

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

MAJA MILANOVIĆ, IVANA ROGIĆ, ANA ŠITUM

**PROCJENA METODA ZA PRORAČUN POŽARNE
OTPORNOSTI ČELIČNOG NOSAČA**

ZAGREB, 2015.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc. dr. sc. Davora Skejića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2014./2015.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Općenito	1
1.2. Protupožarna zaštita	2
1.3. Općenito o projektiranju konstrukcija izloženih požaru	5
2. HIPOTEZA I CILJEVI RADA	10
3. METODE ISTRAŽIVANJA	12
3.1. Ispitivanja čeličnih nosača izloženih požaru.....	12
3.2. Normirane metode proračuna.....	16
3.2.1. Proračun prema europskim normama	16
3.2.1.1. Požarno opterećenje na konstrukciju	16
3.2.1.2. Otpornost na požar	21
3.2.2. Proračun programskim paketom Elefir-EN	32
3.3. Napredne metode proračuna	34
3.3.1. Toplinski odziv.....	35
3.3.2. Mehanički odziv	39
3.3.3. Programski paket ANSYS	41
4. MEĐUNARODNA ROUND ROBIN STUDIJA	43
4.1. Uvod.....	43
4.2. <i>Round Robin</i> studija – prva faza	43
4.2.1. Ulazni podaci i zahtjevi	43
4.2.2. Pristup modeliranju	45
4.2.3. Temperature čeličnog nosača	45
4.2.4. Povijest progiba.....	49
4.2.5. Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja.....	49
4.3. Rezultati laboratorijskog ispitivanja	50
4.4. <i>Round Robin</i> studija – druga faza.....	54
4.4.1. Dodatne informacije u odnosu na prvu fazu studije i zahtjevi	54
4.4.2. Promjene u modeliranju prijenosa topline i mehaničkom modelu.....	57
4.4.3. Povijest progiba.....	58
4.4.4. Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja.....	59
5. DOPRINOS MEĐUNARODNOJ ROUND ROBIN STUDIJI	60

5.1.	Uvod.....	60
5.2.	Proračun prema europskim normama	60
5.2.1.	Ručni proračun prema europskim normama	60
5.2.1.1.	Prva faza	60
5.2.1.2.	Druga faza	62
5.2.2.	Proračun u programu Elefir-EN	64
5.2.2.1.	Prva faza ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$)	65
5.2.2.2.	Prva faza ($f_y = 345 \text{ N/mm}^2$)	67
5.2.2.3.	Druga faza ($f_y = 447 \text{ N/mm}^2$)	68
5.3.	Proračun prema naprednim metodama (ANSYS)	70
5.3.1.	Prva faza.....	70
5.3.1.1.	Pristup modeliranja	70
5.3.1.2.	Temperature čeličnog nosača	71
5.3.1.3.	Povijest progiba	73
5.3.1.4.	Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja	73
5.3.2.	Druga faza	74
5.3.2.1.	Pristup modeliranja	74
5.3.2.2.	Temperature čeličnog nosača	76
5.3.2.3.	Povijest progiba	77
5.3.2.4.	Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja	78
6.	USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA	79
6.1.	Diskusija rezultata različitih metoda proračuna.....	79
6.2.	Diskusija rezultata <i>Round Robin</i> studije	82
6.2.1.	Prva faza.....	82
6.2.2.	Druga faza	84
7.	ZAKLJUČAK	86
7.1.	Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja	86
7.2.	Smjernice za daljnja istraživanja	87
8.	ZAHVALA	88
9.	POPIS LITERATURE.....	89
10.	SAŽETAK	95
11.	SUMMARY.....	97

1. UVOD

1.1. Općenito

Požar je svako nekontrolirano gorenje koje ugrožava sigurnost ljudi i uzrokuje uništavanje materijalnih dobara, a prema novim europskim normama jedno je od ekstremnih djelovanja na konstrukcije. Katastrofalno rušenje World Trade Center tornjeva dovelo je do globalnog povećanja svijesti o važnosti požarne otpornosti konstrukcija i učinilo ju je sve do danas 'gorućom' temom.

Prema službenim statistikama Republike Hrvatske za razdoblje od 1997.-2004. godine, u prosjeku se godišnje dogodi 3612 požara, od čega 79 % požara građevina, [1]. Prema dosadašnjim znanstvenim spoznajama o požarima, njihovom uzroku i širenju, nije moguće predvidjeti gdje i kada će nastati požar. Od svih faktora zbog kojih nastaje požar, najznačajniji je ipak ljudski. Kako bi se mogao shvatiti utjecaj požara na konstrukciju, potrebna su temeljita interdisciplinarna znanstvena istraživanja na razini materijala, konstrukcije i samog fenomena požara.

Zastarjela regulativa zaštite od požara ozbiljno je ograničavala primjenu čeličnih konstrukcija. Usuglašavanje projektne dokumentacije s takvom regulativom dovodilo je do niza problema. Primjerice, ukupni troškovi izgradnje čeličnih konstrukcija znatno su se povećavali, čelik kao građevinski materijal postajao je nekonkurentan, a arhitektima se ograničavala mogućnost da ostvare vizualni dojam koji se dobije kad je čelična struktura vidljiva, [2].

U posljednja dva desetljeća primjenom metoda inženjerstva pouzdanosti postignut je znatan napredak u razumijevanju ponašanja čeličnih konstrukcija pri požaru. Danas se može opravdano tvrditi da se u tom području zna više o čeliku, nego o bilo kojem drugom materijalu. Intenzivna istraživanja dovela su do razvoja brojnih metoda projektiranja koje daju učinkovita inženjerska rješenja za zgrade u požaru. To mogu biti jednostavnije elementarne metode ili napredne metode požarnog inženjerstva. Požarnim inženjerstvom, kao specijalističkom disciplinom koja kombinira inženjerstvo pouzdanosti s modeliranjem metodom konačnih elemenata, može se predvidjeti

realno ponašanje konstrukcije pri požaru i na temelju toga odrediti mjere protupožarne zaštite.

Čelične konstrukcije zauzimaju sve veći udio u novogradnji, a njihove prednosti osobite su izražene kod višekatnih građevina, kod kojih se često koriste kao optimalno rješenje. Budući da se cijena protupožarne zaštite smanjuje, [3], očekuje se još veća popularizacija čelika, stoga je potrebno istraživati pouzdanost postojećih propisa za projektiranje požarne sigurnosti i otpornosti.



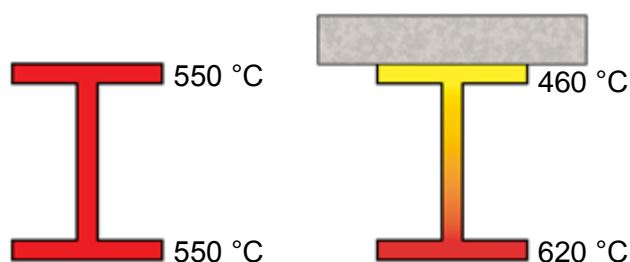
Slika 1.1. Razorno djelovanje požara na čelične konstrukcije

Požar je izvanredna situacija čije se razarajuće djelovanje na konstrukciju treba u što većoj mjeri spriječiti, predvidjeti i na odgovarajući način modelirati. Projektom se treba dokazati da konstrukcija ima zadovoljavajuću otpornost na požar, kako njegova nekontrolirana priroda ne bi uzrokovala velike štete imovine i u krajnjem slučaju gubitke života (slika 1.1.). Budući da su proračuni požarne otpornosti prema normama i metodom končanih elemenata podložni značajnom rasipanju rezultata, od iznimne je važnosti da se postojeći postupci i programski paketi učine pouzdanijim. Zato ćemo u ovom radu uspoređivati rezultate laboratorijskog ispitivanja požarne otpornosti čeličnog nosača s rezultatima koje daje Eurokod, te rezultatima naprednih metoda proračuna– kako bismo utvrdili stupanj njihove točnosti.

1.2. Protupožarna zaštita

Čelik je anorganski materijal i kategorizira se kao nezapaljiv. Ipak, pri povišenim temperaturama gubi nosivost. Za očuvanje sigurnosti i nosivih svojstava potrebna je

stoga protupožarna zaštita. Protupožarna zaštita je skup mjera i postupaka koji se poduzimaju radi sprječavanja nastanka i širenja požara, utvrđivanja i uklanjanja uzroka požara, otkrivanja i gašenja požara, te pružanja pomoći pri uklanjanju posljedica uzrokovanih požarom. Njome moramo osigurati da temperatura čelika ne prijeđe 550 °C kod elemenata izloženih požaru sa sve četiri strane (primjerice stupova), odnosno 620 °C za elemente zaštićene betonskom pločom s gornje strane (slika 1.2.).



Slika 1.2. Raspodjela temperature u čeličnim profilima

Za grede koje nose betonske stropove navedena granična temperatura je veća, jer se odnosi samo na donji dio presjeka. Naime, raspodjela temperature po visini poprečnog presjeka u ovom slučaju nije jednolika. Gornja pojasnica ima nižu temperaturu u odnosu na hrbat i donju pojasnicu, jer betonska ploča kondukcijom odvodi toplinu. Obično se maksimalne temperature od 550/620 °C smatraju konzervativnima, [3], jer se pretpostavlja da su kritične za potpuno napregnute elemente, a oni najčešće nisu u potpunosti napregnuti na sobnoj temperaturi; veza sila-naprezanje-temperatura čelika na povišenim temperaturama, korištena da se dobiju ove temperaturne vrijednosti previše je pojednostavljena i u stvarnosti se elementi ne ponašaju kao pojedinačni dijelovi.

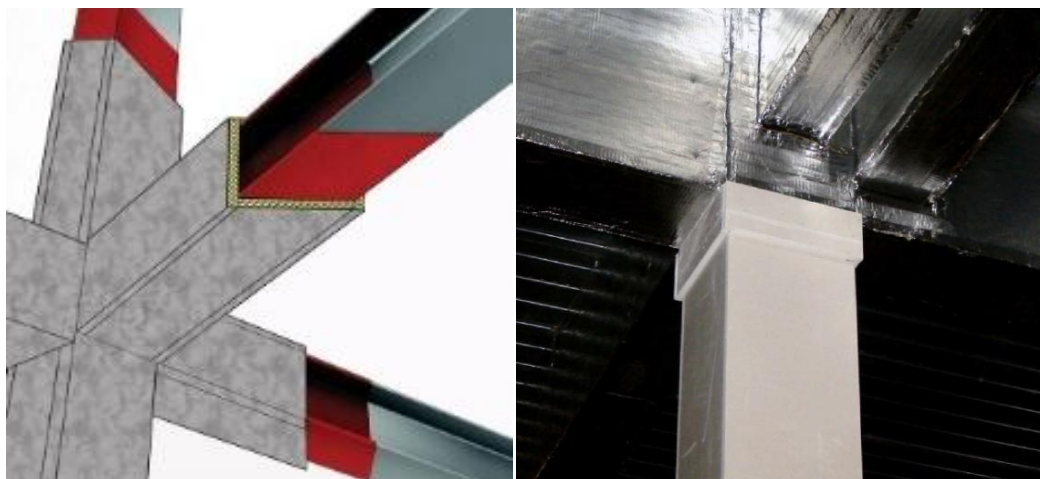
Mjere zaštite od požara mogu biti pasivne ili aktivne.

Sustavi aktivne zaštite djeluju u samoj fazi razvoja požara, a rade na principu pobude i odziva. Obuhvaćaju uređaje za detekciju požara, uređaje za detekciju eksplozivnih plinova, aparate za gašenje požara, uređaje za ventilaciju, sprinklere i podjelu objekta na požarne odjeljke.

Pasivne mjere protupožarne zaštite dizajnirane su tako da zadrže požar na ograničenom području i uspore njegovo napredovanje. Za razliku od aktivne

protupožarne zaštite, pasivna zaštita nije namijenjena gašenju požara. Ovakav tradicionalni pristup, kojim se postižu zahtijevane razine sigurnosti tako da se nanosi protupožarna zaštita na sve izložene dijelove čelika, još i danas je najpopularniji, [3]. Pasivne mjere zaštite od požara mogu se podijeliti u dvije kategorije, ne-reaktivni tip zaštite, u koji spadaju pločaste obloge i prskanje sprejevima, te reaktivni tip zaštite, u koji spadaju premazi. Zaštita konstrukcija premazima može se izvršiti u tvornici ili na gradilištu.

Pločaste obloge pružaju čist, uokviren izgled i imaju dodatnu prednost što se "suho" nanose na stupove i druge elemente, te se mogu postavljati na nepremazani čelik. Postoje lagane i teške pločaste obloge. Lagane ploče nisu prikladne za finu završnu obradu, pa se koriste tamo gdje estetika nije bitna (slika 1.3.), za razliku od teških ploča koje su pogodne za dekorativnu završnu obradu, pa se koriste gdje je estetika važna.



Slika 1.3. Zaštita stupa laganom pločastom oblogom

Zaštite sprejevima nanosi se "mokrim" prskanjem na elemente. Ovaj proces može izazvati poprilično nereda, te se koristi na izloženim dijelovima koji zahtijevaju dodatnu obradu gipsanjem ili pločama. Zaštita prskanjem ograničena je na grede sa visećim stropovima.

U zaštitu premazima spadaju materijali inertni na niskim temperaturama, a koji kemijski reagiraju na višim temperaturama (200-250 °C) i tako pružaju izolaciju čeličnim elementima. Premazi reagiraju tako da nabubre u obliku pjenaste strukture, u omjeru 50:1, odnosno 1 mm tanki premaz povećat će se na 50 mm u reakciji s

požarom (slika 1.4.). Prednosti zaštite ovog tipa su to što se može nanositi u tvornici i na gradilištu, na teško dostupna mjesta, na razne oblike elemenata, te za dobivanje atraktivnih završnih površina. Upotreba zaštite premazima sve se više povećava, posebno kada se nanosi u tvornici, što značajno smanjuje vrijeme izgradnje i povećava kvalitetu.



Slika 1.4. Zaštita elemenata premazom – početni izgled (lijevo) i reakcija uslijed požara (desno), [3]

Izbor protupožarne zaštite je važna odluka koja se mora pomno razmotriti u početnim fazama projektiranja, inače može uzrokovati prekoračenje rokova izgradnje, a time i povećanje troškova. Protupožarna zaštita je skupa, primjerice, u jednoj višekatnoj čeličnoj zgradi zaštita od požara iznosi otprilike 18 % od ukupne cijene koštanja, [4]. Ključ uspješne protupožarne zaštite je korištenje aktivne i pasivne zaštite zajedno, jer se tako povećava vjerojatnost da korisnici sigurno napuste zgradu i smanjuje se razina štete na konstrukciju.

1.3. Općenito o projektiranju konstrukcija izloženih požaru

Postoje brojni pristupi kojima se omogućava sigurno projektiranje konstrukcija izloženih požaru. Oni sežu od jednostavnih pristupa kojima se realno ponašanje konstrukcije i požara zanemaruje, do naprednijih pristupa koji, uzimajući u obzir realno ponašanje konstrukcije i požara, dopuštaju izgradnju pouzdanije, robusnije i vrlo često ekonomičnije konstrukcije. U naprednim metodama velika točnost u procjeni sigurnosti konstrukcije omogućena je uvođenjem probablističkog i/ili

semiprobabilističkog pristupa u određivanju i opterećenja na konstrukciju i njezine otpornosti. Upravo semiprobabilistički pristup baza je razvoja europskih normi, tj. Eurokodova, čiji je dio EN 1991-1-2, [5], posvećen djelovanjima na konstrukcije izložene požaru. Konstrukcija treba biti projektirana i izgrađena tako da u slučaju izbijanja požara održi kapacitet nosivosti određeni vremenski period, ograniči širenje požara i dima u konstrukciji, ograniči širenje požara i dima na okolne konstrukcije, omogući pravovremenu evakuaciju korisnika građevine, te omogući sigurnost tima za spašavanje. Cilj požarnog inženjerstva je primjena znanstvenih i inženjerskih principa na učinke požara kako bi se smanjio gubitak života i oštećenje imovine.

Dakle, projektni ciljevi, [6], su:

1. Kontrola zapaljenja

Uzima se u obzir kontroliranjem zapaljivosti materijala konstrukcije, održavanjem konstrukcije posebnim premazima ili upravljanjem požarnom sigurnosti, primjerice zabranom pušenja.

2. Kontrola mogućnosti bijega

Ovo se može kontrolirati osiguravanjem zakonom propisanih uvjeta i pomagala koja omogućuju bijeg iz požarom zahvaćenog sektora, ili educiranjem korisnika građevine.

3. Otkrivanje požara

Osigurava se instalacijom sustava koji omogućuje otkrivanje novonastalog požara, i to u što ranijoj fazi (npr. ugradnjom alarmnog sustava sa sensorima za dim).

4. Kontrola širenja požara

Podrazumijeva kontrolu širenja požara unutar građevine kao i na susjedne objekte. To se može ostvariti ugradnjom razdjelnih sustava, kontrolom udaljenosti između građevina ili mehaničkim pomagalima (primjerice ventilacijskim sustavom, sprinklerima itd.).

5. Kontrola kolapsa konstrukcije

Pokriva projektne zahtjeve na nosivi kapacitet i stabilnost konstrukcije u cjelini ili za neki dio tijekom požara.

Projektiranje po principima požarnog inženjerstva uključuje četiri faze. U prvoj fazi modelira se scenarij požara kako bi se odredila požarom oslobođena toplina koja povećava temperaturu plinova u građevini. U drugoj fazi modelira se prijenos topline između plinova i konstrukcije, što se ostvaruje strujanjem, provođenjem i isijavanjem. U trećoj fazi procjenjuje se mehaničko opterećenje u uvjetima požara, koje je manje od maksimalnog mehaničkog opterećenja za ambijentalnu temperaturu zbog smanjenih faktora sigurnosti za mehaničko opterećenje pri požaru. U posljednjoj fazi određuje se odgovor konstrukcije pri povišenoj temperaturi uzrokovanoj požarom.

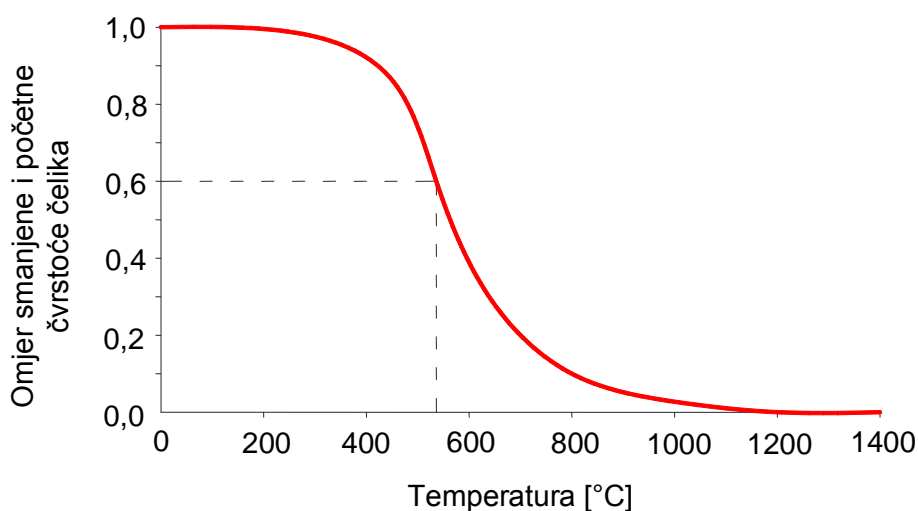
U normama su dani principi proračuna koji se mogu koristiti za većinu konstrukcija. Za kompleksne probleme mora se, pak, na neki način predvidjeti ponašanje konstrukcije sa zadovoljavajućim stupnjem točnosti. U tu svrhu najčešće se koristi analiza metodom konačnih elemenata. Ponašanje konstrukcije pri požaru složenije je od ponašanja pri ambijentalnoj temperaturi, jer promjene u svojstvima materijala i toplinski pomaci uzrokuju njezin nelinearan i neelastičan odgovor.

