

Sigurnost čeličnih konstrukcija pri djelovanju požara

Ivica Boko, Bernardin Peroš

Ključne riječi

realno požarno opterećenje, veliki zatvoreni prostori, model zona, temperaturne krivulje, sigurnost konstrukcija

Key words

real fire load, large enclosed areas, zone model, temperature curves, safety of structures

Mots clés

charge réelle de feu, grands espaces couverts, modèle des zones, courbes de température, sécurité des constructions

Ключевые слова

реальная пожарная нагрузка, большие закрытые пространства, модель зон, температурные кривые, надёжность конструкций

Schlüsselworte

reelle Brandbelastung, grosse geschlossene Räume, Zonenmodell, Temperaturkurven, Sicherheit der Konstruktion

I. Boko, B. Peroš

Izvorni znanstveni rad

Sigurnost čeličnih konstrukcija pri djelovanju požara

Prikazana je analiza djelovanja različitih slučajeva realnog požara za skladišnu halu. Primjenom modela zona za različita požarna opterećenja dobivene su temperaturne krivulje u funkciji vremena, koje su uzete kao djelovanje na nosivu čeličnu konstrukciju. Na temelju dobivenih temperaturnih krivulja modelirano je provođenje topline kroz osnovni materijal konstrukcije, te je utvrđen stupanj njene sigurnosti. Istraživanja se provode u okviru NAD-a (National Application Document).

I. Boko, B. Peroš

Original scientific paper

Fire safety of steel structures

The analysis of various cases or real fire impact on a warehouse is presented. Temperature curves were obtained as a function of time by means of the zone model established for different fire loads. These curves were then used as actions influencing the load bearing steel structure. Based on such temperature curves, the passage of heat through the basic material of the structure was modeled, and the safety level of the structure was determined. These studies are conducted in the scope of the NAD (National Application Document).

I. Boko, B. Peroš

Ouvrage scientifique original

Sécurité incendie des constructions métalliques

L'article présente une analyse de l'action de différents cas d'incendies réels pour une halle de stockage. L'application du modèle des zones pour différentes charges de feu a permis d'obtenir les courbes de température en fonction du temps, qui ont été prises comme l'action du feu sur l'ossature métallique portante. A partir des courbes de température obtenues, il a été procédé à la modélisation de la propagation de la chaleur à travers le matériau principal de la construction et à la détermination du degré de sa sécurité. Ces études sont menées dans le cadre du NAD (National Application Document).

Ивица Бокo, Бернардин Перoш

Оригинальная научная работа

Надёжность стальных конструкций при пожаре (в случае пожара)

В работе дан анализ действия разных случаев реального пожара для складировочного зала. Применением моделей зон для различных пожарных нагрузок получены температурные кривые в функции времени, которые взяты как действие на несущую стальную конструкцию. На основании полученных температурных кривых моделирована теплопроводность через основной материал конструкции и установлена (определена) степень её надёжности. Исследования проводятся в рамках NAD-a (National Application Document).

I. Boko, B. Peroš

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Sicherheit von Stahlkonstruktionen bei Brandeinwirkung

Dargestellt ist eine Analyse der Wirkung verschiedener reeller Brandfälle für eine Lagerhalle. Durch Anwendung eines Zonenmodells für verschiedene Brandbelastungen gewann man zeitabhängige Temperaturkurven, die als Einwirkung auf die tragende Stahlkonstruktion angenommen wurden. Auf Grund der gewonnenen Temperaturkurven modellierte man die Leitung der Wärme durch das Grundmaterial der Konstruktion, und bestimmte deren Sicherheitsgrad. Die Forschungen werden im Rahmen der NAD (National Application Document) durchgeführt.

Autori: Mr. sc. **Ivica Boko**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Bernardin Peroš**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15, Split

1 Uvod

Prema današnjim znanstvenoistraživačkim spoznajama o požarima, njihovom nastanku i širenju nije moguće predvidjeti gdje i kada će nastati požar. Požari u industrijskim objektima mogu nastati zbog različitih faktora, od kojih je svakako najznačajniji ljudski faktor.

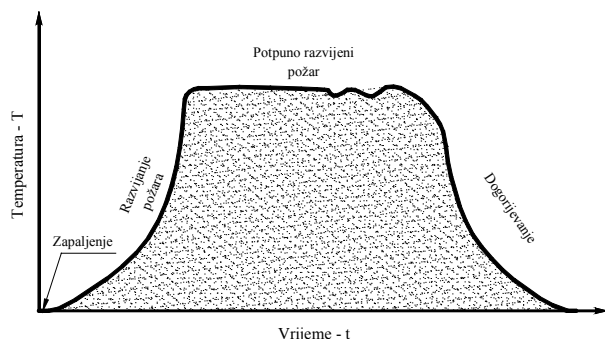
Produkti djelovanja požara su: razvijanje visokih temperatura i velike količine dima u zatvorenoj prostoriji. Visoke temperature utječu na sigurnost nosive konstrukcije objekta, dok je dim izravna opasnost za ljude, i od njega u požarima strada najviše ljudi. U ovom radu promatrano je samo djelovanje visokih temperatura na nosivu čeličnu konstrukciju.

U svijetu su posljednjih godina prisutni veliki znanstvenoistraživački napori da se shvati proces nastanka, razvoja i širenja požara, tako da danas postoji i jedna grana znanosti koja se naziva *Fire Science*.

Ova problematika obrađena je i u ENV 1991-2-2: 1995, gdje se osim klimatskih temperaturnih promjena računa i djelovanje požara kao toplinsko djelovanje, tj. razorno djelovanje u klasifikaciji djelovanja. Ovdje je riječ o novom pristupu jer su u djelovanja uključene i visoke temperature (slučaj požara) za razliku od sadašnjih Privremenih tehničkih propisa gdje se računa samo s temperaturnom promjenom od $\pm 30^{\circ}\text{C}$ kao dopunskim djelovanjem. Toplinska djelovanja definirana su: nominalnom krivuljom temperatura-vrijeme i parametarskom izloženosti požaru. Parametarske izloženosti požaru samo su inicirane i ostavljene pojedinim državama da to riješe na nacionalnoj razini u okviru NAD-ova. Dio tih istraživanja predstavljen je u ovome radu.

2 Osnovne karakteristike požara u zatvorenom prostoru

Požar u zatvorenim prostorijama industrijskih objekata prolazi kroz određene faze, kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Faze požara u zatvorenim industrijskim objektima

Neposredno nakon izbijanja (zapaljenja), požar ima karakteristike požara na otvorenom prostoru. U razdoblju razvijanja požara srednja temperatura prostorije je niska

i požar je lokalnog karaktera. Požar se razvija na način da se plamen počinje širiti ili po predmetu koji se zapalio ili po okolnim predmetima i okarakteriziran je razvojem dima i plamena koji povisuju temperaturu u zatvorenom prostoru. Faza razvijanja požara traje oko 10 – 20 min, odnosno dok plamen iz žarišta ne dosegne nivo stropa i ne počne se raspršivati po stropu. Toplinsko zračenje vrućih plinova zagrijava materijal koji još nije obuhvaćen plamenom. Tada požar prelazi u fazu potpuno razvijenog požara. To je faza u kojoj se razvijaju najviše temperature u prostoriji. Eksperimentalno [1] je dokazano da tada požar ulazi u kritično stanje i ako se nastavi širiti dolazi do povećanja brzine sagorijevanja gorivog materijala. Ovo povećanje brzine sagorijevanja gorivog materijala, za vertikalni porast visine plamena od jednog metar, rezultira povećanje u horizontalnom rasplamsavanju plamena od 5 do 7 metara. Stropni plameni znatno povećavaju razinu radijacije (zračenja) koja opada u neizgorenog gorivu daleko od izvora požara. Faktor radijacije rezultira bržim širenjem požara neovisno o drugim faktorima pa relativno mala površina požara brzo postane velika. U dosezanju potpuno razvijenog požara (tj. maksimalnoj brzini sagorijevanja) eksperimenti su pokazali da je općenito ponašanje tih požara uvjetovano dvama faktorima: količinom gorivog materijala i dotokom kisika koji je potreban za gorenje.

Na kraju, kad temperature u prostoriji padnu na 80 % od maksimalno razvijene temperature, smatra se da je započela zadnja faza – faza dogorijevanja.

Za požare je najvažniji čimbenik gorivi materijal – gorivo. Za analiziranje požara potrebno je poznavati količinu i vrstu goriva, brzinu sagorijevanja goriva, trajanje požara i snagu požara.

