

Primljen / Received: 16.4.2015.

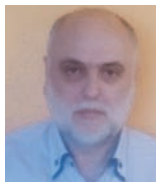
Ispravljen / Corrected: 31.7.2015.

Prihvaćen / Accepted: 22.8.2015.

Dostupno online / Available online: 10.1.2016.

# Nosivost spregnutih stupova izloženih utjecaju požara

## Autori:



Mr.sc. **Milivoje Milanović**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Novom Pazaru  
Građevinski fakultet  
[milanovicnp@gmail.com](mailto:milanovicnp@gmail.com)



Prof.dr.sc. **Meri Cvetkovska**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Skopju  
Građevinski fakultet  
[cvetkovska@gf.ukim.edu.mk](mailto:cvetkovska@gf.ukim.edu.mk)



Mr.sc. **Petar Knežević**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Novom Pazaru  
Građevinski fakultet  
[petar.knezevic.dunp@gmail.com](mailto:petar.knezevic.dunp@gmail.com)

Pregledni rad

**Milivoje Milanović, Meri Cvetkovska, Petar Knežević**

## Nosivost spregnutih stupova izloženih utjecaju požara

U radu se analizira nosivost poprečnih presjeka triju vrsta spregnutih stupova čelik-beton, a dobiveni rezultati se uspoređuju s nosivošću referentnog armiranobetonskog stupa. Mehanička svojstva sastavnih materijala bitno se pogoršavaju zbog visokih temperatura uzrokovanih djelovanjem požara, što dovodi do smanjenja otpornosti stupa na djelovanje uzdužne sile i dvoosnog momenta savijanja. Smanjenje otpornosti analiziranih stupova pod utjecajem visokih temperatura iskazano je kroz promjenu interakcijskih krivulja M-N.

### Ključne riječi:

spregnuti stup, temperatura, provođenje topline, vatrootpornost

Subject review

**Milivoje Milanović, Meri Cvetkovska, Petar Knežević**

## Load-bearing capacity of fire exposed composite columns

The cross-section load-bearing capacity of three types of fire exposed steel-concrete composite columns is analysed in this paper, and the results are compared with the load-bearing capacity of a reference reinforced-concrete column. Mechanical properties of constitutive materials are reduced considerably by high temperatures caused by fire action, which results in a reduced load bearing capacity of columns with regard to the longitudinal force and biaxial bending moment. The reduced load bearing capacity of analysed columns subjected to elevated temperatures is expressed through changes in the M-N interaction curves.

### Key words:

composite column, temperature, heat transfer, fire resistance

Übersichtsarbeit

**Milivoje Milanović, Meri Cvetkovska, Petar Knežević**

## Tragfähigkeit von Verbundstützen unter Brandeinwirkung

In dieser Arbeit wird die Tragfähigkeit der Querschnitte von drei verschiedenen Stützen mit Verbund von Stahl und Beton analysiert. Die Resultate werden der Tragfähigkeit einer als Referenz angenommenen Stahlbetonstütze gegenübergestellt. Mechanische Eigenschaften einzelner Materiale werden bei erhöhter Temperatur aufgrund von Brandeinwirkungen bedeutend beeinträchtigt. Somit werden der Normkraft- und der zweiachsige Biegezugwiderstand der Stütze abgemindert. Die Reduktion des Widerstandes der untersuchten Stützen bei der Einwirkung hoher Temperaturen wird durch eine Veränderung der M-N Interaktionskurven dargestellt.

### Schlüsselwörter:

Verbundstütze, Temperatur, Wärmeleitung, Brandwiderstand

## 1. Uvod

Prema propisima koji se danas primjenjuju u mnogim državama, građevine trebaju udovoljavati ne samo osnovnim zahtjevima koji uključuju njihovu otpornost na opterećenje, stabilnost i uporabivost, već i zahtjevima koji uključuju zaštitu građevina od požara. To prije svega znači: otpornost na opterećenje građevine pretpostavlja se za određeno vrijeme izlaganja utjecaju požara; ograničava se pojava i širenje požara i dima u zoni građevine; ograničava se širenje požara na susjedne građevine; korisnicima se osigurava mogućnost napuštanja građevine ili spašavanja na neki drugi način; u obzir se uzima i sigurnost spasilačkih ekipa [1-5].

Općenito uzevši, vatrootpornost je sposobnost građevine, dijela građevine ili nekog njenog elementa da obavlja svoju funkciju (funkciju nosivosti i/ili funkciju razdvajanja) do određene granice opterećenja, do određenog stupnja izloženosti utjecaju požara, te u određenom razdoblju [1]. Ponašanje elementa i čitave građevine u slučaju požara ovisno je o brojnim faktorima kao što su: izloženost požaru (intenzitet i trajanje požara), položaj elemenata u odnosu na požarnom sektoru (scenarij požara), konstrukcijski sustav i uvjeti oslanjanja, raspored i intenzitet postojećih opterećenja, veličina i oblik elemenata, te temperaturne ovisnosti termičkih i mehaničkih svojstava sastavnih materijala.

Zbog toplinskog kapaciteta betona, spregnuti stupovi od čelika i betona otporniji su na požar negoli čelični stupovi, pa se može reći da su spregnuti stupovi konstruirani da bi poboljšali vatrootpornost čeličnih stupova [6-13]. U praksi se najčešće koriste sljedeće vrste spregnutih stupova: potpuno obloženi čelični profili (eng. *fully encased steel sections* - FES); djelomično obloženi čelični profili (eng. *partially encased steel sections* - PES), te betonom ispunjeni cjevasti profili (eng. *concrete filled tubular sections* - CFS) Stupovi od potpuno obloženih čeličnih profila mogu se tretirati kao armiranobetonski stupovi. Beton prekriva čelični profil i štiti ga od intenzivnog zagrijavanja, tj. beton djeluje kao izolator čeličnog profila. U slučaju djelomično obloženih čeličnih profila, obod čeličnog profila izravno je izložen požaru, pa se smanjuje efekt betona kao "toplinskog štita". Kod cjevastih profila ispunjenih betonom, čelični profil izravno je izložen utjecaju visokih temperatura, dok betonska jezgra ostaje hladna i ponaša se kao element koji apsorbira toplinu (hladilo). U takvim se slučajevima naprezanja preraspodjeljuju na relativno hladnu betonsku jezgru pa je stupanj vatrootpornosti mnogo viši nego što je to slučaj kod čeličnih stupova bez betonske jezgre.

Nosivost poprečnog presjeka stupa može se odrediti pomoću interakcijske krivulje momenta savijanja i uzdužne sile. Pri visokim temperaturama naponsko-deformacijske karakteristike betona i čelika postaju nelinearne i naglo se pogoršavaju [4]. Ovo djelovanje izravno dovodi do smanjenja vrijednosti uzdužne sile i savojnog momenta koje može preuzeti poprečni presjek stupa. Posljedica tome je pad na interakcijskoj krivulji nosivosti presjeka stupa.

U zadnja dva desetljeća primjenjuju se brojne metode projektiranja pomoću kojih se izrađuju interakcijski dijagrami za određivanje utjecaja visokih temperatura na

armiranobetonske stupove i spregnute stupove od čelika i betona. Kada se razmatraju kratki stupovi čija dužina ne utječe na njihovu nosivost, vrijedi spomenuti i metode koje predlažu Chen i dr. [13] i Cvetkovska [14]. Te se metode isključivo temelje na analizi uz razmatranje materijalne nelinearnosti, ali se u njima zanemaruju efekti geometrijske nelinearnosti. Unutarnje se sile određuju u svakom vremenskom intervalu na bazi prethodno definiranog temperaturnog polja u poprečnom presjeku stupa, pri čemu se u obzir uzima i Navierova hipoteza te o temperaturi ovisne konstitutivne zakonitosti koje vrijede za čelik i beton.