Jedan od najvećih projektnih izazova predstavlja izbor konstrukcijskih materijala. Čvrstoća svih građevinskih materijala, pa tako i čelika, opada porastom temperature. Njegova najveća prednost je nezapaljivost i, u najvećem broju slučajeva, mogućnost potpunog povrata čvrstoće nakon požara, [7]. Za vrijeme požara čelik apsorbira značajnu količinu toplinske energije. Nakon izloženosti požaru i potom hlađenju na temperaturu okoline, čelik se vraća u stabilno stanje. Tijekom ciklusa zagrijavanja i hlađenja, čelični elementi mogu se neznatno deformirati ili oštetiti, ali bez utjecaja na globalnu stabilnost konstrukcije. Gledano sa stajališta ekonomičnosti, značajan broj čeličnih elemenata može se zadržati u upotrebi ukoliko se to utvrdi pregledom nakon požara. U praksi se vodi principom „*If it's bent, cut it, if it's straight, paint it!*“, što znači da se element koji je nakon požara ostao ravan najčešće ne mijenja, nego samo premaže zaštitnom bojom, [2]. Čelični elementi koji imaju neznatne torzijske deformacije mogu se jednostavnim metodama izravnavanja dovesti u stanje za ponovno korištenje. Neuporabljivi elementi s velikim deformacijama, pak, moraju se ukloniti iz konstrukcije.

Posebna vrsta konstrukcijskih čelika koja se razvila iz potrebe za povećanjem otpornosti čelika na požar jesu vatrootporni čelici. Ti su čelici termomehanički

obrađeni kako bi pokazali bolje performanse pri požarnom djelovanju. Njihova mikrostruktura sačinjena je od ferita i perlita kao i kod običnih konstrukcijskih čelika, no dodatak molibdena i kroma čini ju stabilnom čak i na 600 °C. Ovi čelici pri navedenoj temperaturi moraju zadržati otprilike dvije trećine granice popuštanja koju imaju pri ambijentalnoj temperaturi.

Pojava požara u konstrukciji dovodi do situacije koja se razlikuje od one pri ambijentalnoj temperaturi i zato se moraju uzeti u obzir posebne kombinacije djelovanja za požarno granično stanje. Pri tome se uzimaju specifične proračunske vrijednosti mehaničkih djelovanja za koje su faktori sigurnosti manji od onih za proračun pri ambijentalnoj temperaturi. Razlog tomu je to što je požar rijetki događaj i vjerojatnost otkazivanja prihvatljivija je za požarnu računsku situaciju nego u normalnim uvjetima.



Slika 1.5. Utjecaj temperature na čvrstoću čelika

Gledano općenito na primijenjeno opterećenje, element koji ima 100 %-tnu nosivost pod faktorima sigurnosti za granično stanje nosivosti, imao bi 60 %-tnu sigurnost kada bi upotrijebili faktore sigurnosti za požarno opterećenje. Stoga bilo koja primijenjena zaštita mora održavati čelične elemente na minimalno 60 % nosivosti koju ti elementi imaju na ambijentalnoj temperaturi, [3] (slika 1.5.). Na primjer, društveno je prihvatljivije da će pri požaru jedna od sto građevina otkazati, dok takva vjerojatnost otkazivanja u normalnim uvjetima nije prihvatljiva, [8].

Proračunski učinak djelovanja za požarnu situaciju može se prema EN 1990 izračunati koristeći sljedeće kombinacije djelovanja:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \psi_{11} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1.-1.)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1.-2.)$$

gdje je:

- $G_{k,j}$ - karakteristična vrijednost stalnog djelovanja,
- A_d - proračunska vrijednost izvanrednog djelovanja,
- $Q_{k,1}$ - karakteristična vrijednost prevladavajućeg promjenjivog djelovanja,
- $Q_{k,i}$ - karakteristična vrijednost ostalih promjenjivih djelovanja,
- ψ_{11} - faktor kombinacije za čestu vrijednost promjenjivog djelovanja,
- $\psi_{2,i}$ - faktor kombinacije za nazovistalnu vrijednost promjenjivog djelovanja.

2. HIPOTEZA I CILJEVI RADA

Koncepti požarnog inženjerstva mogu se primijeniti na bilo koju situaciju u kojoj je požar potencijalna opasnost. Iako su razvijeni za zgrade (visokogradnju), slični principi mogu se koristiti i kod projektiranja mostova, naftnih postrojenja i slično.

Tipična konstrukcija sastoji se od niza elemenata za koje se u postupku projektiranja proračunom treba dokazati mehanička otpornost i stabilnost, što uključuje i dokaz otpornosti na požar. Cilj građevinskih inženjera je imati pouzdane i jednostavne postupke za proračun požarne otpornosti koji se mogu koristiti u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Kako bi se do njih došlo 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 treba biti provjerena na temelju rezultata ispitivanja. Međutim, jednom kad se numerički model kalibrira on se može koristiti nebrojeno puta za simulaciju istih ili sličnih ispitivanja. Na taj način se ostvaruje ušteda u novcu i vremenu.

Dosadašnja praksa je pokazala da je analitički proračun požarne otpornosti prema Eurokodu, uz sve svoje vrline, prilično nekonzistentan. Kako je već navedeno, da bi se unaprijedili analitički izrazi u Eurokodu, potrebno je prvo kalibrirati numeričke postupke. Ova kalibracija je nužna jer napredne numeričke metode, kao i postavke numeričkih simulacija u različitim kompjuterskim paketima, daju izuzetno neujednačene rezultate. Iz tih kalibracija proizaći će, u konačnici, konkretna pravila za numeričko simuliranje čeličnih konstrukcija u požarnim uvjetima.

Pri dokazu pouzdanosti konstrukcije ručni proračuni i analize naprednim metodama trebali bi imati istu vrijednost kakvu bi imala i ispitivanja. No, dok je za ispitivanja potrebno imati akreditaciju laboratorija i udovoljiti provjerama inspekcija, to nije slučaj kod ručnog proračuna. Drugim riječima, kod proračuna prema normama ne postoji opći sustav kontrole koji treba poštivati, pa je odabir metode za proračun formalna stvar inženjera i revidenta. Zato je od iznimne važnosti da numeričke metode i obrasci ručnog proračuna budu robusni i pouzdani.

Cilj ovog rada je kvantitativno i kvalitativno procijeniti neujednačenost rezultata dobivenih različitim metodama proračuna požarne otpornosti čeličnih konstrukcijskih elemenata. Konkretno, u radu se prikazuje usporedba rezultata laboratorijskih ispitivanja realnog ponašanja slobodno oslonjenog elementa (nosača) izloženog požaru, rezultata koje za isti element daje norma (ručno i programskim paketom Elefir-EN, [9]), te rezultata dobivenih računalnim proračunom pomoću metode konačnih elemenata (ANSYS, [10]). Pri tome su korišteni rezultati laboratorijskih ispitivanja koje je krajem 2014. godine proveo Tehnički istraživački centar u Švedskoj i rezultati ostalih sudionika međunarodnog *Round Robin* proračuna. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, s analizom koja je prezentirana u ovom radu, bio je jedan od 11 sudionika *Round Robin* simulacija.

3. METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Ispitivanja čeličnih nosača izloženih požaru

Kako bi se dobio što bolji uvid u stvarno ponašanje čeličnih konstrukcija izloženih realnom požaru, provode se različita požarna ispitivanja od kojih su najvjerodostojnija ispitivanja čitavih konstrukcija (slika 3.1.). Za takva ispitivanja potrebno je imati konstrukciju zadovoljavajućih svojstava, te ju kompletnu izložiti požaru u kontroliranim uvjetima. Ona su zbog toga kompleksna i jako skupa, te se provode iznimno rijetko. Zato se pribjegava jednostavnijim i puno jeftinijim ispitivanjima izdvojenih čeličnih elemenata koja također daju čitav niz vrlo korisnih podataka (slika 3.2.).



Slika 3.1. Cardington požarno ispitivanje na kompletnoj konstrukciji, [11]

Provedeno je nekoliko požarnih ispitivanja na realnim konstrukcijama, od kojih su najpoznatija Cardington požarna ispitivanja. To je niz od šest požarnih ispitivanja u punom mjerilu, provedenih na spregnutoj konstrukciji od osam katova, dizajniranoj u Cardington laboratoriju (British Research Establishment) u Velikoj Britaniji kao tipična poslovna zgrada, [11]. Analizom se pokazalo da je ukupna požarna otpornost okvirne čelične konstrukcije puno veća nego koristeći standardne požarne testove. Primjerice, Cardington ispitivanjima pokazalo se da nezaštićena greda koja u standardnom ispitivanju gubi nosivost u manje od 20 min, može pružiti požarnu otpornost preko sat vremena kod velikih realnih požara, [12].

Ispitivanje jednostavnih proračunskih modela za određivanje požarne otpornosti koji su dani u europskim normama česta je tema znanstvenih istraživanja. To je zato što je ponašanje konstrukcija izloženih požaru vrlo kompleksno čak i kad se radi o jednom konstruktivnom elementu jednostavnog statičkog sustava. Razlozi odstupanja požarne otpornosti konstrukcije dobivene eksperimentom prema onoj koju daje proračunski model su velika pojednostavnjenja u ponašanju čelika pri požaru kao idealnog elastoplastičnog materijala, te odstupanja parametara materijala koji se koriste za proračun povećanja temperature u elementu i proračun otpornosti. Zato se nameće potreba za kvantificiranjem veličine odstupanja pretpostavljene požarne otpornosti koja se dobije normiranim postupcima proračuna od one koja se dobije ispitivanjem.



Slika 3.2. Požarno ispitivanje čeličnih elemenata: stup (lijevo), [13], i greda (desno), [14]

Europska norma EN 1363-1, [15], daje opće informacije o znanstvenoj podlozi i metodologiji laboratorijskih ispitivanja požarne otpornosti, dok su detaljni podaci o svakoj metodi ispitivanja dani u posebnim dijelovima norme. EN požarna laboratorijska ispitivanja provode se prema standardnoj požarnoj ISO krivulji zagrijavanja. U tablici 3.1. dane su temperature generirane u peći za ispitivanje (slika 3.4.) u određenim vremenskim točkama kada se zagrijavanje provodi prema ISO požarnoj krivulji.

Tablica 3.1. Temperature u peći za zagrijavanje prema ISO požarnoj krivulji

Vrijeme [min]	Temperatura u peći [°C]
15	739
30	842
60	945
120	1049

U standardnom požarnom ispitivanju konstruktivni element se izlaže požaru u požarnoj peći određeno vremensko razdoblje. Tražena požarna otpornost izražava se kao vrijeme u minutama tijekom kojeg element zadovoljava određene uvjete. Ispitivanje se prekida kada je dosegnut neki od kriterija otkazivanja:

- nosivost i stabilnost (R) – element više ne može nositi opterećenje ili se prekomjerno deformirao,
- cjelovitost (E) – element je izgubio otpornost na penetraciju plinova i plamena kroz pukotine i otvore, tako da isti uzrokuju zapaljenje pamučnog jastučića postavljenog na površinu elementa neizloženu toplini ili je u elementu nastao otvor određenih dimenzija (slika 3.3.),
- toplinska izolacija (I) – prijenos topline kroz element je takav da je prosječna temperatura na njegovoj neizloženoj strani veća od početne temperature za više od 180 °C u jednoj točki ili 140 °C prosječno.



Slika 3.3. Otkazivanje uvjeta cjelovitosti – zapaljenje pamučnog jastučića (lijevo) i nastajanje otvora (desno), [16]

Navedeni uvjeti otkazivanja razlikuju se ovisno o vrsti ispitivanog elementa, npr. kriterij otkazivanja nosivosti i stabilnosti za stup je lom presjeka ili izvijanje, a za grede i stropne ploče to je prekoračenje progiba na više od $D = L^2/400 \cdot d$ ili brzine prirasta progiba preko vrijednosti $dD/dt = L^2/9000 \cdot d$ (D – progib [mm], L – raspon [mm], d – maksimalna udaljenost između tlačnog i vlačnog područja u hladnom stanju [mm], dD/dt – brzina prirasta progiba [mm/min]).

Za izradu norme HRN EN 1993-1-2:2008, [17], koja se odnosi na proračun čeličnih konstrukcija na požar, korišteni su rezultati i zaključci brojnih laboratorijskih ispitivanja. Mehanička svojstva materijala pri djelovanju visokih temperatura određena su na temelju istraživanja koje je proveo Schleich, [18] [19]. U tom istraživanju ispitivane su slobodno oslonjene grede opterećene na savijanje koncentriranom silom u sredini raspona i zagrijavane u peći linearnim povećanjem temperature od 3,5 °C/min. Istraživanje je dovelo do uvođenja redukcijskih koeficijenata za granicu popuštanja čelika pri povišenim temperaturama ($k_{y,\theta}$). Ti su koeficijenti određeni na temelju jednakosti između omjera granice popuštanja pri visokim temperaturama i pri ambijentalnim temperaturama, i omjera lomne sile grede pri visokim temperaturama i pri ambijentalnim. Osim što su kvalitativno određeni redukcijski koeficijenti za mehanička svojstva čelika pri povišenim temperaturama (k_{θ}), u istraživanju je pokazano da se otpornost slobodno oslonjenih greda može iskazati u ovisnosti o koeficijentu smanjenja granice popuštanja.

Temperaturno ovisne krivulje naprezanje-deformacija čeličnih elemenata dane u normi HRN EN 1993-1-2:2008 usvojene su prema požarnim ispitivanjima koja su proveli Kirby i drugi, te niz drugih istraživača, [18] [20].

Koncept jednostavnih proračunskih modela otpornosti elemenata pri požaru, koji daje norma HRN EN 1993-1-2:2008, stvoren je analiziranjem eksperimentalnih i teoretskih istraživanja. Kirby i drugi proveli su ispitivanje na nezaštićenim vruće valjanim čeličnim I profilima i kompozitnim elementima s različitim vrstama rubnih uvjeta, [21]. Gredni elementi i stupovi bili su izloženi djelovanju standardnog požara s tri ili četiri strane, a opterećeni težinom betonske ploče i koncentriranim silama. U istraživanju je dokazana ovisnost požarne otpornosti čeličnih elemenata o rubnim uvjetima

oslanjanja, faktoru oblika poprečnog presjeka i obliku temperaturnog polja u presjeku čeličnog elementa.



Slika 3.4. Peć za ispitivanje čeličnih elemenata na požar

3.2. Normirane metode proračuna

3.2.1. Proračun prema europskim normama

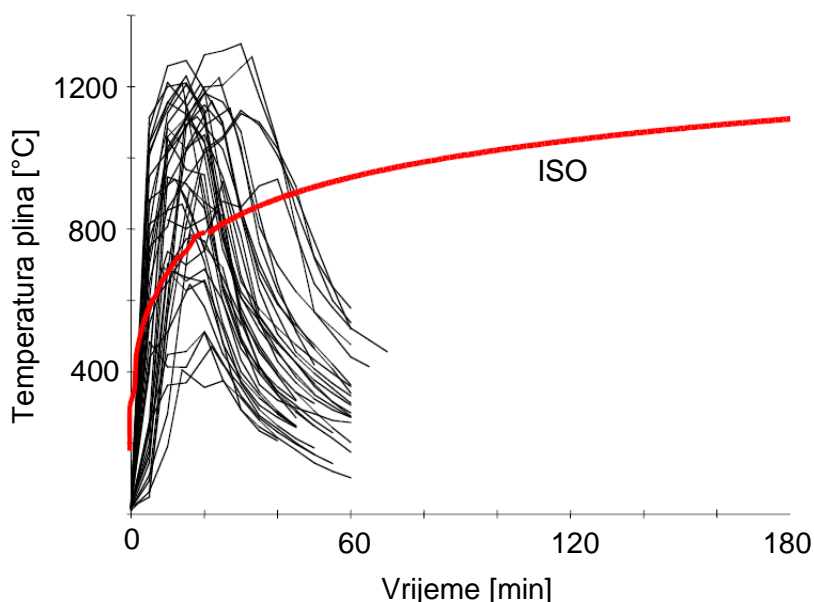
3.2.1.1. Požarno opterećenje na konstrukciju

Požarni scenarij može se opisati požarnim modelima različitih stupnjeva složenosti. U najjednostavnijim metodama vrijeme otpornosti na standardni požar dano je u normama, dok se u složenijima razarajući utjecaj realnog požara nastoji uzeti u obzir preko pristupa ekvivalentnog vremena otpornosti. Idealno, ekvivalentno vrijeme otpornosti trebalo bi biti temeljeno na usporedbi ponašanja konstrukcijskog elementa u prirodnom požaru s ponašanjem dobivenim požarnim ispitivanjem. Pristup ekvivalentnog vremena otpornosti privlačan je inženjerima jer omogućava povezivanje složenog ponašanja konstrukcije u stvarnom požaru s otpornosti na standardni požar, koji je razumljiv koncept. Ekvivalentno vrijeme požarne otpornosti dano je u Eurokodu kao funkcija požarnog opterećenja, ventilacije i toplinskih svojstava požarnog odjeljka.

Još racionalniji, a i dalje jednostavan pristup, je pretpostavljanje jednolike temperature u požarnom odjeljku i određivanje odnosa temperatura-vrijeme. U Eurokodu ti odnosi su dani kao parametarske požarne krivulje.

Naposljetku, jedan od najsloženijih načina modeliranja požara je modeliranje računalnom dinamikom fluida.

U standardnim ispitivanjima požarne otpornosti temperatura plina povećava se tako da slijedi unaprijed definiranu krivulju koja se po europskim normama naziva standardnom nominalnom požarnom krivuljom, ili ranije, ISO 834 požarnom krivuljom (slika 3.5.). Temperatura kod standardnog požara raste brzo i zatim se povećava beskonačno. Ovakav način zagrijavanja plina drugačiji je od onoga što se događa tijekom stvarnog požara. U realnom požaru, nakon što se utroši sav zapaljivi materijal, požar će se ugasiti i/ili razviti dalje. Daljnji razvoj požara u odjeljku povezan je s požarnom silom i ventilacijom, što nije uzeto u obzir u standardnom požarnom ispitivanju.



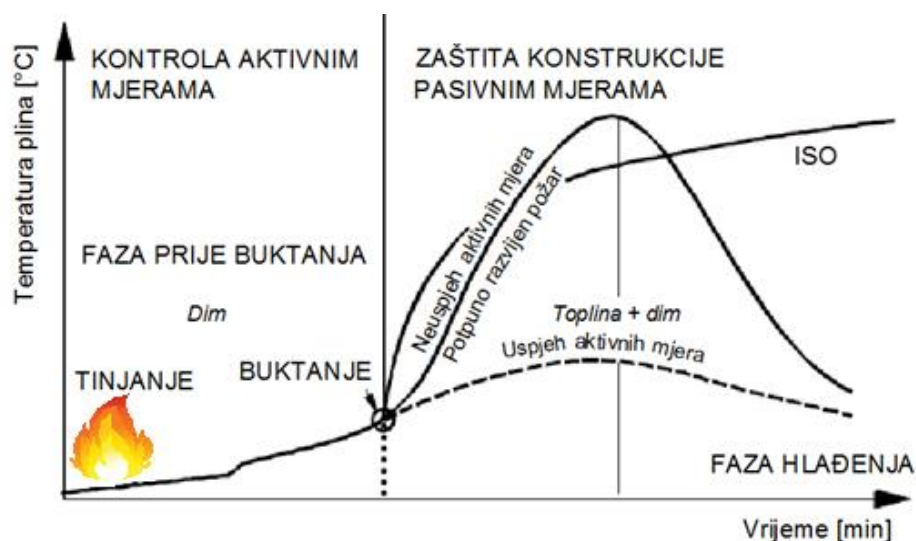
Slika 3.5. Standardna ISO požarna krivulja u usporedbi s 50 ispitivanja prirodnih požara, [22]

Klasifikacija čeličnih konstrukcija prema ISO standardnoj krivulji izražava se u jedinicama vremena i označava kao R15, R20, R30, R45, R60, R90, R120, R180, R240, R360, gdje navedeni brojevi predstavljaju minute. Naznačeno vrijeme ne predstavlja trajanje realnog požara, niti vrijeme potrebno za evakuaciju korisnika. Vremenski parametri zapravo su pogodan način usporedbe građevina po važnosti za zaštitu od požara. Oni predstavljaju izdržljivost čeličnih elemenata u standardnim

laboratorijskim uvjetima, što znači da element pruža otpornost obzirom na požar 15 minuta, 30 minuta, itd.

Usporedbom standardne požarne krivulje s krivuljama dobivenim ispitivanjem prirodnih požara, uočeno je da je vrlo teško točnije numerički odrediti učinak prirodnog požara na konstrukciju (slika 3.5.). Stoga su razvijene matematičke podloge i krivulje koje vjerodostojnije opisuju djelovanje prirodnog, tj. realnog požara. Ovim analizama može se odrediti brzina kojom se toplina oslobađa iz goriva, a koja je funkcija ventilacije prostora te gustoće i raspoređenosti samog goriva. Također se može izračunati gubitak topline iz požarnog odjeljka strujanjem i isijavanjem kroz otvore, te provođenjem kroz krute granice, kako bi se točnije odredila rezultirajuća temperatura plinova.

