

Primljen / Received: 29.8.2017.

Ispravljen / Corrected: 22.2.2018.

Prihvaćen / Accepted: 16.3.2018.

Dostupno online / Available online: 10.4.2018.

# Procjena metoda proračuna čeličnog nosača izloženog požaru

## Autori:



<sup>1</sup>Izv.prof.dr.sc. **Davor Skejić**, dipl.ing.građ.  
[davors@grad.hr](mailto:davors@grad.hr)



<sup>2</sup>Ivana Rogić, mag.ing.aedif.  
[Ivana.Rogic@seele.com](mailto:Ivana.Rogic@seele.com)



<sup>3</sup>Ana Šitum, mag.ing.aedif.  
[a.situm@f2k-ingenieure.de](mailto:a.situm@f2k-ingenieure.de)



<sup>4</sup>Dr.sc. **David Lange**, dipl.ing.građ.  
[d.lange@uq.edu.au](mailto:d.lange@uq.edu.au)



<sup>5</sup>Prof.dr.sc. **Lars Boström**, dipl.ing.građ.  
[lars.bostrom@sp.se](mailto:lars.bostrom@sp.se)

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

<sup>2</sup>seele GmbH, Njemačka

<sup>3</sup>f2k ingenieure Fries Kürschner Kobler GmbH, Njemačka

<sup>4</sup>Sveučilište Queensland, Građevinski fakultet

<sup>5</sup>RISE - Švedski institut za znanost

Prethodno priopćenje

**Davor Skejić, Ivana Rogić, Ana Šitum, David Lange, Lars Boström**

## Procjena metoda proračuna čeličnog nosača izloženog požaru

Prema iskustvu, procjena požarne otpornosti čeličnih elemenata prema europskim normama je konzervativna, a napredne metode proračuna su složene i dugotrajne. U sklopu međunarodne Round Robin studije, procjena postojećih metoda analizirana je za ispitani čelični nosač izložen savijanju i standardnom ISO požaru. Usporedba rezultata pokazuje da napredne metode daju neujednačene procjene. Svedjedno, napredne su metode proračuna potrebne za poboljšanje normiranih metoda koje precjenjuju požarnu otpornost ovog "trivijalnog" problema.

### Ključne riječi:

požarna otpornost, čelični nosač, metode proračuna, Round Robin istraživanje

Preliminary report

**Davor Skejić, Ivana Rogić, Ana Šitum, David Lange, Lars Boström**

## Assessment of methods for calculating fire resistance of a steel beam

Experience shows that the assessment of fire resistance of steel elements based on European standards is conservative, while advanced methods are complex and time consuming. The analysis of existing methods for the tested steel beam exposed to bending and standard ISO fire was conducted in the scope of the international Round Robin study. The comparison of results shows that advanced methods provide non-uniform assessments. Nevertheless, advanced methods are necessary for improving standard methods that overestimate fire resistance of this "trivial" problem.

### Key words:

fire resistance, steel beam, calculation methods, round robin study

Vorherige Mitteilung

**Davor Skejić, Ivana Rogić, Ana Šitum, David Lange, Lars Boström**

## Einschätzung der Berechnungsmethoden für Stahlträger, die Feuer ausgesetzt sind

Erfahrungsgemäß ist die Einschätzung der Feuerbeständigkeit von Stahlelementen nach den europäischen Normen konservativ, und fortschrittliche Berechnungsmethoden sind komplex und zeitaufwendig. Im Rahmen der internationalen Round-Robin-Studie wurde die Einschätzung der bestehenden Methoden für den getesteten Stahlträger analysiert, der einer Biegebelastung und einem ISO-Standard-Feuer ausgesetzt wurde. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die fortschrittlichen Methoden eine uneinheitliche Einschätzung ergeben. Jedoch sind die fortschrittlichen Berechnungsmethoden für die Verbesserung der normierten Methoden erforderlich, welche die Feuerbeständigkeit dieses "trivialen" Problems einschätzen.

### Schlüsselwörter:

Feuerbeständigkeit, Stahlträger, Berechnungsmethode, Round-Robin-Untersuchung

## 1. Uvod

Požar je izvanredna situacija čije se razarajuće djelovanje na konstrukciju treba u što većoj mjeri spriječiti, njegovi učinci trebaju se predvidjeti, a kako bi se to postiglo, potrebno ga je na odgovarajući način modelirati. Projektom je potrebno dokazati da konstrukcija ima zadovoljavajuću otpornost na požar, kako njegova pojava ne bi uzrokovala neproporcionalne štete imovine i u krajnjem slučaju gubitke života (slika 1.). Katastrofalno rušenje World Trade Center tornjeva, na primjer, dovelo je do općenitog povećanja svijesti o važnosti požarne otpornosti konstrukcija i učinilo ju je sve do danas "gorućom" temom.

Dosadašnja praksa pokazala je da je analitički proračun požarne otpornosti prema europskim normama, uz sve svoje vrline, prilično nekonzistentan. Kod proračuna prema normama ne postoji opći sustav kontrole koji treba uzeti u obzir, pa je odabir metode za proračun stvar dogovora inženjera i revidenta. Zato je osobito važno da numeričke metode i obrasci ručnog proračuna daju robusna i pouzdana rješenja.



Slika 1. Razorno djelovanje požara na čelične konstrukcije

Cilj je građevinskih inženjera imati pouzdane i jednostavne postupke za proračun požarne otpornosti koje mogu primijeniti u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Kako bi se to postiglo, potrebno je kalibrirati normirana pravila proračuna na temelju rezultata ispitivanja koji daju uvid u realno ponašanje konstrukcije. Budući da su ispitivanja požarne otpornosti skupa, pribjegava se znatno jeftinijim varijantama procjene realnog ponašanja putem naprednih računalnih simulacija metodom konačnih elemenata. Pouzdanost takvih simulacija također je nužno provjeriti na temelju rezultata ispitivanja, jer napredne numeričke metode, kao i postavke numeričkih simulacija u različitim računalnim paketima, daju izričito neujednačene rezultate. Iz kalibracija numeričkih modela na temelju ispitivanja proizađi će konkretna pravila za numeričko simuliranje, koja se mogu koristiti nebrojeno puta za simulaciju istih ili sličnih ispitivanja. Na taj način principijelno se može ostvariti ušteda u novcu i vremenu.

Svrha je ovog rada kvantitativno i kvalitativno procijeniti neujednačenost rezultata dobivenih različitim metodama proračuna požarne otpornosti čeličnih konstrukcijskih

elemenata. Konkretno, u radu se prikazuje usporedba rezultata laboratorijskog ispitivanja ponašanja slobodno oslonjenog elementa (nosača) izloženog požaru [1], rezultata koje za isti element daje norma (ručno i programskim paketom Elefir-EN [2]) te rezultata dobivenih računalnim proračunom pomoću metode konačnih elemenata (ANSYS [3]). Eksperimentalni rezultati ispitivanja koje je krajem 2014. godine proveo RISE (Research Institutes of Sweden, prije SP Technical Research Institute of Sweden), kao i rezultati sudionika međunarodnog *Round Robin* istraživanja [1, 4], korišteni su kako bi se ilustrirala neujednačenost rezultata različitih pristupa u rješavanju istog problema. Među 12 sudionika bio je i Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, s analizom koja je prezentirana u ovom radu. Treba napomenuti da se ovo *Round Robin* istraživanje proračuna provodilo u isto vrijeme kada i šire *Round Robin* istraživanje požarne otpornosti koje je organizirao EGOLF, a u kojemu je sudjelovalo 16 protupožarnih laboratorija [5].

