

Primljen / Received: 13.12.2011.

Ispravljen / Corrected: 4.4.2012.

Prihvaćen / Accepted: 20.4.2012.

Dostupno online / Available online: 25.5.2012.

# Analiza proračunskih modela provođenja topline iz EN1993-1-2

## Autori:

Prof.dr.sc. **Ivica Boko**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[ivica.boko@gradst.hr](mailto:ivica.boko@gradst.hr)

Neno Torić, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[neno.toric@gradst.hr](mailto:neno.toric@gradst.hr)Prof.dr.sc. **Bernardin Peroš**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[bernardin.peros@gradst.hr](mailto:bernardin.peros@gradst.hr)

Izvorni znanstveni rad

[Ivica Boko, Neno Torić, Bernardin Peroš](#)

## Analiza proračunskih modela provođenja topline iz EN1993-1-2

U radu su opisana eksperimentalna istraživanja koja su provedena u svrhu testiranja osnovnih proračunskih modela iz EN 1993-1-2 za proračun povećanja temperatura u konstrukciji u slučaju djelovanja požara. Analiza je provedena za osnovne modele proračuna povećanja temperature u zaštićenim i nezaštićenim čeličnim elementima. Analizirani su čelični elementi sa zaštitom u obliku protupožarnog premaza.

### Ključne riječi:

provođenje topline, protupožarni premaz, požar, toplinske karakteristike, čelik, nezaštićeni element, zaštićeni element

Original scientific paper

[Ivica Boko, Neno Torić, Bernardin Peroš](#)

## Analysis of heat transfer design models based on EN1993-1-2

An overview of experimental research conducted in order to test basic design models relating to temperature increase in structures in case of fire action, as given in EN 1993-1-2, is presented in the paper. The analysis was conducted for basic design models relating to temperature increase in protected and unprotected steel elements. Steel elements with protection in form of a fire-resistant coating are analyzed.

### Key words:

heat transfer, fire-resistant coating, fire, thermal properties, steel, unprotected and protected element

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

[Ivica Boko, Neno Torić, Bernardin Peroš](#)

## Analyse der Berechnungsmodelle der Wärmeleitfähigkeit nach EN1993-1-2

In der Arbeit sind experimentelle Forschungen, die zum Zwecke der Testierung grundlegender, in EN 1993-1-2 für die Berechnung der Temperaturerhöhung in einer Konstruktion im Falle einer Brandwirkung festgelegener Berechnungsmodelle dargestellt. Die Analyse wurde für Grundmodelle der Berechnung von Temperaturerhöhungen in geschützten und ungeschützten Stahlelementen durchgeführt. Es wurden Stahlelemente mit Schutz in Form eines Brandschutzanstriches analysiert.

### Schlüsselwörter:

Wärmeleitfähigkeit, Brandschutzanstrich, Brand, Wärmecharakteristiken, Stahl, ungeschütztes und geschütztes Element

## 1. Uvod

Proračun provođenja topline prvi je korak u modeliranju ponašanja konstrukcija izloženih djelovanju požara. Suvremene europske norme za proračun čeličnih konstrukcija – EN 1993-1-2 [1] trenutačno predstavljaju osnovnu podlogu za inženjerske proračune konstrukcija izloženih djelovanju visokih – požarnih temperatura. U normi EN1993-1-2 definirana su dva tipa jednostavnih modela za proračun požarnih temperatura u konstrukciji – model za nezaštićene i model za zaštićene čelične elemente. Takvi su modeli ovisni o određenom broju kritičnih parametara pomoću kojih se određuje veličina razvijenih temperatura u konstrukciji. Općenito, parametri se mogu podijeliti u četiri skupine:

- parametri prijenosa topline u materijalu (koeficijent toplinske provodljivosti i specifični toplinski kapacitet)
- parametri rubnih uvjeta (koeficijenti konvekcije i radijacije, faktor konfiguracije)
- parametri požarnog djelovanja (temperatura vrućeg plina u okolini elementa)
- parametri oblika poprečnog presjeka (faktor oblika i faktor sjene).

Navedene se skupine parametara najčešće određuju direktnim ili indirektnim eksperimentalnim metodama koje su se, tijekom godina, uvelike razlikovale kod pojedinih istraživača. Kao posljedica toga, u literaturi postoje određena odstupanja rezultata između pojedinih parametara koje su dobili drugi istraživači i onih koji su empirijski zadani ovisno o temperaturi u EN1993-1-2.

Svrha ovog rada jest testiranje jednostavnih proračunskih modela za određivanje povećanja požarnih temperatura u zaštićenom i nezaštićenom čeličnom elementu predloženih prema EN 1993-1-2 i usporedba dobivenih rezultata s provedenim eksperimentalnim istraživanjima [2]. Istraživanja uključuju mjerenja razvijenih temperatura na površini čeličnih elemenata za različite veličine brzine (gradijente) zagrijavanja elementa. U radu je prikazana nova metodologija za proračun povećanja temperature u čeličnim elementima zaštićenim protupožarnim premazom, za što nema nikakvih posebnih smjernica u normi EN 1993-1-2.