Po novom konceptu razvoj prirodnog požara dijeli se u nekoliko faza (slika 3.6.): tinjanje, širenje požara, buktanje, potpuno razvijeni požar, hlađenje. Tinjanje počinje pri vrlo malim temperaturama. Faza razvoja, odnosno širenja požara, odnosi se na lokalizirani požar. Požar je lokalnog karaktera do mogućeg početka buktanja. Faza buktanja vrlo je kratka i karakterizira je iznenadna erupcija požara. Do ovog trenutka požar se kontrolira aktivnim mjerama, a nakon toga zaštita konstrukcije ovisi o pasivnim mjerama. Faza nakon buktanja odgovara potpuno razvijenom požaru uz povećanje temperature plina, a njeno trajanje ovisi o požarnom opterećenju i uvjetima ventilacije. U fazi opadanja požara ili hlađenja smanjuje se temperatura plina sve dok gorivi materijal potpuno ne izgori.



Slika 3.6. Faze za vrijeme razvoja realnog požara

Maksimalna temperatura koja se razvije tijekom požara, kao i brzina prirasta temperature, ovise o brojnim faktorima. Oni su povezani s dostupnim gorivom, geometrijskim i toplinskim svojstvima požarom zahvaćenog odjeljka, te o dostupnim otvorima kroz koje požar može biti opskrbljen kisikom. Potpuno razvijen požar ovisi o količini kisika na način da ako ima dovoljno kisika rata izgaranja ovisi samo o karakteristikama materijala koji gori, a u slučaju da nema dovoljno kisika ovisi isključivo o raspoloživom kisiku.

Analizi konstrukcije pri požaru može se pristupiti na dva načina određivanja toplinskog djelovanja: prvi je određivanje prema nominalnim požarnim krivuljama, dok se drugi temelji na računskoj analizi konstrukcije. Prvi pristup provodi se prema propisanim pravilima, pa projektant nema bitnu inženjersku ulogu. Drugi je složeniji u smislu određivanja toplinskog djelovanja, jer je potrebno usvojiti i analizirati fizikalne i kemijske parametre.

Računska analiza konstrukcije zahtijeva odabir scenarija računskog požara, određivanje prikladnog računskog požara, analizu temperature konstrukcijskih elemenata, te mehaničku analizu konstrukcije.

Određivanje računskog požara započinje definiranjem požarnog opterećenja. Požarno opterećenje je količina toplinske energije koja se može razviti u nekom prostoru, a nastaje sagorijevanjem sadržaja građevine i dijelova konstrukcije. Dio toplinske energije zagrijava požarni odjeljak, a dio se gubi kroz otvore. Komponente požarnog odjeljka, kao što su konstrukcijski elementi, obloge i premazi, i sadržaj odjeljka predstavljaju izvor gorenja.

Požarno opterećenje Q_{fi} može se mjeriti kao težina zapaljivog materijala pomnožena s kalorijskom vrijednosti po jedinici težine. Računa se kao:

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{u,i} \cdot \psi_i \quad [\text{MJ}] \quad (3.-1.)$$

pri čemu je:

$M_{k,i}$ - iznos karakteristične vrijednosti gorivog materijala i [kg];

$H_{u,i}$ - čista kalorična vrijednost gorivog materijala i [MJ / kg];

ψ_i - faktor opcije za procjenu zaštićenog požarnog opterećenja materijala i .

Ukoliko se izražava po jedinici površine poda, tj. u MJ/m^2 ili Mcal/m^2 , naziva se gustoća požarnog opterećenja i označava kao q_f . Češće je ipak izražena kao ekvivalentna količina drveta u kg drva $/\text{m}^2$. Vrijednost se dobiva izrazom:

$$q_{f,k} = \frac{Q_{f,k}}{A} \left[\text{MJ}/\text{m}^2 \right] \quad (3.-2.)$$

gdje je:

$Q_{f,k}$ - karakteristično požarno opterećenje $[\text{MJ}]$;

A - površina poda u požarnom odjeljku $[\text{m}^2]$.

Proračunska gustoća požarnog opterećenja definira se kao:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \left[\text{MJ}/\text{m}^2 \right] \quad (3.-3.)$$

U izrazu 2.3. oznake su sljedeće:

$q_{f,k}$ - karakteristična vrijednost gustoće požarnog opterećenja $[\text{MJ}/\text{m}^2]$;

m - faktor izgaranja;

δ_{q1} - faktor koji uzima u obzir rizik nastanka požara uslijed veličine odjeljka;

δ_{q2} - faktor koji uzima u obzir rizik nastanka požara uslijed namjene prostorije;

$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$ - faktor koji uzima u obzir različite aktivne mjere zaštite od požara.

Osim određivanja požarnog opterećenja, treba odrediti i ratu kojom će to opterećenje izgarati. U tu svrhu potrebno je definirati ratu oslobađanja topline Q . Maksimalna rata oslobađanja topline požara po m^2 označava se s RHR_f .

Rata oslobađanja požara računa se kao:

$$Q = 10^6 \cdot \left(\frac{t}{t_a} \right)^2 \quad (3.-4.)$$

U izrazu 2.4. oznake predstavljaju:

Q - rata oslobađanja topline požara za vrijeme njegovog razvoja [W];

t - vrijeme [s];

t_q - vrijeme potrebno za dostizanje rate oslobađanja topline Q od 1 MW.

Kako bi se što realnije prikazala požarna djelovanja, u proračunu se koriste jednostavni i napredni modeli prirodnog požara. Jednostavni modeli su požar u odjeljku i lokalizirani požar, dok su napredni modeli jedne zone, modeli dvije zone i CFD modeli (modeli polja). Kad se zadovoljavajuće modelira požarno djelovanje, prelazi se na određivanje otpornosti na požar.

3.2.1.2. **Otpornost na požar**

Otpornost na požar je sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost i stabilnost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara. Promatra se sposobnost elementa da ne otkáže, da ograniči širenje požara, te da podupre ostale elemente. Zagrijavanjem materijala elementi gube sposobnost prenošenja opterećenja i u slučaju dovoljno velikog zagrijavanja mogu otkazati. Posljedice takvog otkazivanja ovise o važnosti elementa za globalno ponašanje konstrukcije, pa mogu biti zanemarive ili 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.

Kako bi se smanjila opasnost koju požar predstavlja ljudima unutar konstrukcije i količina oštećenja koju požar može uzrokovati, velike zgrade podijeljene su na manje požarne odjeljke korištenjem vatrootpornih zidova i podova. Efikasnost elemenata koji dijele zgrade na požarne odsječke uvelike ovisi o sposobnosti konstrukcije koja ih podupire da zadrži svoju funkcionalnost tijekom požara. Požarni zidovi izrađuju se od negorivog građevinskog materijala, a moraju spriječiti prijenos vatre i dima na druge građevine i/ili požarne odjeljke u istoj zgradi.

Zahtijevana otpornost na požar čeličnih konstrukcija dana je nacionalnim propisima u vidu klasa požarne otpornosti R15, R30, R60, itd. Ovisi o broju etaža, namjeni i vrsti

zgrade, te u nekim državama o požarnom opterećenju, broju ljudi i utjecaju aktivnih mjera protupožarne zaštite.

Pravila proračuna čeličnih konstrukcija pri požaru razlikuju se ovisno o tome je li konstrukcija nezaštićena, izolirana odgovarajućim materijalom ili zaštićena toplinskom zaštitom. Otpornost pri požaru može se odrediti pojednostavljenim modelima, naprednim modelima ili ispitivanjem. U normi HRN EN 1993-1-2 dan je pojednostavljeni model koji obuhvaća određivanje svojstava materijala narušenih pri požaru i proračun elemenata ovisno o unutarnjim silama kojima je izložen. Pojednostavljeni postupak proračuna sastoji se od tri koraka. U prvom koraku određuje se kritična temperatura čelika, u drugom razvoj temperature u čeličnom poprečnom presjeku, a u trećem požarna otpornost čeličnog elementa.

Proračunske vrijednosti mehaničkih karakteristika materijala (čvrstoća i deformacija) pri požaru $X_{d,fi}$ dane su u normi HRN EN 1993-1-2 kao:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} X_k / \gamma_{M,fi} \quad (3.-5.)$$

pri čemu je:

X_k - karakteristična vrijednost čvrstoće ili svojstva deformiranja za obični temperaturni proračun;

k_{θ} - faktor smanjenja za čvrstoću ili svojstvo deformiranja ovisan o temperaturi materijala;

$\gamma_{M,fi}$ - parcijalni koeficijent za odgovarajuće svojstvo materijala za požarnu situaciju.

Proračunske vrijednosti toplinskih karakteristika materijala pri požaru $X_{d,fi}$ definirane su:

- ako je porast svojstva povoljan za sigurnost:

$$X_{d,fi} = X_{k,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (3.-6.)$$

- ako je porast svojstva nepovoljan za sigurnost:

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} X_{k,\theta} \quad (3.-7.)$$

gdje je:

$X_{k,\theta}$ - vrijednost svojstva materijala u požarnom proračunu.

Pri proračunu elementa konstrukcije učinak djelovanja pri požaru može se pojednostavljeno dobiti preko učinka djelovanja određenog za uobičajenu temperaturu kao:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d \quad (3.-8.)$$

pri čemu je:

E_d - proračunska vrijednost učinka djelovanja za proračun pri ambijentalnoj temperaturi za osnovnu kombinaciju djelovanja;

η_{fi} - faktor redukcije proračunske razine opterećenja u požarnoj situaciji.

Faktor redukcije η_{fi} treba uzeti kao:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (3.-9.)$$

gdje je:

G_k - karakteristična vrijednost stalnog djelovanja,

$Q_{k,1}$ - karakteristična vrijednost prevladavajućeg promjenjivog djelovanja,

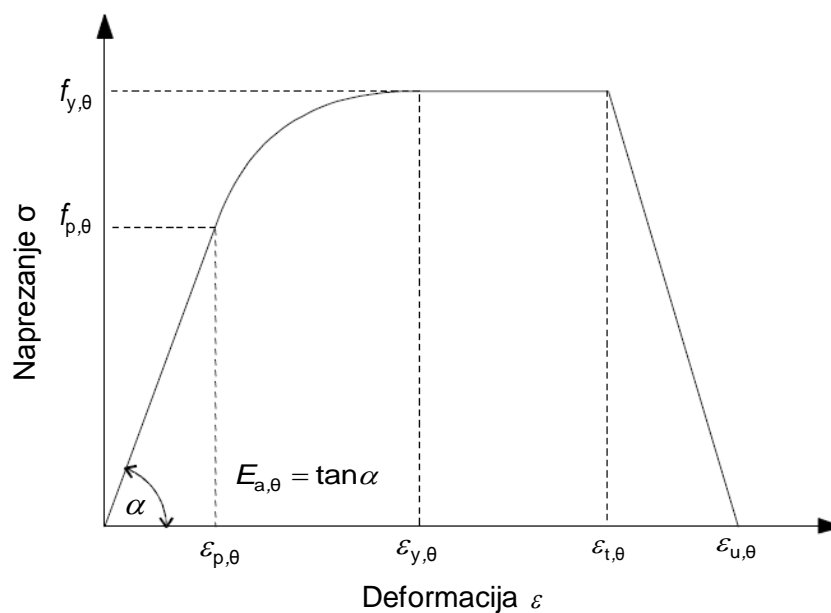
γ_G - parcijalni faktor za stalna djelovanja,

$\gamma_{Q,1}$ - parcijalni faktor za promjenjivo djelovanje 1,

ψ_{fi} - faktor kombinacije.

Povećanje temperature ugljičnih čelika uzrokuje degradiranje mehaničkih svojstava materijala i to se ogleda na njihove radne dijagrame. Zato su u normi HRN EN 1993-1-2 dani izrazi za određivanje temperaturno ovisnih dijagrama naprežanje-deformacija (tablica 3.2.). Ovi dijagrami za svaku pojedinu temperaturu sastoje se od četiri dijela: linearnog dijela do granice proporcionalnosti $f_{p,\theta}$, eliptičnog dijela do granice popuštanja koja označava kraj elastičnog dijela, platoa tečenja i završnog pada naprežanja koji nastupa nakon dosezanja granične deformacije pri popuštanju

$\varepsilon_{t,\theta}$ (slika 3.7.). Gustoća čelika smije se uzeti kao neovisna o temperaturi u iznosu od $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.



Slika 3.7. Ovisnost naprezanje-deformacija ugljičnog čelika pri povišenim temperaturama

Oznake na slici su sljedeće:

- $f_{y,\theta}$ - proračunska granica popuštanja,
- $f_{p,\theta}$ - granica proporcionalnosti,
- $E_{a,\theta}$ - nagib linearnog elastičnog područja,
- $\varepsilon_{p,\theta}$ - deformacija pri granici proporcionalnosti,
- $\varepsilon_{y,\theta}$ - deformacija pri popuštanju,
- $\varepsilon_{t,\theta}$ - granična deformacija pri popuštanju,
- $\varepsilon_{u,\theta}$ - krajnja deformacija.

Tablica 3.2. Izrazi za određivanje temperaturno ovisnih dijagrama naprezanje-deformacija ugljičnih čelika

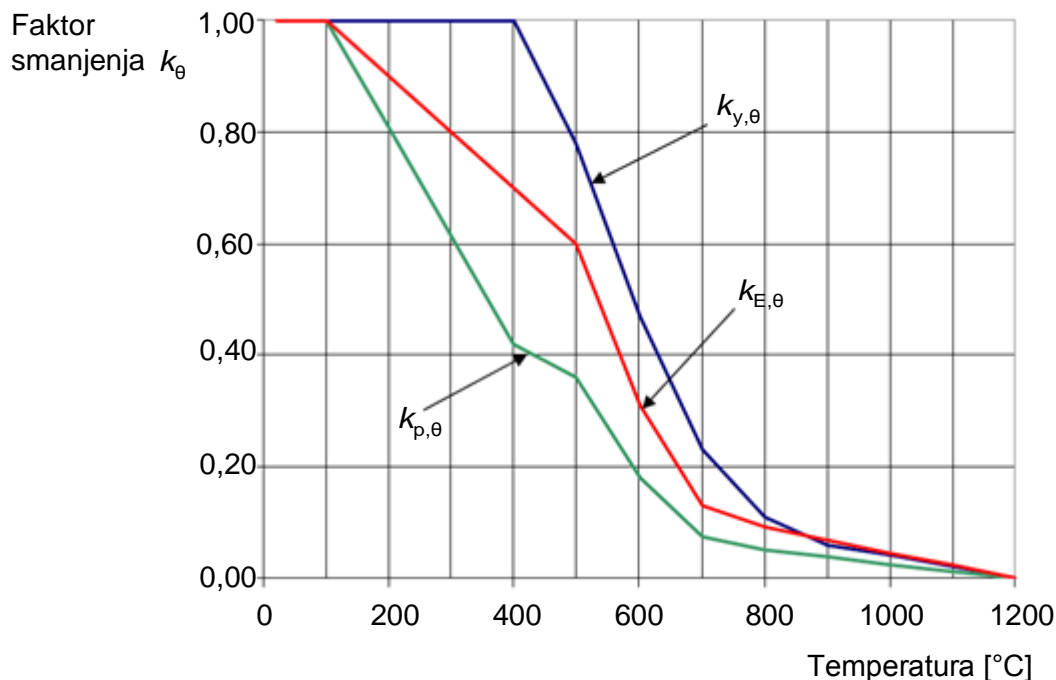
Područje naprezanja	Naprezanje σ		Tangentni modul	
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$		$E_{a,\theta}$	
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$		$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$	
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$		0	
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \right]$		-	
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0		-	
Parametri	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$	$\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Funkcije	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$ $c^2 = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$			

Povećanje temperature ugljičnih čelika uzrokuje degradiranje njihovih mehaničkih svojstava, što se u normi uzima u obzir faktorima smanjenja $k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ i $k_{E,\theta}$ (slika 3.8.), definiranim kao:

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y \quad - \quad \text{proračunska granica popuštanja, u odnosu na granicu popuštanja pri } 20 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y \quad - \quad \text{granica proporcionalnosti, u odnosu na granicu proporcionalnosti pri } 20 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad - \quad \text{nagib linearnog elastičnog područja, u odnosu na nagib pri } 20 \text{ }^\circ\text{C.}$$



Slika 3.8. Faktori smanjenja pri povišenim temperaturama

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:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (3.-10.)$$

gdje je:

$E_{fi,d}$ - računski učinak djelovanja za računsku situaciju požara,

$R_{fi,d,t}$ - računska otpornost čeličnog elementa za računsku situaciju požara u vremenu t .

Za gredni element klase poprečnog presjeka 1 ili 2, opterećen momentom savijanja i s jednolikom raspodjelom temperature čelika θ_a , otpornost se određuje kao proračunski moment otpornosti $M_{fi,\theta,Rd}$ iz izraza:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \left[\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right] M_{Rd} \quad (3.-11.)$$

gdje je:

M_{Rd} - moment plastične otpornosti poprečnog presjeka $M_{pl,Rd}$ za proračun pri običnoj temperaturi.

U slučaju da je raspodjela temperature po presjeku nejednolika, otpornost poprečnog presjeka korigira se faktorima prilagodbe κ_1 i κ_2 i jednaka je:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / \kappa_1 \kappa_2 \quad (3.-12.)$$

pri čemu je:

κ_1 - faktor prilagodbe za nejednoliku temperaturu po poprečnom presjeku,

κ_2 - faktor prilagodbe za nejednoliku temperaturu po duljini elementa.

Za nosač izložen požaru sa sve četiri strane poprečnog presjeka $\kappa_1 = 1,00$. Ukoliko je iznad nosača izbetonirana ploča, $\kappa_1 = 0,70$ za nezaštićeni nosač, a $\kappa_1 = 0,85$ ako je nosač zaštićen s preostale tri strane izložene požaru. κ_2 uzima se 0,85 na osloncima statički neodređenih nosača, a u svim ostalim slučajevima $\kappa_2 = 1,00$.

Proračun otpornosti čeličnog elementa na požar može se provesti i u temperaturnom području. Za element zagrijan gotovo jednoliko, kritična temperatura čelika $\theta_{a,cr}$ definirana je kao temperatura za koju nosivi kapacitet elementa postaje jednak učinku djelovanja. Tada nastupa otkazivanje elementa. Dakle, temperatura čelika θ_a ne smije biti veća od kritične temperature, tj.:

$$\theta_a \leq \theta_{a,cr} \quad (3.-13.)$$

Kritična temperatura čelika $\theta_{a,cr}$ može se odrediti kao:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,883}} - 1 \right) + 482 \quad (3.-14.)$$

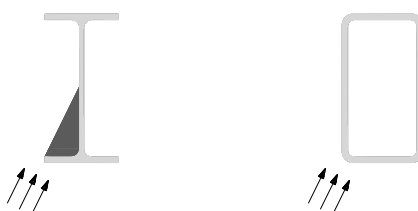
Iz gornje formule vidljivo je da $\theta_{a,cr}$ ovisi samo o stupnju iskorištenosti koji je definiran kao:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (3.-15.)$$

gdje je:

$R_{fi,d,0}$ - vrijednost $R_{fi,d,t}$ za vrijeme $t = 0$.

Razvoj temperature u čeličnom poprečnom presjeku ovisi o odnosu površine preko koje se toplina prenosi na čelik 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 (tablice 3.3. i 3.4.).