Kada se radi o vitkim stupovima, u obzir se trebaju uzeti teorije drugog reda. Rezultati dobiveni numeričkim postupcima koji se temelje na ovom pristupu bliži su eksperimentalnim rezultatima. Iako se u literaturi navodi veći broj podataka o temperaturno ovisnim interakcijskim krivuljama za cjevaste profile ispunjene betonom [10, 11] te za čelične profile potpuno obložene betonom [12], nema podataka o temperaturnoj analizi interakcijskih krivulja za razne vrste spregnutih profila čelik-beton. Analiza prikazana u ovom radu provodi se da bi se odredilo koje su vrste poprečnih presjeka pogodnije s aspekta vatrootpornosti. Stoga se u radu analiziraju četiri vrste stupova, od kojih su tri spregnuti stupovi čelik-beton raznih poprečnih presjeka (čelični profili potpuno obloženi betonom (FES), čelični profili djelomično obloženi betonom (PES) te cjevasti profili ispunjeni betonom (CFS), dok je za četvrtu vrstu stupova usvojen armiranobetonski stup koji služi za uspoređivanje, tj. za donošenje potrebnih zaključaka o prednostima spregnutih stupova čelik-beton u odnosu na armiranobetonske stupove iste veličine i istih početnih opterećenja. Interakcijske krivulje momenta savijanja i uzdužne sile izrađene su za sve četiri vrste stupova pri izlaganju stupova standardnoj krivulji požara te se na temelju njih izvode zaključci o vatrootpornosti pojedinih stupova. U tu se svrhu koristi računalni program SAFIR [15] koji je osmislio J. M. Franssen na belgijskom sveučilištu u Liegeu. Postupak za određivanje temperaturno ovisnih interakcijskih dijagrama M-N za spregnute stupove bazira se na pojednostavljenoj metodi koja se preporučuje u Eurokodu 4, dio 1-2 [4].

## 2. Interakcijska krivulja M-N za poprečne presjeke spregnutih stupova

U slučajevima kada uzdužna sila i moment savijanja istodobno djeluju na poprečni presjek stupa, nosivost stupa može se odrediti na temelju interakcijske krivulje "moment - uzdužna sila", koja prikazuje odnos između projektirane vrijednosti plastičnog otpora na centrički tlak ukupnog poprečnog presjeka i projektirane vrijednosti otpora na moment savijanja  $M_{pl,Rd}$  (slika 1.), [3-5]. Plastični otpor na tlak  $N_{pl,Rd}$  spregnutog poprečnog presjeka treba se izračunati dodavanjem plastičnih otpora njegovih komponenata:

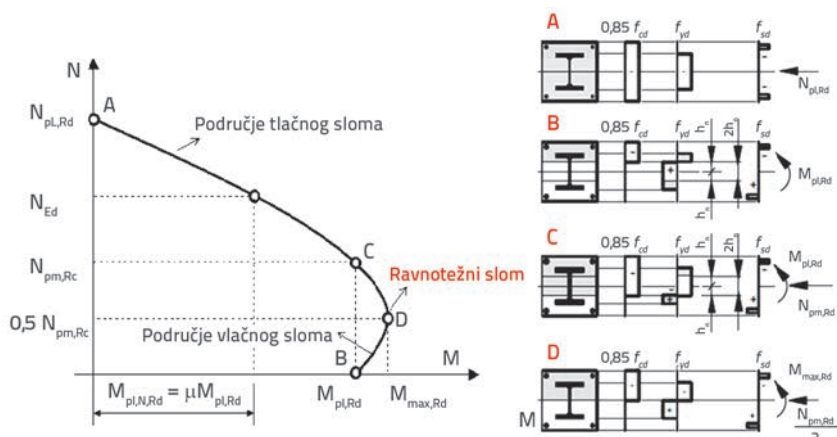
$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} + 0,85 A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd} \quad (1)$$

gdje su:

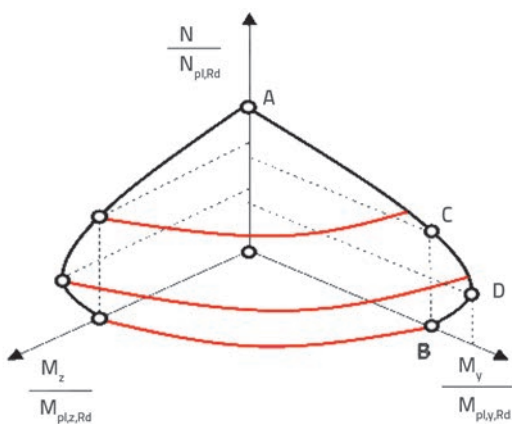
$A_a, A_s$  i  $A_c$  - površine poprečnog presjeka nosivog čeličnog profila, armature i betona

$f_{yd}, f_{sd}$  i  $f_{cd}$  - proračunske vrijednosti granice popuštanja konstrukcijskog čelika, granice popuštanja armature, te tlačne čvrstoće betonskog valjka.

Jednadžba (1) se koristi za potpuno obložene i djelomično obložene čelične profile. Za profile ispunjene betonom koeficijent 0,85 može se zamijeniti s 1,0. Pojednostavljena interakcijska krivulja M-N definirana je s četiri karakteristične točke: A, B, C i D (slika 1.).



Slika 1. Pojednostavljena interakcijska krivulja spregnutog stupa i odgovarajuća raspodjela napreznja



Slika 2. Interakcijska krivulja M-N za dvoosne momente savijanja

Točka A definirana je proračunskom plastičnom otpornošću spregnutog profila na tlačnu silu  $N_{pl,Rd}$ , a moment savijanja jednak je nuli (ekscentričnost  $e = 0$ ).

Točka B definirana je proračunskim momentom plastičnog otpora spregnutog profila  $M_{pl,Rd}$ , a uzdužna sila je jednaka nuli (ekscentričnost  $e = \infty$ ).

Točka C je definirana proračunskom otpornošću betona na tlačnu silu  $N_{pm,Rd} = 0,85 A_c f_{cd}$  (za potpuno ili djelomično obložene

čelične profile) ili  $N_{pm,Rd} = A_c f_{cd}$  (za betonom ispunjene cjevaste čelične profile), a moment savijanja iznosi  $M_{pl,Rd}$ .

Točka D je definirana maksimalnim proračunskim momentom otpora  $M_{max,Rd}$  pri tlačnoj sili  $0,5 N_{pm,Rd}$ .

Proračunska vrijednost tlačne sile  $N_{Ed}$  odgovara proračunskoj vrijednosti momenta plastičnog otpora spregnutog profila uzimajući u obzir tlačnu silu  $M_{pl,N,Rd}$ .

U slučaju kada je poprečni presjek izložen djelovanju uzdužne sile i momenata savijanja oko obje osi (slabe i jake), nosivost stupa se grafički prikazuje kombinacijom dviju interakcijskih krivulja za svaku os, slika 2.

### 3. Interakcijska krivulja M-N za spregnuti poprečni presjek stupa u slučaju požara

Naponsko-deformacijske karakteristike betona i čelika postaju nelinearne na visokim temperaturama pri čemu materijali vrlo brzo gube svoju čvrstoću [2, 4]. To se izravno reflektira na smanjenje vrijednosti udužnih sila i savojnih momenata kojima se mogu oduprijeti stupovi. Također dolazi i do smanjenja vrijednosti interakcijskih krivulja za poprečne presjeke stupova. Izrada interakcijskih krivulja M-N za definirani model požara i za definirano vrijeme izlaganja požaru moguća je samo ako je

poznata raspodjela temperature po poprečnom presjeku stupa. Jedna od mogućnosti koje su nam na raspolaganju za rješavanje ovog problema jest i metoda konačnih elemenata (FEM). U tom se slučaju stup treba diskretizirati na određeni broj elemenata, dok se poprečni presjek stupa treba diskretizirati na određeni broj manjih segmenata, tj. lamela. Ista se mreža konačnih elemenata treba koristiti za nelinearnu i nestacionarnu analizu provođenja topline i za izradu interakcijskih krivulja M-N [14, 15].

#### 3.1. Numerički postupak za nelinearnu i nestacionarnu analizu provođenja topline

Smatra se da je analiza provođenja topline osnovna komponenta za izračunavanje vatrootpornosti jer otpornost na opterećenje elementa/sklopa konstrukcije ovisi o njegovoj unutarnjoj temperaturi. Kada je stup izložen djelovanju požara, u njemu se javlja temperaturni gradijent. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku elemenata izloženih utjecaju požara može se izračunati pomoću teorije provođenja topline. Osnovna diferencijalna jednadžba procesa provođenja topline je [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

gdje je:

- $\lambda$  - toplinska provodljivost (ovisna o temperaturi)
- $\rho$  - gustoća materijala (ovisna o temperaturi)
- $c$  - specifična toplota (ovisna o temperaturi).

