPE 180
H4	HE 260A
H5	HE 300A

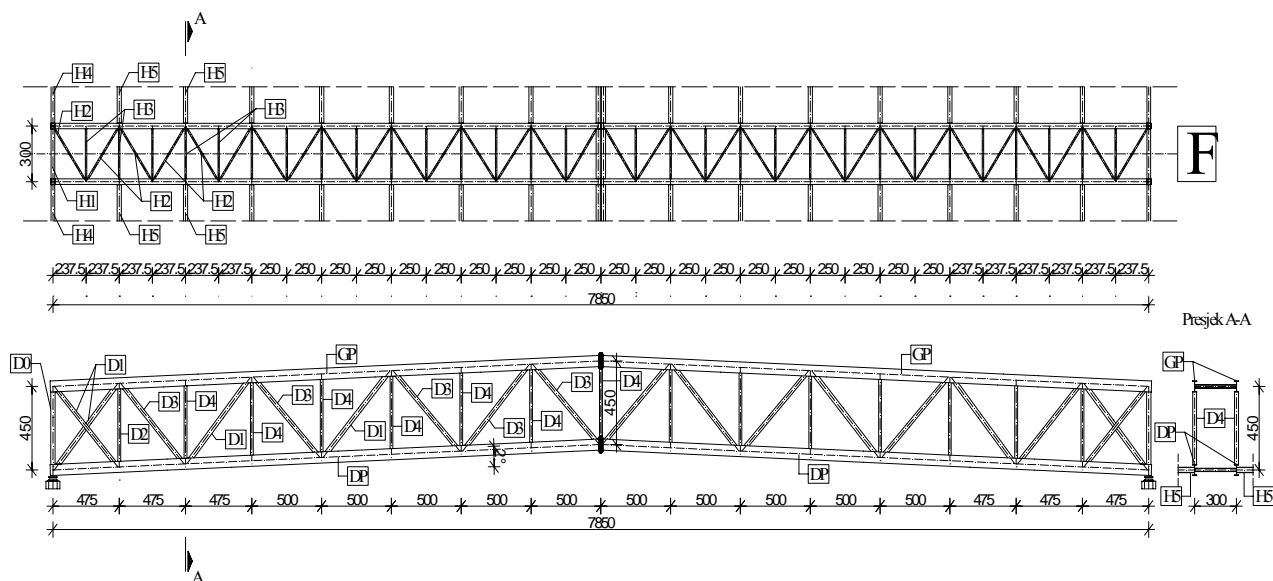
Na slici 6. prikazan uzdužni i poprečni presjek karakterističnog segmenta krovne rešetkaste konstrukcije.

Na krovništu dvorane projektirana je krovna ventilacija (krovne kupole za oddimljavanje) ploštine 130,5 m². Elaboratom zaštite od požara [9] definirano je očekivano realno požarno opterećenje od 300,0 MJ/m² u dvorani (požarni odjeljak PS1) na borilištu i tribinama.

Elaboratom zaštite od

Tablica 1. Koeficijenti redukcije mehaničkih karakteristika čelika na visokim temperaturama

Temperatura čelika θ_a [°C]	Koeficijenti redukcije			
	koeficijent redukcije za 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

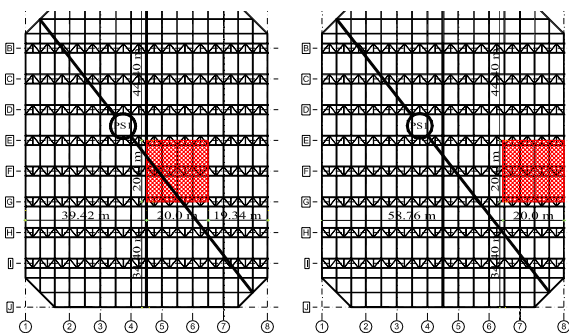


Slika 6. Uzdužni i poprečni presjek segmenta čelične krovne konstrukcije

požara također je definiran stupanj otpornosti konstrukcijskih elemenata i zahtijevana otpornost konstrukcija na djelovanje realnog požara od 60 minuta (R60).

Za analizu otpornosti konstrukcije simulirane su dvije požarne situacije:

- požar na borilištu (požar u sredini)
- požar na vrhu tribina (požar na rubu dvorane).