## 2. Prethodna istraživanja

U ovom su poglavlju ukratko opisana eksperimentalna i teoretska istraživanja vezana za toplinske karakteristike čelika i proračunske modele provođenja topline koja su služila za izradu norme EN 1993-1-2.

### 2.1. Toplinske karakteristike čelika

Osnovni su parametri koji definiraju veličinu temperature koja se razvija u čeličnom elementu zbog djelovanja požara specifični toplinski kapacitet i koeficijent toplinske provodljivosti materijala. Toplinske karakteristike čelika

dane u Eurokodu 3 definirane su na osnovi izvještaja koji je dao Anderberg [3] u kojem je pregled rezultata toplinskih i mehaničkih karakteristika čelika koji su bili dostupni u to vrijeme, kao i na osnovi drugih publikacija [4, 5]. Dosadašnja eksperimentalna istraživanja toplinskih karakteristika čelika [6, 7] pokazala su zadovoljavajuće podudaranje eksperimentalnih rezultata s empirijskim modelom koeficijenta toplinske provodljivosti koji je u Eurokodu 3. Eksperimentalni rezultati određivanja specifičnoga toplinskog kapaciteta više istraživača pokazuju poklapanje s modelom iz Eurokoda 3 do 700°C, dok se veća odstupanja pojavljuju iznad navedene temperature, pogotovo u području gdje dolazi do nagloga skoka u vrijednosti toplinskog kapaciteta (750°C), zbog faznog prijelaza u materijalu. Uzimajući u obzir navedeno, dosadašnja eksperimentalna istraživanja pokazuju male varijacije u parametrima toplinske provodljivosti čelika u temperaturnom području do 700°C te zadovoljavajuće podudaranje provedenih eksperimentalnih istraživanja s modelima toplinskih karakteristika danim u EN1993-1-2.

### 2.2. Modeli provođenja topline

Povećanje temperature u elementu konstrukcije ovisno o vremenu trajanja požara definirano je rješenjem diferencijalne jednadžbe provođenja topline. Osnovne jednadžbe za proračun promjene temperature u zaštićenom i nezaštićenom čeličnom elementu definirane su na temelju istraživanja koje je proveo Wickström [8, 9]. Kao rezultat tog istraživanja u Eurokodu 3 su dane jednadžbe koje opisuju povećanje temperature u zaštićenom i nezaštićenom čeličnom elementu i koje predstavljaju jednodimenzionalnu diferencijsku jednadžbu provođenja topline. U model provođenja topline po prvi je put uveden koncept faktora sjene kojim se umanjuje toplinski tok zbog zračenja od požara na element poradi specifičnog oblika poprečnog presjeka koji služi kao svojevrсна prepreka djelovanju toplinskog toka od prijenosa topline zračenjem, što je izraženo samo kod elemenata s poprečnim presjekom I tipa.

## 3. Analiza jednostavnih proračunskih modela provođenja topline

U ovom se poglavlju prikazuje dio eksperimentalnog programa [10] koji uključuje mjerenje prirasta temperature u zaštićenim i nezaštićenim čeličnim elementima. Rezultati eksperimentalnih istraživanja usporedit će se s jednostavnim modelima provođenja topline za zaštićene i nezaštićene čelične elemente koji su dani u Eurokodu 3, zajedno s predviđanjima 2D numeričkog modela provođenja topline TASEF (*eng. Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire*).

### 3.1. Opis eksperimentalnog istraživanja

Eksperiment vezan za mjerenje prirasta temperature u čeličnim elementima proveden je za nezaštićene elemente

i elemente zaštićene protupožarnim premazom. Elementi duljine 3,0 m zagrijavali su se plamenicima koji su automatski regulirani da bi se dobile željene temperature u termokomorama dimenzija 3150 x 3000 x 1000 (6 plamenika) i 1250 x 700 x 500 mm (1 plamenik). Također je izvršeno mjerenje prirasta temperature u elementima s postupnim zagrijavanjem elemenata (grijanje elementa u peći s postupnim nelinearnim gradijentom zagrijavanja). Elementi koji su se zagrijavali s postupnom nelinearnom krivuljom razvoja požara nakon dostizanja ciljane temperature opterećivali su se konstantnim prirastom opterećenja za potrebe određivanja mehaničkog odgovora elementa na visoke temperature. Eksperimentalno istraživanje izvršeno je na čeličnim elementima profila I 212/180 opterećenim uzdužnim i poprečnim opterećenjem, odnosno pod djelovanjem savijanja i ekscentričnog tlaka (tlak + savijanje). U ovom su radu prikazani samo rezultati mjerenja temperatura u određenom broju ispitanih čeličnih elemenata (test savijanja + ekscentrični tlak\*\*).



Slika 1. Prikaz čeličnog elementa\* unutar peći dimenzija 3150 x 3000 x 1000 mm

U eksperimentu prikazanom na slici 1. odabrana su tri različita tipa čeličnih profila koji pokrivaju vrijednosti faktora oblika poprečnog presjeka u rasponu vrijednosti od 100-300: IPE140 i IPE180 sa zaštitom u obliku protupožarnog premaza te nezaštićeni zavareni profil I 212/180. U tablici 1. prikazan je popis elemenata na kojima je izvršeno mjerenje temperatura na njihovoj površini.