Slika 3.9. Utjecaj oblika poprečnog presjeka na učinak zasjenjenja

Na razvoj temperature u nezaštićenom čeličnom elementu utječe i zasjenjenje poprečnog presjeka (slike 3.9. i 3.10.). Faktor presjeka koji uzima u obzir učinak zasjenjenja (A_m/V)_{sh} definiran je za I profile kao:

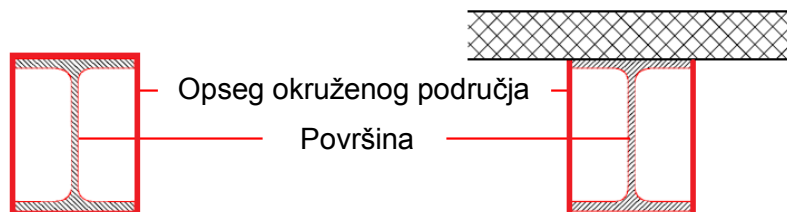
$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh} = 0,9 \left[\frac{A_m}{V} \right]_b \quad (3.-16.)$$

a za sve ostale profile:

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh} = 1,0 \left[\frac{A_m}{V} \right]_b \quad (3.-17.)$$

pri čemu je:

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_b = \frac{\text{opseg okruženog područja presjeka po jedinici duljine}}{\text{površina poprečnog presjeka po jedinici duljine}} \quad (\text{slika 3.4.})$$

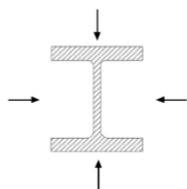


Slika 3.10. Određivanje faktora presjeka uključujući učinak sjene

Tablica 3.3. Faktori presjeka A_m/V za nezaštićene čelične elemente

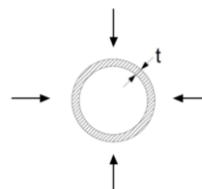
Otvoreni profil izložen požaru sa svih strana

$$A_m/V = \text{opseg/površina}$$



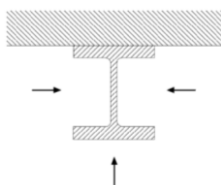
Cijev izložena požaru sa svih strana

$$A_m/V = 1/t$$



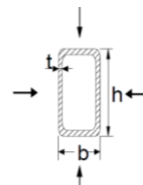
Otvoreni profil izložen požaru s tri strane

$$A_m/V = \text{opseg izloženog dijela/površina}$$



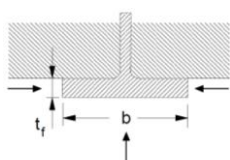
Šuplji profil izložen požaru sa svih strana

$$\text{Za } t \ll b: A_m/V \approx 1/t$$



Pojasnica I profila izložena požaru s tri strane

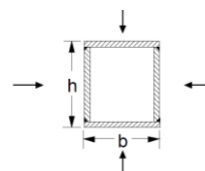
$$A_m/V = b + 2t_f/bt_f, \text{ za } t \ll b: A_m/V \approx 1/t_f$$



Zavareni sandučasti profil izložen požaru sa svih strana

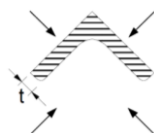
$$A_m/V = 2(b+h)/\text{površina}, \text{ za } t \ll b:$$

$$A_m/V \approx 1/t$$



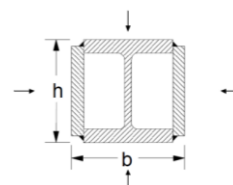
Kutni profil izložen požaru sa svih strana

$$A_m/V = 2/t$$



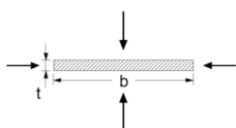
I profil sa sandučastim ojačanjima izložen požaru sa svih strana

$$A_m/V = 2(b+h)/\text{površina presjeka}$$



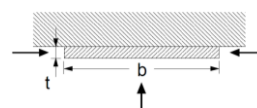
Ravni lim izložen požaru sa svih strana

$$A_m/V = 2(b+t)/bt, \text{ za } t \ll b: A_m/V \approx 2/t$$

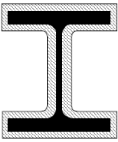
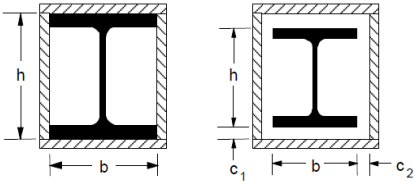
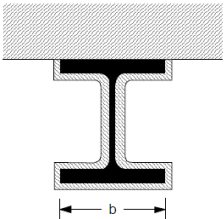
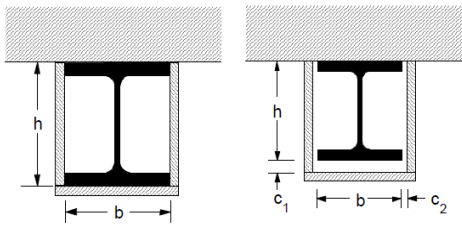


Ravni lim izložen požaru s tri strane

$$A_m/V = b + 2t/bt, \text{ za } t \ll b: A_m/V \approx 1/t$$



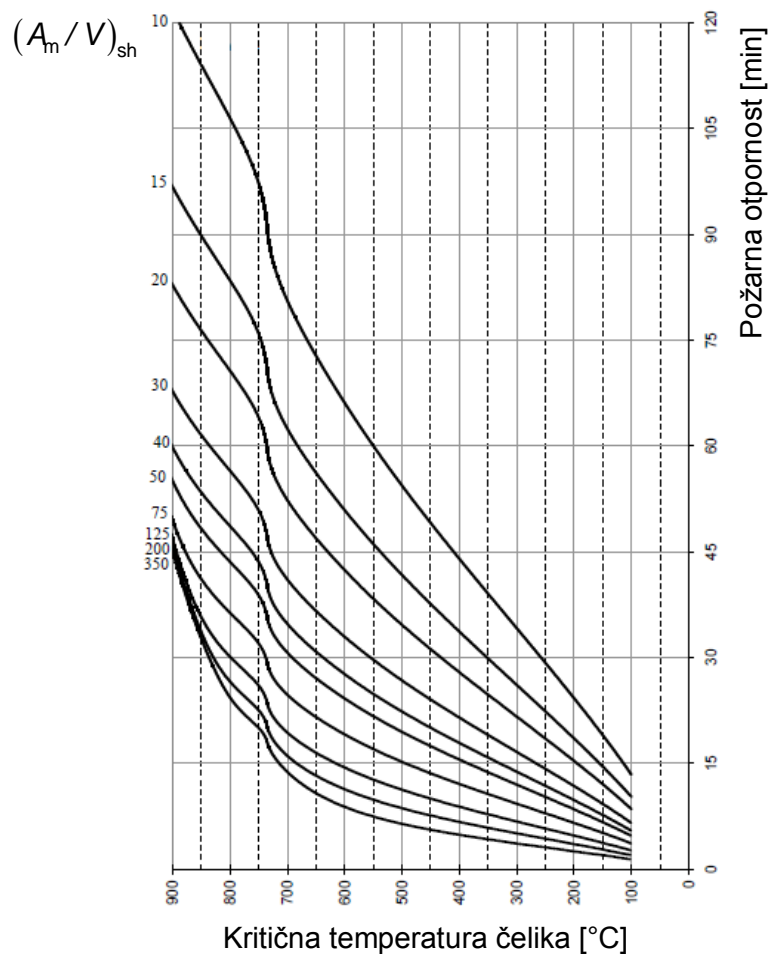
Tablica 3.4. Faktori presjeka A_p/V za čelične elemente izolirane materijalom za zaštitu od požara

	<p>Obloga po konturi jednolike debljine</p>	$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{opseg čelika}}{\text{ploština poprečnog presjeka čelika}}$
	<p>Šuplja obloga jednolike debljine, c_1 i c_2 manje od $h/4$</p>	$\frac{A_p}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{ploština poprečnog presjeka čelika}}$
	<p>Obloga po konturi jednolike debljine izložena požaru s tri strane</p>	$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{opseg čelika} - b}{\text{ploština poprečnog presjeka čelika}}$
	<p>Šuplja obloga jednolike debljine izložena požaru s tri strane</p>	$\frac{A_p}{V} = \frac{2h+b}{\text{ploština poprečnog presjeka čelika}}$

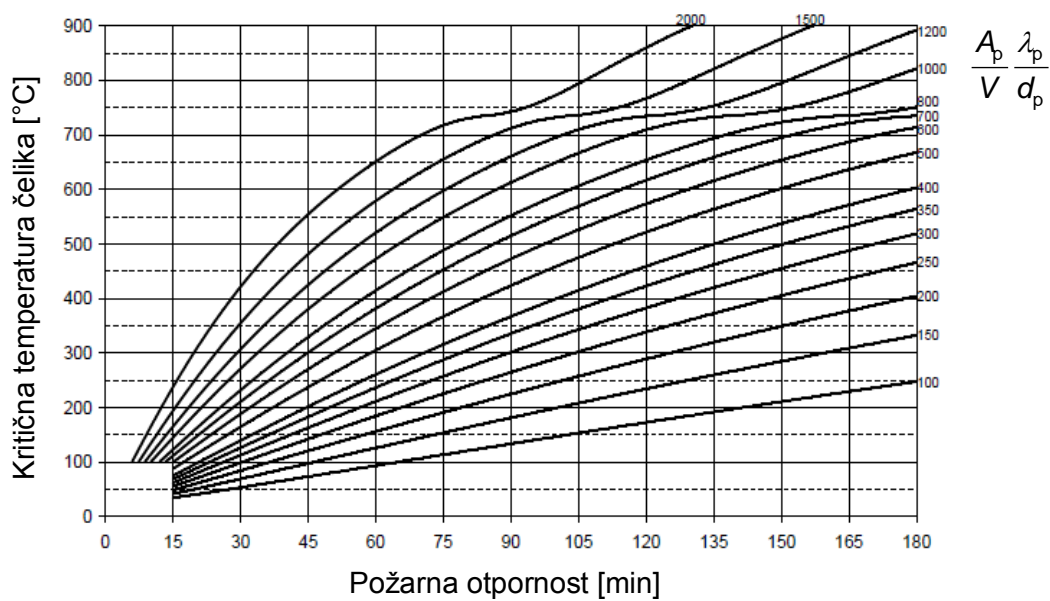
Posljednji korak vremenskog požarnog proračuna je očitavanje otpornosti iz nomograma u ovisnosti o faktoru presjeka i kritičnoj temperaturi čelika (slike 3.11. i 3.12.).

Postupak proračuna otpornosti pri požaru provodi se, dakle, prema sljedećim koracima:

1. odabir odgovarajućih vrijednosti faktora prilagodbe $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$,
2. proračun stupnja iskorištenosti kod požara μ_0 ,
3. određivanje kritične temperature za čelični nosač,
4. definiranje faktora presjeka uključujući učinak sjene $(A_m/V)_{sh}$ za nezaštićene čelične elemente, te A_p/V za zaštićene čelične elemente
5. primjena nomograma za dobivanje vremena požarne otpornosti pomoću kritične temperature.



Slika 3.11. Nomogram za nezaštićene čelične elemente



Slika 3.12. Nomogram za zaštićene čelične elemente

Proračun požarne otpornosti temelji se na sljedećim pretpostavkama:

- metoda je primjenjiva samo ako je bočno torzijsko izvijanje spriječeno,
- temperatura se povećava prema standardnoj ISO požarnoj krivulji,
- čelični element zagrijava se jednoliko, a nejednolika raspodjela temperature po visini i duljini nosača uzima se u obzir faktorom $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$,
- koriste se klase čelika prema EN 10025 (S235, S355, S460),
- za nezaštićene elemente učinak sjene uzima se pomoću faktora presjeka $(A_m/V)_{sh}$,
- za analizu elemenata učinak toplinskog istezanja elemenata može se zanemariti,
- kritična temperatura određuje se različito za klase poprečnog presjeka 1, 2, 3 u odnosu na klasu 4,
- za zaštićeni čelični profil krivulja povećanja temperature računa se s $\phi = 0$.

3.2.2. Proračun programskim paketom Elefir-EN

Elefir-EN je programski paket koji se koristi za proračun požarne otpornosti čeličnih elemenata prema normama EN 1991-1-2 i EN 1993-1-2, koje su ugrađene u njegovu strukturu. Uporabom ovog softvera smanjuje se vrijeme projektiranja konstrukcije i vjerojatnost pogrešaka koje se mogu javiti kod ručnog proračuna.

Proračun može biti proveden u vremenskom području, području otpornosti i području temperature, a analizirati se mogu nosači opterećeni oko jače ili slabije osi.

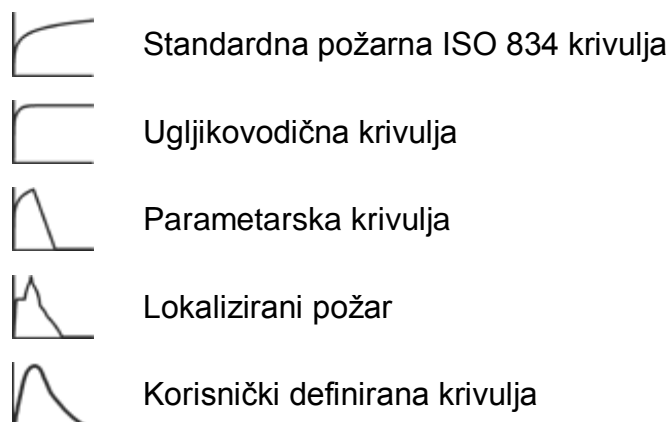
Program omogućava odabir sljedećih stavki:

- poprečni presjek nosača,
- izloženost požaru (s tri strane ili s četiri strane poprečnog presjeka),
- protupožarna zaštita (presjek bez zaštite, zaštita po konturi presjeka i okružujuća zaštita – slika 3.13.), uz mogućnost odabira zaštitnog materijala,



Slika 3.13. Mogućnosti s obzirom na protupožarnu zaštitu

- požarna krivulja (ISO 834 krivulja, ugljikovodična krivulja, parametarske krivulje, korisnički definirane krivulje, krivulje lokaliziranih požara – slika 3.14.),

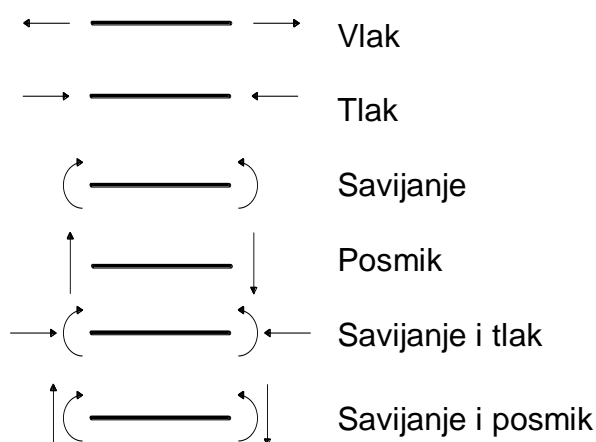


Slika 3.14. Mogućnosti s obzirom na protupožarnu zaštitu

- rata oslobađanja topline (RHR),
- dimenzije požarnog odjeljka, mjesto i veličina otvora (za parametarske krivulje),
- prisutnost ljudi, rata razvoja požara (FGR), gustoća požarnog opterećenja i vrsta aktivne protupožarne zaštite (za parametarske ili krivulje lokaliziranih požara).

Izlazni podaci mogu biti:

- kritična temperatura i kritično vrijeme elementa izloženog vlatku, tlaku, posmiku, savijanju, savijanju i vlatku, savijanju i tlaku, savijanju i posmiku (slika 3.15.),



Slika 3.15. Opterećenja elementa koja se mogu analizirati u programu Elefir-EN

- temperatura čelika nakon određenog vremenskog razdoblja,
- debljina protupožarne zaštite potrebna za osiguranje određene požarne otpornosti,
- globalna plastična analiza kontinuirane grede.

3.3. Napredne metode 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.

Najpouzdaniji način određivanja požarne otpornosti je provođenje eksperimenata, na čitavim konstrukcijama ili izdvojenim elementima, ali oni su vrlo skupi. Napredne metode simulacija ponašanja elemenata pod požarnim opterećenjem vrlo su dobra, i jeftinija, alternativa eksperimentima. One omogućavaju pouzdano i jednostavno požarno projektiranje koje je istovremeno u skladu s normama i realnim ponašanjem čeličnih konstrukcija u požaru.

Napredne metode proračuna daju pouzdanu procjenu realnog ponašanja dijelova konstrukcije u požarnim uvjetima. Uključuju odvojene proračunske modele radi određivanja razvoja i raspodjele temperature u konstrukcijskim elementima (model toplinskog odziva), te mehaničkog ponašanja konstrukcije ili svakog njezinog dijela (model mehaničkog odziva).

Modeli za simulaciju nastanka i ponašanja požara u odjeljcima (modeli zona i modeli polja) u Eurokodu 1 nazivaju se napredni požarni modeli. Napredni proračunski modeli, o kojima je ovdje riječ, povezani su s proračunom ponašanja konstrukcije.

Danas je razvijen velik broj kompjuterskih programa za napredni proračun ponašanja konstrukcija pod požarom. Neki od najpoznatijih su ANSYS i ABAQUS. Niti jedan softver nije sam po sebi 100 % kompatibilan s Eurokodom. Veliku ulogu u ostvarenju kompatibilnosti igra točno unošenje podataka danih u Eurokodu, kao što su toplinska

i mehanička svojstva. Kako bi se dobio točan model, koji će dobro prikazivati realno ponašanje elementa, važno je iskustvo i znanje projektanta.

Svi proračunski modeli dani u kompjuterskim programima trebaju biti podvrgnuti provjeri točnosti na temelju odgovarajućih rezultata ispitivanja. Rezultati proračuna mogu se odnositi na temperaturu, deformaciju i vrijeme požarne otpornosti. Kritične parametre, kao što su duljina izvijanja, veličina elemenata, razina opterećenja, itd., treba kontrolirati pomoću analize osjetljivosti kako bi model bio usklađen s jasnim inženjerskim načelima.

3.3.1. Toplinski odziv

Model toplinskog odziva razvijen je za predviđanje razvoja temperature u elementima konstrukcije i izolacijskim materijalima koji štite konstrukciju, ako su prisutni.

Prijenos topline u tvarima opisan je Fourierovom jednadžbom. Prolazan oblik ove jednadžbe mora se uzeti u obzir, kako bi se mogla opisati stalna promjena temperature tijekom požara. Za konstrukcije sa složenijom geometrijom, materijalima čija svojstva ovise o promjeni temperature, te nelinearnim rubnim uvjetima, nije moguće dobiti točno rješenje Fourierove jednadžbe. Stoga se traži približno rješenje, tako da se konstrukcija podijeli na veći broj manjih elemenata.

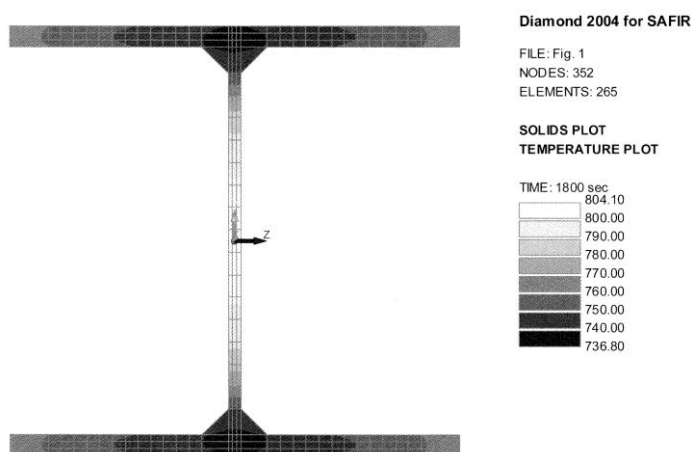
Metoda konačnih elemenata je najraširenija metoda naprednog proračuna temperature, iako se prije dosta koristila i metoda konačnih razlika. Ovim metodama danas se može prilično lako koristiti, u smislu da su razvijeni brojni kompjuterski programi koji su ih približili korisnicima.

I u naprednim toplinskim modelima moraju se napraviti neka pojednostavljenja. U metodi konačnih elemenata, primjerice, geometrija konstrukcije aproksimirana je nizom linearnih krivulja ili krivulja drugog reda. Također, pretpostavljena je distribucija temperature u svakom konačnom elementu. Temperatura je izračunata smo u određenim točkama elementa, najčešće u čvorovima, na mjestu spoja elemenata, te u određenim vremenskim intervalima. Kontakt između susjednih materijala (npr. izolacijski materijal i čelik) smatra se savršenim. Jednostavan prijenos topline provođenjem pretpostavljen je u materijalima gdje prijenos topline na lokalnom nivou uključuje previše složenih pojava (npr. u pločama od mineralne vune i zaštitnim

premazima). Isparavanje, prijenos i kondenzacija vlage u nekim izolacijskim materijalima tretiraju se na pojednostavljen način, ili konzervativno zanemaruju, ukoliko je to dopušteno Eurokodom.