## 2. Metode proračuna na požar

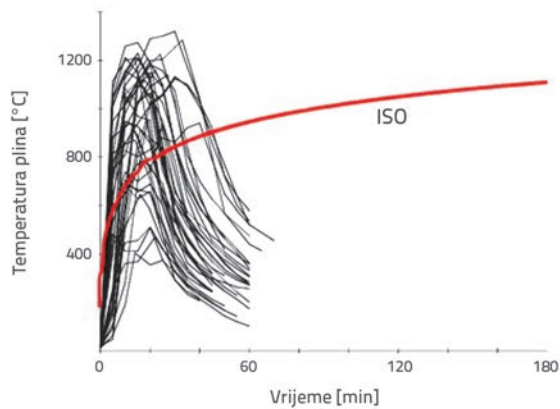
Ponašanje konstrukcija izloženih požaru vrlo je kompleksno, čak i kad se radi o jednom konstrukcijskom elementu jednostavnog statičkog sustava. Razlozi odstupanja požarne otpornosti konstrukcije dobivene ispitivanjem, prema onoj koju daje proračunski model, velika su pojednostavnjenja u ponašanju čelika pri požaru kao idealnog elastoplastičnog materijala, te odstupanja parametara materijala koji služe za proračun povećanja temperature u elementu i za proračun otpornosti. Općenito, proračunom konstrukcije treba dokazati da ukupna djelovanja na konstrukciju u slučaju požara trebaju biti manja od otpornosti konstrukcije u kritičnim presjecima za vrijeme trajanja požara, što se prikazuje izrazom

$$E_{f,d} \leq R_{f,d,t} \quad (1)$$

gdje je:

$E_{f,d}$  – računski učinak djelovanja za računsku situaciju požara,  
 $R_{f,d,t}$  – računska otpornost čeličnog elementa za računsku situaciju požara u vremenu  $t$ .

Pri proračunu elementa konstrukcije, učinak djelovanja pri požaru može se pojednostavljeno dobiti preko učinka djelovanja određenog za uobičajenu temperaturu, uz smanjenje faktorom redukcije proračunske razine opterećenja u požarnoj situaciji [6]. Požarna laboratorijska ispitivanja u skladu s EN 1363-1 [7] provode se prema standardnoj nominalnoj požarnoj krivulji zagrijavanja (ISO 834). Temperatura plina kod standardnog požara raste brzo i povećava se beskonačno, što je drugačije od onoga što se događa tijekom stvarnog požara, slika 2. U standardnom požarnom ispitivanju konstrukcijski element izlaže se požaru u požarnoj peći određeno vrijeme, kako bi se dobila požarna otpornost izražena kao vrijeme u minutama tijekom kojeg element zadovoljava određene uvjete.



Slika 2. Standardna ISO požarna krivulja u usporedbi s 50 ispitivanja prirodnih požara

Zagrijavanjem materijala elementi gube sposobnost prenošenja opterećenja i u slučaju dovoljno velikog zagrijavanja mogu otkazati. Posljedice takvog otkazivanja ovise o važnosti elementa za općenito ponašanje konstrukcije, pa mogu biti zanemarive ili pak kobne. Otkazivanje jednog elementa za vrijeme požara ne smije utjecati na nosivost cijele konstrukcije. Zato svi glavni elementi moraju zadržati otpornost na požar proporcionalnu pretpostavljenom riziku.

U normi EN 1993-1-2 [6] dan je pojednostavljeni model koji obuhvaća određivanje svojstava materijala pri povišenim temperaturama i proračun elemenata ovisno o unutarnjim silama kojima je izložen. Pojednostavljeni postupak proračuna sastoji se od tri koraka – u prvom se određuje kritična temperatura čelika, u drugom razvoj temperature u čeličnom poprečnom presjeku, a u trećem požarna otpornost čeličnog elementa.

Proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala (čvrstoće i deformacije) pri požaru reducirane su u normi EN 1993-1-2 [6] faktorom smanjenja koji je ovisan o temperaturi materijala. Povećanje temperature ugljičnih čelika uzrokuje degradiranje mehaničkih svojstava materijala i to se reflektira na njihove radne dijagrame. Zato su u normi EN 1993-1-2 [6] dani izrazi za određivanje temperaturno ovisnih dijagrama naprezanje-deformacija.

Proračun otpornosti čeličnog elementa na požar može se provesti i u temperaturnom području. Taj postupak proračuna otpornosti pri požaru provodi se prema sljedećim koracima:

- odabir odgovarajućih vrijednosti faktora prilagodbe  $\kappa = \kappa_1 \kappa_2$
- proračun stupnja iskorištenosti kod požara  $\mu_0$  u trenutku  $t = 0$
- određivanje kritične temperature za čelični nosač,
- definiranje faktora presjeka uključujući učinak sjene ( $A_m / V_{sh}$  za nezaštićene čelične elemente, te  $A_p / V$  za zaštićene čelične elemente, gdje  $A_m$  predstavlja ploštinu elementa po jedinici duljine,  $V$  volumen elementa po jedinici duljine, a  $A_p$  odgovarajuću ploštinu materijala za zaštitu od požara po jedinici duljine elementa,
- primjena nomograma za dobivanje vremena požarne otpornosti pomoću kritične temperature.

Za jednostavniji proračun požarne otpornosti čeličnih elemenata može se koristiti programski paket Elefir-EN [2], koji je usklađen s normama EN 1991-1-2 [8] i EN 1993-1-2 [6]. Upotreba tog računalnog programa automatizira značajan dio ručnog proračuna.

Jednostavni toplinski i mehanički modeli bazirani su na određenim pojednostavljenim pretpostavkama i zato su ponekad ograničavajući u proračunu konstrukcija. Primjerice, u jednostavnom toplinskom modelu pretpostavljamo jednaku raspodjelu temperature kroz cijeli element, što u stvarnosti nije slučaj. Ova ograničenja mogu se premostiti usvajajući napredne metode proračuna, temeljene na fundamentalnom fizičkom ponašanju elemenata pod zadanim uvjetima. One uključuju odvojene proračunske modele radi određivanja razvoja i raspodjele temperature u konstrukcijskim elementima i mehaničkog ponašanja konstrukcije ili nekog njezinog dijela.

Danas je razvijen velik broj računalnog programa za napredni proračun ponašanja konstrukcija u požaru. Neki od najpoznatijih su Abaqus, Ansys, Sofistik, OpenSEES, SAFIR, Infograph i TASEF. Metoda konačnih elemenata čini se kao najraširenija metoda koja se primjenjuje za napredne proračune raspodjele temperature.

Čak i u naprednim toplinskim modelima moraju se napraviti neka pojednostavljenja. U metodi konačnih elemenata, primjerice, geometrija konstrukcije aproksimirana je nizom pravaca ili krivulja drugog reda. Također, pretpostavljena je raspodjela temperature u svakom konačnom elementu. Temperatura je izračunana samo u određenim točkama elementa, najčešće u čvorovima, na mjestu spoja elemenata, te u određenim vremenskim intervalima. Kontakt između susjednih materijala smatra se idealnim. Jednostavan prijenos topline provođenjem pretpostavljen je u materijalima u kojima prijenos topline na lokalnoj razini uključuje previše složenih fenomena.