Tablica 1. Popis elemenata za mjerenje površinskih temperatura

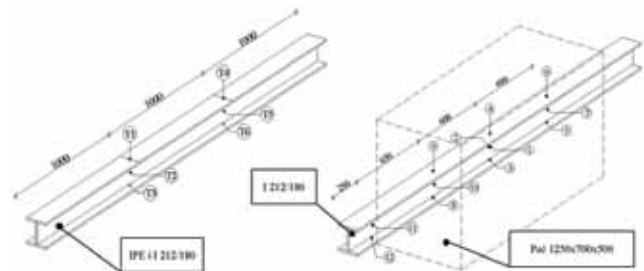
Tip elementa	Režim zagrijavanja peći	Tip zaštite	Dimenzije peći (mm)	Maks. temp. zagr. (°C)	Ukupan broj elemenata
IPE 140	stand. krivulja	zaštićen	3150 x 3000 x 1000	800	1
IPE 180	stand. krivulja	zaštićen	3150 x 3000 x 1000	800	1
I 212/180*	stand. krivulja	nezaštićen	3150 x 3000 x 1000	800	1
I 212/180**	nelin. krivulja	nezaštićen	1250 x 700 x 500	400-700	7

Brzina zagrijavanja termokomore unaprijed se definira, a uređaj za zagrijavanje ima automatsku regulaciju temperatura u pojedinoj zoni. Kontrola temperature zraka u pojedinoj zoni obavljala se uz pomoć termoelemenata. Termoelementi su na čelični element postavljeni elektrootpornim zavarivanjem prikazanim na slici 2.



Slika 2. Termoelement na mjernoj poziciji

Za mjerenje temperatura u diskretnim točkama na površini elementa upotrijebljeni su termoelementi tipa K (NiCr-Ni). Na slici 3. prikazane su mjerne točke temperature na površini vruće valjanih profila i zavarenog profila I 212/180.



Slika 3. Položaj mjernih točaka temperature na IPE profilima i zavarenom profilu I 212/180

Elementi koji su izloženi djelovanju ISO krivulje standardnog požara nalazili su se u cijelosti unutar peći dimenzija 3150 x 3000 x 1000 mm, dok elementi koji su se zagrijavali postupnim nelinearnim prirastom topline nisu u potpunosti bili unutar peći već samo dijelom u peći volumena 1250 x 700 x 500 mm, iz tehničkih razloga, radi sprječavanja mogućeg oštećenja

opreme za praćenje progiba elementa nakon ciklusa zagrijavanja i opterećivanja (slika 3.).

### 3.2. Modeliranje provođenja topline prema EN1993-1-2

#### 3.2.1 Osnovne pretpostavke modela

Za jednostavne proračunske modele povećanja temperature prema EN 1993-1-2 vrijede određene pretpostavke:

- Temperatura je jednoliko raspoređena po površini poprečnog presjeka elementa (1D model provođenja topline).
- Povećanje temperature u elementu direktno je proporcionalno s faktorom oblika poprečnog presjeka.
- Za zaštićene čelične elemente temperatura okolnog plina jednaka je temperaturi površine vatrootpornog materijala.

#### 3.2.2. Proračunski model

Jednadžbe za proračun povećanja temperature u nezaštićenom i zaštićenom elementu prema EN1993-1-2 dane su izrazima 1 i 2:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \times A_p/V}{d_p \times c_a \times \rho_a} \times \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \times \Delta t - (e^{f_{10}} - 1) \times \Delta\theta_{g,t} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{c_p \times \rho_p}{c_a \times \rho_a} \times d_p \times A_p/V$$

gdje je:

$\Delta\theta_{a,t}$  – prirast temperature u elementu u vremenskom intervalu  $\Delta t$  (°C)

$k_{sh}$  – faktor sjene

$A_m/V$  – faktor oblika poprečnog presjeka (m<sup>-1</sup>)

$A_m$  – površina poprečnog presjeka po jedinici duljine elementa (m<sup>2</sup>)

$V$  – volumen po jedinici duljine elementa (m<sup>3</sup>)

$c_a \rho_a$  – specifični toplinski kapacitet (J/kgK) i gustoća čelika (kg/m<sup>3</sup>)

$c_p \rho_p$  – specifični toplinski kapacitet (J/kgK) i gustoća vatrootpornog materijala (kg/m<sup>3</sup>)

$\dot{h}_{net,d}$  – toplinski tok od konvekcije i zračenja (W/m<sup>2</sup>)

$\Delta t$  – vremenski interval integracije (s)

$\lambda_p d_p$  – koeficijent toplinske provodljivosti vatrootpornog materijala (W/mK) i debljina vatrootpornog materijala (m)

Tablica 2. Osnovni ulazni parametri za modeliranje provođenja topline prema EN1993-1-2

Parametri	$C_a$	$\rho_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A/V$ [m <sup>-1</sup> ]	$k_{sh}$	$\alpha_c$ [W/m <sup>2</sup> K]	$\Phi$	$\varepsilon_{res}$	$\Delta t$ [s]
Zaštićeni	EN1993-1-2	7850,0	291/335	1,0	25,0	1,0	0,7	3,0
Nezaštićeni	EN1993-1-2	7850,0	129	0,65	25,0	1,0	0,7	3,0