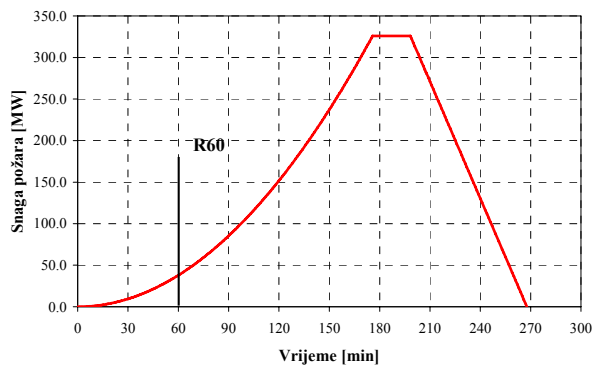
Slika 7. Požarne situacije – požar u sredini i požar na rubu dvorane

Na temelju ulaznih podataka definirano je ukupno požarno opterećenje $Q = 2265300$ MJ. Simulacija realnog požara provedena je uz pretpostavku da će cjelokupno požarno opterećenje izgorjeti, te da će u fazi razvoja požara i fazi potpuno razvijenog požara izgorjeti 70 % požarnog opterećenja, a u fazi dogorijevanja 30 % požarnog opterećenja, kako je objašnjeno u točki 2. Također se navedeni požar s obzirom na namjenu građevine definira kao spori požar. Na osnovi navedenih pretpostavki definirani su sljedeći parametri razvoja požara.

Tablica 3. Parametri razvoja požara

	Faza razvoja požara	Faza potpuno razvijenog požara	Faza dogorijevanja
Pož. opterećenje [MJ]	1585710		679590
Trajanje požara [min]	175,8	22,5	69,5

Iz dobivenih rezultata u tablici 3. vidljivo je da vremenski najduže traje faza razvoja požara i upravo u toj fazi nalazi se vrijeme zahtijevane otpornosti konstrukcije za djelovanje realnog požara. Ostale dvije faze traju puno kraće i nisu relevantne za proračun pouzdanosti čelične krovne konstrukcije. Krivulja požara (snaga požara – vrijeme) za sve 3 faze djelovanja požara prikazana je sljedećim dijagramom.

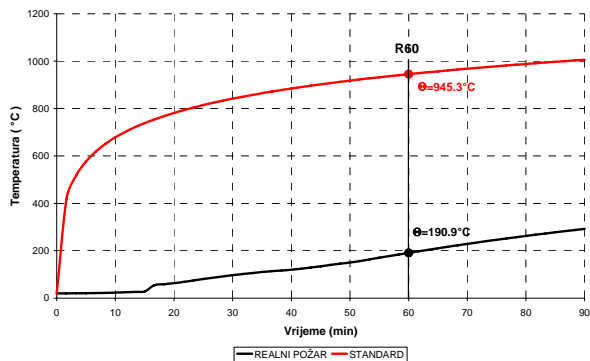


Slika 8. Krivulja snaga požara – vrijeme

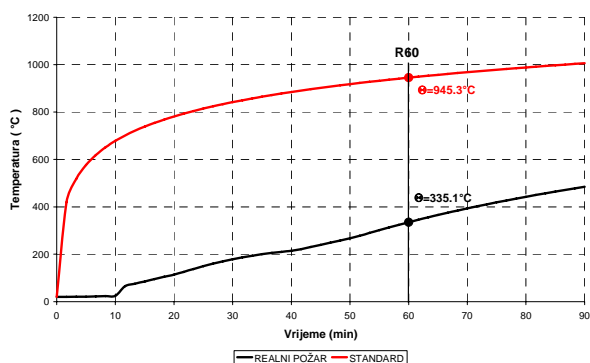
Na osnovi navedenih ulaznih parametara (krivulja snaga požara-vrijeme) provedena je simulacija razvoja realnog požara primjenom programskog paketa „JET“ [10] na temelju čega su dobivene krivulje temperatura-vrijeme

za zatvoreni prostor požarnog odjeljka PS1. U nastavku će biti prikazani rezultati proračuna samo za slučaj djelovanja požara na rubu dvorane.