Rubni uvjeti požara mogu se modelirati pomoću konvektivnih i radijativnih mehanizama provođenja topline. Protok topline uzrokovan konvekcijom može se prikazati kako slijedi:

$$q_c = h_c(T_m - T_f) \tag{3}$$

gdje je:

$h_c$  - koeficijent konvekcije (za površinu izloženu požaru  $h_c = 25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , i za neizloženu površinu  $h_c = 9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ). Te se vrijednosti preporučuju u Eurokodu 1-1-2 [1]

- $T_m$  - temperatura na obodu elementa
- $T_f$  - temperatura fluida oko elementa.

Protok topline uzrokovan zračenjem iznosi:

$$q_r = \Phi \varepsilon \sigma_c (T_{m,a}^4 - T_{f,a}^4) = h_r (T_m - T_f) \tag{4}$$

$$h_r = \Phi \varepsilon \sigma_c (T_{m,a}^2 + T_{f,a}^2) (T_{m,a} - T_{f,a}) \tag{5}$$

gdje je:

- $h_r$  - koeficijent zračenja (ovisan o temperaturi)
- $\Phi$  - faktor fizičkog oblika preporučena vrijednost:  $V = 0$
- $\varepsilon$  - rezultirajući koeficijent emisije  $\varepsilon = \varepsilon_f \varepsilon_m$ ;
- $\varepsilon_f = 1,0$  je koeficijent emisije za požarni sektor (zona u kojoj se požar zadržava)
- $\varepsilon_m$  - koeficijent emisije za površinu elementa
- $\sigma_c$  - Stefan-Boltzmannova konstanta
- $T_{m,a}$  - apsolutna temperatura površine
- $T_{f,a}$  - apsolutna temperatura plina.

Usvajanjem tipičnog Galerkinovog pristupa u metodi konačnih elemenata, jednadžba (2) poprima sljedeći oblik:

$$\int_V N^T \left[ \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right] dV = 0 \tag{6}$$

gdje se funkcija za aproksimaciju polja izražava u obliku interpolacijske funkcije kao:

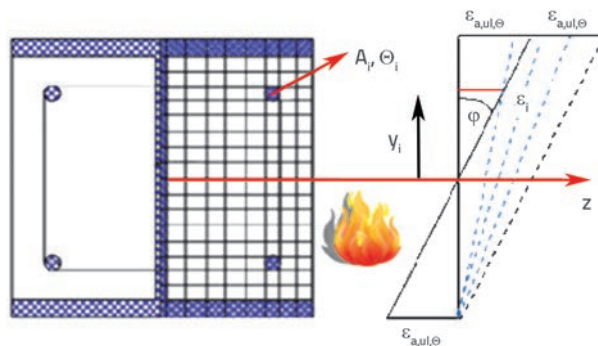
$$T = N \cdot T_e \tag{7}$$

Problem se u potpunosti rješava pomoću jednadžbe (6), uz primjenu početnih i rubnih uvjeta. Prikazana jednadžba provođenja topline dio je računalnog programa SAFIR [15] koji se koristi u ovom istraživanju. Program se temelji na metodi konačnih elemenata, a usvojene su sljedeće pretpostavke: požar se može modelirati pomoću podataka o temperaturi plina na bazi samo jedne vrijednosti: ISO 834 ili neki

drugi model požara; nema kontaktnog otpora prijenosu topline na kontaktu između armature i betona; granični uvjeti požara mogu se modelirati primjenom konvektivskih i radijacijskih mehanizama prijenosa topline; o temperaturi ovisna svojstva materijala poznata su i preporučena u Eurokodu 4, dio 1.2 [4]; pri pojavi pukotina ili pucanju pojedinih elemenata toplota brže ulazi u poprečni presjek, što je zanemareno u ovom istraživanju. Pretpostavljeno je da promjene u unutarnjoj energiji elementa, uzrokovane promjenama u temperaturnom polju u poprečnom presjeku elementa, ne utječu na djelovanje unutarnjih sila te da je u svakom vremenskom koraku analiza provođenja topline odjeljiva od statičkog proračuna i paralelna s njim.

### 3.2. Numerički postupak za definiranje interakcijskih krivulja M-N u slučaju požara

Nakon što se poprečni presjek stupa diskretizira u odgovarajući broj konačnih elemenata ili pod-lamela (slika 3.) te nakon definiranja o vremenu ovisnog temperaturnog polja, definira se odgovarajuća zakrivljenost  $\varphi$  za plastičnu otpornost poprečnog presjeka, te broj koraka za povećanje zakrivljenosti do maksimuma  $\varphi$ .



Slika 3. Diskretizacija poprečnog presjeka stupa u podlamela, te odgovarajuće deformacije elemenata za jaču os "z"

Slobodne su deformacije određene za svaku podlamelu na početku vremenskog koraka, i one se ne mijenjaju tijekom iteracije unutar vremenskog koraka. One se za betonsku ili čeličnu podlamelu izračunavaju primjenom sljedećih jednadžbi:

$$\varepsilon_i^{f,c} = \varepsilon_{i-1}^{f,c} + \Delta \varepsilon_i^{cr,c} + \Delta \varepsilon_i^{tr,c} + \Delta \varepsilon_i^{th,c} \tag{8}$$

$$\varepsilon_i^{f,a} = \varepsilon_{i-1}^{f,a} + \Delta \varepsilon_i^{cr,a} + \Delta \varepsilon_i^{th,a} \tag{9}$$

gdje je:

- $\varepsilon_i^f$  - slobodna deformacija betonske ili čelične podlamela, za vremenski korak i
- $\Delta \varepsilon_i^c$  - slobodna deformacija puzanjem, definirana u tekućem vremenskom koraku i
- $\Delta \varepsilon_i^{tr,c}$  - prolazna deformacija, akumulirana samo u podlameli betona tijekom tekućeg vremenskog koraka i
- $\Delta \varepsilon_i^{th}$  - slobodna toplinska ekspanzija, akumulirana tijekom tekućeg vremenskog koraka i.

Pretpostavljeno je da postoji deformacijska kompatibilnost između čelika i betona na kontaktnim površinama. Kod odnosa " $\sigma - \varepsilon$ " koji se preporučuju u Eurokodu 4, dio 1.2, u obzir se uzima puzanje betona ili čelika pri visokim temperaturama. Do toga se dolazi pomicanjem maksimalnih vrijednosti naponsko-deformacijskih krivulja prema većim vrijednostima deformacija pri višim temperaturama. Kada se beton izložen tlačnom naprezanju prvi put zagrijava, ukupna se deformacija razlikuje od ukupne deformacije izmjerene tijekom ispitivanja puzanja pri konstantnoj temperaturi, pa se u obzir treba uzeti dodatna nepovratna "prolazna deformacija". Ta prolazna deformacija ovisi o razini naprezanja i toplinske ekspanzije [16]. Korak prolazne deformacije može se u svakom vremenskom intervalu izračunati kako slijedi:

$$\Delta \varepsilon_i^{tr,c} = -2.35 \frac{\sigma_c(\theta)}{f_{c,20^\circ C}} \Delta \varepsilon_i^{th,c} \quad (10)$$

gdje je:

$\Delta \varepsilon_i^{tr,c}$  - prolazna deformacija akumulirana u tekućem vremenskom koraku i

$\Delta \varepsilon_i^{th,c}$  - slobodna toplinska ekspanzija akumulirana u tekućem vremenskom koraku i

$\sigma_{i,c}(\theta)$  - tlačno naprezanje pri odgovarajućoj temperaturi pod-lamele

$f_{c,20^\circ C}$  - tlačna čvrstoća betona pri uvjetima okoline (20°).

Ako prolazna deformacija nije uključena u statički proračun, kao rezultat se dobiva krući model konstrukcije pri visokim temperaturama. Tada izračunane toplinske deformacije postaju vrlo velike pa se predviđa da će do sloma doći mnogo prije nego što to pokazuju eksperimentalni rezultati [14, 16].

Odgovarajuća naprezanja  $\sigma(\theta)$  definirana su na temelju krivulja " $\sigma - \varepsilon$ " u ovisnosti o temperaturi i odgovarajućim deformacijama elemenata " $\varepsilon$ ". O temperaturi ovisne krivulje " $\sigma - \varepsilon$ " zadane su za beton i čelik u Eurokodu 4, dio 1-2 [4].