$A_p/V$  – faktor oblika poprečnog presjeka s vatrootpornim materijalom (m<sup>-1</sup>)

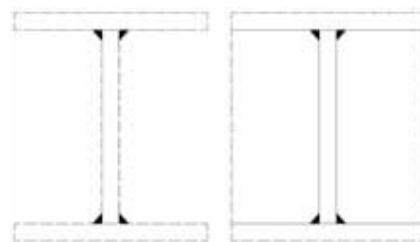
$\theta_{g,t}$  – temperatura na površini vatrootpornog materijala (°C)

$\theta_{a,t}$  – temperatura čeličnog elementa iz prethodnog vremenskog intervala (°C).

Faktor sjene  $k_{sh}$  općenito se može izračunati prema izrazu:

$$k_{sh} = \frac{A_{m,b}}{A_m} \quad (3)$$

Ilustracija površina  $A_{m,b}$  i  $A_m$  za slučaj I profila dana je na slici 4.



Slika 4. Definicija faktora sjene

Izraz za proračun toplinskog toka  $\dot{h}_{net,d}$  preuzet je prema EN1991-1-2 [11] i dan je izrazom:

$$\dot{h}_{net,d} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) + \Phi \cdot \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot (\theta_g^4 - \theta_m^4) \quad (4)$$

gdje je:

$\alpha_c$  – koeficijent konvekcije (W/m<sup>2</sup>K)

$\Phi$  – faktor konfiguracije

$\varepsilon_{res}$  – rezultantni faktor emisivnosti između čeličnog elementa i požara

$\sigma$  – Stephan Boltzmannova konstanta (5,67A10-8 W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$\theta_g$  i  $\theta_m$  – temperatura plina u okolini elementa i temperatura površine elementa (°C).

Temperatura plina u okolini elementa  $\theta_g$  za modeliranje provođenja topline primjenom izraza 1 i 2 uzeta je kao srednja vrijednost temperature u peći. Važno je napomenuti da je izraz za modeliranje provođenja topline u zaštićenim elementima prema EN1993-1-2 (jednadžba 2) predviđen samo u slučaju postojanja vatrootpornog materijala konstantne debljine  $d_p$ .

#### 3.2.3. Parametri modeliranja provođenja topline za nezaštićene čelične elemente

U tablici 2. prikazane su vrijednosti parametara za proračun povećanja temperatura u zaštićenim i nezaštićenim elementima.

### 3.2.4. Parametri modeliranja provođenja topline za zaštićene čelične elemente

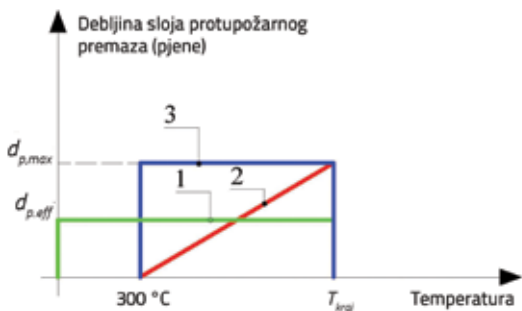
Analizirani su zaštićeni elementi premazani protupožarnim premazom na bazi umjetne smole, koja kad se zagrije na temperaturu ekspandiranja premaza  $T_{exp}$  prelazi u pjenu i naglo povećava svoj obujam i do 50 puta. Povećavanje obujma dovodi do smanjenja gustoće rezultirajuće pjene koja se može smanjiti do 100 puta [12]. Kao posljedica dvaju navedenih fenomena pojavljuje se promjenjiva debljina protupožarnog premaza (pjene) u ovisnosti o temperaturi.

U ovom ćemo poglavlju dati pregled nekoliko tipova modela rasta debljine zaštitnog sloja vatrootpornog materijala da bi se odredilo koji model rasta najbolje opisuje prirast temperature u zaštićenom čeličnom elementu. Osnovni parametri koji su poznati za modeliranje protupožarnog premaza i njezina utjecaja na smanjeno zagrijavanje elementa navedeni su u tablici 3.

Tablica 3. Osnovni parametri za modeliranje provođenja topline sa zaštitom u obliku protupožarnog premaza

$T_{exp}$ [°C]	$C_p$ [J/kgK]	$\lambda_p$ [W/mK]	$d_{p,max}$ [cm]	$\rho_p$ [kg/m³]	$\rho_{premaza}$ [kg/m³]
300	1000	0,25-0,5	4	20	1200

Konačna debljina pjene  $d_{p,max}$  određena je u eksperimentu nakon završetka ciklusa zagrijavanja. Vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti  $\lambda_p$  i specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_p$  za premaz preuzete su iz literature [13]. Model prirasta debljine zaštitnog sloja dan je za dva slučaja: model 2: linearni prirast debljine do konačne vrijednosti  $d_{p,max}$  (debljina počinje rasti linearno nakon dostizanja požarne temperature od 300°C) te model 3: nagli prirast debljine zaštitnog sloja na konačnu vrijednost  $d_{p,max}$  neposredno nakon dosezanja temperature od 300°C. Isto tako izradit će se i analiza prirasta temperature zaštićenog elementa za slučaj kad je zaštitni sloj uzet kao konstanta po cijelom temperaturnom području (modeliranje sa zamjenskom debljinom zaštitnog sloja  $d_{p,eff}$ ), model 1.