Ipak, metoda konačnih elemenata, kada se primjeni na ispravan način, daje dobru indicaciju raspodjele temperature izmjerene u čeličnim elementima tijekom požarnih ispitivanja.

### 3. Međunarodno Round Robin istraživanje

#### 3.1. Uvod

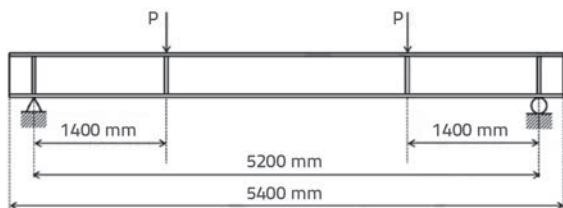
Tijekom nedavnog *Round Robin* istraživanja, RISE je okupio 12 institucija koje su neovisno provele proračun jednostavno oslonjenog nosača izloženog požaru. Među tim institucijama bila su sveučilišta, laboratoriji i konzultantske tvrtke, čiji se predstavnici smatraju stručnjacima u području požarnog inženjerstva (2. poglavlje u [1]). Analizirale su se razlike rezultata proračuna požarne otpornosti čeličnog nosača dobivenih naprednim metodama, te su se dodatno sva neovisna rješenja uspoređivala s rezultatima laboratorijskog ispitivanja. Istraživanje je provedeno u dvije faze – prva je bila preliminarna faza u kojoj se proračun provodio s nominalnim svojstvima materijala nosača i temperaturama kojima je bio izložen, a za drugu fazu sudionicima su bili na raspolaganju izmjereni podaci

o svojstvima čelika, kao i zabilježene temperature iz peći u kojoj je nosač ispitivan. Slična *Round Robin* požarna ispitivanja, čime je omogućena usporedba s *Round Robin* ispitivanjem metoda proračuna, proveo je EGOLF (European Group of Organizations for Fire Testing, Inspection and Certification) [5].

*Round Robin* istraživanje prikazano je ovdje sažeto za orijentaciju čitatelja, a sve pojedinosti mogu se naći u literaturi [1, 4].

### 3.2. Prva faza

Ispitni uzorak bio je čelični nosač profila HEB 300, klase čelika S355. Ukupna duljina slobodno oslonjenog nosača iznosila je 5400 mm, a raspon između oslonaca je bio 5200 mm, slika 3. Koncentrirane sile vrijednosti 100 kN nanosene su u dvije točke, 1400 mm od svakog oslonca. Ukupno primijenjeno opterećenje rezultira momentom od 140 kNm između točaka unosa sile. Ukrućenja hrpta debljine 15 mm bila su zavarena na čelični nosač nad osloncima i na mjestima koncentriranih opterećenja. Za potrebe požarnog ispitivanja, dva nosača ispitana su u istom ispitivanju, te su provedena dva identična ispitivanja.



Slika 3. Statički sustav ispitivanog nosača, preuzeto iz [1]

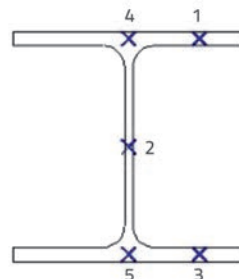
Tijekom ispitivanja mjereno je sljedeće:

- progib u sredini raspona;
- temperatura nosača na jedanaest lokacija: u sredini svake pojasnice i u sredini hrpta u sredini raspona (pet točaka), te u sredini po jedne gornje i jedne donje pojasnice i u sredini hrpta na udaljenosti 1200 mm od oslonaca (po tri točke);
- temperatura peći (zabilježena pomoću 20 pločastih termometara).

Nosač je bio nezaštićen i izložen požaru u horizontalnoj peći s tri strane – donje i dvije bočne strane, a gornja je strana bila zaštićena laganom betonskom pločom. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom EN 1365-3 [9], a standardni ISO 834 požar je simuliran prema EN 1363-1 [7].

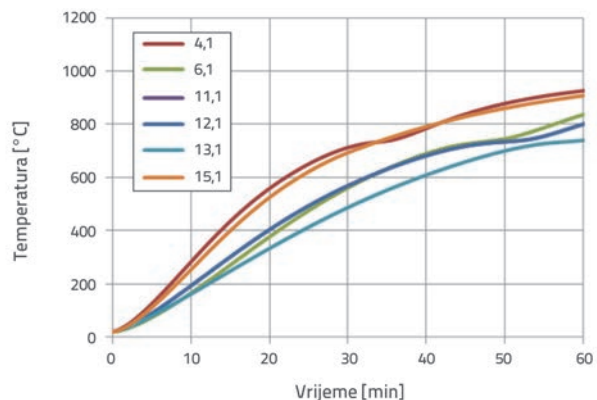
Od sudionika se tražilo da predoče podatke o slijedu temperatura čeličnog nosača, progiba nosača i o vremenu otkazivanja. Svi su sudionici za određivanje toplinske izloženosti čeličnog nosača koristili svojstva materijala dana u EN 1993-1-2 [6] te koeficijente prijenosa topline i toplinske granice dane u EN 1991-1-2 [8]. Svi različiti pristupi temeljeni su na odvojenoj analizi temperatura-pomak. Pristup proračunu temperature varirao je – neki sudionici koristili su pretpostavku svedenog kapaciteta, neki su uvrstili efekt sjene, a neki su uključili prijenos topline kroz lagani beton.

Sudionici su predočili izvješća o temperaturi na različitim lokacijama. Neke od tih lokacija nisu bile predviđene za ispitivanje. Rezultati su grupirani prema lokaciji (točkama), numerirano od 1 do 5 prema slici 4.

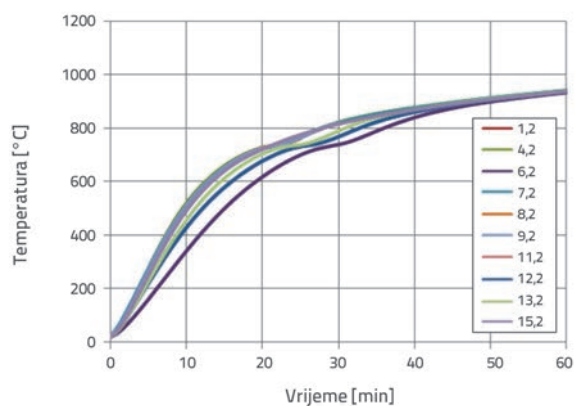


Slika 4. Točke u kojima su sudionici računali temperaturu, preuzeto iz [1]

Različite pretpostavke i različiti pristupi rezultirali su značajnom razlikom u izračunanim temperaturama. Na primjer, slika 5. pokazuje temperature dobivene za točku 1 (na sredini vanjskog dijela gornje pojasnice, a slika 6. prikazuju temperaturu u točki 2 u sredini hrpta. Krivulje na slikama 5. i 6. numerirane su prema sudionicima i mjestu na presjeku, tako da 4,1 označava temperaturu koju je izračunao sudionik broj 4, na mjestu 1.