Najvažnije svojstvo svakog goriva jest brzina sagorijevanja, odnosno količina oslobođene topline po jedinичnoj površini gorivog materijala, izraženo ekvivalentnim drvom. Pri eksperimentalnim ispitivanjima to je najčešće jednoličan proces sagorijevanja u cijeloj prostoriji. U slučaju realnog požara brzinu sagorijevanja je teško odrediti, ali se može izvesti iz omjera razlike goriva prije požara i ostatka neizgorenog goriva u procijenjenom vremenu trajanja požara.

Brzina sagorijevanja po jedinici površine požara može se izraziti dvjema karakterističnim veličinama:

- omjerom ukupno potrošenog goriva izraženog ekvivalentnim drvom s procijenjenom površinom poda prekrivenog gorivom u zoni požara i trajanjem požara
- omjerom ukupno potrošenog goriva izraženog preko ekvivalentnim drvom, procijenjenom površinom poda prekrivenoga gorivom pomnoženo s visinom goriva.

Prvom veličinom iskazuje se globalna brzina sagorijevanja po jedinici površine poda prekrivene gorivom, dok

je drugom veličinom definirana brzina gubitka mase, kojom je definirana brzina sagorijevanja. Veličina brzine sagorijevanja opada s povećanjem gustoće goriva i bolje je korelirana nego brzina sagorijevanja izražena preko goriva po jedinici površine prekrivene gorivom. Visina goriva je vrlo značajna za određivanje karakteristika požara. Oba omjera prikazivanja brzine sagorijevanja su bolja od onih koja se vežu na omjere ukupno potrošenog goriva, izraženog ekvivalentnim drvom po jedinici površine zatvorenog prostora.

Regresijska jednadžba za određivanje maksimalne brzine sagorijevanja glasi [1]:

$$m'' = 0,11 \rho^{-0,34} \quad (1)$$

uz koeficijent korelacije 0,61, gdje je: m'' - maksimalna brzina sagorijevanja po jedinici površine požara, ρ - gustoća goriva (masa po jedinici visine goriva i površini poda prekrivenog gorivom).

Koeficijent varijacije za određivanje brzine sagorijevanja iznosi 0,7.

Trajanje požara je vrijeme trajanja potpuno razvijenog požara. Kao i pri određivanju brzine sagorijevanja postoji više faktora kojima se može definirati trajanje požara. Najvažnija su tri čimbenika:

- omjer goriva izraženog preko ekvivalentnog drva i ukupne površine zatvorenog prostora
- omjer goriva izraženog preko ekvivalentnog drva po jedinici površine prekrivene gorivom
- visina goriva.

Regresijskom analizom na temelju podataka iz eksperimentalnih i realnih požara dobivene su dvije jednadžbe [1]:

$$t = 590 \cdot f^{0,30} \text{ (s)} \quad (2)$$

gdje je f masa goriva, izražena ekvivalentnim drvom po jedinici površine poda zatvorenog prostora uz koeficijent korelacije 0,62 i

$$t = 126 \cdot f^{0,48} \text{ (s)} \quad (3)$$

gdje je f masa goriva, izražena preko ekvivalentnog drva po jedinici površine poda prekrivene gorivom uz koeficijent korelacije 0,70.

Radi bolje korelacije druga jednadžba, koja je u ovisnosti površine prekrivene gorivom, odabrana je kao jednadžba za određivanje vremena trajanja požara.

U ovisnosti o brzini sagorijevanja i trajanju požara može se izraziti snaga požara. Snaga požara definira se kao količina toplinske energije požara oslobođena u jedinici vremena.

Da bi se uopće moglo pristupiti modeliranju požara, potrebo je poznavati krivulju požara odnosno krivulju snaga požara – vrijeme, koja je analogna krivulji na slici 1. Razlikujemo tri faze požara:

- fazu razvijanja
- fazu potpuno razvijenog požara – konstantnu fazu
- fazu dogorijevanja.

Faza razvijanja požara može se definirati sljedećim izrazom [9]:

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

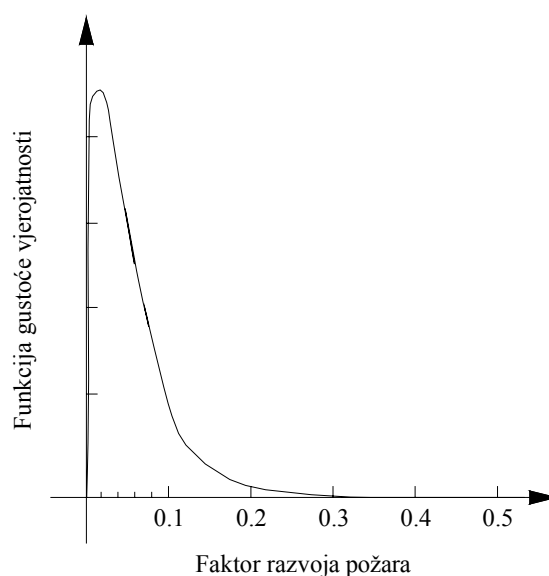
gdje je:

\dot{Q} - snaga požara - HRR (kW),

α_r - faktor razvoja požara (kW/s²),

t - vrijeme u sekundama.

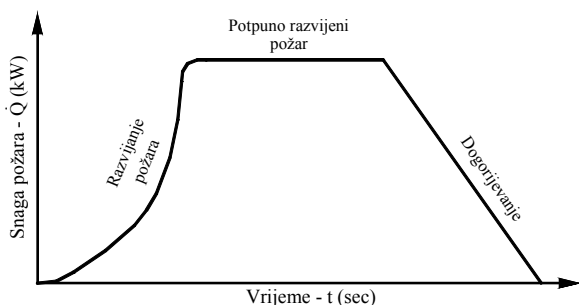
Faktor razvoja požara određuje se eksperimentalno. Konceptualna funkcija gustoće vjerojatnosti faktora razvoja požara prikazana je na slici 2.



Slika 2. Konceptualna funkcija gustoće vjerojatnosti faktora razvoja požara α_r .

Nakon faze razvoja požara nastupa faza potpuno razvijenog požara. Pri modeliranju ove faze maksimalna snaga požara uzima se konstantna u vremenu. U ovoj fazi razvijaju se najviše temperature u zatvorenom prostoru i to je najkritičnija faza pri djelovanju požara. Poslije ove faze, kad izgori oko 70% goriva, nastupa faza dogorijevanja u kojoj dolazi do smanjenja temperatura u zatvorenoj prostoriji. U ovoj se fazi pretpostavlja da snaga požara opada linearno s vremenom i da će cjelokupno gorivo izgorjeti.

Model krivulje snaga požara - vrijeme prikazan je na slici 3.



Slika 3. Krivulja snaga požara – vrijeme

Ovdje treba upozoriti na razliku proračuna kod velikih zatvorenih prostora (istraživanje u radu) i zatvorenih prostora volumena manjeg od 100 m^3 , gdje fazi potpuno razvijenog požara prethodi pojava razbuktavanja (*flashover*). Zbog povećane količine dimnih plinova i zračenjem iz plamena podiže se temperatura zraka i kad temperatura naraste, u sloju ispod stropa, na otprilike 600°C dolazi do razbuktavanja plamena po površini gorivog materijala. Ovaj proces razbuktavanja plamena traje kratko, izgleda spektakularno i kao prijelazna pojava do razvijenog požara obično se posebno matematički analizira. Standardna krivulja požara upravo opisuje požare ovakvog tipa, odnosno požare u zatvorenim prostorijama manjeg volumena.

3 Proračun temperatura u velikim zatvorenim prostorima

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 posebnim zatvorenim prostorima i zatvorenim prostorima gdje su prisutne veće mase ljudi, te se podrazumijeva poznavanje velikog broja ulaznih parametara, a zbog veličine problema potrebna su računala velikih kapaciteta tako da se ovakvi modeli rijetko rabe. Za određivanje temperatura u velikim zatvorenim prostorima tipa industrijskih hala modeli zona pokazali su se dovoljno dobri i našli su primjenu za istraživanje požara (primarna je temperatura u zatvorenim prostorima), što je prihvaćeno kod više istraživača [13].

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, jer

je realno simuliranje veoma složena zadaća pri numeričkom modeliranju pa se zato uvode određena pojednostavljenja. Modeliranje požara u zonama polazi od sustava diferencijalnih jednadžbi koje su izvedene koristeći se zakonom održanja mase, zakonom održanja energije i zakonom idealnih plinova. Ovi zakoni se postavljaju za svaku pojedinu zonu. Najčešće se zatvoreni prostor dijeli u dvije zone: gornju zonu - zona vrućih plinova i dima i donju zonu - zona u kojoj se zadržava sobna temperatura i sobni tlak.