Ipak, metoda konačnih elemenata, kada se koristi na točan način, pruža dobar prikaz temperature izmjerene u čeličnim elementima tijekom požarnih ispitivanja. Napredni toplinski modeli mogu se koristiti s bilo kojom toplinskom krivuljom, ako su poznata svojstva materijala u određenim rasponima temperature. Prema Eurokodu 3, napredne proračunske metode mogu se koristiti za bilo koju vrstu presjeka.

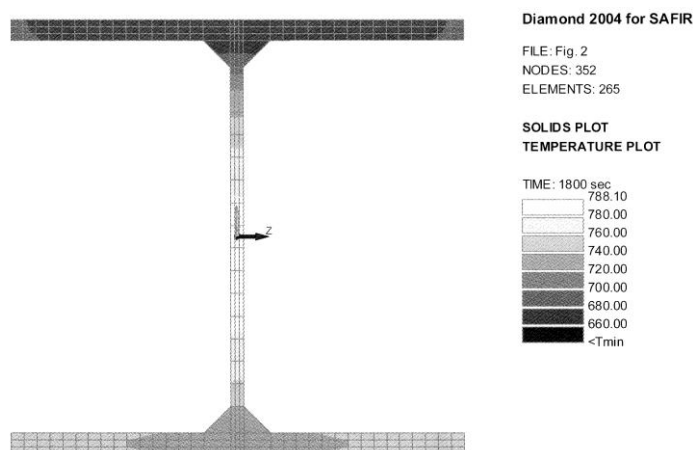
Napredne metode proračuna daju nejednoliku raspodjelu temperature po čeličnom presjeku, što ćemo pokazati na sljedećim primjerima, [8]. Na slici 3.16. prikazan je primjer distribucije temperature u toplo valjanom čeličnom elementu poprečnog presjeka HEA 300 nakon 30 minuta izloženosti požaru, proračunate naprednom metodom proračuna. Proračunom nekom jednostavnom metodom, npr. programom Elefir-EN, dobili bismo jednoliku raspodjelu temperature od 760 °C po čitavom poprečnom presjeku, no proračun naprednom metodom daje temperaturu koja varira od 737 °C do 804 °C. Ove temperaturne razlike su male i nemaju velik utjecaj na mehaničko ponašanje, barem u slučajevima gdje je distribucija temperature simetrična po presjeku.



Slika 3.16. Temperatura u profilu HEA 300 grijanom sa svih strana nakon 30 minuta izloženosti standardnom požaru

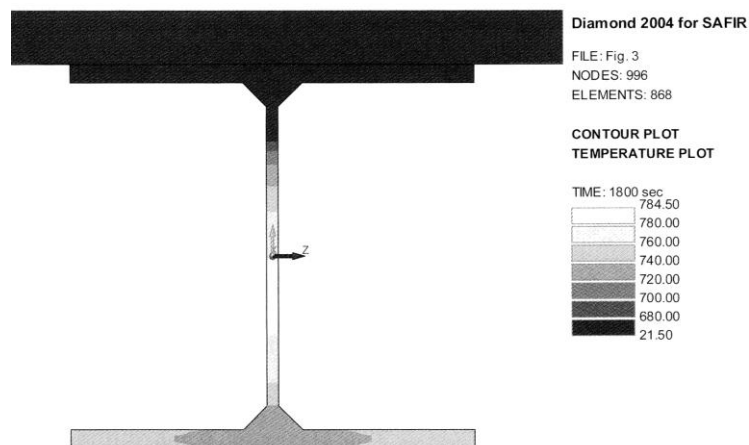
Ipak, kada rubni uvjeti nisu simetrični, primjećuju se veće razlike. Slika 3.17. prikazuje raspodjelu temperature u istom presjeku, grijanom samo sa tri strane.

Gornja strana presjeka nije izložena požaru. Temperature izračunate naprednom metodom u rasponu su od 663 °C do 778 °C, dok jednostavnom metodom proračuna dobijemo jednoliku raspodjelu temperature od 735 °C.



Slika 3.17. Temperatura u profilu HEA 300 grijanom s tri strane nakon 30 minuta izloženosti standardnom požaru

Kako su rubni uvjeti isti, prosječna vrijednost nejednolike temperature izračunata naprednim modelom je vrlo blizu jednolikej temperaturi izračunatoj jednostavnim modelom. Razlike u presjeku su značajno veće od onih na prethodnoj slici (slika 3.16.), i što je još važnije, gradijenti nisu simetrično raspodijeljeni unutar presjeka. Gornja pojasnica je hladnija od donje pojasnice za oko 89 °C. Kada bismo ovaj profil koristili za stup, gdje je materijal koji štiti gornju pojasnicu fasadni zid, gradijent bi uzrokovao dodatni bočni pomak, koji bi uvelike utjecao na otpornost na izvijanje stupa. Samo je modelom koji uzima u obzir ove toplinske gradijente kroz duljinu presjeka moguće predvidjeti ove velike učinke pomaka. Učinak toplinskog gradijenta kroz presjek nije toliko značajan za konačni progib grede. To je stoga što veliki pomaci ne uključuju dodatni akcijski učinak u gredama, barem ne tamo gdje nema osnih pridržanja. Ipak, u gredama je materijal na gornjoj pojasnici koji štiti element od požara najčešće betonska ploča. Taj beton ne samo da štiti gornji dio presjeka od direktne izloženosti požaru, već također kondukcijom odvodi toplinu. Dio topline se prenosi iz gornje pojasnice u betonsku ploču.

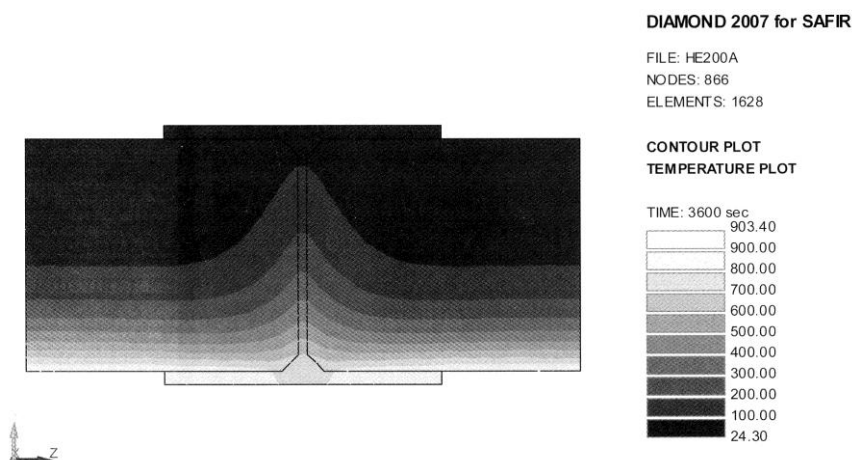


Slika 3.18. Temperatura u profilu HEA 300 s betonskom pločom na gornjoj pojasnici

Slika 3.18. prikazuje distribuciju temperature izračunatu naprednim proračunskim modelom za isti HEA 300 čelični profil, ali sa betonskom pločom na gornjoj pojasnici. Pretpostavljen je savršen kontakt između čelika i betona. Gornja granica za toplinsku provodljivost betona određena je prema normi EN 1994-1-2, [23]. Temperatura u gornjoj pojasnici je značajno reducirana sa 680 °C, prikazanih na slici 3.17., na oko 480 °C prikazanih na slici 3.18. Pošto jednostavnim toplinskim modelom efekt kondukcije topline ne može biti točno uzet u obzir, uveden je faktor prilagodbe κ_1 . Za nezaštićenu čeličnu gredu s betonskom pločom na gornjoj pojasnici vrijednost ovog faktora je 0,7, što povećava kapacitet momenta savijanja s 1 na $1/0,7=1,43$. Kod naprednog proračunskog modela efekt kondukcije topline kroz betonsku ploču je uzet u obzir direktno u toplinskom modelu i nema potrebe za faktorom prilagodbe u mehaničkom modelu. Ipak, ovaj povoljan efekt ima malu važnost za cjelokupnu otpornost na savijanje presjeka. To je zato što prisutnost betonske ploče nema velik utjecaj na temperaturu u donjoj pojasnici (redukcija od 4 °C u ovom primjeru). Posljedično, povećanje kapaciteta u gornjoj pojasnici ne vrijedi i za donju pojasnicu.

Postoje neke situacije gdje je hipoteza o jednolikoj raspodjeli temperature u presjeku potpuno nerealna i stvarna temperatura se ne može odrediti jednostavnim proračunskim modelom. To je npr. slučaj kada se čelični profil koristi kao stup, a betonski zid je smješten između pojasnica (slika 3.19.). U tom slučaju nemoguće je, koristeći jednostavni koncept toplinske masivnosti, koji je fundamentalan za jednostavni proračunski model, dobiti zadovoljavajuću aproksimaciju za prosječnu

temperaturu profila, niti za prosječnu temperaturu bilo kojeg dijela presjeka (izložena pojasnica, hrbat, neizložena pojasnica).



Slika 3.19. Temperatura u profilu HEA 200 umetnutom u betonski zid nakon 60 minuta izloženosti standardnom požaru

Kako bi se dobio točan prikaz raspodjele temperature treba se koristiti napredni proračunski model. Ako profil koristimo kao stup, nužno je dobiti realističnu raspodjelu temperature, jer toplinski gradijent može imati nepovoljan utjecaj na nosivost stupa i njegovu otpornost na požar.

Napredni model također se koristi za određivanje temperature u 3D proračunskom modeliranju.

3.3.2. Mehanički odziv

Napredne proračunske metode mehaničkog odziva trebaju biti utemeljene na priznatim načelima i pretpostavkama teorije konstrukcija, uzimajući u obzir promjene mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi. Različiti tipovi konačnih elemenata mogu se koristiti za modeliranje konstrukcije, ovisno o tipu konstrukcije i tipu ponašanja koji se mora uzeti u obzir. Važno je znati koji se tip elemenata koristi u kojoj situaciji, te koji tipovi modova otkazivanja nisu pokriveni analizom. Prema Eurokodu, ti modovi otkazivanja trebaju se eliminirati pravilnim mjerama. Pošto norme ne daju upute o tim mjerama i budući da one variraju ovisno o modu otkazivanja, ovdje je nužna prosudba inženjera.

Dvodimenzionalni Bernoullijevi tipovi grednih konačnih elemenata bili su godinama temelj za modeliranje konstrukcija u požaru. Tipični modovi otkazivanja koji nisu pokriveni ovakvim elementima za analizu su otkazivanje posmikom, lokalno izvijanje i bočno torzijsko izvijanje izvan ravnine.

Trodimenzionalni Bernoullijevi tipovi grednih elemenata uvedeni su za opisivanje situacija kada se konstrukcija deformira u tri dimenzije. Oni se također koriste za ravninske elemente opterećene u ravnini, ali koji otkazuju izvan ravnine. U graničnom požarnom stanju deformacije u čeličnim konstrukcijama mogu biti jako velike. To je tako zbog nekoliko razloga. Prvo, čvrstoća čelika pada povećanjem temperature, a drugo, toplinsko izduženje i toplinski gradijenti mogu uzrokovati dodatne pomake. Analizom moramo moći modelirati te pomake, i to moramo uzeti u obzir u formulaciji elemenata. Indirektni učinak akcije, odnosno varijacija akcije uzrokovana ograničenim toplinskim izduženjem, mora biti uzet u obzir naprednim mehaničkim modelom.

Najkritičniji aspekt Bernoullijevih grednih elemenata, bili oni 2D ili 3D, je da takvi elementi tretiraju svaki presjek kao presjek klase 1. To znači da presjek može iskoristiti potpuni kapacitet momenta plastičnosti i održati moment savijanja za jako velike zakrivljenosti. Minimalni zahtjev je da projektanti trebaju provjeriti klasu presjeka i koristiti neku alternativnu strategiju ako je presjek klase 2, 3 ili 4. Zbog toga moramo pripaziti na tvrdnju u Eurokodu, da se napredni proračunski modeli mogu koristiti za bilo koji tip presjeka.

Ljuskasti konačni elementi sa membranskim ponašanjem, kao i savijanje tankih čeličnih ploča, mogu se koristiti za prikaz hrptova i pojasnica koji čine čelični presjek. Kada se koriste ovi elementi, nema više problema određivanja klase presjeka i određivanja posebne strategije za klase 2, 3 i 4, jer je njima moguće izmodelirati lokalno izvijanje. Ipak, ovakvi ljuskasti elementi računalno su mnogo skuplji i koriste se samo za analizu pojedinih elemenata ili manjih dijelova konstrukcije, te za prikaz betonskih ploča.

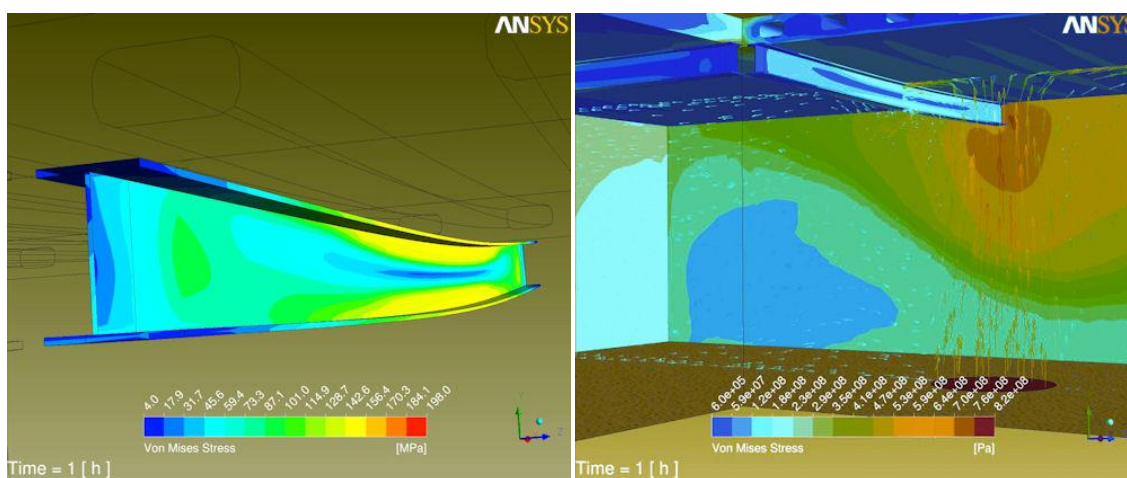
Nelinearni materijalni modeli preporučeni u Eurokodu trebali bi biti uzeti u obzir u softveru, uključujući i učinak opterećenja i rasterećenja na konstrukciju. To znači da se moramo služiti oštećenjem ili plastičnošću modela. Modeli oštećenja ili

plastičnosti, ili kombinacija oba, mogu se koristiti za beton, dok se model plastičnosti koristi za čelik.

Napredni proračunski modeli mogu biti vrlo duktilni, posebno kada se koristi dinamički proces, u smislu da mogu simulirati ponašanje otpornosti konstrukcije na opterećenje do vrlo velikih pomaka. Odgovornost je na korisniku da ne uzima automatski zadnje moguće vrijeme konvergencije proračuna kao vrijeme otpornosti na požar. Povećanje pomaka na konstrukciji mora se pratiti, tako da možemo dokučiti je li otpornost na požar dosegnuta prije vremena kraja simulacije. Eurokod, primjerice, preporuča da se deformacije za krajnje granično stanje ograniče ne bi li se osigurala kompatibilnost između svih dijelova konstrukcije. Kompatibilnost neće biti održana ako jedan od članova izgubi adekvatnu potporu. Drugi očiti primjer nedopustive deformacije je kada se greda progiba ispod razine tla. Trebamo paziti, jer se pri proračunu mogu pojaviti i manje očite nepoželjne situacije.

3.3.3. Programski paket ANSYS

ANSYS je jedan u nizu kompleksnih kompjuterskih programa koji omogućavaju pouzdano modeliranje konstrukcija, proizvoda, sustava, tehnoloških procesa i njihovog životnog vijeka. ANSYS radi na principu metode konačnih elemenata, ima modularnu strukturu i daje mogućnost korištenja samo potrebnih modula. Može raditi integrirano s drugim inženjerskim softverima na inovativnoj *Drag & Drop* površini uz CAD i FEA module, [24].



Slika 3.20. Model stropne čelične grede izložene požaru u programskom paketu ANSYS, [25]

Budući da u analize uključuje brojne promjenjive varijable, vrlo je pogodan za simuliranje složenih problema kao što su scenariji požara i odgovor konstrukcije na požarno djelovanje (slika 3.20.). ANSYS se, među ostalim, može koristiti za simulacije širenja dima i požara, proučavanje sustava suzbijanja požara, primjenu strategija suzbijanja dima, predviđanje vremena evakuacije, te analize ponašanja vatre i dima nakon katastrofalnih događaja. Također može služiti u planiranju optimalnog rasporeda detektora plina, ventilatora i ostale protupožarne opreme.

4. MEĐUNARODNA ROUND ROBIN STUDIJA

4.1. Uvod

U ovom radu koristite se rezultati ispitivanja požarne otpornosti slobodno oslonjene grede koje je proveo Tehnički istraživački centar u Švedskoj, [26]. Koristeći *Round Robin* metodologiju ispitivanja, ovaj centar okupio je 11 institucija koje su pojedinačno provele požarnu analizu nosača istih svojstava. Riječ je o međunarodnoj studiji koju neovisno provodi niz institucija, odnosno stručnjaka polazeći od istih zadanih podataka. Cilj ovakvog načina analize nekog problema je utvrditi rasipanje rezultata koji se dobiju od strane različitih institucija koje pak koriste različite metodologije za rješavanje specifičnog problema.

U ovom slučaju analizira se neujednačenost rezultata dobivenih naprednim metodama proračuna požarne otpornosti čeličnog nosača, te se dodatno sva neovisna rješenja uspoređuju s rezultatima laboratorijskog ispitivanja. Laboratorijski požarno ispitivanje provela je Europska grupa organizacija za požarna ispitivanja, kontrolu i certificiranje (European Group of Organisations for Fire Testing, Inspection and Certification – EGOLF). Sudionici ove međunarodne *Round Robin* studije su stručnjaci s različitih fakulteta, laboratorija i institucija, među kojima je Sveučilište u Zagrebu predstavljao Građevinski fakultet. Studija je provedena krajem 2014. i početkom 2015. godine kao predispitivanje u sklopu procesa certifikacije europskih laboratorija za ispitivanje požara.

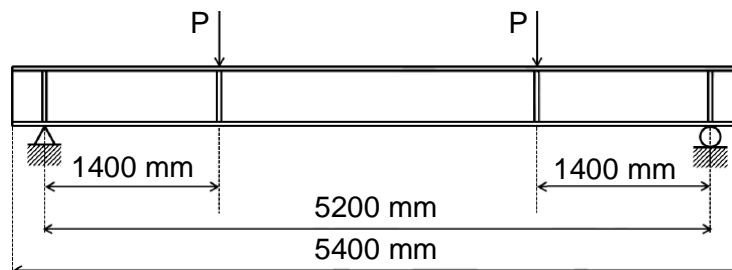
Kako je već navedeno, 11 neovisnih institucija sudjelovalo je u projektu, od kojih su neki poslali više rješenja, pa se raspolagalo s ukupno 18 rezultata.

4.2. *Round Robin* studija – prva faza

4.2.1. Ulazni podaci i zahtjevi

Ispitivani nosač je čelična greda profila HEB 300 i klase čelika S355. Ukupna duljina grede iznosi 5400 mm, a glavni raspon između oslonaca 5200 mm. Koncentrirane sile vrijednosti 150 kN nanese su u dvije točke, 1400 mm od svakog oslonca.

Ukupno primijenjeno opterećenje rezultira momentom od 210 kNm između točaka unosa sila. Ukrućenja hrpta debljine 15 mm zavarena su na čeličnu gredu nad osloncima i na mjestima koncentriranih opterećenja (slika 4.1.)



Slika 4.1. Geometrija ispitivanog nosača

Tijekom ispitivanja progib je mjereno u sredini raspona, a temperatura grede 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).

Greda je bila nezaštićena i izložena požaru u horizontalnoj peći s tri strane – donje i bočnih strana, dok je gornja strana bila zaštićena laganim betonskim pločama. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom EN 1365-3, a požar je simuliran prema EN 1363-1 (standardni ISO 834 požar).