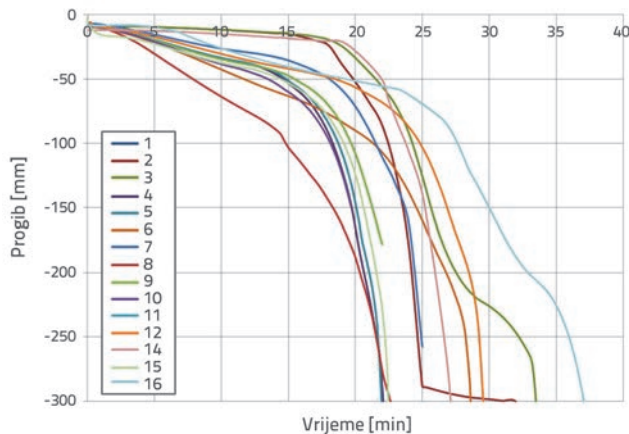


Slika 5. Izračunane temperature u točki 1, modificirano iz [4]



Slika 6. Izračunane temperature u točki 2, modificirano iz [4]

Slijed temperature progiba koje je predočilo 16 od 18 sudionika prikazan je na slici 7. Kao što se može vidjeti, postoji razlika među dostavljenim odnosima vrijeme-progib. Primjerice, progib u sredini raspona od 100 mm ostvaren je u vremenu između 15 i 28 minuta, a 300 mm u vremenu između 21 i 37 minuta. Ta razlika iznenađuje, a neujednačenost u izračunanim temperaturama čelika mogla bi se djelomično smatrati uzrokom.



Slika 7. Izračunani odnosi vrijeme-progib u sredini nosača (1. faza), modificirano iz [4]

Tablica 1. Vremena otkazivanja u minutama, podebljane vrijednosti označavaju mjerodavni kriterij

Oznaka sudionika	Vrijeme otkazivanja [min]	
	Progib [mm]	Brzina prirasta progiba [mm/min]
1	<b>21*</b>	-
2	<b>24</b>	18
3	<b>31</b>	21
4	<b>21</b>	16
5	<b>21</b>	16
6	<b>27</b>	21
7	<b>24</b>	19
8	<b>21</b>	14
9	<b>22</b>	17
10	<b>20**</b>	16
11	<b>28</b>	23
12	<b>28</b>	23
13	<b>28</b>	22
14	<b>26</b>	21
15	<b>22</b>	10
16	<b>34</b>	26
17	<b>38***</b>	-
18	<b>29***</b>	-

\*Proračun do graničnog progiba od 170 mm, progib od L/20 korišten kao kriterij otkazivanja, \*\*Proračun do graničnog progiba od 150 mm, koji je korišten kao kriterij otkazivanja, \*\*\* Pojednostavljene metode proračuna prema europskoj normi

Sudionici su pri određivanju vremena otkazivanja koristili različite kriterije. U tablici 1. prikazana su, stoga, vremena otkazivanja dobivena dodatnom analizom slijeda progiba kako bi svi rezultati odražavali jednak kriterij otkazivanja. Kriteriji otkazivanja opisani su u EN 13501-2 [10], što znači da otkazivanje nosivosti nastupa kad su prekoračena oba sljedeća kriterija:

- progib  $D = L^2 / 400 d$  [mm],
- brzina prirasta progiba  $dD / dt = L^2 / 9000 d$  [mm/min], gdje je  $L$  svijetli raspon ispitivanog uzorka u mm, a  $d$  udaljenost između krajnjih vlaknaca tlačnog i vlačnog područja poprečnog presjeka u hladnom stanju, u mm.

Iz tablice se jasno vidi da postoji značajna varijacija u dostavljenim vremenima otkazivanja. U usporedbi s naprednim metodama proračuna, upotreba pojednostavljenih metoda iz europskih normi (izvješća 17 i 18) rezultira duljim vremenima otkazivanja.

### 3.3. Druga faza

U sklopu *Round Robin* istraživanja sudionici su proveli i naknadnu analizu nakon što su im na uvid dani dodatni podaci mjereni tijekom ispitivanja. Ti podaci uključuju temperature mjerene u peći, temperature čelika mjerene na različitim mjestima u odnosu na prvu fazu, te izmjerenu granicu popuštanja čelika od kojeg je izrađen nosač. Podaci su dani kako bi se otklonilo što više neizvjesnosti proračuna, te poboljšala korelacija između predviđanja rezultata i zabilježenih rezultata ispitivanja. Ispitivanje je provedeno sve dok element nije dosegnuo oba kriterija otkazivanja prema EN 13501-2 [10]: kriterij progiba i kriterij brzine prirasta progiba. Kriterij brzine prirasta progiba prekoračen je nakon 26 minuta, a kriterij progiba dosegnut je nakon 31 minute. Ispitivanje je zaustavljeno odmah po dosezanju oba kriterija otkazivanja i element je uklonjen iz peći. Konačni deformirani oblik nosača prikazan je na slici 8.



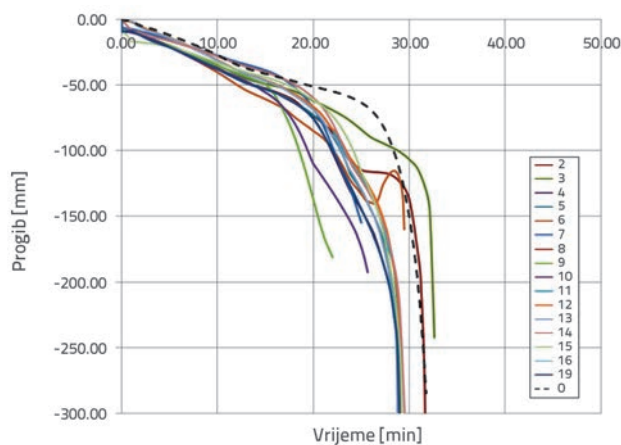
Slika 8. Fotografija nosača nakon ispitivanja, preuzeto iz [4]

Izmjerena granica popuštanja čelika je 447,5 MPa, što je znatno više u odnosu na nominalnu vrijednost od 355 MPa (S355). Podaci o vrijednostima temperature dani sudionicima dopunjeni su pretpostavljenim vrijednostima, jer je ispitivanje prekinuto kad je nosač otkazao. Na taj način vrijeme otkazivanja koje je dobiveno ispitivanjem nije otkriveno sudionicima.

Svi sudionici koji su sudjelovali u prvoj fazi nisu sudjelovali i u drugoj fazi istraživanja. Sudionici su dobivene podatke uzeli u obzir na različite načine:

- neki su primijenili izmjerene temperature na odgovarajuće dijelove nosača, bez "zaglađivanja" temperatura na prijelazu između hrpta i pojasnice (npr. primijenjena su tri niza slijeda zagrijavanja – jedan na gornjoj pojasnici, jedan na hrptu, a jedan na donjoj pojasnici)
- jedan sudionik nanio je izmjerene temperature na cijelu duljinu nosača
- drugi je primijenio izmjerene temperature u sredini raspona, te linearno smanjivao temperaturu do 80 % vrijednosti na krajevima nosača
- neki su sudionici koristili temperature mjerene u peći (mjerene pločastim termometrom) kao temperaturu radijacije i temperaturu plina u proračunu prijenosa topline
- neki su sudionici prilagodili koeficijent konvektivnog prijenosa topline i sposobnost emisivnosti čelika kako bi temperature čelika koje su izračunali što bolje odgovarale izmjerena.

Svi, osim jednog sudionika, prilagodili su krivulju naprezanje-deformacija čelika tako da odgovara višoj vrijednosti granice popuštanja. Slijed progiba koje su sudionici predočili u drugoj fazi prikazani su na slici 9. Krivulja 0 predstavlja rezultate laboratorijskog ispitivanja jednog od četiri ispitana nosača.