Međusobna djelovanja zona posljedica su izmjene mase i energije. U ovakvom modeliranju uvode se još i pojednostavljenja:

- specifični toplinski kapaciteti c_p i c_v 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.

3.1 Konzervativna formulacija

Ekvivalentna je zakonima održanja koji se postavljaju za svaku zonu. Plinovi u svakoj zoni su okarakterizirani:

m_i - masom
 E_i - unutarnjom energijom
 ρ_i - gustoćom
 T_i - temperaturom
 V_i - volumenom
 p - tlakom

gdje je indeks $i = d$ za donju zonu, a $i = g$ za gornju zonu. Tlak u cjelokupnom zatvorenom prostoru je obilježen s p . Ovih jedanaest varijabli međusobno je povezano prinudnim jednadžbama kako slijedi:

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

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

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

$$V = V_d + V_g \quad (8)$$

Specifični toplinski kapaciteti pri konstantnom volumenu c_v i konstantnom tlaku c_p , plinska konstanta R i omjer specifičnih toplina γ povezane su jednadžbama:

$$R = c_p - c_v \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (10)$$

Diferencijalne jednadžbe za masu u pojedinoj zoni su trivijalne:

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum \dot{m}_i \quad (11)$$

gdje je $\sum \dot{m}_i$ - suma promjena mase poradi djelovanja ventilacije i požarne perjanice.

Prvi zakon termodinamike u diferencijalnom obliku glasi:

$$\frac{dE_i}{dt} + p \frac{dV_i}{dt} = \dot{q}_i \quad (12)$$

gdje je $\frac{dE_i}{dt}$ - unutarnja energija sustava, $p \frac{dV_i}{dt}$ - rad

koji sustav obavlja, \dot{q}_i - entalpija.

Uvrštavanjem (7) u (6) dobije se diferencijalni izraz za unutarnju energiju sustava:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{d(c_v m_i T_i)}{dt} = \frac{c_v}{R} \frac{d}{dt} (p V_i) \quad (13)$$

Diferencijalna jednadžba za tlak dobije se iz jednadžbe (12), uključivanjem obje razine uz korištenje uvjetom

$$\frac{dV_g}{dt} = - \frac{dV_d}{dt} ;$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} \left(\dot{q}_d + \dot{q}_g \right) \quad (14)$$

Diferencijalna jednadžba za volumene pojedine zone može se dobiti supstitucijom jednadžbe (13) u (12):

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{P\gamma} \left((\gamma - 1) \dot{q}_i - V_i \frac{dp}{dt} \right) \quad (15)$$

Diferencijalne jednadžbe za gustoće mogu se izvesti primjenom pravila deriviranja kvocijenta $\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_i}{V_i} \right)$ i

korištenjem jednadžbom (15) za eliminiranje $\frac{dV_i}{dt}$:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = - \frac{1}{c_p T_i V_i} \left(\left(\dot{q}_i - c_p \dot{m}_i T_i \right) - \frac{V_i}{\gamma - 1} \frac{dp}{dt} \right) \quad (16)$$

Diferencijalne jednadžbe za temperaturu mogu se također izvesti primjenom pravila za deriviranje kvocijenta

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{p}{R\rho_i} \right) \text{ i korištenjem jednadžbom (16) za sub-}$$

stituciju $\frac{d\rho_i}{dt}$:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_i V_i} \left(\left(\dot{q}_i - c_p \dot{m}_i T_i \right) + V_i \frac{dp}{dt} \right) \quad (17)$$

Ovako postavljene diferencijalne jednadžbe formiraju sustav od 11 jednadžbi s 11 nepoznanica, ali koristeći se

prinudnim jednadžbama (5) – (8) dobijemo da je potrebno odabrati 4 varijable kao rješenja i formirati sustav diferencijalnih jednadžbi. Pri izboru ove 4 varijable treba paziti da one nisu međusobno povezane prinudnim jednadžbama. Za rješenja ovog problema najčešće se odabiru ovi parovi rješenja:

- m_d, m_g i E_d, E_g
- ρ_d, ρ_g i P, V_d
- T_d, T_g i P, V_g .

Pri rješavanju takvog sustava diferencijalnih jednadžbi nailazi se na još jedan problem. Fizikalno, tlak u zatvorenoj prostoriji uravnotežava se brže od gustoće i temperature. Ovaj je problem poznat pod nazivom “*stiff problem*”. Tlak koji opada kroz ventilaciju može prouzročiti značajan tok mase kroz ventilaciju. Numerički, problem nastaje zbog proračuna točnog tlaka koji opada kroz ventilaciju. Ovaj problem je složen iz činjenice da je sobni tlak 10^5 Pa, a tlak koji opada kroz ventilaciju je oko 0,1 Pa. Zbog toga, ako je tlak varijabla rješenja, potrebno je računati sa sedam točnih značajnih znamenki. Vidljivo je da se radi o slabo uvjetovanoj matrici sustava jednadžbi. Zbog ovog su problema danas sve više aktualne aproksimativne formulacije.

3.2 Aproksimativna formulacija

Aproksimativne formulacije pretpostavljaju da tlak u prostoriji i temperatura u donjoj zoni ostaju sobni. Uz ove pretpostavke, za razliku od konzervativne formulacije, dobiva se sustav od dvije diferencijalne jednadžbe s dvije nepoznanice [2]:

- diferencijalna jednadžba zakona održanja mase gornje zone:

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_i \quad (18)$$

- diferencijalna jednadžba za energiju gornje zone:

$$\frac{d(y_c - y) \rho T A c_v}{dt} = \sum \dot{q}_i + p A \frac{dy}{dt} \quad (19)$$

gdje je:

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 - površina prostorije

p - apsolutni tlak

C_v - specifična toplina pri konstantnom volumenu

q_i - entalpija gornje zone

t - vrijeme.

Koristeći se zakonom idealnih plinova jednadžba (19) može se napisati:

$$\frac{dy}{dt} = - \frac{\sum q_i}{Ac_p \rho_\infty T_\infty} \quad (20)$$

gdje je:

ρ_∞ - gustoća zraka pri sobnoj temperaturi

T_∞ - sobna temperatura

c_p - specifična toplina pri konstantnom tlaku.

Dok gornja zona nije prisutna (formirana), za proračun temperature plamena ΔT_p primjenjuje se odnos koji su postavili Heskestad i Delicatsios [7]:

$$\Delta T_p = \frac{9.28 T_\infty \left((1 - \chi_r) \dot{Q} \right)^{\frac{2}{3}}}{\left(\rho_\infty c_p T_\infty g^{\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{2}} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (21)$$

gdje je:

χ_r - frakcija zračenja požara,

\dot{Q} - mjera oslobođene topline požara,

g - gravitacijska konstanta,

H - visina stropa iznad površine požara.

Kada se formira gornja zona, ova se korelacija mora modificirati. Temperatura u plamenu računa se po metodi Evansa [10]:

$$\dot{Q}_{I,1}^* = \frac{(1 - \chi_r) \dot{Q}}{\left(\rho_\infty c_p T_\infty g^{\frac{1}{2}} Z_{I,1}^2 \right)} \quad (22)$$

$$\dot{Q}_{I,2}^* = \frac{\left[\left(1 + C_T \dot{Q}_{I,1}^{\frac{2}{3}} \right) \right]^{\frac{3}{2}}}{\left[\xi C_T - \frac{1}{C_T} \right]} \quad (23)$$

$$Z_{I,2} = \left[\frac{\xi C_T \dot{Q}_{I,1}^*}{\dot{Q}_{I,2}^{\frac{1}{3}} \left[(\xi - 1)(\beta^2 + 1) + \xi C_T \dot{Q}_{I,2}^{\frac{2}{3}} \right]} \right]^{\frac{2}{5}} Z_{I,1} \quad (24)$$

$$\Delta T_p = 9.28 T_g \dot{Q}_{I,2}^{\frac{2}{3}} \left(\frac{Z_{I,2}}{H_2} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (25)$$

gdje je:

\dot{Q}_I^* - snaga požara

I - označava granicu zona

1 - označava donju zonu

2 - označava gornju zonu

$Z_{I,1}$ - udaljenost između požara i granice gornje i donje zone

$Z_{I,2}$ - udaljenost između visine privremenog požara i visine početnog požara,

ξ - omjer temperatura gornje i donje zone

β - 0,9555

C_T - 9.115,

H_1 - udaljenost požara od plafona,

H_2 - visina gornje zone

T_g - temperatura gornje zone.