Zadatak sudionika bio je a priori predvidjeti odgovor grede na požarno opterećenje koristeći bilo koji dostupan softver, te dostaviti sljedeće podatke:

1. kratki opis primijenjenog pristupa modeliranja koji uključuje:
 - detalje bilo koje pretpostavke uzete u obzir pri pripremi modela,
 - detalje materijala korištenog pri proračunu,
 - kratki opis pristupa modeliranju toplinskog djelovanja peći na gredu,
2. raspodjelu temperature u čeličnoj gredi (uz slobodan odabir načina provođenja analize prijenosa topline),
3. povijest progiba grede tijekom izloženosti standardnom požaru,
4. požarnu otpornost,
5. opis kriterija otkazivanja koji su korišteni tijekom određivanja požarne otpornosti.

4.2.2. Pristup modeliranju

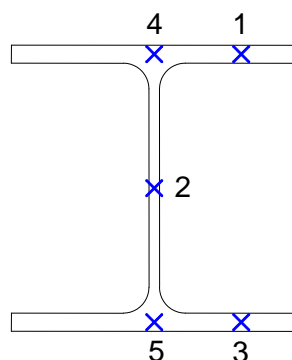
Za proračun potrebnih podataka sudionici su koristili različite pristupe. Razlike sežu od razlika u korištenim softverima, do pretpostavki potrebnih za analizu i razlika u načinu pretpostavljenog prijenosa topline. U većini slučajeva, korištene su numeričke metode temeljene na toplinskom djelovanju iz EN 1991-1-2 i odgovoru materijala iz EN 1993-1-2. Sukladno odabranom pristupu proračuna upotrebljene su različite pretpostavke.

Počevši od analize prijenosa topline, za 5 od 18 predstavljenih rješenja korištena je pretpostavka svedenog kapaciteta za distribuciju temperature. Sudionici su je proračunavali koristeći ili metodu prema normi EN 1993-1-2, ili posebne softverske pakete. 4 sudionika uvrstila su učinak efekta sjene, a 3 su uključila i prijenos topline kroz beton. Bez obzira na pretpostavke o temperaturnoj distribuciji, svi različiti pristupi temeljeni su na analizi nepovezanih temperaturnih pomaka. U svim slučajevima je koeficijent konvektivnog prijenosa topline, kao i sposobnost emisije čelika, uzet iz Eurokoda.

Pristup korišten za analizu konstrukcije temelji se ili na pojednostavljenoj metodi predstavljenoj u EN 1993-1-2, ili metodi konačnih elemenata softverskim paketima. Za napredna rješenja korišteni su Abaqus, ANSYS, Sofistik, OpenSEES, SAFIR i Infograph. Kod metode konačnih elemenata, korišteni su gredni, ljuskasti ili prostorni (*solid*) elementi. Neka rješenja temelje se na simetriji, uključujući i četvrtinsku simetriju. Rješenja u kojima su korišteni gredni elementi nužno zanemaruju krutost.

4.2.3. Temperature čeličnog nosača

Pošto nisu svi sudionici podnijeli izvješće o temperaturama čelika u točkama gdje je temperatura mjerena, teško je uspoređivati rezultate. Neki sudionici su računali temperaturu na sredinama pojasnica ili hrpta, a neki na vrhu, sredini i dnu hrpta. Radi usporedbe, rezultati su grupirani prema mjestu proračuna, numerirano od 1 do 5 prema lokaciji (slika 4.2.). Drugi su pak računali temperaturu s pretpostavkom svedenog kapaciteta, gdje je temperatura cijelog presjeka predstavljena brojem 6 u rezultatima.

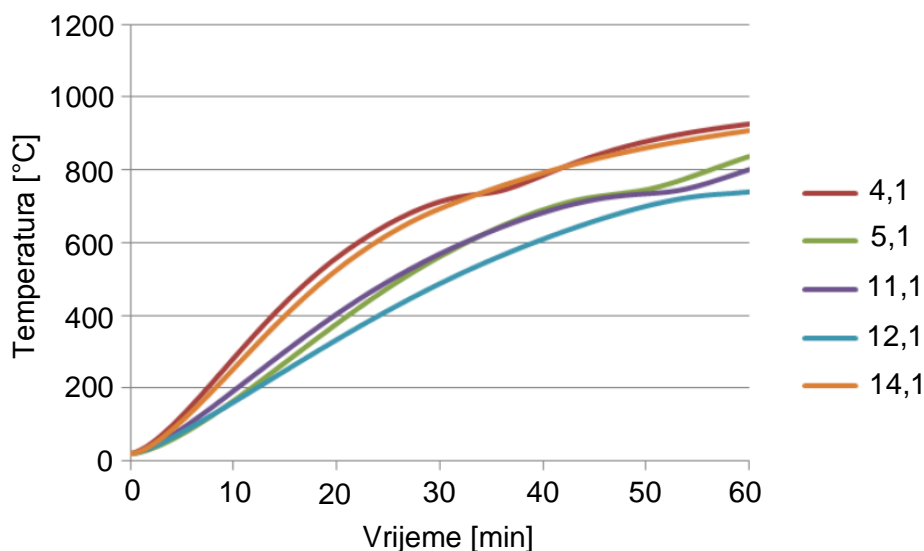


Slika 4.2. Točke u kojima su sudionici računali temperaturu

U obzir su uzeti rezultati do 60 minuta, iako su neki sudionici uključili i podatke nakon ovog vremena, što je zanemareno.

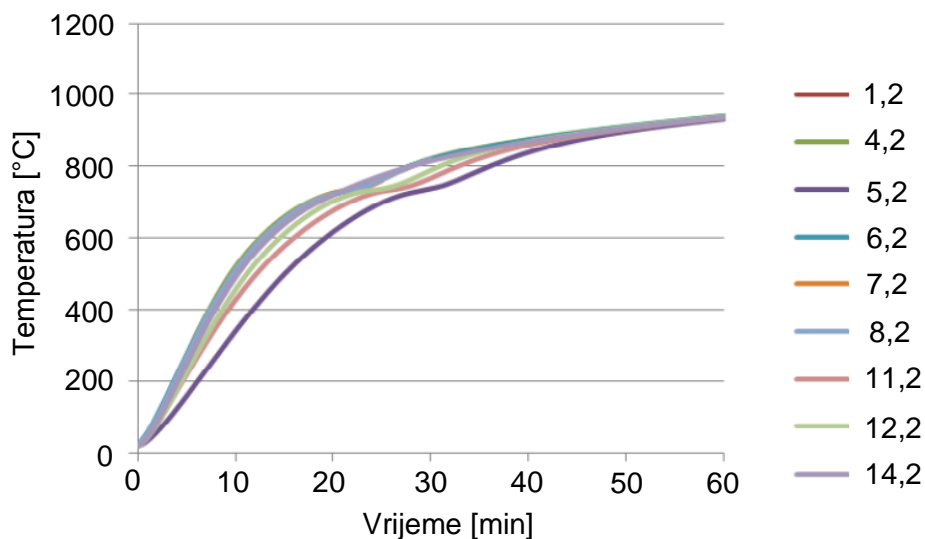
Svi su sudionici koristili svojstva materijala opisana u EN 1993-1-2, te koeficijente prijenosa topline i toplinske granice opisane u EN 1991-1-2 za određivanje toplinske izloženosti čelične grede. Različite pretpostavke i različiti pristupi rezultirali su značajnom razlikom u izračunatim temperaturama.

Slika 4.3. pokazuje temperature dobivene za točku 1, na sredini jedne od gornjih pojasnica grede. Krivulje na slici numerirane su prema sudionicima i mjestu na presjeku, tako da 4,1 označava temperaturu koju je izračunao sudionik broj 4, na mjestu 1. Slike 4.4., 4.5., 4.6. i 4.7. prikazuju temperature u točkama 2, 3, 4 i 5.

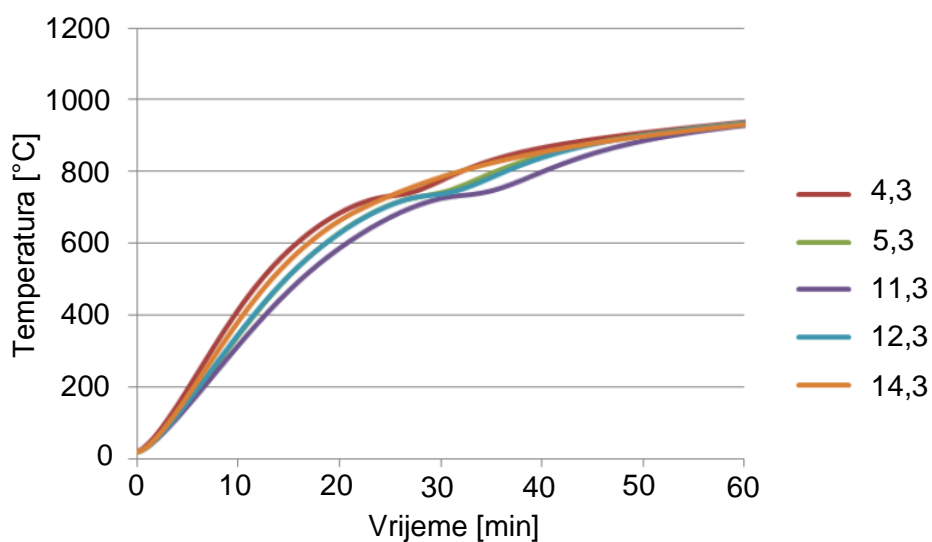


Slika 4.3. Temperature u točki 1

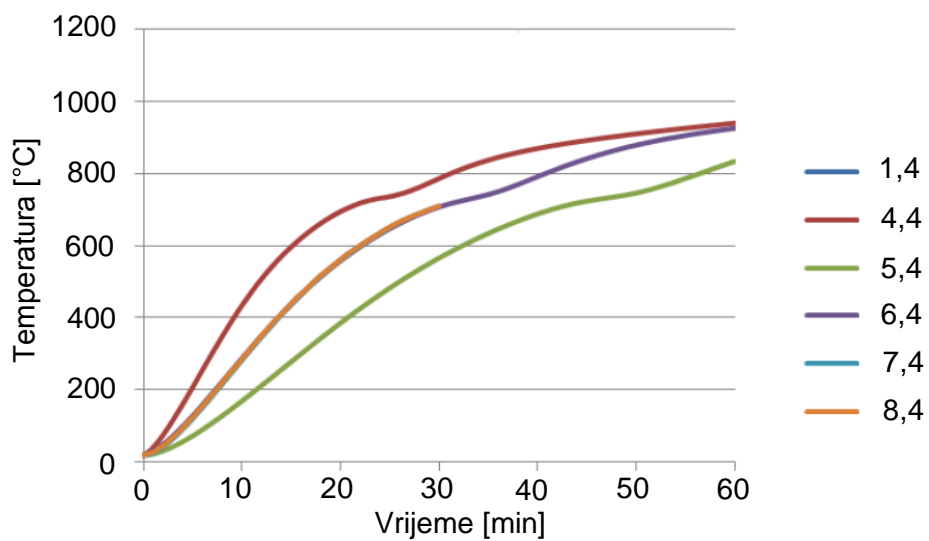
Najveće varijacije dobivene su iz izvješća o temperaturama na mjestima 1 i 4, koja su na vrhu grede. Razlog tome je što su sudionici različito uzimali u obzir izolaciju betonom na vrhu.



Slika 4.4. Temperature u točki 2

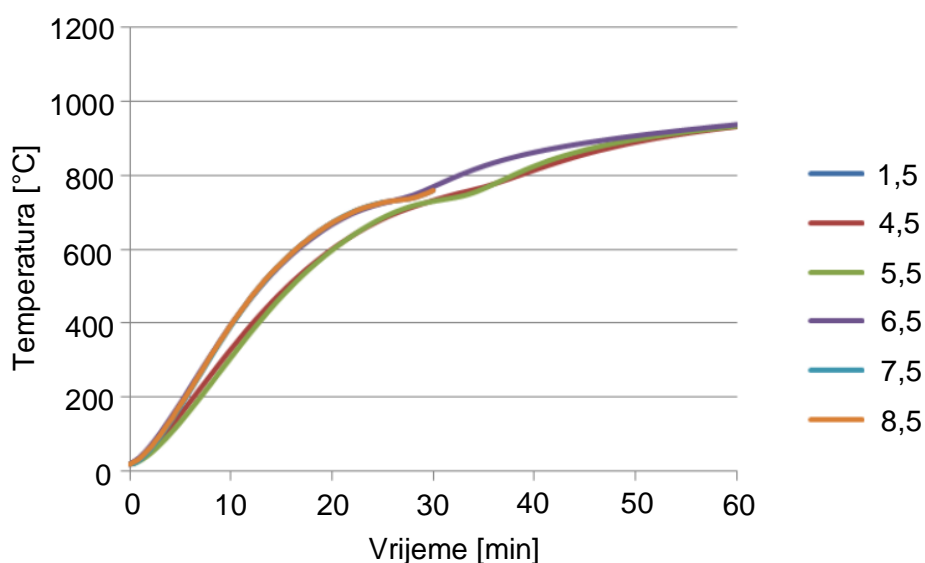


Slika 4.5. Temperature u točki 3

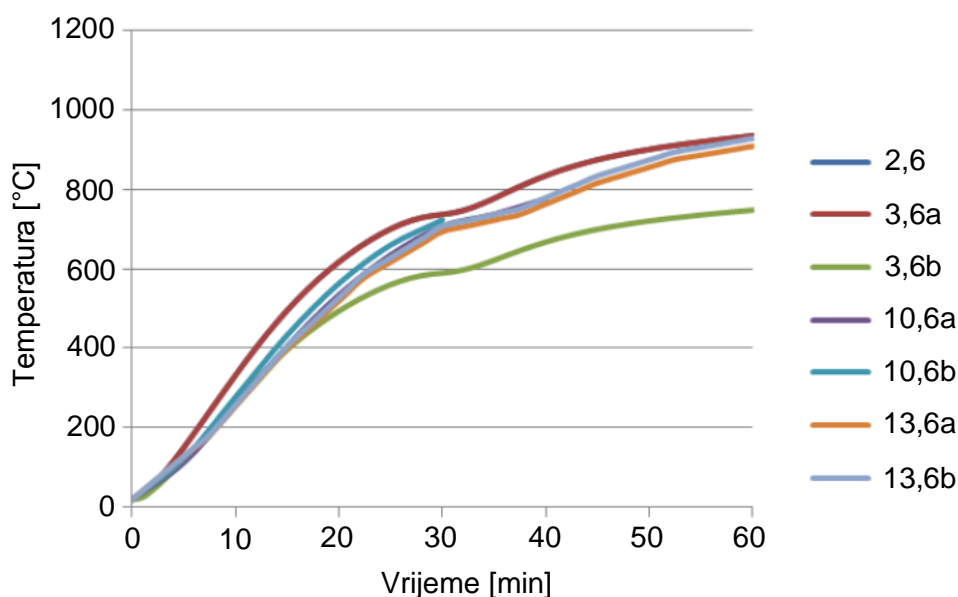


Slika 4.6. Temperature u točki 4

Slika 4.8. prikazuje temperature gdje su sudionici pretpostavili svedeni kapacitet. Treba spomenuti da je sudionik broj 3 prijavio dvije različite temperature, 3,6a i 3,6b, s pretpostavkom da je temperatura na krajevima ispitivane grede bila 20 % niža od temperature u sredini raspona. Pretpostavljena je linearna varijacija između različitih temperatura. Sudionik 10 proveo je dva toplinska proračuna uzimajući u obzir efekt sjene na različite načine, a sudionik 13 je prijavio samo maksimalnu i minimalnu temperaturu u gredi. Rezultati sudionika 13 su uključeni u ovaj dijagram radi usporedbe s proračunom svedenim kapacitetom, pošto iz opisa nije jasno gdje se javljaju maksimalna i minimalna temperatura.



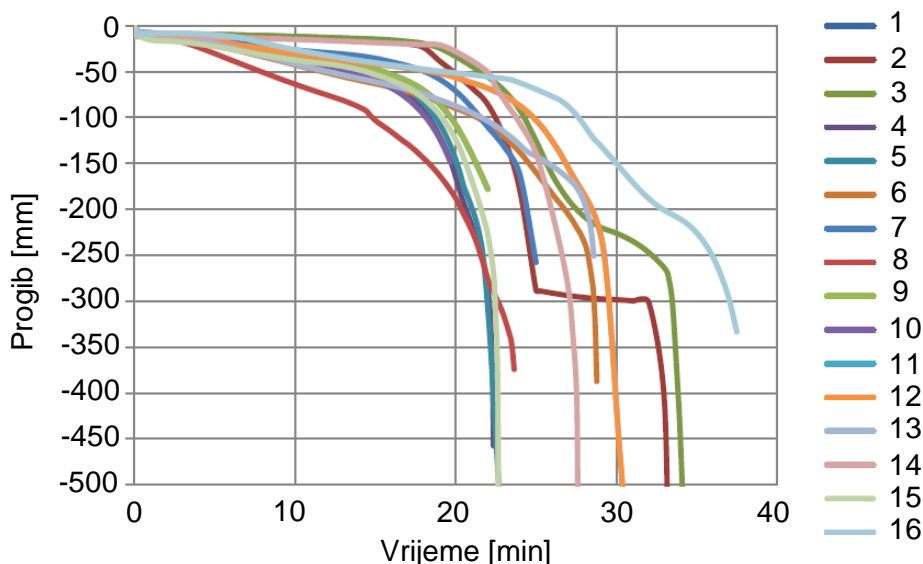
Slika 4.7. Temperature u točki 5



Slika 4.8. Temperature uzimajući u obzir svedeni kapacitet

4.2.4. Povijest progiba

U većini *Round Robin* izvještaja (16 od 18) prijavljen je i odgovor vrijeme-progib, koji se uobičajeno koristi kao kriterij otkazivanja. Ukupna kolekcija odgovora vrijeme-progib na sredini grede prikazana je na slici 4.9.



Slika 4.9. Izračunati odnosi vrijeme-progib

Bez obzira na kriterije kojima se određuje otkazivanje u svakom slučaju, možemo vidjeti da postoji velika razlika između odgovora 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. To predstavlja vremensku razliku od 87 % i 76 %. Ova razlika je iznenađujuća i rasipanje nije lako shvatiti, unatoč tome što očito neujednačenost u temperaturama čelika ima utjecaj na to.

4.2.5. Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja

Dobivena vremena otkazivanja svih sudionika, odnosno vrijednosti požarne otpornosti, prikazane su u tablici 4.1. Podebljani brojevi u tablici označavaju požarne otpornosti koje su priložili sudionici. Pritom su neki od njih kao kriterij otkazivanja uzeli vrijednost graničnog progiba, a neki vrijednost granične brzine prirasta progiba. Jedan od sudionika predložio je alternativni kriterij otkazivanja – bočni pomak grede na krajevima – pa su njegovi rezultati odbačeni i nisu prikazani u tablici.

U svrhu bolje usporedbe, rezultati su prilagođeni kriteriju otkazivanja opisanom u EN 13501-2, [27].

Tablica 4.1. Rezultati požarne otpornosti u minutama

Oznaka sudionika	Izračunata požarna otpornost		Prilagođena požarna otpornost	
	Progib	Brzina prirasta progiba	Progib	Brzina prirasta progiba
1	21*	<21	21*	-
2	25	19	24	18
3	31	21	31	21
4	21	16	21	16
5	21	16	21	16
6	22	27	27	21
7	24	<24	24	19
8	21	<21	21	14
9	22	<22	22	17
10	19**	-	20**	16
11	28	23	28	23
12	28	23	28	23
13	28	22	28	22
14	26	21	26	21
15	22	10	22	10
16	34	26	34	26
17	38***	-	38***	-
18	29***	-	29***	-

* Proračun za granični progib do 170 mm i za L/20 kao kriterij otkazivanja

** Proračun za granični progib do 150 mm korišten i kao kriterij otkazivanja

*** Pojednostavljene metode prema Eurokodu

Kriteriji otkazivanja prema EN 13501-2 su sljedeći:

Otkazivanje nosivosti dosegnuto je tek kada su zadovoljeni sljedeći kriteriji:

a) granična vrijednost progiba $D = L^2 / 400 \cdot d$ [mm],

b) granična vrijednost brzine prirasta progiba $dD / dt = L^2 / 9000 \cdot d$ [mm/min],

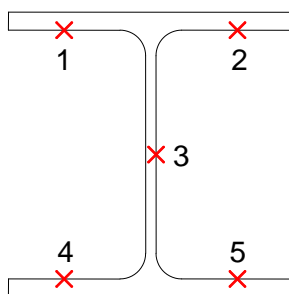
gdje je L svijetli raspon ispitivanog uzorka u mm, a d udaljenost između krajnjih vlakana tlačnog i vlačnog područja u hladnom stanju u mm.