Slika 9. Niz progiba u drugoj fazi *Round Robin* istraživanja, modificirano iz [4]

Razlike u slijedovima progiba čine se manjima za veće progibe u drugoj fazi, nego u prvoj. Svakako postoji grupa rezultata koja općenito prati vrlo sličnu povijest progiba. U tablici 2. prikazane su vrijednosti požarne otpornosti dobivene dodatnom analizom s ciljem prilagodbe kriterijima otkazivanja iz EN 13501-2 [10].

Tablica 2. Vremena otkazivanja u minutama, podebljane vrijednosti označavaju mjerodavni kriterij

Oznaka sudionika	Progib [mm]	Brzina prirasta progiba [mm/min]
1	-	-
2	<b>31</b>	29
3	<b>32</b>	31
4	<b>28</b>	23
5	<b>28</b>	21
6	<b>30</b>	20
7	<b>25</b>	20
8	<b>25</b>	23
9	<b>25</b>	17
10	<b>25</b>	17
11	-	-
12	-	-
13	-	-
14	<b>29</b>	21
15	<b>28</b>	22
16	<b>33</b>	28
17	-	-
18	-	-
19	<b>28</b>	21

## 4. Doprinos međunarodnom Round Robin istraživanju

### 4.1. Općenito

Prikazuju se proračuni požarne otpornosti opisanog nosača pojednostavljenom metodom (Eurokod) i naprednom metodom (ANSYS), za problem sličan prvoj fazi i za problem identičan drugoj fazi *Round Robin* ispitivanja. Razlika između prve faze *Round Robin* studije i ovdje prikazane analize jest primijenjeno opterećenje, koje je u ovom slučaju 150 kN, a ne 100 kN. Proračun za prvu fazu je stoga ilustrativan i omogućuje usporedbu odgovora nosača izloženog različitim opterećenjima.

### 4.2. Proračun prema europskim normama

Proračun požarne otpornosti proveden je prema koracima danim u EN 1993-1-2 [6]. Prvi korak je odabir odgovarajućih vrijednosti faktora prilagodbe  $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$ . Vrijednost faktora prilagodbe  $\kappa_1$  za nejednoliku raspodjelu temperature po poprečnom presjeku za nezaštićeni nosač izložen požaru s tri strane je  $\kappa_1 = 0,70$ . Za nejednoliku raspodjelu temperature duž nosača, faktor prilagodbe iznosi  $\kappa_2 = 1,00$  u svim slučajevima osim na osloncima statički neodređenog nosača. Prema tome,  $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,70 \cdot 1,00 = 0,70$ .

Za nosač HEB 300 izrađen od čelika klase S355 (razred 1 poprečnog presjeka), stupanj iskorištenosti kod požara  $\mu_0$  u trenutku  $t = 0$  može se dobiti iz izraza

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,0,Rd}} = \frac{M_{fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_y / (\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \gamma_{M,fi})} = \frac{21000}{1869 \cdot 35,5 / (0,70 \cdot 1,00 \cdot 1,0)} = 0,22$$

gdje je:

- $E_{fi,d}$  - proračunski učinak djelovanja za požarnu situaciju
- $R_{fi,0,Rd}$  - pripadajuća proračunska požarna otpornost u trenutku  $t = 0$
- $M_{fi,Ed}$  - proračunski moment savijanja za požarnu situaciju
- $M_{fi,0,Rd}$  - proračunska otpornost na savijanje grede u trenutku  $t = 0$
- $W_{pl,y}$  - plastični moment otpora oko osi y-y
- $f_y$  - granica popuštanja čelika pri 20 °C
- $\kappa_1$  - faktor prilagodbe za temperaturu nejednoliku po poprečnom presjeku
- $\kappa_2$  - faktor prilagodbe za temperaturu nejednoliku duž grede
- $\gamma_{M,fi}$  - parcijalni faktor za relevantno svojstvo materijala, za požarnu situaciju.

Osim kada se razmatraju kriteriji deformiranja ili kada treba uzeti u obzir fenomene nestabilnosti, kritična temperatura ugljičnog čelika  $\theta_{a,cr}$  u trenutku  $t$  za jednoliku raspodjelu temperature u elementu smije se odrediti za svaki stupanj iskorištenja  $\mu_0$  u trenutku  $t = 0$ . Prema EN 1993-1-2 [6], kritična temperatura nosača HEB 300 za prvu fazu je:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left( \frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 39,19 \cdot \ln \left( \frac{1}{0,9674 \cdot 0,22^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 711 \text{ °C}$$

Razvoj temperature u čeličnom poprečnom presjeku ovisi o odnosu izložene površine čelika  $A$  i volumena čelika  $V$ . Prijenos topline razlikuje se za nezaštićeni ( $A_m$ ) i zaštićeni ( $A_p$ ) poprečni presjek. Ovaj odnos naziva se faktorom presjeka ( $A/V$ ) i definiran je, ovisno o tome je li presjek zaštićen ili nezaštićen, za različite oblike i izloženost isijavanju i prenošenju topline u tablicama 4.2 i 4.3 norme EN 1993-1-2 [6]. Za nezaštićeni čelični element profila HEB 300 očitano je faktor presjeka uključujući učinak sjene u iznosu  $(A_m/V)_{sh} = 54 \text{ m}^{-1}$ . Zadnji korak dokaza požarne otpornosti u temperaturnom području jest određivanje požarne otpornosti iz nomograma ovisno o faktoru presjeka i kritičnoj temperaturi čelika.

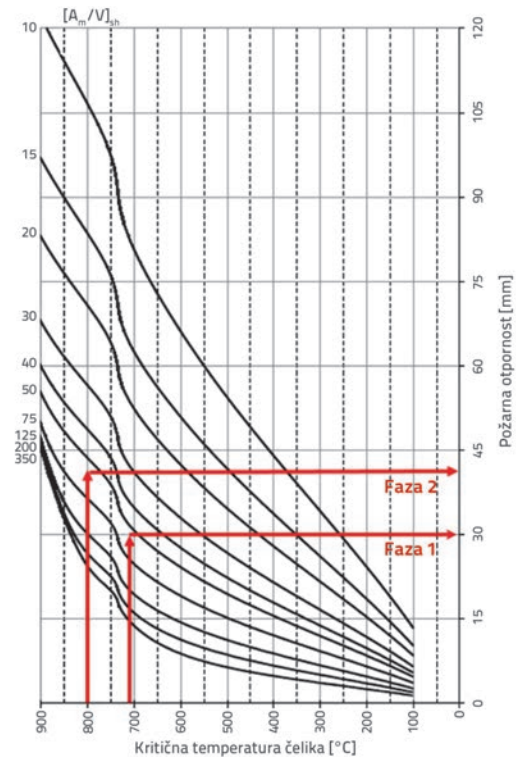
Za izračunanu kritičnu temperaturu čelika  $\theta_{a,cr} = 711 \text{ °C}$  i faktor presjeka  $(A_m/V)_{sh} = 54 \text{ m}^{-1}$  vrijednost požarne otpornosti  $t_{fi,d}$  očitana je iz nomograma za nezaštićene čelične elemente kao  $t_{fi,d} = 30 \text{ min}$ , slika 10. Slijedi proračun požarne otpornosti po opisanim koracima za drugu fazu:

$$\mu_0 = \frac{M_{fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_y / (\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \gamma_{M,fi})} = \frac{14000}{1869 \cdot 44,8 / (0,70 \cdot 1,00 \cdot 1,0)} = 0,12$$

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left( \frac{1}{0,9674 \cdot 0,12^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 802 \text{ °C}$$

$$(A_m/V)_{sh} = 54 \text{ m}^{-1}.$$

Za izračunanu kritičnu temperaturu čelika  $\theta_{a,cr} = 802 \text{ °C}$  i faktor presjeka  $(A_m/V)_{sh} = 54 \text{ m}^{-1}$  očitano je vrijeme otpornosti pri požaru  $t_{fi,d}$  iz nomograma za nezaštićene čelične elemente  $t_{fi,d} = 40 \text{ min}$  (slika 10.).