Temperatura stropne mlaznice računa se uporabom sljedeći model. Alpert [11] je postavio odnos za proračun temperature stropne mlaznice ΔT_{cj} , dok gornja zona još nije formirana, koja se u ovisnosti o radijalnoj udaljenosti r i temperaturi u plamenu ΔT_p može izraziti prema:

$$\Delta T_{cj} = \frac{0.68 \Delta T_p}{\frac{2}{r^3}} \quad (26)$$

za odnos $\frac{r}{H} > 0,18$

gdje je:

r - horizontalna radijalna udaljenost od središta požara

H - visina stropa iznad površine požara.

Dok je gornja zona u fazi formiranja, temperatura stropne mlaznice računa se iz odnosa koji je postavio

Davis [8], uz uvjet $\frac{r}{H} > 0,18$:

$$\Delta T_{cj} = \frac{C}{r^\gamma} \quad (27)$$

$$C = \beta r_0^\gamma \Delta T_p \quad (28)$$

gdje je:

$$\beta = \left(0.68 + 0.16 \left(1 - e^{-\frac{y_D}{y_j}} \right) \right) \quad (29)$$

$$r_0 = 0,18H \quad (30)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} - \alpha \left(1 - e^{-\frac{y_D}{y_j}} \right) \quad (31)$$

$$y_j = 0,1H \quad (32)$$

Vrijednost koeficijenta α se određuje iz dva uvjeta: dok se ne formira gornja zona, radijalna zavisnost temperature stropne mlaznice određena je Alpertovom vrijednošću $\left(\frac{2}{3}\right)$, a kad se gornja zona formira, tada se vrijed-

nost ovog koeficijenta uzima 0,23, pri čemu je y_D oznaka za visinu donje zone.

Jednadžbe (21) - (32) služe za izračunavanje temperatura požarne perjanice i požarne mlaznice u pojedinom vremenskom koraku, a one su ulazni parametri u sustav diferencijalnih jednadžbi (18) i (20).

Ovdje je primijenjena aproksimativna formulacija za određivanje temperatura u zatvorenoj prostoriji zbog djelovanja požara, za različite slučajeve realnoga požarnog opterećenja.

4 Numerički primjeri određivanja temperatura u zatvorenim prostorima

Radi određivanja kritičnih temperatura u velikim zatvorenim objektima, uporabom programa JET [2] simulirano je djelovanje požara u zatvorenom industrijskom objektu (skladišnoj hali). Odabrana hala je tlocrtnih dimenzija 60 x 40 m. Visina u najnižoj točki nosive konstrukcije jest 7,5 m. Kao gorivo uzeto je drvo, upotrijebljeno u eksperimentalnim istraživanjima [1]. U radu je obrađeno više različitih primjera realnoga požarnog opterećenja variranjem sljedećih parametara: mase goriva po jediničnoj površini, površine poda prekrivene gorivom, i to za različite slučajeve ventiliranja objekta (otvori na hali). Masa goriva po jediničnoj površini varirana je s vrijednostima:

- M1 - 35 kg/m² (napunjene poštanske torbe visine 1,9 m),
- M2 - 70 kg/m² (PE tuš kabine pakirane u kartonske kutije visine 2,5 m),
- M3 - 105 kg/m² (PE boce u kartonskim kutijama visine 2,2 m).

Površina poda prekrivena gorivom varirana je s vrijednostima:

- S1 - 5% površine poda objekta,
- S2 - 10% površine poda objekta,

Površina otvora hale varirana je s vrijednostima:

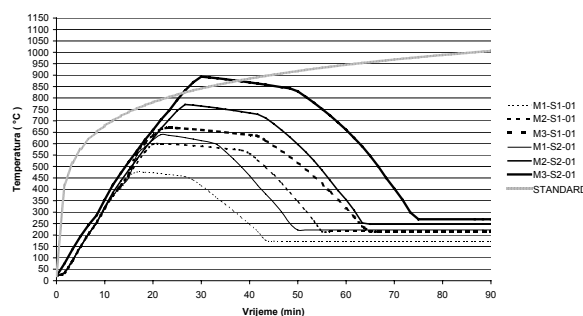
- O1 - 1% površine zidova i krova,
- O2 - 5% površine zidova i krova,
- O3 - 10% površine zidova i krova.

Obrađene su sve kombinacije različitih varijacija navedenih parametara (npr. M1-S1-O2), a u tablici 1. dani su požarni parametri za karakteristične kombinacije i najnepovoljniji slučaj ventiliranja objekta.

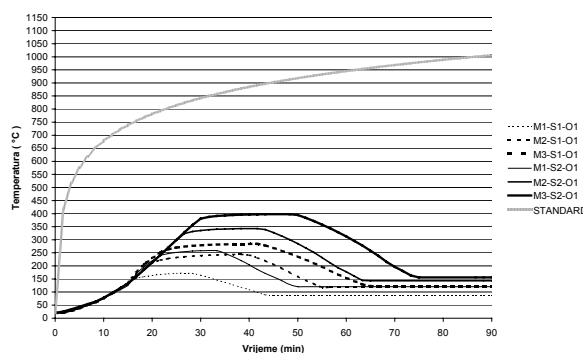
Tablica 1. Slučajevi realnog požara

Slučajevi realnog požara	Gustoća požarnog opterećenja	Snaga potpuno razvijenog požara	Trajanje potpuno razvi. požara
M1-S1-O1	665 MJ/m ²	442 kW/m ²	11.56 min
M2-S1-O1	1330 MJ/m ²	684 kW/m ²	16.13 min
M3-S1-O1	1995 MJ/m ²	867 kW/m ²	19.60 min
M1-S2-O1	665 MJ/m ²	412 kW/m ²	11.56 min
M2-S2-O1	1330 MJ/m ²	623 kW/m ²	16.13 min
M3-S2-O1	1995 MJ/m ²	790 kW/m ²	19.60 min

Na sljedećim crtežima, ovisno o radijalnoj udaljenosti r (udaljenost od središta požara), prikazane su krivulje temperatura stropa – vrijeme za 6 slučajeva realnog požara (tablica 1.), a za usporedbu je prikazana i standardna krivulja požara [4].



Slika 4. Krivulja temperatura stropa za $r = 0,0$ m – vrijeme



Slika 5. Krivulja temperatura stropa za $r = 14,0$ m – vrijeme

5 Modeliranje nestacionarnoga nelinearnog provođenja topline

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

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

Temperature u nekom tijelu s nejednolikom temperaturom nastoje se izjednačiti provođenjem topline. Sve točke tijela s jednakom trenutačnom temperaturom leže na nivo-plohi jednake temperature. Ove plohe mogu biti raznoliko položene, ali se ne mogu dodirivati niti presijecati, jer bi u tim točkama tijela istovremeno bile različite temperature, što je fizikalno besmisleno.

Toplina struji u smjeru pada temperature, dakle najjače u smjeru normale na nivo-plohu. Gustoća toplinskog toka u nekoj promatranoj točki za taj smjer [12] jest:

$$\underline{q} = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (33)$$

gdje je:

k - koeficijent toplinske vodljivosti

T - temperatura

n - smjer normale na nivo-plohu.

Negativnim predznakom uzima se u obzir da toplina struji uvijek u smjeru temperaturnog pada. U smjeru nivo-plohe nema temperaturnog pada, tako da u tom smjeru nema strujanja topline.

Komponente vektora toplinskog toka po koordinatnim osima su:

$$\begin{aligned} q_x &= -k_x \frac{\partial T}{\partial x} = q \cos \alpha \\ q_y &= -k_y \frac{\partial T}{\partial y} = q \cos \beta \\ q_z &= -k_z \frac{\partial T}{\partial z} = q \cos \gamma \end{aligned} \quad (34)$$

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:

$$d\dot{Q}_x(dy dz)dt = \frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} dx dy dz dt = \frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} dV dt \quad (35)$$

Analogno se može postaviti jednadžba i za preostala dva koordinatna smjera.

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

$$e = \int_{T_0}^T c \rho dT \quad (36)$$

gdje je:

c - specifični toplinski kapacitet,

ρ - materijalna gustoća kontinuuma,

T_0 - početna temperatura.