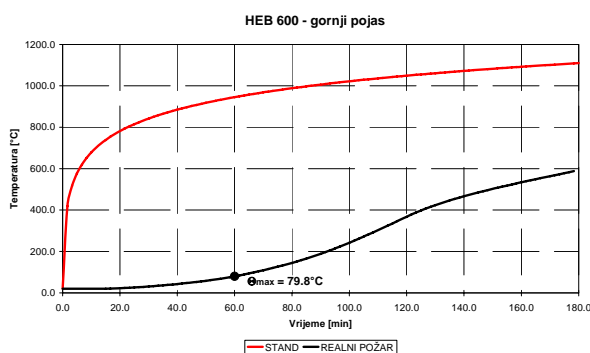
Grafički prikaz odnosa temperatura – vrijeme za normiranu krivulju iz norme ISO-834 i krivulju realnog požara (dobivenu simulacijom realnog požara) za požar na rubu nalazi se na sljedećim slikama.



Slika 9. Temperature u prostoru - H = 11,0 m – razina gornjeg pojasa rešetkastog nosača



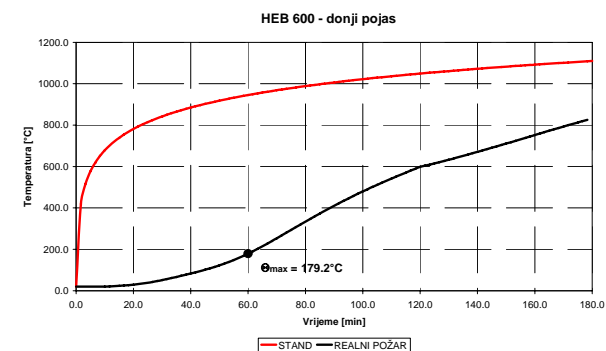
Slika 10. Temperature u prostoru - H = 6,5 m – razina donjeg pojasa rešetkastog nosača



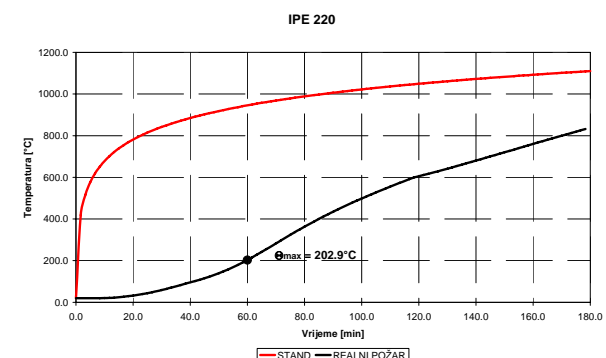
Slika 11. Odnos temperatura-vrijeme u poprečnom presjeku gornjeg pojasa rešetke (GP)

Na temelju dobivenih odnosa temperatura-vrijeme u prostoru izvršena je analiza temperatura u vremenu u nosivoj čeličnoj konstrukciji po pojedinim elementima primjenom nestacionarnog nelinearnog modela provođenja topline koji je razrađen u točki 3. Dobiveni rezul-

tati za karakteristične elemente rešetkaste konstrukcije (poprečni presjek) prikazani su na slikama 11.-13.



Slika 12. Odnos temperatura-vrijeme u poprečnom presjeku donjeg pojasa rešetke (DP)



Slika 13. Odnos temperatura-vrijeme u poprečnom presjeku dijagonale donjeg pojasa rešetke (H2)

Dokaz nosivosti prema EN 1990/2002 (semiprobabilistička metoda razine I.) provodi se ovisno o proračunskoj situaciji za granično stanje nosivosti gdje je potrebno dokazati odnos: $E_d/R_d \leq 1,0$, kako je definirano u točki 4. 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 4. Rezultati dokaza nosivosti prema EN za karakteristične elemente rešetkaste konstrukcije – slučaj realnog požara

Oznaka elementa	Iskorištenost (EC)
GP	0,03
DP	0,05
H2	0,99

Primjenom probabilističke metode razine II (programski paket STRUREL [11]) sukladno postupku opisanom u točki 4., dobivene su reprezentativne vrijednosti indeksa pouzdanosti β za karakteristične elemente rešetke (tablica 2.).

Vrijednosti baznih varijabli otpornosti i djelovanja koje su primijenjene u probabilističkom modelu prikazane su u tablicama 5. i 6.