4.3. Rezultati laboratorijskog ispitivanja

Laboratorijsko ispitivanje provela je organizacija EGOLF u skladu s normom EN 1363-1. Sila na gredu nanosena je preko hidrauličkih cilindara smještenih iznad

ukrućenja. Ukupno primijenjeno opterećenje rezultira momentom od 140 kNm između točaka unosa sila.

Temperaturni senzori postavljeni su na nosač u sredini raspona na mjestima 1, 2, 3, 4, i 5 (slika 4.10.). Također, postavljeni su na površinu grede 700 mm od oslonaca na mjestima 1, 3 i 4.



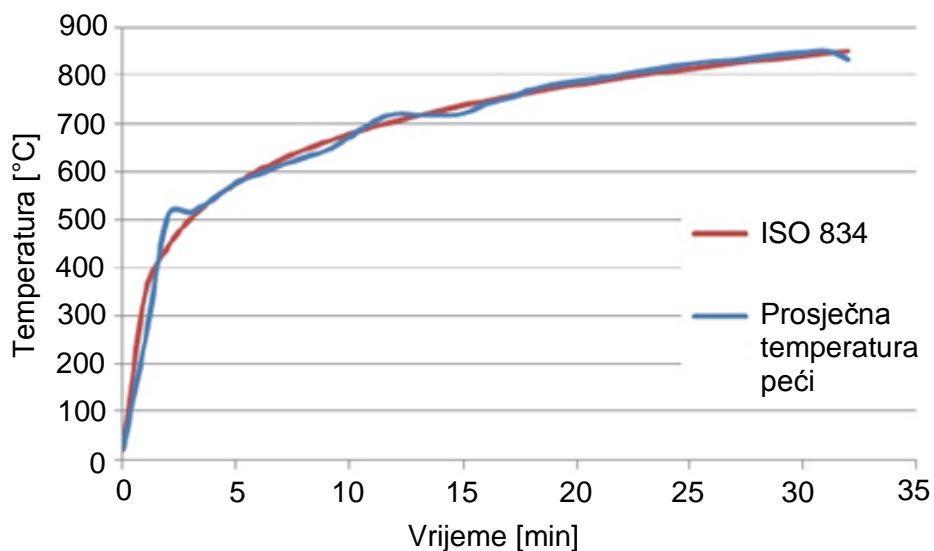
Slika 4.10. Točke na koje su postavljeni temperaturni senzori

Temperatura u peći mjerena je pločastim termometrima. Uzorak postavljen u peć prikazan je na slici 4.11. Vrh elementa prekriven je laganim porobetonским blokovima dimenzija 150 mm x 200 mm x 580 mm i gustoće 535 kg/m³. Peć je s obje strane betonskih blokova zatvorena armiranobetonskim pločama. Sloj izolacijskog materijala postavljen je s obje strane laganog betona, ne bi li se spriječila interakcija između laganog betona i armiranobetonskih ploča.



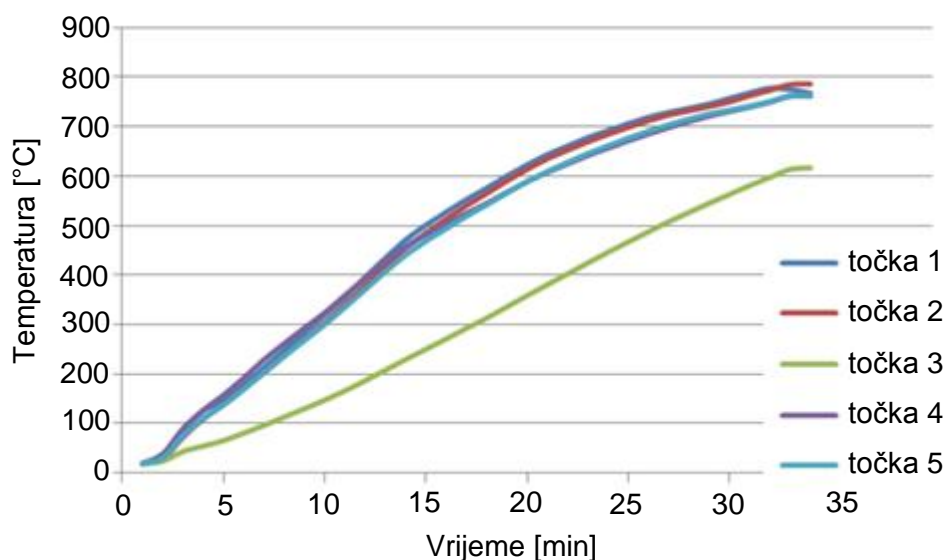
Slika 4.11. Čelični nosač postavljen u peć za ispitivanje

Prosječna mjerenja temperature zraka u peći pločastim termometrom u požarnom ispitivanju prikazana su na slici 4.12. Radi usporedbe na istu sliku dodana je i ISO 834 požarna krivulja.



Slika 4.12. Temperature zraka tijekom ispitivanja u usporedbi s ISO 834 krivuljom

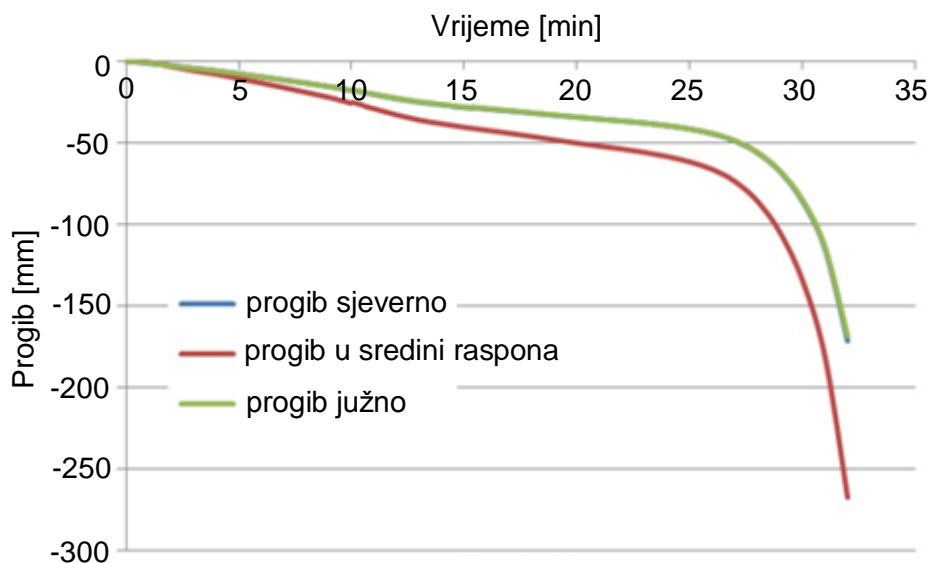
Temperature čelika mjerene temperaturnim senzorima tijekom ispitivanja prikazane su po mjernim pozicijama na slici 4.13.



Slika 4.13. Temperature čelika tijekom ispitivanja

Progib je mjeran u sredini grede i na mjestu 700 mm udaljenom od sjevernog i južnog ležaja. Ukupna povijest progiba prikazana je na slici 4.14. Ispitivanje je provođeno dok element nije dosegnuo oba kriterija otkazivanja iz EN 13501-2: kriterij progiba i

brzine prirasta progiba. Kritična brzina prirasta progiba prekoračena je nakon 26 min, a kritična vrijednost progiba dosegnuta je nakon 31 min.



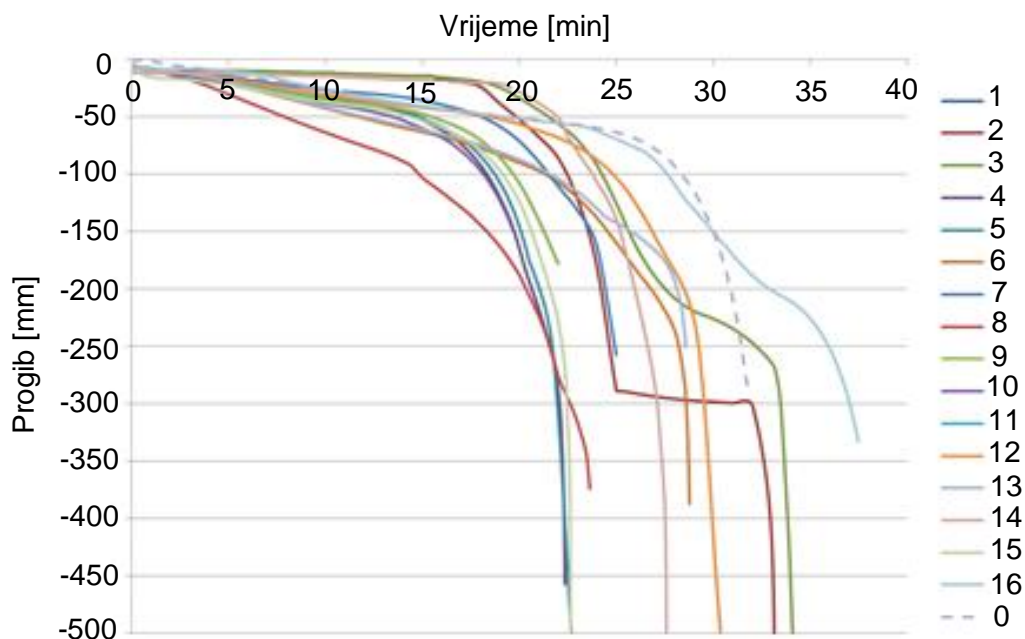
Slika 4.14. Povijest progiba tijekom ispitivanja

Ispitivanje je zaustavljeno odmah po dosezanju oba kriterija otkazivanja i element je uklonjen iz peći. Konačni deformirani oblik nosača je prikazan na slici 4.15. Jasno se vidi progib elementa i oštećenja laganih betonskih ploča postavljenih kao zaštita gornjeg ruba.



Slika 4.15. Nosač nakon ispitivanja

Za cijelo vrijeme izloženosti ISO standardnom požaru mjereno je progibanje nosača. Izmjereni odnos vrijeme-progib prikazan je na slici 4.16. krivuljom 0 u usporedbi s odnosima dobivenim *Round Robin* studijom.



Slika 4.16. Usporedba izračunatih i izmjerenog (krivulja 0) odnosa vrijeme-progib

4.4. Round Robin studija – druga faza

4.4.1. Dodatne informacije u odnosu na prvu fazu studije i zahtjevi

U sklopu studije sudionici su proveli i naknadnu analizu nakon što su im dani na uvid dodatni podaci o nosaču. Ti podaci su izmjerene temperature kojima je element u stvarnosti bio izložen, temperature čelika mjerene na drugim mjestima u odnosu na prvu fazu, te granica popuštanja čeličnog uzorka uzetog iz šarže samog nosača. Podaci su dani kako bi se otklonilo što više nesigurnosti proračuna i tako poboljšala korelacija između predviđanja rezultata i onoga što daje ispitivanje.

Također su promijenjene vrijednosti koncentriranih sila iz 150 kN u 100 kN, tako da opterećenje rezultira momentom od 140 kNm između točaka unosa sila.

Granica popuštanja čelika izmjerena je u iznosu od 447,5 MPa, što je značajno više u odnosu na nominalnu vrijednost od 355 MPa danu za kvalitetu čelika S355.

Podaci o vrijednostima temperature dani sudionicima prošireni su pretpostavljenim vrijednostima pošto je ispitivanje prekinuto kad je nosač otkazao. Na taj način vrijeme otkazivanja dobiveno ispitivanjem nije sudionicima bilo unaprijed poznato.

Prosječne vrijednosti temperature u peći koje su dane na uvid sudionicima prikazane su u tablici 4.2. Izmjerene vrijednosti temperature čelika u različitim mjernim točkama dane su u tablici 4.3.

Tablica 4.2. Prosječne vrijednosti temperature u peći

Vrijeme [min]	Temperature prema ISO 834 krivulji	Izmjerene temperature	Vrijeme [min]	Temperature prema ISO 834 krivulji	Izmjerene temperature
0	20	22	23	802	810
1	349	252	24	808	817
2	444	511	25	814	825
3	502	516	26	820	830
4	544	544	27	826	833
5	576	575	28	831	838
6	603	595	29	836	844
7	625	613	30	841	848
8	645	629	31	846	853
9	662	644	32	851	860
10	678	671	33	856	867
11	692	702	34	860	871
12	705	720	35	864	874
13	717	718	36	869	878
14	728	717	37	873	882
15	738	721	38	877	885
16	748	741	39	881	888
17	757	753	40	884	893
18	765	771	41	888	897
19	773	782	42	892	899
20	781	788	43	895	900
21	788	794	44	899	902
22	795	803	45	902	903

Tablica 4.3. Temperature čelika

Vrijeme [min]	Pozicija 1	Pozicija 2	Pozicija 3	Pozicija 4	Pozicija 5	Vrijeme [min]	Pozicija 1	Pozicija 2	Pozicija 3	Pozicija 4	Pozicija 5
0	19	19	19	19	19	23	506	495	701	693	686
1	38	34	37	30	32	24	526	517	714	707	700
2	63	56	95	86	75	25	548	536	725	720	712
3	71	69	141	125	111	26	565	554	734	729	724
4	85	83	177	149	141	27	585	572	742	738	733
5	104	99	215	181	173	28	601	590	752	746	742
6	123	115	254	216	206	29	619	606	764	758	751
7	141	132	289	251	239	30	634	622	775	769	763
8	160	148	324	286	273	31	650	637	787	778	774
9	179	166	357	322	306	32	664	652	798	774	786
10	201	189	395	359	343	33	677	670	808	798	795
11	226	212	434	399	381	34	689	683	814	805	803
12	251	237	473	438	421	35	701	695	819	811	809
13	274	260	505	473	457	36	711	705	825	817	816
14	297	283	531	503	487	37	721	717	828	822	820
15	320	307	554	529	515	38	730	727	831	826	825
16	344	333	578	554	542	39	738	736	835	830	829
17	368	357	599	578	567	40	745	744	838	833	833
18	391	383	622	601	592	41	751	751	839	835	835
19	415	407	642	624	615	42	756	757	840	837	838
20	440	429	659	645	636	43	761	763	841	839	839
21	462	451	674	662	653	44	766	767	842	840	841
22	485	475	689	679	671	45	770	771	842	841	841

Za drugu fazu, od sudionika je zatraženo da ponove svoje analize uzimajući u obzir nove podatke i zauzvrat pošalju:

1. opis bilo kojih drugih promjena modela između prve i druge faze,
2. opis načina kojim su dane vrijednosti temperature unijete u model, ako jesu,
3. prepravljenu povijest progiba nosača za vrijeme izloženosti standardnom požaru,
4. požarnu otpornost nosača tijekom izloženosti standardnom požaru.

U odnosu na fazu 1, sudjelovanje u fazi 2 smanjeno je; na 13 priloženih rješenja. Unatoč tome, broj rješenja ostao je isti između dviju faza kako bi se mogla vršiti usporedba. Također, priloženo je još jedno rješenje, rješenje broj 19, koje se nije pojavljivalo u prvoj fazi.

4.4.2. Promjene u modeliranju prijenosa topline i mehaničkom modelu

Sudionici s rješenjima 2, 3, 6, 8 i 14 primijenili su izmjerene temperature na dijelove nosača, bez zaglađivanja temperatura na prijelazu između hrpta i pojasnice (npr. primijenjene su tri povijesti zagrijavanja – jedna na gornjoj pojasnici, jedna u hrptu, a jedna na donjoj pojasnici). U rješenju broj 2 temperature su nanese cijelom duljinom nosača, dok su u rješenju broj 3 nanese u sredini raspona, te zatim linearno smanjivane do 80 % vrijednosti na krajevima nosača. U oba navedena rješenja, prosječna vrijednost izmjerene temperature primijenjena je na ukrućenja. Sudionik 6 primijenio je temperaturu hrpta na ukrućenja.

U rješenju broj 7, sudionik je promijenio koeficijent konvektivnog prijenosa topline iz $35 \text{ kW/m}^2\text{K}$ u prvoj fazi, na $25 \text{ kW/m}^2\text{K}$ u drugoj fazi. Osim toga, izmijenio je sposobnost emisije čelika iz 0,7 u 0,6. Temperature mjerene u peći (vrijednosti mjerenja pločastim termometrom) sudionici su koristili kao temperature radijacije i plina u proračunima prijenosa topline.

Sudionik 9 koristio je mjerene temperature iz peći umjesto temperature standardne požarne krivulje za proračun prijenosa topline.

Rješenje broj 10 nije sadržavalo dodatne podatke što se tiče promjene vrijednosti temperature u odnosu na prvu fazu.

Sudionik 15 prilagodio je koeficijent konvektivnog prijenosa topline i sposobnost emisije čelika kako bi temperature u modelu što bolje odgovarale izmjerenima. U ovom slučaju uzet je koeficijent konvektivnog prijenosa topline od $12 \text{ kW/m}^2\text{K}$ na gornjoj pojasnici i $15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ na ostalim mjestima. Sposobnost emisije čelika svugdje je uzeta kao 0,5.

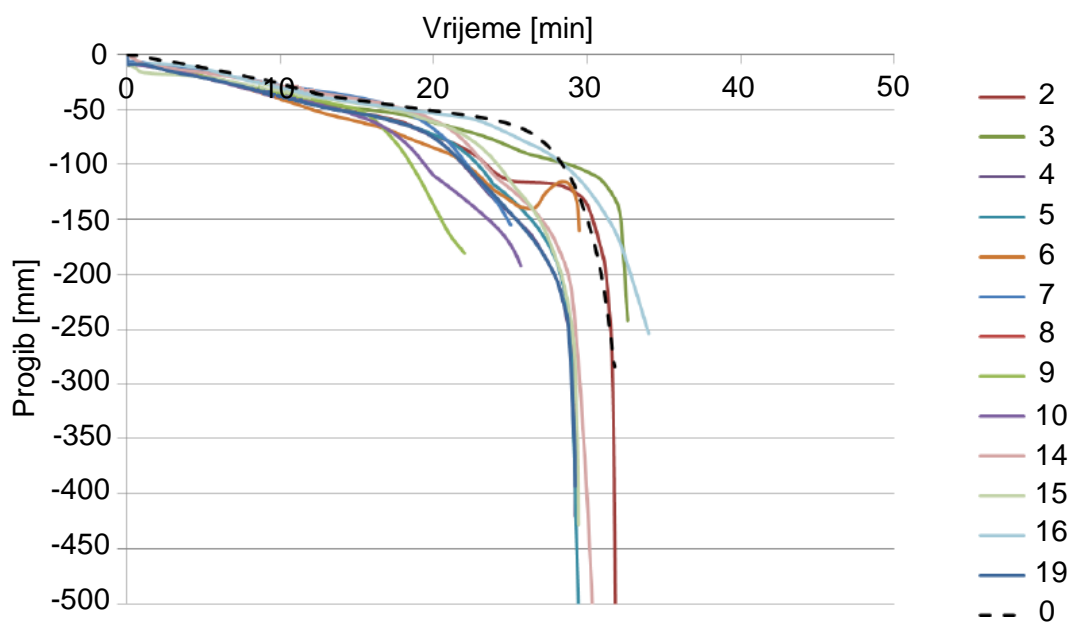
U rješenju broj 16 korištena je nova temperatura kako bi se ponovno izračunala sposobnost emisije čelika. Ta ista temperatura uzeta je kao temperatura radijacije i plina u proračunu prijenosa topline.

Sudionici odgovorni za rješenja 4, 5 i 19 primijenili su izmjerenu temperaturu direktno na čelik. Temperatura gornje pojasnice bila je prosječna temperatura pozicija 1 i 2, a temperatura donje pojasnice prosječna temperatura pozicija 4 i 5.

Sudionici koji su predali izvješća pod brojevima 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15 i 19 prepravili su temperaturno ovisnu krivulju sila-naprezanje tako da odgovara izmjerenim vrijednostima granice popuštanja koja je priopćena sudionicima. U izvješću broj 16 sudionik to nije prilagodio.

4.4.3. Povijest progiba

Povijest progiba izvještenih u drugoj fazi prikazana je na slici 4.17. Krivulja 0 na toj slici predstavlja rezultate laboratorijskog ispitivanja.