Toplina ohlađivanja elementa u istom vremenskom razdoblju dt jest:

$$e dV = dV \frac{\partial e}{\partial t} dt \quad (37)$$

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

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = Q \quad (38)$$

odnosno:

$$\underline{q} \cdot \nabla q = Q \quad (39)$$

$$\underline{q} = \frac{\partial e}{\partial t} = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (40)$$

gdje je:

e - specifična volumenska entalpija

c - specifični toplinski kapacitet

ρ - materijalna gustoća kontinuuma

T_0 - početna temperatura

Vektor toplinskog toka po koordinatnim osima može se prikazati izrazom:

$$\underline{q} = \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = -\underline{k} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = -\underline{k} \nabla T \quad (41)$$

Za izotropni materijal je:

$$\underline{k} = k \underline{I} \quad (42)$$

gdje je:

k - koeficijent toplinske vodljivosti

\underline{I} - jedinična matrica.

Uvrštavanjem (41) u (39) dobijemo:

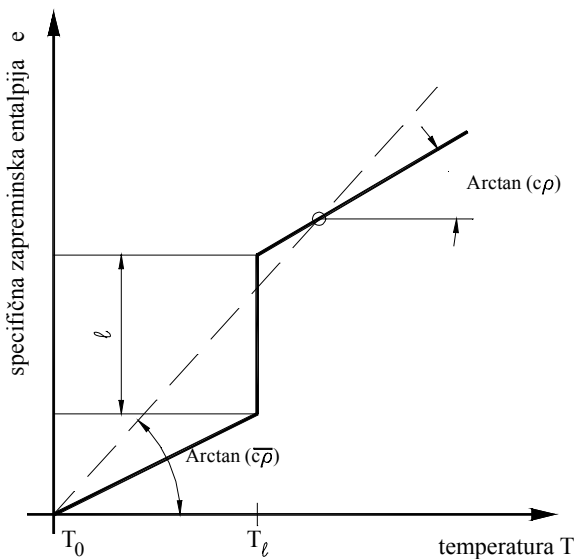
$$\underline{q} \cdot \nabla T - (k \nabla T) \cdot \nabla T - Q = 0 \quad (43)$$

U nekim materijalima dolazi do nagle promjene specifične volumenske entalpije zbog promjena faza na različitim temperaturama, tako da se specifična volumenska toplina može definirati izrazom:

$$e(T) = \int_{T_0}^T \rho c dT + \sum_i \lambda_i \quad (44)$$

gdje je λ_i latentna volumenska toplina zbog promjena faza u različitim temperaturnim nivoima (npr. zbog isparavanja vode iz materijala).

Na slici 6. prikazana je specifična zapreminska entalpija u ovisnosti o temperaturi za materijal s latentnom volumenskom toplinom s naznačenim korakom λ na krivulji.



Slika 6. Definicija nominalne specifične volumenske topline

Može se primijetiti da u temperaturi T_λ , gdje krivulja entalpije ima skok, vrijednost $c\rho$ nije definirana, dok je vrijednost $\bar{c}\rho$ uvijek definirana, tj. konačna.

Nominalna specifična volumenska entalpija može se izraziti prema:

$$e = \bar{c}\rho T \quad (45)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (45) u jednadžbu (43) dobije se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{c}\rho T) - \nabla^T(\underline{k}\nabla T) - Q = 0 \quad (46)$$

Jednadžba (46) opisuje provođenje topline ovisno o vremenu i prostoru. Da bi se uopće moglo pristupiti rješavanju ove jednadžbe potrebno je poznavati početne i rubne uvjete. Početni uvjeti moraju definirati raspodjelu temperature u svim točkama kontrolnog volumena u nekom poznatom trenutku, najčešće u trenutku $t = 0$. Na rubu kontrolnog volumena potrebno je nadomjestiti vezu s odbačenim dijelom kontinuuma, koji se ne modelira, a to su upravo rubni uvjeti. Prirodni rubni uvjet je toplinski tok po rubu kontinuuma, dok je prisilni rubni uvjet zadana temperatura u čvorovima.

Primjenom osnovne leme [3] na (46) dobiva se:

$$\int_{\Omega} w \left[\frac{\partial}{\partial t}(\bar{c}\rho T) - \nabla^T \underline{k} \nabla T - Q \right] d\Omega = 0 \quad (47)$$

te primjenom pravila parcijalnog integriranja, dobije se nejakta formulacija provođenja topline:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} w \frac{\partial}{\partial t}(\bar{c}\rho T) d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla w)^T \underline{k} \nabla T d\Omega \\ & = \int_{\Gamma} w \underline{n}^T \underline{k} \nabla T d\Gamma + \int_{\Omega} w Q d\Omega \end{aligned} \quad (48)$$

gdje je \underline{n} - vanjska normala na rub Γ .

Izborom test vektora iz klase varijacije rješenja, integral po rubu potrebno je izračunavati samo na dijelovima ruba s prirodnim rubnim uvjetima. Prirodni rubni uvjet općenito je neka funkcija položaja točke na rubu i rješenja:

$$q(x) = q_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots ; x \in \Gamma \quad (49)$$

koja se može formalno razviti u red potencija po varijabli T .

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

$$q_n^k = \beta (T_p - T_{pe})^\gamma \quad (50)$$

a toplinski tok zbog zračenja:

$$q_n^z = \varepsilon_r \sigma (T_p^4 - T_{pe}^4) \quad (51)$$

gdje je:

β - koeficijent prijenosa topline konvekcijom

T_p - temperatura plina u okolini elementa

T_{pe} - temperatura površine elementa

γ - koeficijent konvekcije

ε_r - rezultatni emisijski koeficijent

σ - Stefan - Boltzmanova konstanta.

U slučaju kad imamo djelovanje požara na konstrukciju, rezultatni emisijski koeficijent proračunava se iz uvjeta dviju beskonačno velikih paralelnih ravnina:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{pe}} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (52)$$

gdje je ε_p emisijski koeficijent za odgovarajući plin ili emisijski koeficijent plamena.

Ukupni toplinski tok na rubovima kontinuuma proračunava se dodavanjem doprinosa konvekcije i zračenja:

$$q_n = q_n^k + q_n^z \quad (53)$$

U tehnici konačnih elemenata rabe se lokalizirane globalne bazne funkcije koje se grade od oblikovnih funkcija elemenata. Oblikovne funkcije izabrane su tako da su parametri linearne kombinacije jednaki čvornim vrijednostima približnog rješenja:

$$T = \sum_i N_i(x, y, z) T_i(t) = \underline{N} \underline{T} \quad (54)$$

Budući da se radi o nestacionarnom problemu, čvorne vrijednosti približnog rješenja bit će funkcije vremena, tako da je promjena temperature u vremenu:

$$\underline{\dot{T}} = \underline{N} \underline{\dot{T}}^e \quad (55)$$

Izborom test funkcije kao varijacije približnog rješenja (Galjerkinova metoda):

$$w_i = N_i \quad (56)$$

dobije se sustav nelinearnih diferencijalnih jednadžbi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{\Omega} (\underline{N}^T \overline{c\rho} \underline{N} d\Omega) \underline{T} \right] + \int_{\Omega} [(\underline{\nabla} \underline{N})^T \underline{k} \underline{\nabla} \underline{N} d\Omega] \underline{T} = \\ = \int_{\Gamma} \underline{N}^T \underline{n}^T \underline{k} \underline{\nabla} \underline{T} d\Gamma + \int_{\Omega} \underline{N}^T \underline{Q} d\Omega \end{aligned} \quad (57)$$

Kako je tehnika konačnih elemenata zasnovana na lokalizaciji globalne baze, rješenje je izraženo kao vektor čije su komponente pridružene čvorovima diskretizacije. Jednadžba (57) može se prikazati u vektorskom obliku:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\underline{E}) + \underline{F}_T = \underline{F}_q + \underline{F}_Q \quad (58)$$

gdje je:

\underline{E} - vektor entalpije ili toplina akumulirana u elementu pridružena susjednim čvorovima

\underline{F}_T - vektor čvornog provođenja topline

\underline{F}_q - vektor rubnog toplinskog dotoka

\underline{F}_Q - vektor toplinskog opterećenja.

Komponente vektora \underline{E} , \underline{F}_T , i \underline{F}_Q pridružene su čvorovima područja, dok su komponente vektora \underline{F}_q pridružene čvorovima ruba.

Vektor čvorne entalpije jest:

$$\underline{E} = \underline{C} \underline{T} \quad (59)$$

gdje je \underline{C} - nominalna kapacitivna matrica.

Vektor unutrašnjeg provođenja topline jest:

$$\underline{F}_T = \underline{K} \underline{T} \quad (60)$$

gdje je \underline{K} - matrica provođenja.