Nakon definiranja naprezanja  $\sigma(\theta)$ , u jednadžbama (11), (12) i (13) definiraju se uzdužna sila i moment savijanja oko jače osi "z" i slabije osi "y" za tekuću raspodjelu temperature po poprečnom presjeku spregnutog stupa:

$$N = \int_A \sigma(\theta) dA = \int_{y,z} \sigma(\theta) dydz = \sum \sigma(\theta_i) \Delta y_i \Delta z_i \quad (11)$$

$$M_z = \int_A \sigma(\theta) y dA = \int_{y,z} \sigma(\theta) y dydz = \sum \sigma(\theta_i) y_i \Delta y_i \Delta z_i \quad (12)$$

$$M_y = \int_A \sigma(\theta) z dA = \int_{y,z} \sigma(\theta) z dydz = \sum \sigma(\theta_i) z_i \Delta y_i \Delta z_i \quad (13)$$

Prema Eurokodu 4, dio 1-2, pojednostavljeni postupak za izradu interakcijskih krivulja M-N za spregnute stupove pri normalnoj temperaturi može se koristiti čak i za stupove izložene utjecaju požara. U takvim se slučajevima proračunska vrijednost plastične otpornosti na uzdužni tlak dobiva na sljedeći način:

$$N_{r,pl,Rd} = \sum_j (A_{a,\theta} f_{ay,\theta}) / \gamma_{M,pl,a} + \sum_k (A_{s,\theta} f_{sy,\theta}) / \gamma_{M,pl,s} + \sum_m (A_{c,\theta} f_{c,\theta}) / \gamma_{M,pl,c} \quad (14)$$

gdje je:

$A_{i,\theta}$  - površina svakog elementa (s definiranom temperaturom poprečnog presjeka  $\theta$ )

$f_{ay,\theta}$  - efektivna granica popuštanja konstruktivnog čelika pri temperaturi  $\theta$

$f_{sy,\theta}$  - efektivna granica popuštanja armature pri temperaturi  $\theta$

$f_{c,\theta}$  - karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće betonskog valjka pri temperaturi  $\theta$

$\gamma_{M,pl,a}$  - parcijalni faktor čvrstoće čelika u slučaju požara

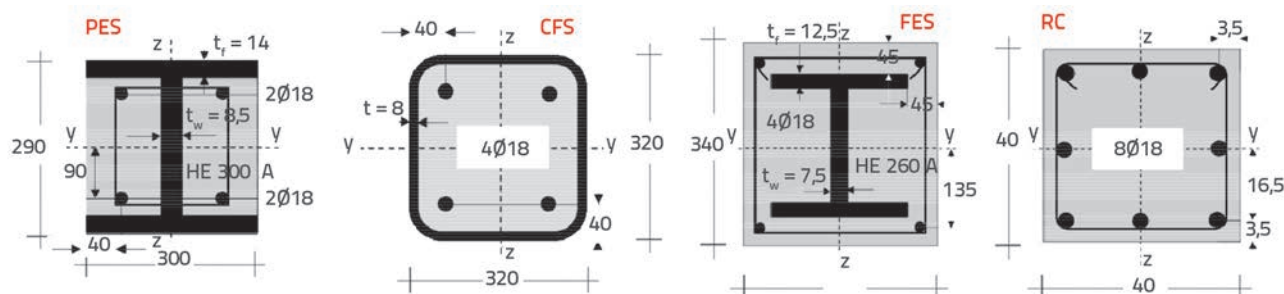
$\gamma_{M,pl,c}$  - parcijalni faktor čvrstoće betona u slučaju požara

$\gamma_{M,pl,s}$  - parcijalni faktor čvrstoće armature u slučaju požara.

Za mehanička svojstva čelika i betona, preporučene vrijednosti parcijalnih faktora za slučaj požara iznose:  $\gamma_{M,pl,a} = \gamma_{M,pl,c} = \gamma_{M,pl,s} = 1,0$ .

### 3.3. Interakcijske krivulje M-N raznih vrsta spregnutih stupova u slučaju požara

Prije opisani postupak sastavni je dio računalnog programa SAFIR [15]. Taj je program korišten za definiranje temperaturnih polja za četiri različite vrste poprečnih presjeka (slika 4.) koje su izložene požaru prema krivulji ISO 834 sa sve četiri strane, pri čemu se obrađuje samo faza zagrijavanja. Poprečni presjeci spregnutih stupova su: PES - djelomično obloženi čelični profil HE 300 A s dodatkom armature 4 $\varnothing$ 18; CFS - betonom ispunjeni šuplji profil; FES - potpuno obloženi čelični profil HE 260 A s dodatkom armature 4 $\varnothing$ 18; te RC - armiranobetonski



Slika 4. Geometrija poprečnog presjeka stupova: PES - djelomično obloženi čelični profil; CFS - betonom ispunjeni šuplji profil; FES - potpuno obloženi čelični profil; i RC - armiranobetonski profil



profil 40 x 40 cm pojačan s armaturom 8Ø25, pri čemu ovaj zadnji profil služi za uspoređivanje. U ovom je slučaju profil RC tretiran kao spregnuti presjek a primijenjen je pojednostavljeni postupak za dijagrame M-N koji se preporučuje u Eurokodu 4, dio 1-2. Kao kriterij za dimenzioniranje stupova usvojena je proračunska vrijednost plastičnog otpora na uzdužni tlak, a ta vrijednost iznosi približno 5500 kN za sva četiri poprečna presjeka (tablica 2.). S aspekta provođenja topline i raspodjele temperature po poprečnom presjeku stupova, dimenzije triju vrsta spregnutih presjeka gotovo su iste, a veće su samo kod poprečnog presjeka RC.

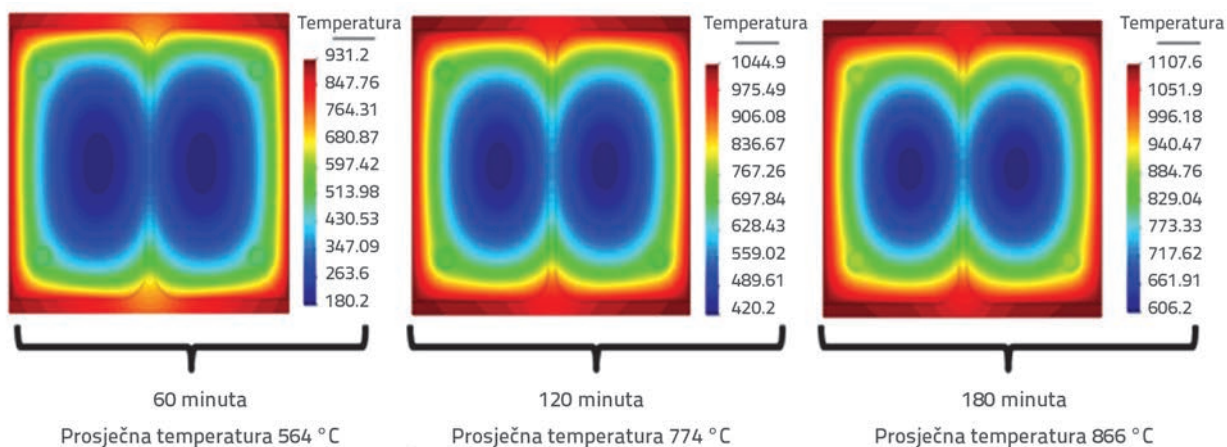
Toplinska i mehanička svojstva čelika, betona i armature usvojena su prema preporukama u Eurokodu 4, dio 1-2, kao što se to može vidjeti u tablici 1. O temperaturi ovisna specifična toplina betona definirana je u Eurokodu 4, dio 1-2, a ovisi o vlažnosti betona. U ovoj je analizi pretpostavljeno da vlažnost betona iznosi 2 %. Broj konačnih elemenata (podlamela) korištenih za diskretizaciju poprečnih presjeka, isto kao i proračunska vrijednost plastičnog otpora za uzdužni tlak, prikazani su za sva četiri stupa u tablici 2. O vremenu ovisna temperaturna polja analiziranih poprečnih presjeka dobivena pomoću programa SAFIR, prikazana su na slikama 5. do 8.