Slika 5. Primijenjeni modeli prirasta debljine zaštitnog sloja protupožarnog premaza

### 3.2.5. Parametri modeliranja provođenja topline za TASEF

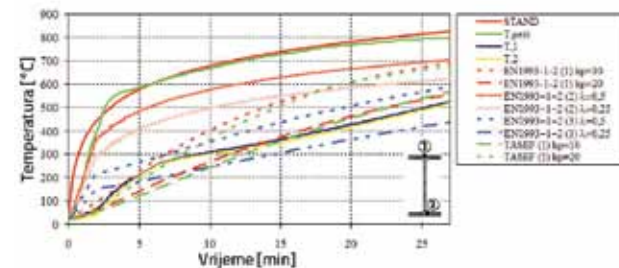
U tablici 4. prikazane su vrijednosti parametara rabljenih za proračun povećanja temperatura u 2D modelu TASEF. U modelu TASEF nije moguće zadavanje faktora sjene u eksplicitnom obliku, stoga u rezultatima koji su dobiveni navedenim modelom faktor sjene nije uzet u obzir.

Tablica 4. Osnovni ulazni podaci za modeliranje provođenja topline u programu TASEF

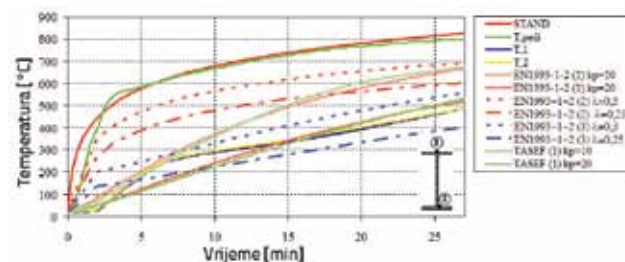
Parametri	$C_a$ i $\lambda_a$	$\rho_a$ [kg/m³]	$\Phi$	$\epsilon_{res}$	$\Delta t$ [s]
Zaštićeni	EN1993-1-2	7850,0	1,0	0,7	1,0
Nezaštićeni	EN1993-1-2	7850,0	1,0	0,7	1,0

### 3.3. Rezultati - zaštićeni čelični elementi

Na slikama 6. i 7. prikazani su rezultati povećanja temperatura u pojedinim točkama na površini profila IPE 140 i IPE 180 i usporedba s modelom provođenja topline za zaštićene elemente iz EN1993-1-2. Prikazan je prirast temperature za slučaj kad je parametar  $k_p = \lambda_p \times d_p \times c_p$  jednak 10 i 20, što odgovara slučaju kad je zaštitni sloj uzet kao konstanta (model 1) po cijelom temperaturnom području s debljinom 2 i 4 cm respektivno. Proračun provođenja topline izrađen je prema modelu 2 za dva slučaja: kad je koeficijent toplinske provodljivosti  $\lambda_p$  0,25 i 0,5 W/mK. Također je prikazan proračun prema modelu 3 za iste vrijednosti koeficijenata toplinske provodljivosti. Usporedba je dana s temperaturama dobivenim modeliranjem poprečnog presjeka elementa u 2D modelu nestacionarnog nelinearnoga provođenja topline TASEF [14] u kojem su kao ulazni parametri bili modeli koeficijenta toplinske provodljivosti i specifičnoga toplinskog kapaciteta prema EN1993-1-2 (tablica 4.).



Slika 6. Rezultati razvijenih temperatura u profilu IPE140 i usporedba s EN1993-1-2 i TASEF

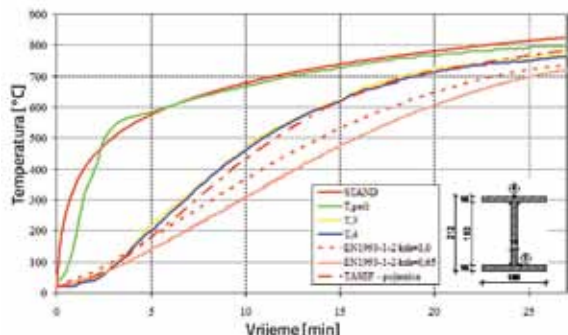


Slika 7. Rezultati razvijenih temperatura u profilu IPE180 i usporedba s EN1993-1-2 i TASEF



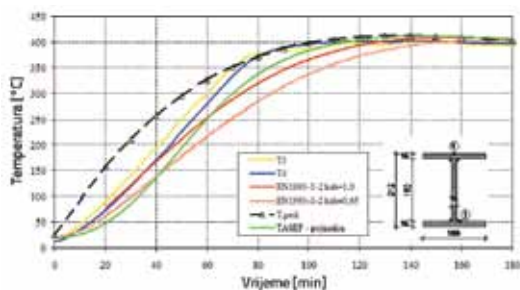
### 3.4. Rezultati - nezaštićeni čelični elementi

Na slici 8. prikazani su rezultati povećanja temperatura u pojedinim točkama nezaštićenog zavarenoga profila I 212/180 i usporedba s temperaturama dobivenim modelom provođenja topline za nezaštićene elemente iz EN1993-1-2. Proračunate su dvije krivulje prema modelu iz EN1993-1-2: bez uključivanja faktora sjene  $k_{sh}$  i s njim.