Uvođenjem (59) i (60) u (58) dobije se diskretni sustav jednadžbi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\underline{C} \underline{T}) + \underline{K} \underline{T} = \underline{F}_q + \underline{F}_Q \quad (61)$$

Jednadžba (61) može se prikazati u ovisnosti o čvornoj entalpiji:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\underline{E}) + \underline{K}^* \underline{E} = \underline{F}_q + \underline{F}_Q \quad (62)$$

gdje je:

$$\underline{K}^* = \underline{K} \underline{C}^{-1} \quad (63)$$

Isto tako, jednadžba (61) može se napisati i za svaki konačni element, kao izdvojena cjelina, sa svojim lokalnim rubnim uvjetima:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\underline{C}^e \underline{T}) + \underline{K}^e \underline{T} = \underline{F}_q^e + \underline{F}_Q^e \quad (64)$$

odnosno izraženo čvornom entalpijom:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\underline{E})^e + (\underline{K}^* \underline{E})^e = \underline{F}_q^e + \underline{F}_Q^e \quad (65)$$

Članovi matrica i vektora konačnog elementa u jednadžbi (65) su:

$$K_{ij}^e = \int_e (\underline{\nabla} N_i)^T \underline{k} (\underline{\nabla} N_j) de \quad (66)$$

$$C_{ij}^e = \int_e N_i \overline{c\rho} N_j de \quad (67)$$

$$F_{qi}^e = \int_{\gamma} N_i \underline{n}^T \underline{k} \underline{\nabla} T d\gamma \quad (68)$$

$$F_{Qi}^e = \int_e N_i Q de \quad (69)$$

Vrijednosti integrala u jednadžbama (66) - (69) izračunavaju se Gaussovom kvadraturnom formulom.

Pod nestacionarnim procesom podrazumijeva se pojava koja ima vremensku promjenjivost. Ovakva se pojava prati od nekog poznatog stanja, tj. početnih uvjeta.

Tehnika konačnih elemenata dovodi do diskretnog sustava običnih nelinearnih diferencijalnih jednadžbi:

$$\frac{d}{dt} (\underline{E}) = -\underline{K}^* \underline{E} + \underline{F} \quad (70)$$

gdje je

$$\underline{F} = \underline{F}_q + \underline{F}_Q \quad (71)$$

Primjenom približnog oblika poučka o srednjoj vrijednosti [3] na (70) dobiva se izraz:

$$\begin{aligned} \theta \underline{K}^*_{t+\Delta t} \underline{E}_{t+\Delta t} + (1-\theta) \underline{K}^*_{t+\Delta t} \underline{E}_t + \frac{\underline{E}_{t+\Delta t} - \underline{E}_t}{\Delta t} = \\ = \theta \underline{F}_{t+\Delta t} + (1-\theta) \underline{F}_t \end{aligned} \quad (72)$$

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 (72) dobije se eksplicitna formula:

$$\underline{E}_{i,t+\Delta t} = \underline{E}_t + \left(\underline{F}_t - \underline{K}_t^* \underline{E}_t \right) \Delta t \quad (73)$$

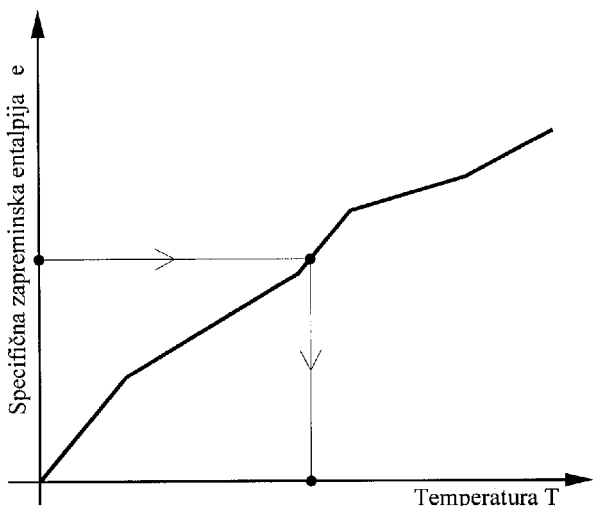
Jednadžba (59) tada se rabi za proračun temperature u čvoru i :

$$T_{i,t+\Delta t} = C_{ii}^{-1} \left(T_{i,t+\Delta t} \right) E_{i,t+\Delta t} \quad (74)$$

Budući da C_{ii} varira ovisno o temperaturi, egzaktno rješenje jednadžbe (74) dobiva se iterativno. Ako su svi elementi pridruženi čvoru i od istog materijala specifična volumenska entalpija računa se:

$$e_{i,t+\Delta t} = \frac{E_{i,t+\Delta t}}{W_{ii}} \quad (75)$$

i $T_{i,t+\Delta t}$ dobije se koristeći se funkcionalnom vezom temperatura – specifična volumenska entalpija prikazanu na slici 7.



Slika 7. Određivanje temperature iz specifične volumenske entalpije

Za određivanje temperature u čvorovima na spojevima između različitih materijala, upotrebljava se iterativna formula

$$T_{i,t+\Delta t}^{j+1} = C_{ii}^{-1} \left(T_{i,t+\Delta t}^j \right) E_{i,t+\Delta t} \quad (76)$$

gdje j označava iterativni korak. Za prvi iterativni korak temperatura u prijašnjem vremenskom koraku se pretpostavi. Iterativni postupak prestaje kada je razlika između čvornih temperatura u dva uzastopna koraka manja od dopustive vrijednosti δ određene kao

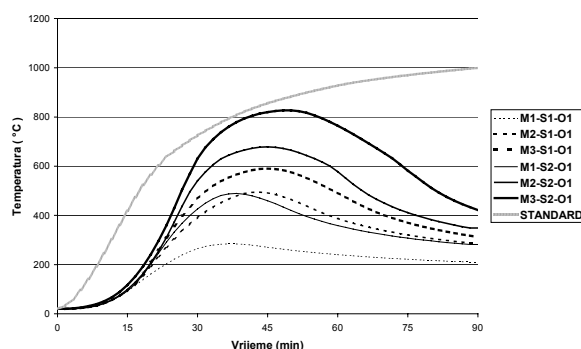
$$\frac{T_{i,t+\Delta t}^{j+1} - T_{i,t+\Delta t}^j}{T_{i,t+\Delta t}^{j+1} + T_{i,t+\Delta t}^j} < \frac{\delta}{2} \quad (77)$$

gdje je δ unaprijed određena vrijednost.

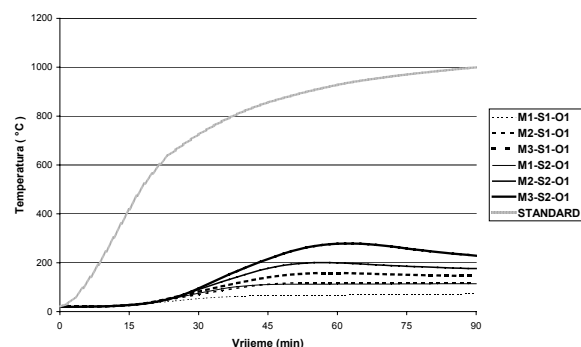
6 Primjeri nestacionarnog nelinearnog provođenja topline kroz osnovni materijal čelične konstrukcije

Proračun temperatura u čeličnim elementima zbog djelovanja požara, primjenom modela nestacionarnoga, nelinearnoga provođenja topline izvršen je s programskim paketom TASEF [6]. TASEF (*Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire*) računalni je program za proračun temperatura u konstrukcijama izloženim požaru, zasnovan na tehnici konačnih elemenata, za rješavanje 2D problema, kako je opisano u točki 5.

Provođenje topline kroz osnovni materijal čelične konstrukcije ovisi i o faktoru obloka poprečnog presjeka (O/A). Ova istraživanja nisu dana u radu zbog opsežnog prikaza, te je analiziran samo poprečni presjek HEB 800 koji čini glavnu nosivu konstrukciju (slika 11.). Variranjem 6 različitih požarnih opterećenja za radialne udaljenosti od središta požara $r = 0,0$ m i $r = 14,0$ m provedena je analiza provođenja topline primjenom nestacionarnog, nelinearnog modela, na odabranom nezaštićenom poprečnom presjeku HEB 800, a dobiveni rezultati prikazani su na slikama 8. i 9. Za usporedbu prikazan je i utjecaj standardne krivulje na odabranom presjeku.