Slika 10. Nomogram za nezaštićene čelične elemente – prva i druga faza

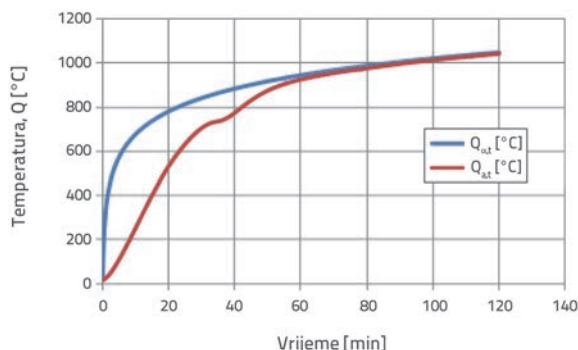
### 4.3. Proračun prema naprednim metodama (ANSYS)

#### 4.3.1. Prva faza

Čelični nosač izložen standardnom ISO požaru modeliran je u programskom paketu ANSYS [3]. Svojstva poprečnog presjeka i statičkog sustava uzeta su u obzir s nominalnim vrijednostima. Ukrućenja hrpta uključena su u model. Promjene svojstava materijala pri povišenim temperaturama, faktori redukcije za odnos naprezanje-deformacija, specifična toplina i toplinska provodljivost uzete su u obzir u skladu s EN 1993-1-2 [6].

Izloženost čeličnog nosača požaru u peći modelirana je prema pristupu danom u normama EN 1991-1-2 [8] i EN 1993-1-2 [6]. Raspodjela temperature u nosaču proračunata je koristeći *Steady-State Thermal* modul u ANSYS-u. Činjenica da gornja pojasnica nije izložena požaru, uzeta je u obzir kao rubni uvjet u analizi. Pri tome je pretpostavljeno da je temperatura gornje strane gornje pojasnice jednaka 20 °C i da koeficijent konvekcije

iznosi 25 W/m<sup>2</sup>C. Sve druge strane presjeka imaju temperaturu prikazanu krivuljom Q<sub>g</sub> na slici 11. Krivulja Q<sub>g</sub> predstavlja temperaturu plina – ISO krivulju.



Slika 11. ISO požarna krivulja plina i maksimalna temperatura u čeličnom nosaču, prva faza

Otkazivanje nosača tijekom ispitivanja promatrano je kroz kriterije nosivosti – prekoračenje graničnih vrijednosti progiba (D [mm]) i brzine prirasta progiba (dD/dt [mm/min]). Uz kriterije dane u normi EN 1363-1 [7], zanimljivo je primijeniti i kriterije prema britanskoj normi BS 476, dio 20 [11]. U izrazima koji slijede L je raspon nosača u milimetrima, a d je visina profila u milimetrima.

a) EN 1363-1 [7]:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot d} = \frac{5200^2}{400 \cdot 300} = 225 \text{ mm}$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 \cdot d} = \frac{5200^2}{9000 \cdot 300} = 10 \text{ mm/min}$$

b) BS 476, dio 20 [11]:

$$D = \frac{L}{20} = \frac{5200}{20} = 260 \text{ mm}$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 \cdot d} = \frac{5200^2}{9000 \cdot 300} = 10 \text{ mm/min, ako je prekoračena}$$

granična vrijednost progiba od L / 30 = 5200/30 = 173 mm.

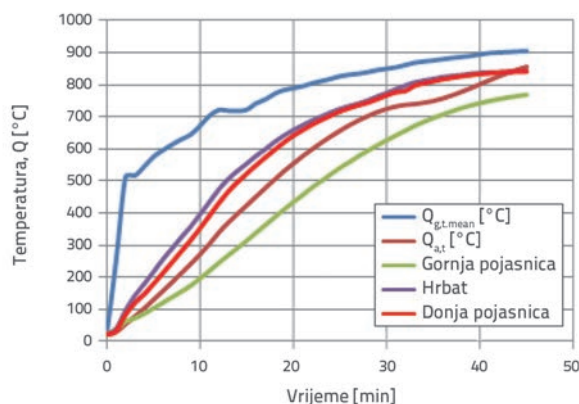
Prema EN 1363-1 [7], zabilježeno je da vrijeme otkazivanja iznosi 21,7 min, jer je tada dosegnuta granična brzina prirasta progiba. U tom trenutku brzina prirasta progiba iznosila je 10,1 mm/min, središnji progib nosača je 48 mm (~L/110), a maksimalna temperatura nosača 571 °C.

Prema BS 476, dio 20 [11], vrijeme otkazivanja iznosi 25,5 min, jer je tada dosegnuta granična vrijednost progiba (L/30 = 5200/30 = 173 mm), a brzina prirasta progiba je prekoračena. U tom trenutku brzina prirasta progiba iznosila je 43,1 mm/min, središnji progib nosača 173 mm, a maksimalna temperatura nosača 636 °C.

### 4.3.2. Druga faza

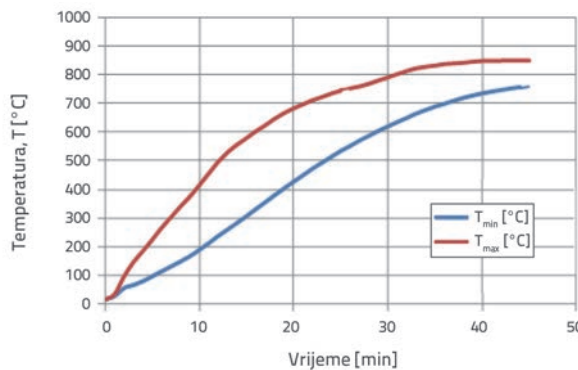
Umjesto nominalne vrijednosti granice popuštanja čelika od 355 MPa, u drugoj fazi korištena je prosječna izmjerena vrijednost (447,5 MPa). Modeliranje toplinske izloženosti čeličnog nosača požaru iz peći aproksimirano je izravnim nanošenjem izmjerenih temperatura na čelični profil (gornju pojasnicu, hrbat i donju pojasnicu) (slika 12.). Također je korištena mjerena temperatura u peći.

U ovoj fazi ponovno je korišten *Steady-State Thermal* modul u ANSYS-u. Pretpostavljeno je da je temperatura gornje pojasnice jednaka 19 °C i da koeficijent konvekcije iznosi 25 W/m<sup>2</sup>C.