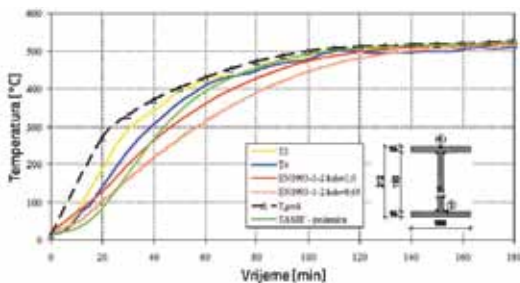


Slika 8. Rezultati ispitivanja profila I 212/180 i usporedba s EN1993-1-2 i TASEF

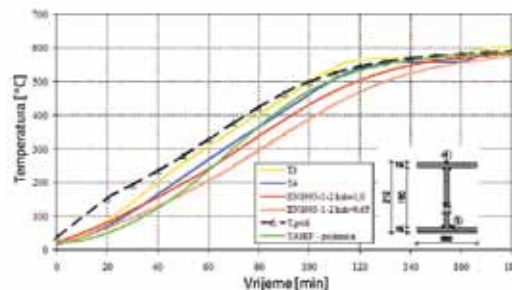
Na slikama 9.–12. prikazane su izmjerene temperature u karakterističnim točkama elementa za postupni nelinearni prirast temperature u peći za temperaturne nivoe 400–700°C (test savijanja). Prikazana je usporedba s modelom provođenja topline iz EN1993-1-2 te s modelom TASEF. Proračunate su dvije krivulje prema modelu iz EN1993-1-2: bez uključivanja faktora sjene  $k_{sh}$  i s njim.



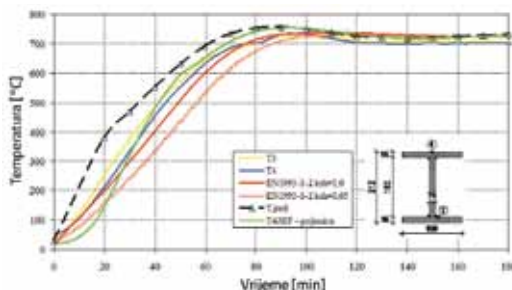
Slika 9. Usporedba temperatura u elementu za nelinearnu krivulju zagrijavanja (400°C, test savijanja)



Slika 10. Usporedba temperatura u elementu za nelinearnu krivulju zagrijavanja (500°C, test savijanja)

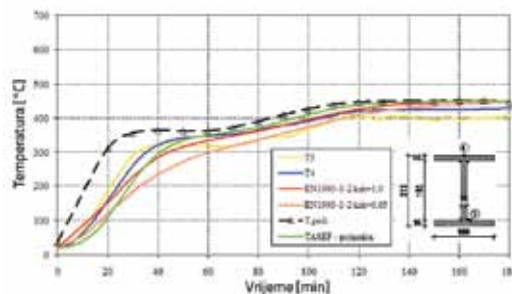


Slika 11. Usporedba temperatura u elementu za nelinearnu krivulju zagrijavanja (600°C, test savijanja)

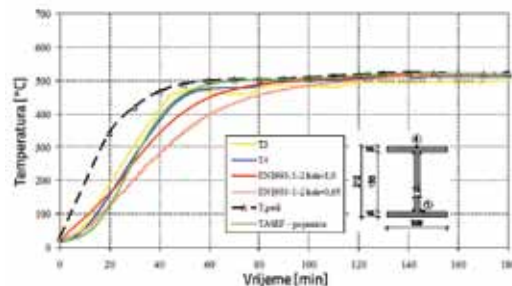


Slika 12. Usporedba temperatura u elementu za nelinearnu krivulju zagrijavanja (700°C, test savijanja)

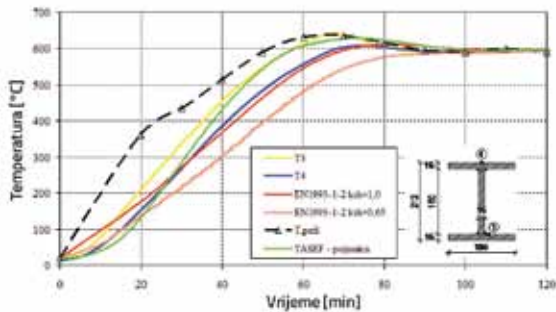
Na slikama 13.–15. prikazane su izmjerene temperature u karakterističnim točkama elementa za postupni nelinearni prirast temperature u peći za temperaturne nivoe 400–600°C (test ekscentrični tlak).