Slika 8. Krivulja temperatura – vrijeme $r = 0,0$ m

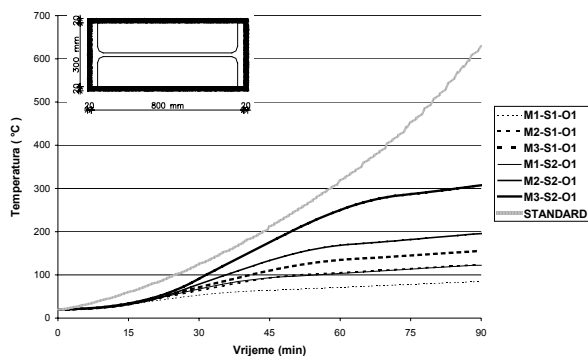


Slika 9. Krivulja temperatura – vrijeme $r = 14,0$ m

Da bi se u slučaju požara snizile temperature u nosivim čeličnim konstrukcijama, one se mogu štiti vatrootpornim materijalima. Jedan od načina zaštite nosive konstrukcije prikazan je na crtežu 10. gdje se čelična konstrukcija oblaže negorivim mineralnim pločama. Zadaća tak-

ve zaštite jest sprječavanje zagrijavanja nosive čelične konstrukcije do kritičnih temperatura, zbog čega može doći do otkazivanja nosivosti konstrukcije.

Primjer djelovanja istih slučajeva požarnog opterećenja, ali na zaštićenom odabranom presjeku za $r = 0,0$ m, dan je na slici 10.



Slika 10. Krivulja temperatura – vrijeme $r = 0,0$ m

7 Proračun sigurnosti čeličnih konstrukcija u slučaju požara

7.1 Općenito

Proračun sigurnosti konstrukcija u slučaju požara, može se odrediti samo probabilističkim metodama, tj. sve ulazne parametre, otpornosti i djelovanja koji utječu na sigurnost konstrukcije potrebno je promatrati kao slučajne veličine.

Otpornost neke konstrukcije čini otpornost pojedinih elemenata i spojeva tih elemenata. Ako pretpostavimo da konstrukcija kao cjelina otkazuje kada kod njezina najslabijeg elementa otkaze nosivost (slučaj lanca), onda možemo u razmatranje uključiti samo taj element. Proračun otpornosti elementa može se provesti za dva granična stanja:

- krajnje granično stanje
- granično stanje uporabljivosti.

Kako je prije obrazloženo djelovanje požara pripada grupi razornih djelovanja i definira se nominalnom krivuljom temperatura - vrijeme. U radu je obrađeno više različitih primjera realnoga požarnog opterećenja. Kao reprezentativne vrijednosti požarnog djelovanja usvojene su ekstremne krivulje požarnog djelovanja u ovisnosti o površini ventilacije, koje su ujedno i ulazni parametar za određivanje temperatura u elementima konstrukcije. Nestacionarnim modelom provođenja topline dobivene su temperature u nezaštićenim i zaštićenim čeličnim elementima (poglavlje 5), koje će biti u nastavku upotrijebljeno kao temperaturno djelovanje na konstrukciju.

7.2 Proračun sigurnosti konstrukcije postupkom numeričke integracije

Određivanje stupnja sigurnosti nosive čelične konstrukcije u slučaju djelovanja požara izvršeno je primjenom probabilističke metode, gdje je vjerojatnost otkazivanja nosivosti konstrukcije p_f iskazana prema [16] izrazom:

$$p_f = \int_{G(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{X}) d\mathbf{x} \quad (78)$$

Za rješenje ovog višestrukog integrala u daljem postupku primijenjena je metoda pouzdanosti potpune razdiobe FORM (*First Order Reliability Method*). Ovom metodom aproksimira se granično stanje nosivosti sustava $G(\mathbf{X}) = 0$, gdje je $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ vektor osnovnih varijabli, uz odgovarajuću funkciju razdiobe $F(\mathbf{X})$. U daljnjem se prvobitni slučajni vektor \mathbf{X} transformira u nezavisni standardni vektor \mathbf{U} , tj. slijedi $\mathbf{X} = T(\mathbf{U})$. Najvjerojatnija točka otkazivanja, koja se zove indeks sigurnosti β , na funkciji graničnog stanja $G(\mathbf{X}) = 0$, locira se u standardnom \mathbf{U} prostoru (nulta prosječna, jedinična standardna devijacija) koristeći se odgovarajućim algoritmom pretraživanja. Linearizacija funkcije graničnog stanja u najvjerojatnijoj točki loma tada daje procjenu vjerojatnosti:

$$p = P[G(\mathbf{X}) \leq 0] = P[G(T(\mathbf{U})) \leq 0] = P[H(\mathbf{U}) \leq 0] \cong \Phi(-\beta) \quad (79)$$

gdje je $\Phi(\cdot)$ standardna normalna razdioba, a β indeks sigurnosti.

Proračun indeksa sigurnosti u radu izvršen je uz pomoć suvremenog programskog paketa **STRUREL** (*A Structural Reliability Analysis Program System*) [14].

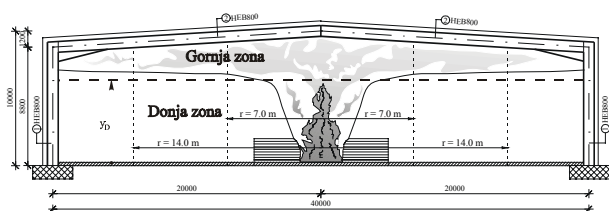
7.3 Primjeri

a) Nezaštićena čelična konstrukcija

Za promatrani objekt, glavna nosiva konstrukcija prikazana na slici 11. dimenzionirana je za stalna i promjenjiva djelovanja. Promjenjiva djelovanja izračunana su prema sadašnjim hrvatskim normama za objekte na području Splita, a dimenzioniranje je izvršeno prema europskim normama [4, 5]. Za ovako dimenzioniranu konstrukciju dobiveni su prihvatljivi indeksi sigurnosti u odnosu na kriterije europske regulative β_{norm} (za razdoblje od 50 godina), i to:

- krajnje granično stanje: $\beta = 4,26 > \beta_{norm} = 3,8$
- granično stanje uporabljivosti: $\beta = 3,02 > \beta_{norm} = 1,5$.

Problem je definiran baznim varijablama djelovanja i otpornosti kao slučajnim veličinama.



Slika 11. Prikaz glavne nosive konstrukcije

Na osnovi prijašnjih analiza iz poglavlja 4. i 5. kao reprezentativne vrijednosti požarnog djelovanja dobivene su temperaturne krivulje na temelju kojih je određeno realno temperaturno djelovanje na glavnu nosivu konstrukciju, a koje uz stalno djelovanje može dovesti u pitanje njezinu sigurnost. Kombinacija promjenjivih djelovanja i razornoga djelovanja nije predmet ovih istraživanja. Temperaturno djelovanje je zadano na konstrukciju koristeći se Gumbelovom raspodjelom s koeficijentom varijacije 0,3 [13].

Vrijednosti baznih varijabli otpornosti te stalnog i temperaturnog djelovanja [15] dane su u tablicama 2. i 3.

Tablica 2. Bazne varijable otpornosti

Bazne varijable otpornosti [X]				
Varijable	Srednja vrijednost	Koef. varijacije	Distribucija	Opis bazne varijable
X_1	$k_{y,\theta} \cdot 27.8$ kN/cm ²	0,0645	Weibullova	Granica popuštanja
X_2	$k_{E,\theta} \cdot 21000$ kN/cm ²	0,04	Weibullova	Modul elastičnosti
X_3	334.2 cm ²	0,05	normalna	Površina poprečnog presjeka
X_4	8980 cm ³	0,05	normalna	Moment otpora poprečnog presjeka
X_5	$h / 75 = 11.7$ cm	0,1	normalna	Limitirani pomak stupa
X_6	$1 / 100 = 40.0$ cm	0,1	normalna	Limitirani pomak sljemena

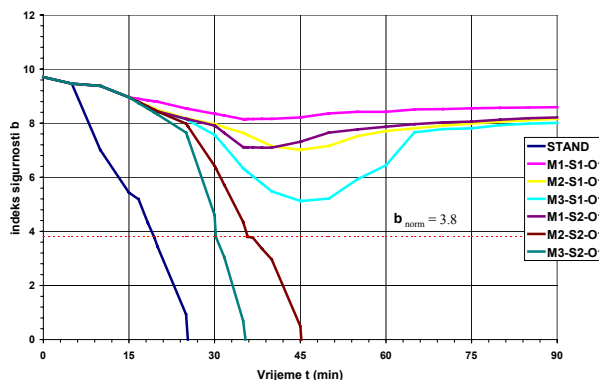
gdje je: $k_{y,\theta}$ - koeficijent redukcije granice popuštanja,
 $k_{E,\theta}$ - koeficijent redukcije za početni modul elastičnosti.