Općenito, oblik jednadžbe graničnog stanja za pojedine elemente čelične krovne konstrukcije ovisi o reznim silama koje se javljaju kao posljedica opterećenja konstrukcije te se jednadžba graničnog stanja G u općem obliku za konkretni slučaj promatranih baznih varijabli može napisati:

$$G(X_i, Y_j) = R(X_i) - E(Y_j) = 0; i = 1, \dots, 4; j = 1 \quad (32)$$

gdje je:

$k_{y,\theta}$ - koeficijent redukcije granice popuštanja

$k_{E,\theta}$ - Koeficijent redukcije za početni modul elastičnosti.

Stalno djelovanje uzeto je u ovom primjeru kao konstantna vrijednost. Vrijednost normiranog indeksa pouzdanosti β_{fi} određuje se prema izrazu (23). Da bi se mogla odrediti vrijednost normiranog indeksa pouzdanosti β_{fi} potrebno je u izrazu (23) odrediti vjerojatnost nastanka požara p_{fi} . Vjerojatnost nastanka požara p_{fi} dobiva se prema izrazu (24), gdje su za ovaj tip građevine uzete sljedeće vrijednosti parametara:

$$p_1 = 5 \cdot 10^{-7}$$

$$p_2 = 1,0$$

$$p_3 = 1,4$$

$$p_4 = 1,0 \text{ (nema sprinklera u građevini)}$$

Tablica 5. Bazne varijable otpornosti R

Bazne varijable otpornosti [X]				
Varijable	Srednja vrijednost	Koef. varijacije	Distribucija	Opis bazne varijable
X_1	$k_{y,\theta} \cdot 41,9 \text{ kN/cm}^2$	0,054	lognormalna	granica popuštanja
X_2	$k_{E,\theta} \cdot 21000 \text{ kN/cm}^2$	0,0645	Weibullova	modul elastičnosti
X_3	Ovisno o pop. presjeku	0,05	normalna	ploština poprečnog presjeka
X_4	Ovisno o pop. presjeku	0,05	normalna	moment otpora poprečnog presjeka W_y i W_z

Tablica 6. Bazne varijable djelovanja E

Bazne varijable otpornosti [Y]				
Varijable	Srednja vrijednost	Koef. varijacije	Distribucija	Opis bazne varijable
Y_1	$\bar{T}_S, \bar{T}_1, \dots, \bar{T}_n$	0,30	Gumbelova	požarno djelovanje iskazano temperaturnim vrijednostima

$$A_{fi} = 8000,0 \text{ m}^2$$

$$p_{fi} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,0 \cdot 8000,0 = 0,0056$$

Normirana vjerojatnost otkazivanja nosivosti p_t u izrazu (23) uzeta je za uobičajene uvjete evakuacije $p_t = 1,3 \cdot 10^{-4}$.

Za tako određenu vjerojatnost nastanka požara p_{fi} proračunata je vrijednost normiranog indeksa pouzdanosti $\beta_{fi} = 2,0$.

Vrijednosti proračunatih indeksa pouzdanosti β dane su samo za karakteristične elemente u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati proračuna indeksa pouzdanosti β za karakteristične elemente rešetkaste konstrukcije

Oznaka elementa	β	β_{fi}
GP	4,2	2,0
DP	4,0	2,0
H2	2,2	2,0

6 Rasprava

Dosadašnjim se pristupom u zakonskoj regulativi primjenjivao koncept normiranog požara primjenom krivulje normiranog požara iz norme ISO-834 (prikazanog na slikama 9. i 10. crvenom krivuljom). Prema tom konceptu određivala se požarna otpornost konstrukcije (F30, F60,...) bez obzira na uvjete u građevini: namjena, požarno opterećenje, sustavi aktivne zaštite od požara. Nedostatak takvog koncepta očitovao se i manjkavostima u proračunu konstrukcije. Naime, pri proračunu nosivosti konstrukcije uzimalo se u obzir temperaturno djelovanje izazvano

atmosferilijama $\Delta T = \pm 30 \text{ }^\circ\text{C}$, a zanemarivalo se djelovanje visokih požarnih temperatura. Novim konceptom proračuna osiguralo se stvaranje realnije slike o pouzdanosti konstrukcija u slučaju djelovanja realnog požara. Ovaj se koncept temelji na dijagramu toka prikazanom na slici 1.