Tablica 1. Toplinska i mehanička svojstva materijala korištenih u poprečnom presjeku stupova

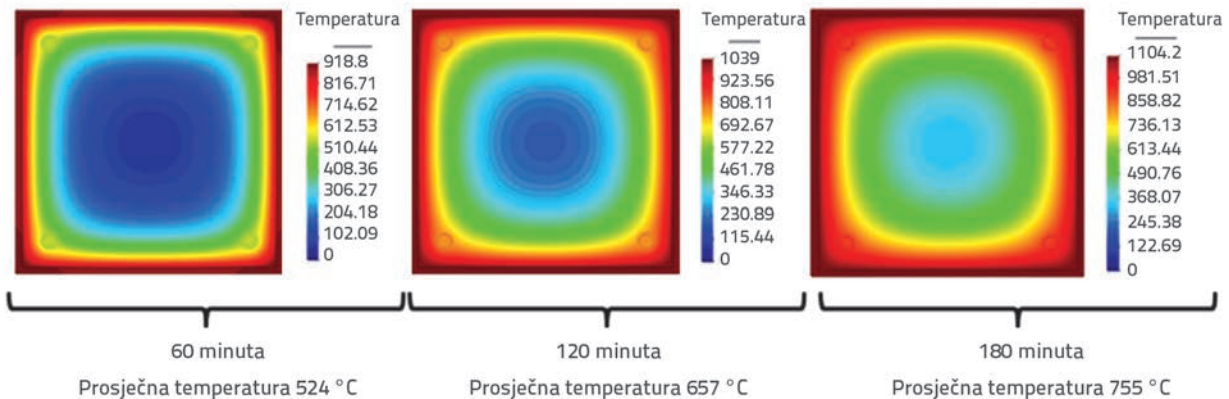
Toplinska i mehanička svojstva	Čelik S355	Beton C30/37	Armatura RA 400/500
Koeficijent prijenosa topline konvekcijom za površinu izloženu požaru [W/m²K]	25	25	-
Koeficijent prijenosa topline konvekcijom za površinu koja nije izložena vatri [W/m²K]	9	9	-
Toplinska provodljivost [W/mK]	45	1,6	45
Koeficijent emisivnosti	0,9	0,8	-
Vlažnosti [%]	-	2	-
Granica popuštanja čelika [MPa]	355		
Granica popuštanja armature [MPa]			400
Tlačna čvrstoća betona [MPa]		30	

Tablica 2. Broj konačnih elemenata korištenih za uzdužni tlak pri normalnoj toplini

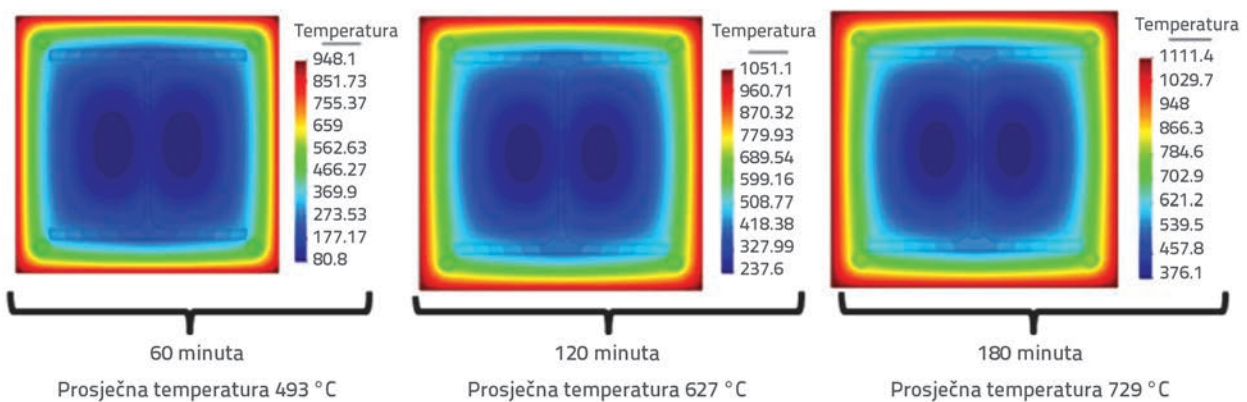
Vrsta poprečnog presjeka	Broj konačnih elemenata	N <sub>pl,Rd</sub> [kN]
PES - djelomično obložen čelični profil	3348	5617
CFS - šuplji profil ispunjen betonom	3446	5529
FES - potpuno obložen čelični profil	3326	5383
RC - armiranobetonski profil	3488	5122



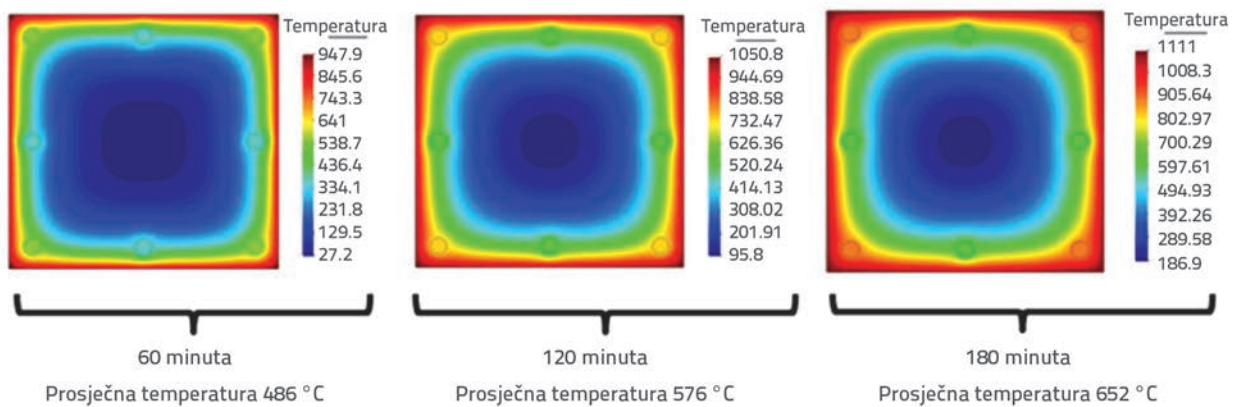
Slika 5. Vremenski ovisno temperaturno polje djelomično obloženog čeličnog profila (PES)



Slika 6. Vremenski ovisno temperaturno polje cjevastog profila ispunjenog betonom (CFS)



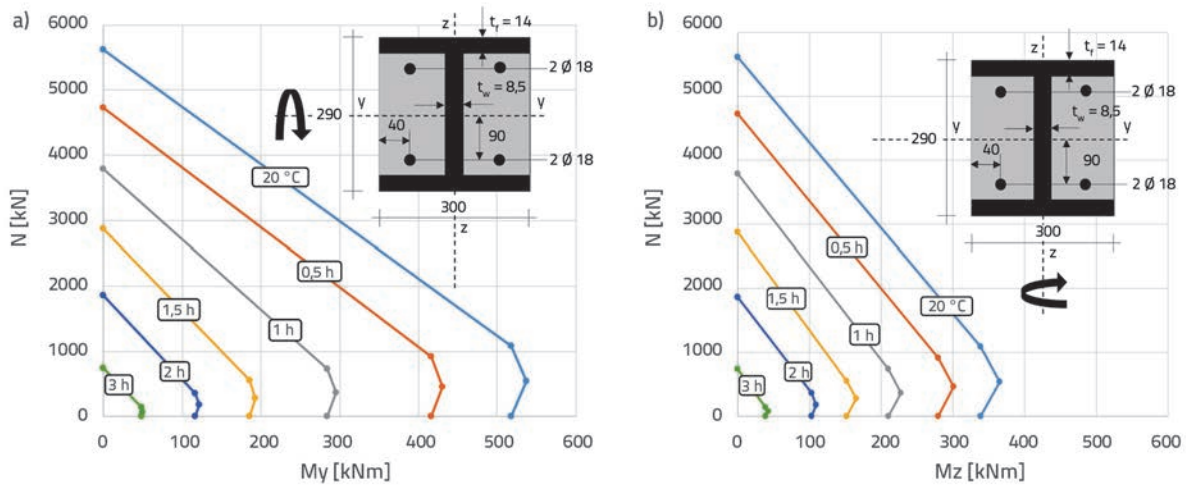
Slika 7. Vremenski ovisno temperaturno polje potpuno obloženog čeličnog profila (FES)