Tablica 3. Bazne varijable djelovanja

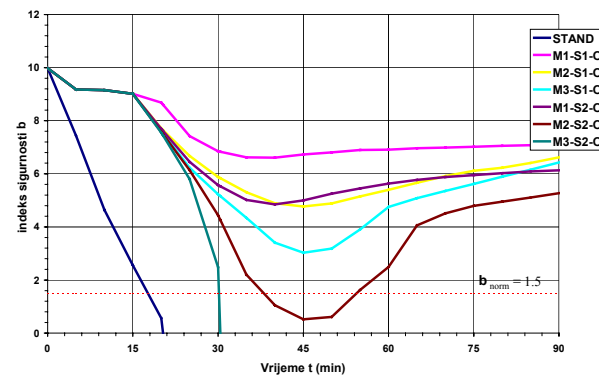
Bazne varijable djelovanja [Y]				
Varijabl	Srednja vrijednost	Koef. varijacije	Distribucija	Opis bazne varijable
Y_1	2.45 kN/m	0,1	normalna	Stalno djelovanje
Y_2	$\bar{T}_S, \bar{T}_1, K, \bar{T}_6$	0,3	Gumbelova	Požarno djelovanje iskazano temp. vrijednostima

Sigurnost čelične konstrukcije, izražena indeksom sigurnosti β s aspekta krajnjega graničnog stanja, ocijenjena je prema otpornosti poprečnog presjeka na interakcijsko djelovanje uzdužne sile i momenta savijanja, dok je granično stanje uporabljivosti ocijenjeno prema kriterijima pomaka vrha stupa i sljemena konstrukcije [15].

Grafički prikazi dobivenih indeksa sigurnosti u ovisnosti o vremenu dani su na sljedećim slikama:



Slika 12. Grafički prikaz dobivenih indeksa sigurnosti β u slučaju požara za krajnje granično stanje

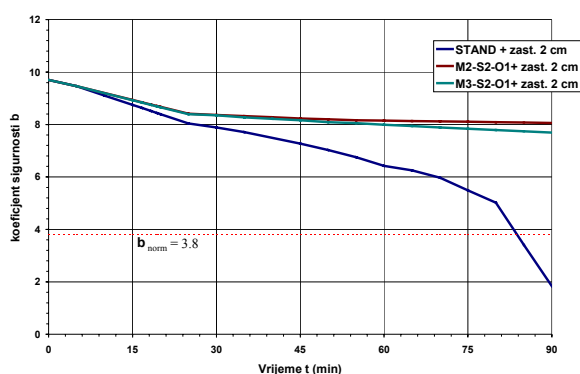


Slika 13. Grafički prikaz dobivenih indeksa sigurnosti β u slučaju djelovanja požara za granično stanje uporabljivosti – kriterij pomaka sljemena konstrukcije

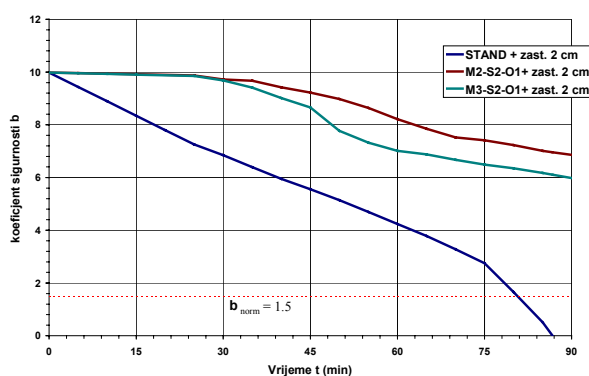
Iz rezultata dobivenih proračunom indeksa sigurnosti za nezaštićenu čeličnu konstrukciju vidljivo je da u slučajevima djelovanja standardnog požara i požara u primjerima 5. i 6. konstrukcija nema dostatnu sigurnost, dok za ostale slučajeve djelovanja požara indeksi sigurnosti β su veći od normama [4] određene vrijednosti (β_{norm}).

b) Zaštićena čelična konstrukcija

Dovoljna sigurnost, za slučajeve požara za koje nosiva konstrukcija nema dovoljnu sigurnost, može se postići tako da se nosiva konstrukcija zaštiti negorivim mineralnim pločama (slika 10.) i tada se dobiju indeksi sigurnosti prikazani na sljedećim crtežima:



Slika 14. Grafički prikaz dobivenih indeksa sigurnosti β u slučaju djelovanja požara za krajnje granično stanje, zaštićene čelične konstrukcije



Slika 15. Grafički prikaz dobivenih indeksa sigurnosti β u slučaju djelovanja požara za granično stanje uporabljivosti – kriterij pomaka sljemena zaštićene čelične konstrukcije

LITERATURA

- [1] Theobald, C. R.: *Growth and development of fire in industrial buildings*, Fire Prevention and Technology, 4.-16., 1977.
- [2] 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.
- [3] Jović, V.: *Uvod u inženjersko numeričko modeliranje*, Aquarius Engineering, Split, 1993.
- [4], *Eurocode 1 - Basis of design and actions on structures - Part 2-2: Actions on structures - Action on structures exposed to fire*, European Committee for Standardization, Brussels, 1995.
- [5], *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, European Committee for Standardization, Brussels, 1995.
- [6] Sterner, E.; Wickström, U.: *TASEF - Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire*, Swedish National Testing Institute, 1990.
- [7] Heskestad, G.; Delichatsios, M. A.: *The Initial Convective Flow in Fire*, 17th International Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, 1113.-1123., 2000.
- [8] Davis, W. D.; Notarianni, K. A.: *An Algorithm for Calculating the Plume Centerline Temperature in the Presence of a Hot Upper Layer*, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No. 3, 23.-31., 2000.
- [9] Tanaka, T.; Ohmiya, Y.: *A Risk - Based Translation of Fire Resistance Requirement*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2000.
- [10] Evans, D. D.: *Calculating Sprinkler Actuation Time in Compartments*, Fire Safety Journal, Vol. 9, 147.-155., 1985.
- [11] Alpert, R. L.: *Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors*, Fire Technology, Vol. 8, 181.-195., 1972.
- [12] Bošnjaković, F.: *Nauka o toplini*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [13] Gulvanessian, H.; Holicky, M.; Cajot, L. G.; Schleich, J. B.: *Reliability Analysis of a Steel Beam Under Fire Design Situation*, EUROSTEEL 1999, Prag, 1999.
- [14], STRUREL - A Structural Reliability Analysis Program-System, RCP Consult, 1996.
- [15] Boko, I.: *Sigurnost čeličnih konstrukcija u slučaju djelovanja požara*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2001.
- [16] Milčić, V.; Peroš, B.: *Uvod u teoriju nosivih konstrukcija*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2002. (u tisku).
- [17] Boko, I.; Jović V.; Peroš, B.: *Safety of Steel Structures Under the Influence of Fire Loads*, International Journal for Engineering Modelling Faculty of Civil Engineering, University of Split, Split, 2002. (u tisku).

8 Zaključak

Za odabranu čeličnu halu dimenzija $40 \times 60 \times 7,5$ m simulirano je djelovanje požara primjenom modela zona, osnovanog na aproksimativnoj formulaciji. Rezultati dobiveni primjenom modela zona u 6 slučajeva realnoga požarnog opterećenja pokazuju da temperatura u prostoru najviše ovisi o količini gorivog materijala, površini poda objekta prekrivenoj gorivim materijalom, površini ventilacijskih otvora te radijalnoj udaljenosti od središta požara.

Pokazano je da primjena Standardne temperaturne krivulje nije prihvatljiva za prostore većih volumena (slike 4. i 5.), jer je očito da se temperaturno djelovanje razlikuje u prostoru i u funkciji je navedenih parametara te je potreban izračun za svako realno požarno opterećenje.

Utvrđeno je da za pojedine slučajeve požarnog opterećenja ovisno o zahtijevanoj vatrootpornosti (npr. 30 min) temperatura u konstrukciji ne prolazi 300°C te nije potrebna zaštita konstrukcije u tim slučajevima.

Također je pokazano da se zaštitom čelične konstrukcije temperature znatno snižavaju čime se povećava sigurnost konstrukcije. Ova istraživanja stvarnih parametarskih krivulja temperatura – vrijeme, te iznalaženje odgovarajućih vrijednosti indeksa sigurnosti β u velikim industrijskim halama za različita požarna opterećenja, provode se u okviru NAD-a za područje djelovanja požara.