Prema tom dijagramu potrebno je prvo definirati požarni scenarij, kojim se određuje: broj i veličina požarnih odjeljaka u građevini, intezitet požarnog opterećenja prema namjeni, zahtijevana požarna otpornost konstrukcije (R30, R60,...), sustavi aktivne zaštite od požara. Svi ovi zahtjevi rješavaju se elaboratom zaštite od požara.

ra. Nakon definiranja požarnog scenarija potrebno je odrediti odgovarajući požar u građevini, odnosno proračunati temperature u zatvorenom prostoru požarnog odjeljka i nosivoj konstrukciji, te provesti proračun konstrukcije kako je to navedeno u točkama 2.-4.

Analizom pouzdanosti nosive konstrukcije dvorane „Spaladium“ primjenom semiprobabilističke metode razine I. (eurokod), dokazano je da svi nosivi elementi imaju dostatnu nosivost. Također, analizom pouzdanosti uporabom probabilističke metode razine II. – određivanje indeksa pouzdanosti β dokazano je da su dobivene vrijednosti β veće od normiranih vrijednosti β_{fi} . Vrijednosti β_{fi} proizlaze iz vjerojatnosti nastanka požara u određenom tipu građevine i uvjetima evakuacije.

Iz dobivenih se rezultata vidi da vrijednost normiranog indeksa pouzdanosti β_{fi} (tablica 7.) u požarnim uvjetima za određeni tip građevine ima znatno manju vrijednost od normiranog indeksa pouzdanosti β za atmosferske uvjete.

Zahvala

Ispitivanja opisana u ovome članku provedena su u sklopu znanstvenog projekta br. 083-1465 "Pouzdanost konstrukcija i procjena rizika uslijed ekstremnih djelovanja" koje podupire Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Autori se zahvaljuju na potpori.

LITERATURA

- [1] Buchanan, A. H.: *Structural Design for Fire Safety*, 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester UK, 2001.
- [2] Theobald, C. R.: *Growth and development of fire in industrial buildings*, Fire prevention and technology, 1977, 4-16
- [3] Gulvanessian, H.; Holicky, M.; Cajot, L. G.; Schleich, J. B.: *Reliability Analysis of a Steel Beam Under Fire Design Situation*, EUROSTEEL 1999, Prag, 1999.
- [4] Boko, I.; Peroš, B.: *Sigurnost čeličnih konstrukcija pri djelovanju požara*, Građevinar 54 (2002) 11, 643-656
- [5] Boko, I.; Jović V.; Peroš, B.: *Safety of Steel Structures Under the Influence of Fire Loads*, International Journal for Engineering Modelling 15 (2002) 1-4, 11-20
- [6] Jović, V.: *Uvod u inženjersko numeričko modeliranje*, Aquarius Engineering, Split, 1993.
- [7] Schleich, J. B.: *Fire actions in buildings: Natural fire or conventional fire*, Zbornik međnarodnega seminarja o požarni varnosti jeklenih konstrukcij, Ljubljana, 2006
- [8] Androić, B.; Dujmović D.; Džeba, I.: *Suvremeni pristup dokazu požarne otpornosti konstrukcija*, Građevinar 58 (2006) 6, 455-462
- [9] Bezić, A.: *Idejni elaborat predviđenih mjera zaštite od požara*, Zast d.o.o., Split, 2007.
- [10] 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.
- [11], STRUREL - *A Structural Reliability Analysis Program-System*, RCP Consult, 1996.
- [12], 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.
- [13], 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.
- [14] Sterner, E.; Wickström, U.: *TASEF - Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire*, Swedish National Testing Institute, 1990.
- [15] Milčić, V.; Peroš, B.: *Uvod u teoriju sigurnosti nosivih konstrukcija*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2002.

7 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 odredbama eurokoda, uključujući i određivanje indeksa pouzdanosti β .

Primjena novog pristupa proračuna konstrukcija u požaru prikazana je na primjeru čelične krovne konstrukcije dvorane „Spaladium“. Dobivene vrijednosti primjenom semiprobabilističke metode razine I i probabilističke metode razine II. pokazuju da nosiva čelična krovna konstrukcija ima pouzdanost koja je veća od normirane za zahtijevano vrijeme otpornosti od 60 minuta (R60) za djelovanje realnog požara.

Ova istraživanja provode se u okviru izrade nacionalnog dodatka za područje djelovanja realnog požara na nosive konstrukcije – eurokod.