Slika 12. Temperatura zraka u požarnom odjeljku i temperatura čeličnog nosača (izračunane i izmjerene vrijednosti)

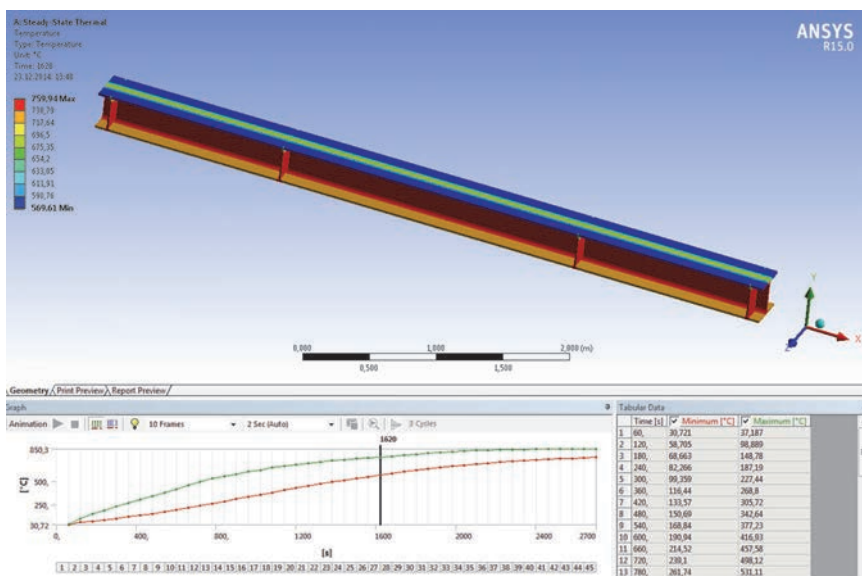
Na slici 13. prikazane su maksimalne i minimalne temperature razvijene u čeličnom nosaču tijekom simulacije požara. Maksimalna temperatura razvijena je u hrptu, a minimalna u gornjoj pojasnici.



Slika 13. Minimalna i maksimalna temperatura u čeličnom nosaču, druga faza

Kao što je već konstatirano, u numeričkoj simulaciji korištene su krivulje naprezanje–deformacija s 0,2 postotnom zaostalom deformacijom pri povišenim temperaturama, te faktori smanjenja za modul elastičnosti – oboje preuzeto iz EN 1993-1-2 [6]. S ulaznim podacima iz druge faze postignuta je relativno dobra podudarnost s ponašanjem koje je pokazao eksperiment, slika 9, sudionik 14.





Slika 14. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču u trenutku otkazivanja

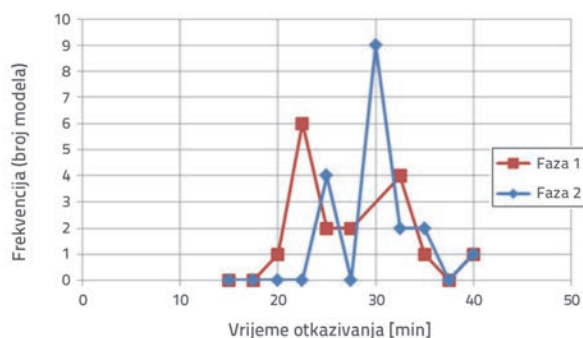
Prema HRN EN 1363-1 [7], vrijeme otkazivanja iznosi 27,0 min, jer je tada dosegnuta granična brzina prirasta progiba. U tom trenutku brzina prirasta progiba iznosila je 10,46 mm/min, središnji progib nosača 150 mm, a maksimalna temperatura nosača 760 °C. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču u trenutku neposredno prije otkazivanja dobivena je u ANSYS-u i prikazana je na slici 14.

Prema BS 476 Dio 20 [11], požarna otpornost iznosi 28 min jer je tada dosegnuta granična vrijednost progiba 173 mm, a brzina prirasta progiba je prekoračena. U tom trenutku brzina prirasta progiba iznosila je 23 mm/min, središnji progib nosača 173 mm, a maksimalna temperatura nosača 769 °C.

## 5. Usporedba rezultata i rasprava

### 5.1. Rasprava o rezultatima Round Robin istraživanja

Vrijednosti požarne otpornosti koje su poslali sudionici u prvoj fazi *Round Robin* istraživanja (tablica 1.) znatno se razlikuju, [1]. Jasno se vidi da rezultati dobiveni pojednostavljenim metodama prema europskim normama (proračuni 17 i 18) daju veću požarnu otpornost u odnosu na rezultate proračuna prema naprednim metodama.



Slika 15. Frekvencije prilagođenih rezultata, modificirano iz [4]

Uzimajući u obzir sve rezultate prve faze, osim rezultata dobivenih pojednostavljenim metodama, srednja vrijednost požarne otpornosti iznosi 24,9 min, standardna devijacija 4,1 min, a koeficijent varijacije 17 %.

Srednja vrijednost požarne otpornosti druge faze (tablica 2.) iznosi 28,2 min, standardna devijacija 2,7 min, a koeficijent varijacije 9,7 %. Radi usporedbe, frekvencija rezultata požarne otpornosti za obje faze prikazana je na slici 15. Očito je da je rasipanje rezultata uže za drugu fazu. Jednostavna usporedba z-vrijednosti napravljena je za sve rezultate *Round Robin* istraživanja, te je pokazano da je ispravnost svih proračuna, osim proračuna pojednostavljenim metodama, statistički prihvatljiva.

### 5.2. Usporedba rezultata po različitim metodama proračuna

Prikazuje se usporedba vrijednosti požarne otpornosti dobivene pojednostavljenim metodama prema europskim normama u točki 4.1 i naprednom metodom prema programu ANSYS [3] u točki 4.2. Unutar pojednostavljenih metoda dani su rezultati za ručni proračun i proračun u programu Elefir-EN [2]. Tablica 3. sadrži rezultate za prvu fazu, a tablica 4. rezultate druge faze *Round Robin* istraživanja.

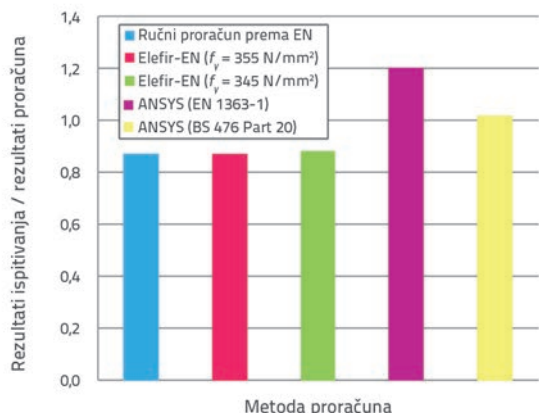
Tablica 3. Vrijednosti požarne otpornosti koje su izračunane na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu za prvu fazu [12]

Metoda / kriterij		Požarna otpornost $t_{f,d}$ [min]
Ručni proračun prema europskim normama		30,0
Proračun u programu Elefir-EN	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$	30,0
	$f_y = 345 \text{ N/mm}^2$	29,6
Proračun naprednim metodama (ANSYS)	EN 1363-1 [7]	21,7
	BS 476-20 [11]	25,5

Srednja vrijednost požarne otpornosti, izračunana za prvu fazu različitim metodama, iznosi  $\bar{t}_{f,d} = 27,4$ , min standardna devijacija  $\sigma = 3,69$  min, a koeficijent varijacije  $V = 13,5$  %. Uspoređujući vrijednost dobivenu u laboratoriju (26 min) s rezultatima prve faze (tablica 3.), vidljivo je da proračun prema europskim normama, ručno i programom Elefir-EN [2], znatno precjenjuje otpornost elementa. Ako se za elemente s debljinom većom od 16 mm koristi čelik s manjom granicom popuštanja

$f_v = 345 \text{ N/mm}^2$ , vrijednost otpornosti malo se bolje poklapa s eksperimentalnom vrijednošću.