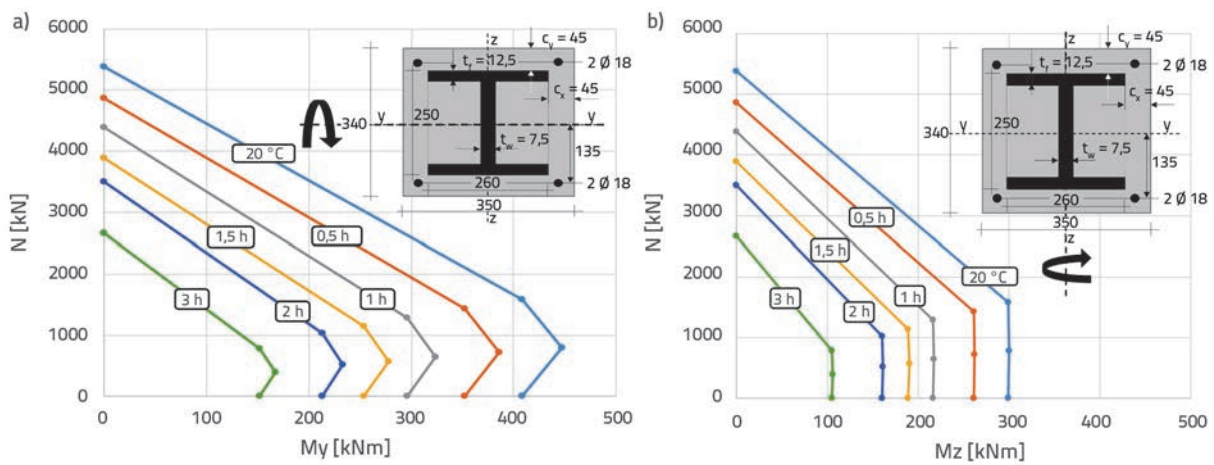
Slika 8. Vremenski ovisno temperaturno polje armiranobetonskog profila (RC)

Interakcijske krivulje momenta savijanja i uzdužne sile izrađene su za sve četiri vrste stupova u funkciji vremena izloženosti standardnoj krivulji požara prema pojednostavljenom postupku koji se preporučuje u EN 1994-1-2, kao što se to vidi na slikama 9. do 11. Krivulje se razlikuju za moment savijanja oko jače

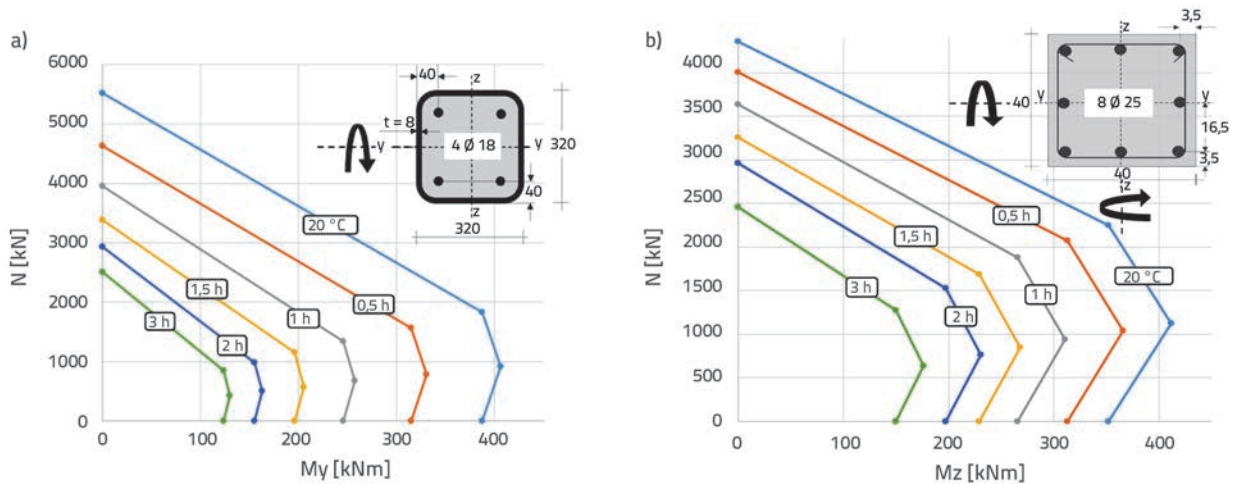
osi u odnosu na moment savijanja oko slabije osi. Mehanička svojstva sastavnih materijala bitno se smanjuju pri visokim temperaturama koje su uzrokovane požarom. Zato se smanjuje otpornost stupova na uzdužnu silu i dvoosni moment savijanja, što dovodi do promjene u interakcijskim dijagramima M-N.



Slika 9. Interakcijske krivulje M-N za momente savijanja oko jače i slabije osi djelomično obloženog čeličnog profila (PES), za vremenske intervale izlaganja požaru



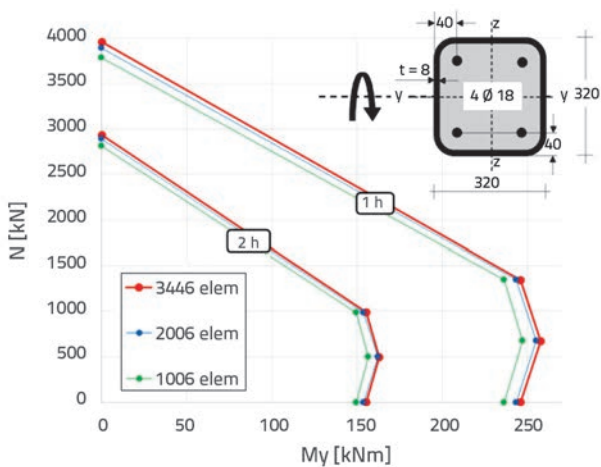
Slika 10. Interakcijske krivulje M-N za momente savijanja oko jače i slabije osi potpuno obloženog čeličnog profila (FES), za vremenske intervale izlaganja požaru



Slika 11. Interakcijske krivulje M-N za razne vremenske intervale izlaganja požaru: a) šuplji profil ispunjen betonom (CFS), b) armiranobetonski profil (RC)



Prikazani numerički postupak za izradu interakcijskih dijagrama M-N ovisan je o diskretizaciji poprečnog presjeka. Stoga je provedeno ispitivanje ovisno o broju konačnih elemenata u poprečnom presjeku profila CFS (šuplji profil ispunjenog betonom). Rezultati za dva karakteristična vremenska intervala ( $t = 1 \text{ h}$  i  $t = 2 \text{ h}$ ) prikazani su na slici 12. Proračun obavljen s 3446 konačnih elemenata smatra se referentnim proračunom, a u slučaju 2006 konačnih elemenata vrijednosti su momenta savijanja za 1 % niže za točke B, C i D, dok su u slučaju 1006 konačnih elemenata vrijednosti niže za 4 % u usporedbi s referentnom vrijednošću. Razlike u vrijednostima uzdužne sile registrirane su samo u točkama A, a one iznose 1 % za 2006 elemenata te 4 % za 1006 elemenata. Da bi se poboljšali rezultati, svi dodatni izračuni obavljani su s više od 3300 konačnih elemenata.



Slika 12. Usporedba interakcijskih krivulja M-N za šuplji profil ispunjen betonom (CFS) pri karakterističnim vremenskim intervalima izlaganja požaru, definirano s različitim brojevima konačnih elemenata

Na slici 12. vidimo da visoke temperature prouzročene djelovanjem požara dovode do bitnog smanjenja nosivosti u analiziranim vrstama poprečnog presjeka. Međutim, gubitak nosivosti u poprečnom presjeku nije jednak u svim vrstama spregnutih profila [17-20]. Najvišu graničnu čvrstoću pri normalnoj temperaturi i pri istim dimenzijama poprečnog presjeka ima djelomično obloženi čelični profil, jer čelični profil sudjeluje s visokim postotkom u ukupnoj površini poprečnog presjeka. Za te četiri vrste poprečnog presjeka, armiranobetonski presjek ima najnižu početnu nosivost, jer udio armature u presjeku iznosi samo 1 %.