Slika 13. Usporedba temperatura u elementu za nelinearnu krivulju zagrijavanja (400°C, test ekscentrični tlak)



Slika 14. Usporedba temperatura u elementu za nelinearnu krivulju zagrijavanja (500°C, test ekscentrični tlak)



Slika 15. Usporedba temperatura u elementu za nelinearnu krivulju zagrijavanja (600°C, test ekscentrični tlak)

### 3.5. Analiza rezultata

Iz rezultata zagrijavanja nezaštićenih elemenata vidi se da model EN1993-1-2 ne opisuje dovoljno točno prirast temperature u elementu u vremenskom intervalu od 25 minuta za slučaj zagrijavanja elementa standardnom krivuljom požara, pogotovo ako se uključi faktor sjene u proračun provođenja topline (slika 8.). Analizom trenda prirasta temperatura prema modelu EN1993-1-2 i prirasta temperature u nezaštićenom elementu vidljivo je da se u vremenu nakon 25 minuta temperature dobivene modelom EN1993-1-2 postupno približavaju izmjerenim temperaturama u čeličnom elementu. Usporedba rezultata na slikama 9.-15. pokazuje da, za slučaj postupnoga nelinearnog zagrijavanja elementa, model provođenja topline prema Eurokodu 3 predviđa dovoljno precizno temperature u zagrijanim čeličnim elementima te se dobivaju odstupanja veličine 50°C od izmjerenih vrijednosti. Rezultati dobiveni računalnim programom TASEF upućuju da modeli koeficijenta toplinske provodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta iz EN1993-1-2 dovoljno precizno opisuju povećanje temperature u zavarenom elementu, što potvrđuje zaključke iz poglavlja 2.1, te opravdava primjenu toplinskih karakteristika ovisnih o temperaturi u EN1993-1-2 kao realne vrijednosti za modeliranje provođenja topline testiranih elemenata.

Rezultati ispitivanja čeličnih elemenata zaštićenih protupožarnim premazom (slike 6. i 7.) pokazuju da model 3 prirasta debljine zaštitnog sloja najbolje opisuje prirast temperature u zaštićenom elementu što predstavlja i stvarnu pojavu popraćenu naglom kemijskom reakcijom koja uzrokuje trenutačni prirast debljine zaštitnog sloja protupožarnog premaza (pjene). Također je vidljivo da modeliranje uporabom efektivnog zaštitnog sloja po cijelom temperaturnom području (model 1) daje zadovoljavajuće rezultate predviđanja prirasta temperature. Podudaranje modela 1 i 3 razvoja debljine zaštitnog sloja s rezultatima eksperimenta dobiva se s vrijednostima koeficijenta toplinske provodljivosti protupožarnog premaza u području između 0,25 i 0,5 W/mK, a to je realna vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti protupožarnog premaza pri temperaturama

većim od 350°C [13]. U početnom stadiju, tijekom prvih 5 minuta zagrijavanja postoje znatnija odstupanja između modela i eksperimenta, međutim nakon tog razdoblja gradijent temperature prema modelu iz EN1993-1-2 odgovara eksperimentalno određenim vrijednostima izmjerenih temperatura. Temperature razvijene u gornjoj i donjoj pojasnici elemenata koji su se zagrijavali pokazuju da za slučaj zagrijavanja sa standardnom krivuljom požara imamo gotovo istu temperaturu po visini na cijeloj dužini elementa (uniformna temperatura po elementu), dok za slučaj nelinearnog zagrijavanja elementa imamo donekle nelinearnu distribuciju temperatura u elementu s maksimalnom razlikom temperatura između gornje i donje pojasnice približnog iznosa 50°C. Može se zaključiti da je distribucija temperature u ispitivanim elementima približno uniformna, a to opravdava osnovnu pretpostavku jednostavnog modela iz poglavlja 3.2.1.

### 4. Rasprava o rezultatima

Analizom rezultata temperatura dobivenih modelom provođenja topline prema Eurokodu 3 vidljivo je da model provođenja topline za nezaštićene elemente dovoljno dobro opisuje povećanje temperatura u elementu za slučaj manjih brzina prirasta temperature u peći prema slučaju većih brzina prirasta temperatura u peći (standardna krivulja požara) kad je odstupanje znatno. Odstupanja se povećavaju ako se u proračunu u obzir uzima faktor sjene, kojim se umanjuje ukupni toplinski tok od konvekcije i zračenja. Međutim, faktor sjene trebao bi smanjivati samo toplinski tok od zračenja zbog toga što u stvarnosti ne postoji prepreka konvektivnom toku zbog specifičnog oblika I profila, što nije slučaj kod primjene modela provođenja topline iz EN1993-1-2 kad se ukupni toplinski tok umanjuje s faktorom sjene.

Važno je primijetiti da se temperature u elementu za slučaj većih brzina prirasta temperature u peći postupno izjednačavaju s predviđanjima modela iz Eurokoda 3, a to znači da će se, ako se element izlaže maksimalnim temperaturama dovoljno dugo, u konačnici dobiti ista predviđanja temperature s modelom iz Eurokoda 3. Ovo nepoklapanje rezultata u početnoj etapi razvoja požara, kad i imamo najveći prirast temperatura, dovodi do mogućega nepreciznog određivanja otpornosti nosive konstrukcije na djelovanje požara. Samo u slučaju dužeg vremena vatrootpornosti konstrukcije, kad požar ulazi u fazu potpuno razvijenog požara, imamo dobro poklapanje temperatura, a samim tim i precizniju procjenu nosivosti konstrukcije.