S druge strane, napredne metode daju nešto konzervativnije rezultate na strani veće pouzdanosti. Kriterijem otkazivanja prema europskoj normi [7] dobije se konzervativnije rješenje u odnosu na ono dobiveno primjenom kriterija prema britanskoj normi [11]. Radi preglednosti usporedbe, omjeri rezultata laboratorijskog ispitivanja (26 min) i rezultata proračuna za prvu fazu prikazani su po metodama na slici 16.



Slika 16. Omjer rezultata požarne otpornosti iz ispitivanja (26 min) i rezultata proračuna po metodama za prvu fazu istraživanja (iz tablice 3)

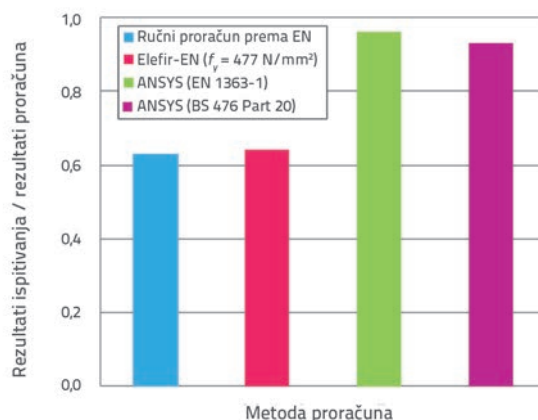
Ipak, bilo koji zaključci dobiveni usporedbom laboratorijskog ispitivanja i prve faze istraživanja ne mogu se smatrati relevantnim, jer ulazni podaci nisu kompatibilni. Zato bi rezultate druge faze (tablica 4.) trebalo promatrati kao mjerodavne. Srednja vrijednost požarne otpornosti proračunata za drugu fazu različitim metodama iznosi  $t_{fid} = 34,1$  min, standardna devijacija  $\sigma = 7,66$  min te koeficijent varijacije  $V = 22,5 \%$ .

Tablica 4. Vrijednosti požarne otpornosti koje su izračunane na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu za drugu fazu [12]

Metoda / kriterij		Požarna otpornost $t_{fid}$ [min]
Ručni proračun prema europskim normama		41,0
Proračun u programu Elefir-EN $f_v = 447,5 \text{ N/mm}^2$		40,5
Proračun naprednim metodama (ANSYS)	EN 1363-1 [7]	27,0
	BS 476- 20 [11]	28,0

Druga faza pokazuje odstupanje i u pojednostavljenim i u naprednim metodama proračuna. Pokazalo se da rezultati normiranog proračuna, zbog povećane granice popuštanja, daju još veću otpornost i više odstupaju od eksperimentalnog rezultata (26 min). U usporedbi s pojednostavljenim

metodama, proračunom u ANSYS-u [3], otpornosti se bolje poklapaju s rezultatom laboratorijskog ispitivanja. Ipak, tako utvrđena otpornost nešto je veća od eksperimentalne vrijednosti. Kriteriji otkazivanja prema europskoj normi [7] i u ovoj fazi daju nešto konzervativnije rješenje u odnosu na kriterije u britanskoj normi [11]. Iako niti jedno rješenje nije zadovoljavajuće s obzirom na rezultat dobiven ispitivanjem, rješenje programskim paketom ANSYS [3] uz kriterij otkazivanja prema EN 1363-1 [7] najbolje procjenjuje stvarno ponašanje. Omjeri rezultata laboratorijskog ispitivanja (26 min) i rezultata proračuna po metodama za drugu fazu prikazani su na slici 17.



Slika 17. Omjer rezultata požarne otpornosti iz ispitivanja (26 min) i proračuna po metodama za drugu fazu istraživanja (iz tablice 4)

## 6. Zaključak

Dva su uzroka velikog rasipanja rezultata *Round Robin* istraživanja - usvojene pretpostavke koje ovise o vještini sudionika i načinu promjene odabrane metode, te činjenica da kriteriji otkazivanja kojima se služe sudionici nisu usklađeni. Neki su od njih koristili kriterije prema europskim normama, a neki i druge nasumične kriterije. Upravo taj veliki izbor metoda i različitost kriterija otkazivanja doveli su do znatne neujednačenosti rezultata simulacije ovog naizgled "trivijalnog" problema.

Suprotno očekivanju, pokazano je da proračun požarne otpornosti "običnog" čeličnog konstrukcijskog elementa prema pojednostavljenoj metodi u europskoj normi (6) ne daje konzervativna rješenja, odnosno ta norma precjenjuje njegovu požarnu otpornost. Zbog korištenja izmjerenih ulaznih podataka u drugoj fazi proračuna, odstupanje rezultata koje daje norma od onih koje daje ispitivanje još je i veće. Ti rezultati jasno upućuju na činjenicu da bi metode za proračun požarne otpornosti dane u europskim normama trebalo preispitati.

Napredne metode temeljene na metodi konačnih elemenata očekivano se bolje poklapaju s eksperimentalnim rezultatima. Međutim, problem naprednih metoda procjene požarne otpornosti jest velika neujednačenost u načinu modeliranja, u odabiru kriterija otkazivanja te značajnoj podložnosti

subjektivnim procjenama projektanta. U nastojanju smanjenja neujednačenosti rezultata dobivenih naprednim metodama i omogućavanja usporedbe s drugim učincima, prvi

značajan korak je definiranje i usuglašavanje jedinstvenog konzistentnog kriterija otkazivanja koji će biti pouzdan i lagan za primjenu inženjerima u praksi.

## LITERATURA

- [1] Lange, D., Boström, L.: Round Robin on calculations: Steel beam with standard fire exposure, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, 2015.
- [2] Elefir-EN, Fire Design of Steel Structural Members According to Eurocode 3, 2010.
- [3] ANSYS 14.5 - User's Manual (Version 14.5), Houston, TX, USA: Swanson Analysis Systems Inc., 2012.
- [4] Lange, D., Boström, L.: A Round Robin study on modelling the fire resistance of a loaded steel beam, Fire Safety Journal, 92 (2017), pp. 64-76.
- [5] Dumont, F., Boström, L., Lukomski, M., van den Berg, G.: Summary Report of the EGOLF Round-Robin Nr. TC2 14-1 in Fire Resistance Testing, 2015.
- [6] EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, Bruxelles, 2005, AC: 2009.
- [7] EN 1363-1, Fire resistance tests - Part 1: General Requirements, Bruxelles, 2012.
- [8] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire, Bruxelles, 2002, AC: 2013.
- [9] EN 1365-3, Fire resistance tests for loadbearing elements - Part 3: Beams, Bruxelles, 1999.
- [10] EN 13501-2, Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services, Brussels, 2003.
- [11] BS 476-20, Fire Tests on Building materials and structures - Part 20. Method of test for determination of the fire resistance of elements of construction (General principles), 2011.
- [12] Milanović, M., Rogič, I., Šitum, A.: Procjena metoda za proračun požarne otpornosti čeličnog nosača, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Studentski rad za Rektorovu nagradu (mentor D. Skejić), Zagreb, 2015.