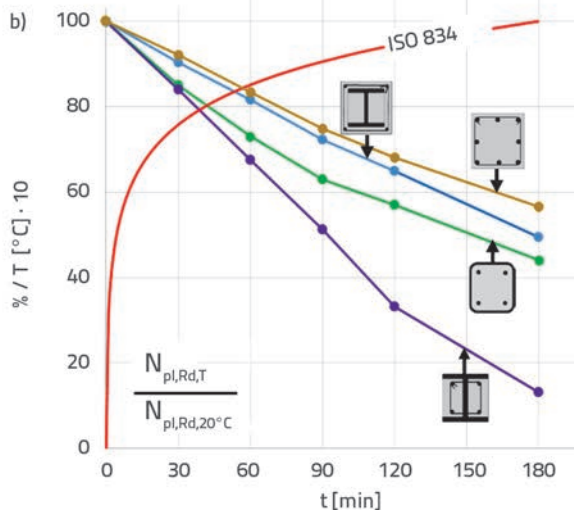
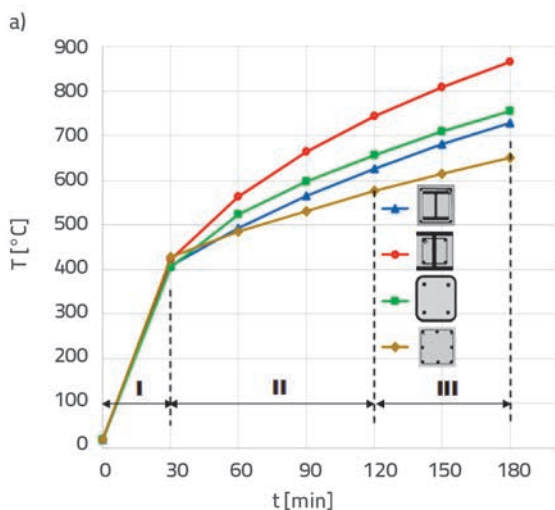
U slučaju požara, potpuno obloženi profil (slika 10.) odlikuje se najvećom vatrootpornošću, dok se niža vatrootpornost bilježi u slučaju djelomično obloženih profila i šupljih (cjevastih) profila ispunjenih betonom (slike 9. i 11.a). Čelični profili bitno povećavaju početnu nosivost djelomično obloženih profila i šupljih profila ispunjenih betonom. Međutim, zbog obodnog položaja čelika koji se zato jako zagrijava u relativno kratkom vremenu pogoršavaju se njegova mehanička svojstva, što dovodi

do niže vatrootpornosti. Čelični segment potpuno obloženog profila nalazi se u unutrašnjosti profila pa je zaštićen betonom vrlo niske toplinske provodljivosti. Zato čelik duže vremena ostaje hladniji zadržavajući svoja mehanička i toplinska svojstva, pa se tako postiže bolja vatrootpornost. Dodatni nedostatak djelomično obloženog profila - u smislu njegove vatrootpornosti - odnosi se na udjel čeličnog segmenta koji je veći nego kod šuplji profila ispunjenog betonom; stoga djelomično obloženi profil ima veću graničnu čvrstoću u uvjetima uporabe [19, 20].

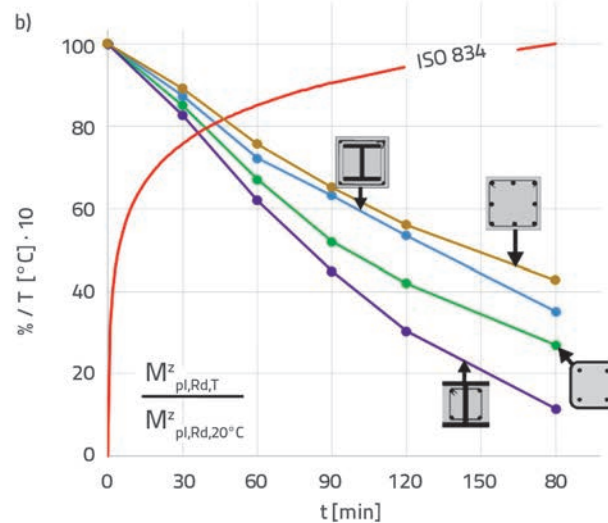
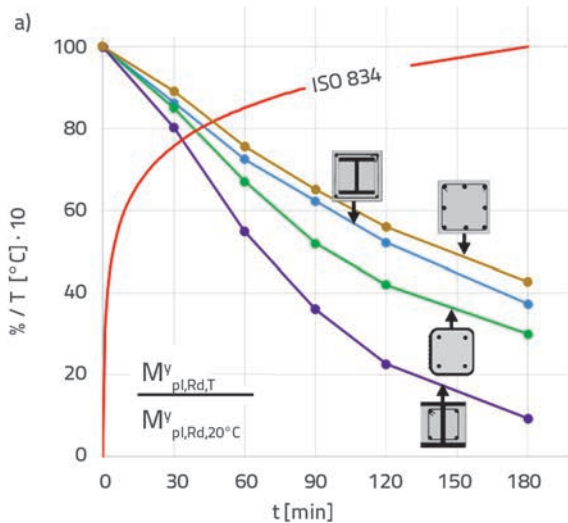
Pri ocjenjivanju gubitka nosivosti poprečnog presjeka, važno je uzeti u obzir vrijednost prosječne temperature poprečnog presjeka u odnosu na odgovarajuće vrijeme izloženosti požaru. Prosječna temperatura poprečnog presjeka izračunana je zbrajanjem temperatura u svakoj podlameli, a taj zbroj se zatim dijeli s ukupnim brojem podlamela. Na slici 13.a prikazane su prosječne temperature poprečnog presjeka za četiri različite vrste stupova koji se analiziraju u ovom radu. Armiranobetonski stup postiže najnižu prosječnu temperaturu u poprečnom presjeku. Za to postoje dva razloga: dimenzije poprečnog presjeka veće su u usporedbi s drugim stupovima, a koeficijent toplinske provodljivosti betona bitno je niži u odnosu na odgovarajući koeficijent čelika. U slučaju djelomično obloženog čeličnog profila, pojasnice čeličnog profila izravno su izložene vatri, kod betona je manje izražen efekt "toplinskog štita", pa tako ta vrsta poprečnog presjeka postiže najvišu prosječnu temperaturu. U slučaju cjevastih profila ispunjenih betonom, čelični profil izravno je izložen utjecaju visokih temperatura, a betonska jezgra ostaje hladna i ponaša se kao element koji apsorbira toplinu (hladilo).

Prosječne temperature u poprečnom presjeku stupa mogu se podijeliti u tri stupnja. Prvi stupanj se odnosi na temperature nakon trideset minuta grijanja. Te su temperature gotovo jednake, što se objašnjava kratkim trajanjem zagrijavanja, pa toplina ne može prodrijeti duboko u presjek. Drugi stupanj predstavlja vrijeme zagrijavanja od trideset do sto dvadeset minuta. Tu je karakteristično ne samo opće povećanje temperature u svim poprečnim presjecima već i postojanje bitnih razlika u pojedinačnim prosječnim temperaturama. U trećem stupnju, razlike u prosječnim temperaturama poprečnih presjeka FES i CFS počinju se smanjivati s povećanjem vremena grijanja (više od sto dvadeset minuta). U profilu FES bilježi se trend gotovo linearnog povećanja temperature. Betonski dio profila CFS opire se prodoru topline u poprečni presjek, što rezultira sporijim prirastom prosječne temperature. Isti se efekt može uočiti i u profilu RC. Kod profila PES, položaj i izravna izloženost čeličnog elementa dovodi do kontinuiranog povećanja prosječne temperature.

Promjene prosječnih temperatura poprečnih presjeka u vremenu zagrijavanja ključne su za analizu i bolje razumijevanje interakcijskih krivulja M-N za stupove. U definiranom razdoblju zagrijavanja, proračunske vrijednosti plastičnog otpora spregnutih profila utjecaju tlačne sile  $N_{pl,Rd,T}$  iskazane su kao postotak proračunskih vrijednosti plastičnog otpora utjecaju tlačne normalne sile  $N_{pl,Rd,20^{\circ}C}$  pri normalnoj temperaturi, slika 13.b.