Modeliranje provođenja topline u elementima zaštićenim protupožarnim premazom prema EN1993-1-2 pokazuje dobre rezultate ako je poznat skup osnovnih parametara prije početka proračuna, da bi se mogla dobiti dovoljno dobra predviđanja povećanja temperatura. Kritični su parametri koji bi trebali biti poznati prije proračuna: konačna debljina protupožarne

pjene, kritična temperatura ekspaniranja premaza, gustoća pjene na sobnoj temperaturi, osrednjeni specifični toplinski kapacitet i koeficijent toplinske provodljivosti premaza u intervalu 300-500°C. Svaki od navedenih parametara mora definirati proizvođač protupožarnih premaza u skladu s normom EN1993-1-2, da bi proračun provođenja topline za slučaj elemenata zaštićenog protupožarnim premazom bio moguć.

## 5. Zaključak

S obzirom na provedeno eksperimentalno istraživanje mogu se donijeti određene preporuke i zaključci vezani za modeliranje provođenja topline u konstrukciji.

Koristeći se jednostavnim proračunskim modelima iz EN1993-1-2 moguće je modeliranje povećanja temperature u čeličnim elementima zaštićenim protupožarnim premazom.

Modeliranje provođenja topline u elementima zaštićenim protupožarnim premazom prema EN1993-1-2 primijenom predložene metodologije pokazuje zadovoljavajuće rezultate.

Proračun temperatura prema EN1993-1-2 koji uzima u obzir faktor sjene za I profile daje rezultate koji nisu na strani sigurnosti zbog nerealnog umanjanja dijela toplinskog toka od konvekcije.

Modeli provođenja topline za nezaštićene i zaštićene elemente u EN1993-1-2 za slučaj većih brzina prirasta temperature u peći pokazuju veća odstupanja povećanja temperatura u odnosu na rezultate provedenih eksperimenata, pa uporaba takvih modela nije pogodna za analizu provođenja topline u konstrukciji izloženoj djelovanju požara.

## Zahvala

Ispitivanja opisana u ovome članku provedena su u sklopu znanstvenog projekta br. 083-1465 "Pouzdanost konstrukcija i procjena rizika uslijed ekstremnih djelovanja" i znanstvenog projekta br. 083-0000000-1538 "Eksperimentalna i numerička istraživanja potresne otpornosti građevina" koje podupire Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

## LITERATURA

- [1] EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3 - *Design of steel structures - Part 1-2: General Rules Structural Fire Design*, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [2] Boko, I., Peroš, B.: *Sigurnost nosivih čeličnih konstrukcija pri djelovanju požara*, Građevinar 54, (2002.), 11, 643-656.
- [3] Anderberg, Y.: *Properties of Materials at High Temperatures - Steel*, RILEM Report, University of Lund, Sweden, 1983.
- [4] ECCS Technical Committee 3, *European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures*, Calculation of the Fire Resistance of Load Bearing Elements and Structural Assemblies Exposed to the Standard Fire, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing company, 1983.
- [5] ECCS Technical Committee 3, *Fire Resistance of Steel Structures*, ECCS Publication No. 89, Brussels: European Convention for Constructional Steelwork, 1995.
- [6] Outinen, J., Kesti, J., Mäkeläinen, P.: *Fire Design model for Structural Steel S355 Based Upon Transient State Tensile Test Results*, Journal of Constructional Steel Research 42, (1997), 3, 161-169.
- [7] Rempe, J. L., Knudson, D. L.: *High Temperature Thermal Properties for Metals used in LWR Wessels*, Journal of Nuclear Materials 372, (2008), 2-3, 350-357.
- [8] Wickström, U.: *Calculation of Heat Transfer to Structures Exposed to Fire - Shadow effects*, Ninth Interflam conf., Interscience Ltd, 451-460, 2001.
- [9] Wickström, U.: *Temperature Analysis of Heavily-insulated Steel Structures Exposed to Fire*, Fire Safety Journal 5, (1985), 281-285.
- [10] Boko I.: *Određivanje stupnja sigurnosti nosivih čeličnih konstrukcija izloženih djelovanju požara*, doktorska disertacija, Građevinsko-arhitektonski fakultet Split, 2005.
- [11] EN 1991-1-2:2002, Eurocode 1 - *Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on structures exposed to fire*, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- [12] Hamins, A.: *Evaluation of Intumescent Body Panel Coatings in Simulated Post Accident Vehicle Fires*, NISTIR 6157, National Institute of Standards and Tehnology, Building and Fire Research laboratory, 1998.
- [13] Mesquita, L.M.R.: Piloto P.A.G., Vaz, M.A.P., *An Experimental Study of Intumescent Fire Protection Coatings*, Second European Coatings Conference Fire Retardant Coatings. Berlin, Germany, 2007.
- [14] Sterner, E., Wickström U.: *TASEF - Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire*, Swedish National Testing Institute, 1990.