Slika 13. a) Prosječne temperature poprečnog presjeka spregnutih stupova tijekom izlaganja požaru; b) Otpornost stupova na uzdužnu silu za razne vremenske intervale djelovanja požara



Slika 14. Otpornost stupova na moment savijanja oko jače i slabije osi, za razne vremenske intervale požara

Na dijagramima koji se nalaze na slici 14. prikazuje se proračunske vrijednosti plastične otpornosti na moment savijanja za razne vrste spregnutih poprečnih presjeka  $M_{pl,Rd,T}$ , i to u obliku postotka proračunskih vrijednosti plastičnog momenta savijanja  $M_{pl,Rd,20°C}$  pri sobnoj temperaturi. Ti su dijagrami izrađeni za analizirane vrste spregnutih stupova izloženih utjecaju standardnog požara prema normi ISO 834. Lijevi dijagram pokazuje nosivost za moment savijanja oko jače osi, a desni dijagram pokazuje nosivost za moment savijanja oko slabije osi presjeka.

#### 4. Zaključak

Požarom uzrokovano povećanje temperature u spregnutim presjecima stupova dovodi do smanjenja nosivosti poprečnog presjeka u odnosu na uzdužnu tlačnu silu i dvoosno savijanje.

Smanjenje nosivosti ovisi o vrsti poprečnog presjeka, vremenu zagrijavanja, scenariju požara itd. Najveći gubitak nosivosti  $M - N$  registriran je u poprečnim presjecima u kojima je čelični profil izravno izložen zagrijavanju, kao što je to slučaj kod djelomično obloženog presjeka (PES). Minimalno smanjenje nosivosti  $M - N$  zabilježeno je kod presjeka kod kojih je čelični profil zaštićen betonskom oblogom (profil FES). Kako beton ima nisku toplinsku provodljivost, taj materijal sprečava brzo prodiranje topline u čelični element i armaturu, čime se postiže povoljnije ponašanje stupa (slika 14.). Iz istog se razloga armiranobetonski stup odlikuje najvećom otpornošću na požar i najnižom veličinom smanjenja nosivosti. U fazi zagrijavanja najniže je smanjenje nosivosti  $M - N$  registrirano kod spregnutog stupa s poprečnim presjekom tipa CFS. Nosivost se smanjuje gotovo linearno.

Zbog svog položaja u cjevastom poprečnom presjeku ispunjenim betonom (CFS), čelični je profil izravno izložen djelovanju požara, pa se tako visoke temperature postižu već na samom početku procesa zagrijavanja. Zbog toga se u ovom slučaju bilježi znatno smanjenje svojstava čelika, a do značajnog smanjenja interakcijskih krivulja M-N dolazi već u prvom satu izlaganja utjecaju požara. Tijekom daljnjeg zagrijavanja, toplina polako prodire u betonsku jezgru pa to dovodi do sporijega smanjenja preostale nosivosti stupa, izražene preko njegovog M-N dijagrama.

Kod poprečnih presjeka FES i CFS, razlika u gubitku na interakciju sila M-N nije bila velika u određenim intervalima požara. Najviša vrijednost od 9 % postignuta je jedan sat nakon izlaganja požaru, a ta se vrijednost smanjila tijekom daljnjeg zagrijavanja. Nakon tri sata zagrijavanja, ona se spustila na 3,5 %. Ova se činjenica treba svakako uzeti u obzir pri odabiru odgovarajuće vrste poprečnog presjeka stupa, naročito zbog bitnih prednosti stupova CFS u odnosu na stupove PES koje se očituju u gradnji bez oplata, u jednostavnijim spojevima elemenata grede itd.

Osim toga, dodatna prednost tih stupova u odnosu na ostale vrste stupova jest i dodatna mogućnost zaštite od požara na obodu stupova CFS.

Kod presjeka PES, smanjenje M-N interakcijskog dijagrama u odnosu na ostala dva analizirana profila iznosi 14 % nakon prvog sata zagrijavanja, 32 % nakon dva sata zagrijavanja, te 36,3 % nakon tri sata zagrijavanja. Ti podaci pokazuju da se ti profili mogu koristiti u konstrukcijama koje bi mogle biti izložene požaru samo uz dodatnu zaštitu (izolaciju) poprečnog presjeka. Dijagrami prosječnih temperatura analiziranih vrsta spregnutih presjeka stupova prikazani su na slici 13.a. Ti dijagrami vrlo jasno pokazuju stupanj prolaska topline u poprečni presjek u određenim intervalima zagrijavanja. Oblici krivulja vrlo su slični kod dijagrama kod kojih do gubitka nosivosti u poprečnom presjeku dolazi zbog utjecaja uzdužne tlačne sile (slika 13.b) i zbog djelovanja momenata savijanja oko obje osi (slika 14.). Rezultati ovog istraživanja potvrđuju činjenicu da visoke temperature uzrokovane djelovanjem požara dovode do smanjenja M-N nosivosti spregnutih stupova.

## LITERATURA

- [1] EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire, 2002.
- [2] EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules. Structural fire design, 2004.
- [3] EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
- [4] EN 1994-1-2: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules. Structural fire design, 2005.
- [5] Androjić, B., Dujmović, D., Lukačević, I.: Projektiranje spregnutih konstrukcija prema Eurokodu 4, I.A. Projektiranje, Zagreb, 2012.
- [6] Lazarevska, M., Knežević, M., Cvetkovska, M., Ivanišević, N., Samardžioska, T., Trombeva-Gavriloska, T.: Fire resistance prognostic model for reinforced concrete columns, GRAĐEVINAR 64(2012) 7, pp. 565-571.
- [7] Cvetkovska, M., Milanović, M., Jovanoska, M., Cifliganec, C.: Parametric analysis of fire resistance of centrally loaded composite steel-concrete columns, 15th International Symposium of Macedonian Association of Structural Engineers, Ohrid, Makedonija, 2013.
- [8] Milanović, M., Cvetkovska, M.: Zavisnost požarne otpornosti centrično opterećenih spregnutih stubova od dimenzija preseka, Godišnji zbornik GNP 2014, Žabljak, Montenegro, 2014.
- [9] Milanović, M., Filipovski, A., Cvetkovska, M., Cvetanovski, P.: Analiza spregnutih stubova od čelika i betona izloženih požaru, Teorijska i eksperimentalna istraživanja konstrukcija i njihova primena u građevinarstvu, Nacionalni simpozijum sa međunarodnim učesćem, Niš, 2010.
- [10] Caldas, R.B., Sousa Jr, J.B.M., Fakury, R.H.: Interaction diagrams for design of concrete-filled tubular columns under fire, Proceedings of SDSS-Stability and Durability of Steel Structures, Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [11] Sousa Jr, J.B.M., Caldas, R.B., Fakury, R.H.: Interaction diagrams for concrete-filled tubular sections under fire, Proceedings of Tubular Structures XII (eds. Shen, Z.Y., Chen, Y.Y., Zhao, X.Z.), Taylor & Francis Group, London, 2009
- [12] Fenollosa, E., Cabrera, I.: Analysis of composite section columns under axial compression and biaxial bending moments, Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges, ISBN 978-0-415-66195-9, Taylor & Francis Group, London, 2013., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:6\(678\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(678))
- [13] Chen, S.F., Teng J.G., Chan, S.L.: Design of bi-axially loaded short composite columns of arbitrary section, Journal of Structural Engineering, ASCE 2001, 127/6, pp. 78-85.
- [14] Cvetkovska, M.: Nonlinear stress strain behavior of RC elements and RC frames exposed to fire, PhD thesis, University "St. Cyril and Methodius", Civil Engineering Faculty-Skopje, 2002.
- [15] SAFIR-Computer program, University of Liege, Belgium, 2014.
- [16] Anderberg, Y., Magnusson, S.E., Pettersson, O., Thelandersson, S., Wickstrom, U.: An analytical approach to fire engineering design of concrete structures, International Symposium on Concrete and Structures. ACI Publications SP-55-16: 409-437, 1986.
- [17] Torić, N., Harapin, A., Boko, I.: Numerical model for determining fire behavior of structures, GRAĐEVINAR 64(2012) 1, pp. 1-13.
- [18] Gillie, M.: The behaviour of steel-framed composite structures in fire, PhD thesis, University of Edinburgh, 2000.
- [19] Adlinge, S.S., Gupta, A.K.: Study of Ultimate Load Capacity of Concrete Encased steel Columns using Finite Element Method, International Journal of Advance Research, IJOAR.org, 2013
- [20] Kuranovas, A., Goode, D., Kazimieras, A.: Load bearing capacity of concrete filled steel columns, Journal of Civil Engineering and Management, Taylor & Francis, pp. 21-33, 2010.