Slika 4.17. Povijest progiba u drugoj fazi proračuna

Požarna otpornost koja za progib od 100 mm u drugoj fazi iznosi 18 - 32 min (slika 4.17.) i požarna otpornost za isti progib u prvoj fazi s vrijednošću od 15 - 28 min (slika 4.9.) imaju usporedivo rasipanje rezultata. Za veće progibe, rasipanje se čini manje u drugoj fazi, no to je zbog manjeg broja poslanih izvješća i postojanja simulacija koje nisu doseglye veće progibe ili ne konvergiraju zajedničkim rezultatima niti pri manjim.

4.4.4. Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja

Požarne otpornosti koje su izračunali sudionici prikazane su u tablici 4.4. zajedno s vrijednostima prilagođenim kriterijima otkazivanja iz EN 13501-2. Podebljani brojevi u tablici označavaju požarne otpornosti koje su priložili sudionici.

Tablica 4.4. Rezultati požarne otpornosti u minutama

Oznaka sudionika	Izračunata požarna otpornost		Prilagođena požarna otpornost	
	Progib	Brzina prirasta progiba	Progib	Brzina prirasta progiba
1	-	-	-	-
2	31	29	31	29
3	32	31	32	31
4	26	-	28	23
5	27	-	28	21
6	29	21	30	20
7	26	26	25	20
8	26	-	25	23
9	27	-	25	17
10	26	-	25	17
11	-	-	-	-
12	-	-	-	-
13	-	-	-	-
14	28	-	29	21
15	28	-	28	22
16	33	27	33	28
17	-	-	-	-
18	-	-	-	-
19	26	-	28	21

5. DOPRINOS MEĐUNARODNOJ ROUND ROBIN STUDIJI

5.1. Uvod

Krajem 2014. godine Tehnički istraživački centar u Švedskoj pozvao je Sveučilište u Zagrebu da sudjeluje u međunarodnoj znanstvenoj studiji o procjeni požarne otpornosti. Građevinski fakultet (Zavod za materijale i Zavod za konstrukcije), kao sastavnica Sveučilišta u Zagrebu, prihvatio je poziv na sudjelovanje. Na Katedri za metalne konstrukcije, Zavoda za konstrukcije, pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Davora Skejića, istraživale smo ovu problematiku u razdoblju od listopada 2014. do ožujka 2015.

Doprinos ovoj međunarodnoj studiji ostvaren je kroz procjenu požarne otpornosti prema normama, ručno i programom Elefir-EN. Nakon proračuna pojednostavljenim metodama, slijedila je robusna analiza naprednom metodom u programskom paketu ANSYS. Naši rezultati, zajedno s rezultatima svih ostalih sudionika međunarodne *Round Robin* studije dani su u 4. poglavlju ovog rada. U ovom poglavlju prikazani su detalji proračuna s kojim je predstavljeno naše Sveučilište.

5.2. Proračun prema europskim normama

5.2.1. Ručni proračun prema europskim normama

U nastavku ćemo pojednostavljenom metodom prema Eurokodu proračunati požarnu otpornost nosača istih karakteristika kao u poglavlju 4., za prvu i drugu fazu. Proračun požarne otpornosti provest ćemo prema koracima danima u poglavlju 3.2.1.2.

5.2.1.1. Prva faza

- Odabir odgovarajućih vrijednosti faktora prilagodbe $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$

$\kappa_1 = 0,70$ - za nezaštićeni nosač izložen požaru s tri strane

$\kappa_2 = 1,00$ - u svim slučajevima osim na osloncima statički neodređenog nosača

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,70 \cdot 1,00 = 0,70$$

- Proračun stupnja iskorištenosti kod požara μ_0

Stupanj iskorištenosti μ_0 izračunat ćemo prema izrazu (3.-15.):

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

- Određivanje kritične temperature za čelični nosač

Kritična temperatura čelika $\theta_{a,cr}$ dana je izrazom (3.-14.):

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

- Definiranje faktora presjeka uključujući učinak sjene $(A_m/V)_{sh}$ za nezaštićene čelične elemente

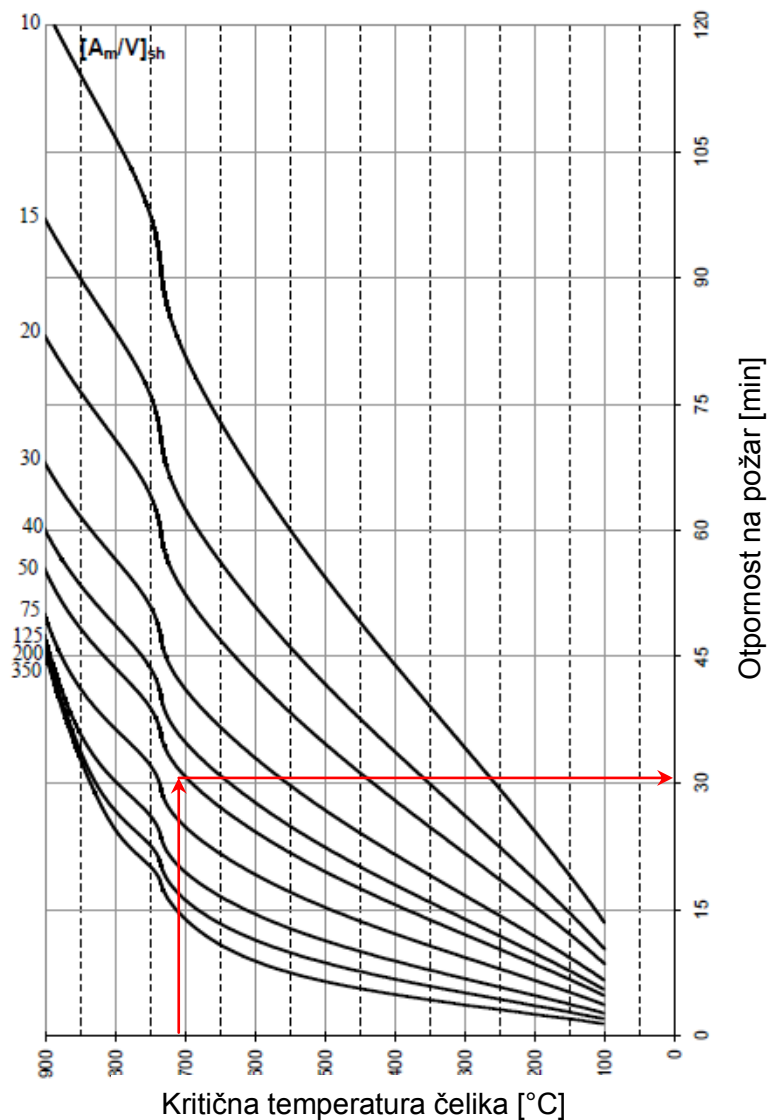
Za profil HEB 300 očitana je faktor presjeka iz tablice u prilogu br. 1:

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

- Primjena nomograma (slika 3.11.) za dobivanje vremena požarne otpornosti pomoću kritične temperature

Za izračunatu kritičnu temperaturu čelika $\theta_{a,cr} = 711 \text{ } ^\circ\text{C}$ 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 (slika 5.1.):

$$t_{fi,d} = 30 \text{ min}$$



Slika 5.1. Nomogram za nezaštićene čelične elemente

5.2.1.2. Druga faza

- Odabir odgovarajućih vrijednosti faktora prilagodbe $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$

$\kappa_1 = 0,70$ - za nezaštićeni nosač izložen požaru s tri strane

$\kappa_2 = 1,00$ - u svim slučajevima osim na osloncima statički neodređenog nosača

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,70 \cdot 1,00 = 0,70$$

- Proračun stupnja iskorištenosti kod požara μ_0

Stupanj iskorištenosti μ_0 izračunat ćemo prema izrazu (3.-15.):

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

- Određivanje kritične temperature za čelični nosač

Kritična temperatura čelika $\theta_{a,cr}$ dana je izrazom (3.-14.):

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

- Definiranje faktora presjeka uključujući učinak sjene $(A_m / V)_{sh}$ za nezaštićene čelične elemente

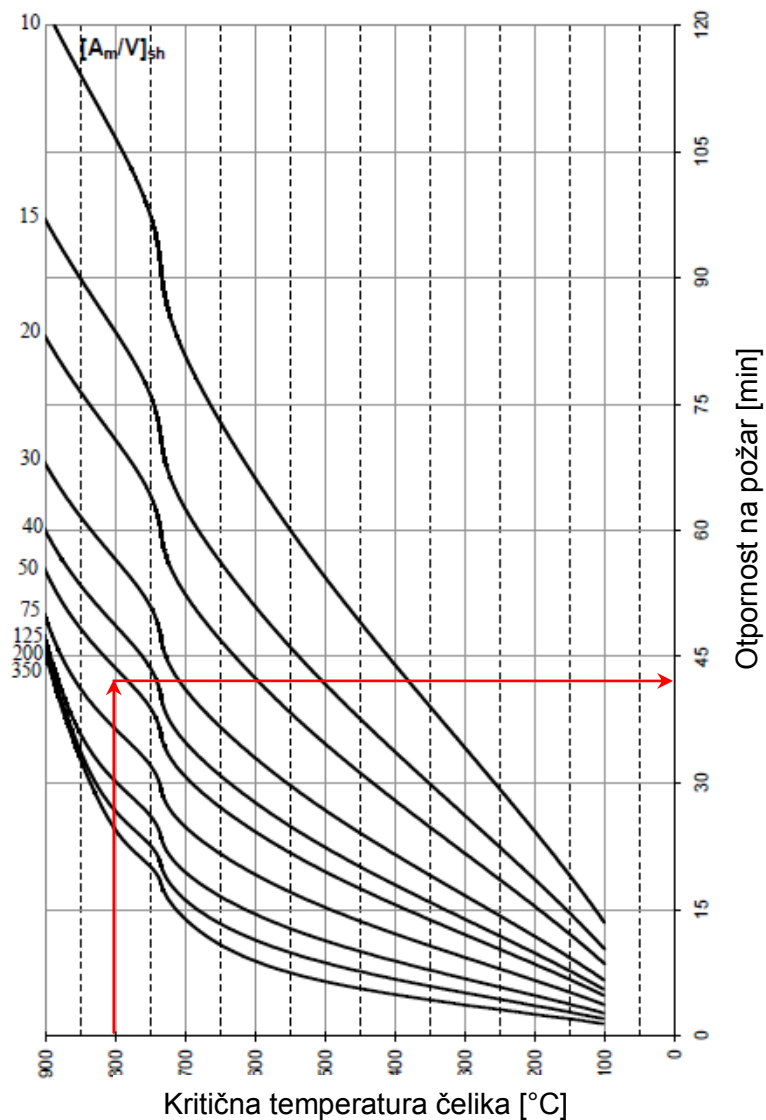
Za profil HEB 300 očitano je faktor presjeka iz tablice u prilogu br. 1:

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

- Primjena nomograma (slika 3.11.) za dobivanje vremena požarne otpornosti pomoću kritične temperature

Za izračunatu 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 (slika 5.2.):

$$t_{fi,d} = 41 \text{ min}$$



Slika 5.2. Nomogram za nezaštićene čelične elemente

5.2.2. Proračun u programu Elefir-EN


Programskim paketom Elefir-EN proračunat je ispitivani nosač za prvu i drugu fazu *Round Robin* studije. Ulazni podaci uneseni u softver za obje faze su sljedeći:

- izloženost elementa unutarnjim silama: savijanje oko jače osi,
- vrsta analize: analiza elementa,
- poprečni presjek nosača: HEB 300,
- kvaliteta čelika: S355,
- izloženost bočno-torzijskom izvijanju: nije dopušteno,
- vrijednosti faktora prilagodbe: $\kappa_1 = 0,70$, $\kappa_2 = 1,00$,

- vrsta proračuna: proračun kritične temperature kao funkcije proračunskog momenta savijanja - $M_{fi,Ed} = 210\text{kNm}$ za prvu fazu, $M_{fi,Ed} = 140\text{kNm}$ za drugu fazu,
- izloženost požaru: s tri strane poprečnog presjeka,
- protupožarna zaštita: bez zaštite,
- požarna krivulja: ISO 834.

Za obje faze odabrana je kvaliteta čelika S355 budući da programski paket Elefir-EN omogućuje proračun samo s nominalnim granicama popuštanja. Međutim, softver daje upozorenje da je debljina pojasnice profila HEB 300 veća od 15 mm, pa u skladu s time preporučuje odabir kvalitete čelika S345. U nastavku su dani izlazni podaci za obje kvalitete čelika u svakoj fazi.

5.2.2.1. Prva faza ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$)

 ELEFIR-EN REPORT
$\gamma_{M0} = 1.00$ $\gamma_{M,fi} = 1.00$
Temperature evaluated using interpolation on the table 3.1 from EN 1993-1-2.
<u>PROFILE</u>
HE 300 B (Class 1)
$h = 300 \text{ mm}$ $b = 300 \text{ mm}$ $t_w = 11 \text{ mm}$ $t_f = 19 \text{ mm}$ $r = 27 \text{ mm}$ $A = 14910 \text{ mm}^2$ $P = 1.73 \text{ m}^2/\text{m}$
$W_{el,y} = 1677710 \text{ mm}^3$ $W_{pl,y} = 1869000 \text{ mm}^3$ $I_z = 85630000 \text{ mm}^4$ $I_t = 1850000 \text{ mm}^4$ $I_w = 1688000000000 \text{ mm}^6$
<u>STEEL</u>
Carbon steel, S355 Young modulus: 210 GPa

ELEMENT SUBMITTED TO BENDING ABOUT THE MAJOR AXIS

Critical temperature function of design moment: $M_{fi,Ed} = 210$ kNm
Lateral torsional buckling not allowed.

Adaptation factors:

Non-uniform temperature across the cross-section: $k_1 = 0.7$

Non-uniform temperature along the beam: $k_2 = 1.0$

EXPOSURE

Fire exposure: Fire on three sides

Fire protection: No protection

RESULTS

Standard fire curve, ISO 834

Section factor: $[A_m/V] = 96.0$ m⁻¹

Modified section factor: $k_{sh} [A_m/V] = 54.3$ m⁻¹

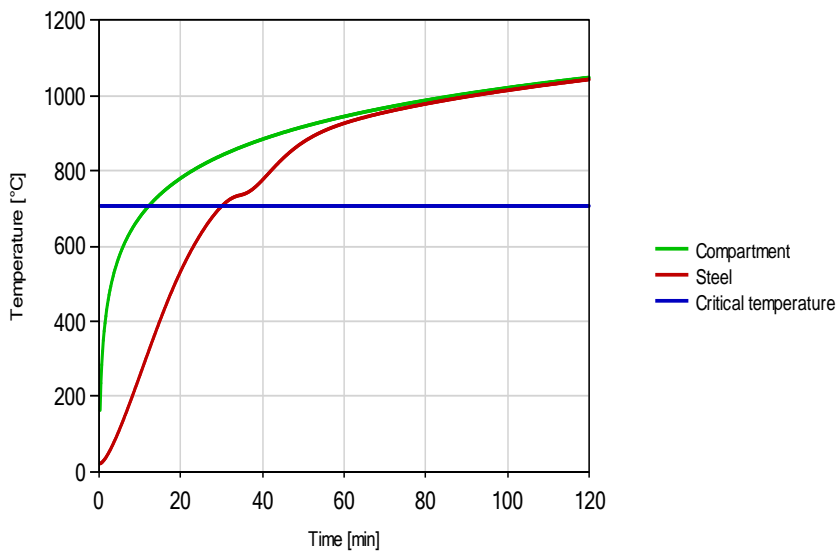
A critical temperature of 707.0 °C is reached after 30.03 minutes

Design moment: 210.000 kNm

Degree of utilization: 0.222

GRAPH

FIRE COMPARTMENT AND STEEL TEMPERATURE



[Maximum temperature] Compartment: 1049.0 °C at 120.00 min / Steel: 1043.8 °C at 120.00 min

5.2.2.2. Prva faza ($f_y = 345 \text{ N/mm}^2$)



ELEFIR-EN REPORT

$$\gamma_{M0} = 1.00$$

$$\gamma_{M,fi} = 1.00$$

Temperature evaluated using interpolation on the table 3.1 from EN 1993-1-2.

PROFILE

HE 300 B (Class 1)

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$t_w = 11 \text{ mm}$$

$$t_f = 19 \text{ mm}$$

$$r = 27 \text{ mm}$$

$$A = 14910 \text{ mm}^2$$

$$P = 1.73 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$W_{el,y} = 1677710 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 1869000 \text{ mm}^3$$

$$I_z = 85630000 \text{ mm}^4$$

$$I_t = 1850000 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 1688000000000 \text{ mm}^6$$

STEEL

Carbon steel, S355

Young modulus: 210 GPa

ELEMENT SUBMITTED TO BENDING ABOUT THE MAJOR AXIS

Critical temperature function of design moment: $M_{fi,Ed} = 210 \text{ kNm}$

Lateral torsional buckling not allowed.

Adaptation factors:

Non-uniform temperature across the cross-section: $k_1 = 0.7$

Non-uniform temperature along the beam: $k_2 = 1.0$

EXPOSURE

Fire exposure: Fire on three sides

Fire protection: No protection

RESULTS

Standard fire curve, ISO 834

$$\text{Section factor: } [A_m/V] = 96.0 \text{ m}^{-1}$$

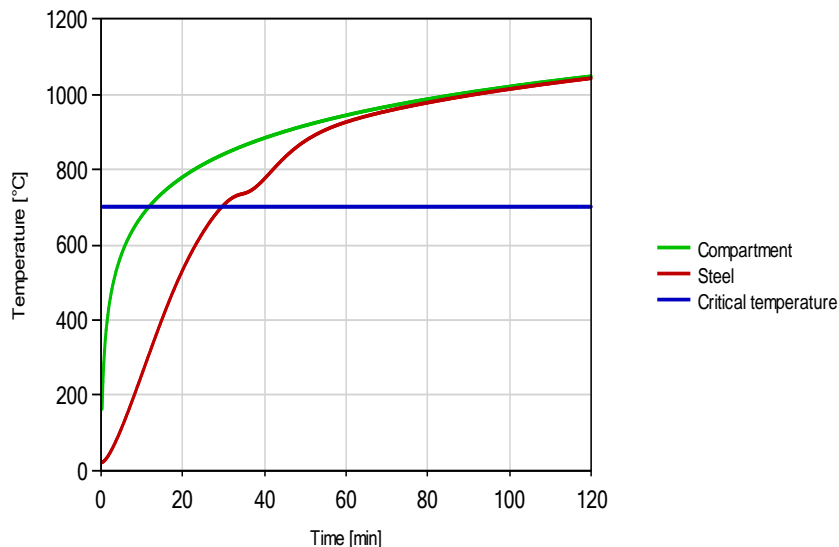
$$\text{Modified section factor: } k_{sh} [A_m/V] = 54.3 \text{ m}^{-1}$$

A critical temperature of 701.7 °C is reached after 29.57 minutes

Design moment: 210.000 kNm
Degree of utilization: 0.228

GRAPH

FIRE COMPARTMENT AND STEEL TEMPERATURE



[Maximum temperature] Compartment: 1049.0 °C at 120.00 min / Steel: 1043.8 °C at 120.00 min

5.2.2.3. Druga faza ($f_y = 447 \text{ N/mm}^2$)



ELEFIR-EN REPORT

$\gamma_{M0} = 1.00$

$\gamma_{M,fi} = 1.00$

Temperature evaluated using interpolation on the table 3.1 from EN 1993-1-2.

PROFILE

HE 300 B (Class 1)

$h = 300 \text{ mm}$

$b = 300 \text{ mm}$

$t_w = 11 \text{ mm}$

$t_f = 19 \text{ mm}$

$r = 27 \text{ mm}$

$A = 14910 \text{ mm}^2$

$P = 1.73 \text{ m}^2/\text{m}$

$W_{el,y} = 1677710 \text{ mm}^3$

$W_{pl,y} = 1869000 \text{ mm}^3$

$I_z = 85630000 \text{ mm}^4$

$I_t = 1850000 \text{ mm}^4$

$I_w = 1688000000000 \text{ mm}^6$

STEEL

Carbon steel, Other (447 MPa)
Young modulus: 210 GPa

ELEMENT SUBMITTED TO BENDING ABOUT THE MAJOR AXIS

Critical temperature function of design moment: $M_{fi,Ed} = 140$ kNm
Lateral torsional buckling not allowed.

Adaptation factors:

Non-uniform temperature across the cross-section: $k_1 = 0.7$
Non-uniform temperature along the beam: $k_2 = 1.0$

EXPOSURE

Fire exposure: Fire on three sides
Fire protection: No protection

RESULTS

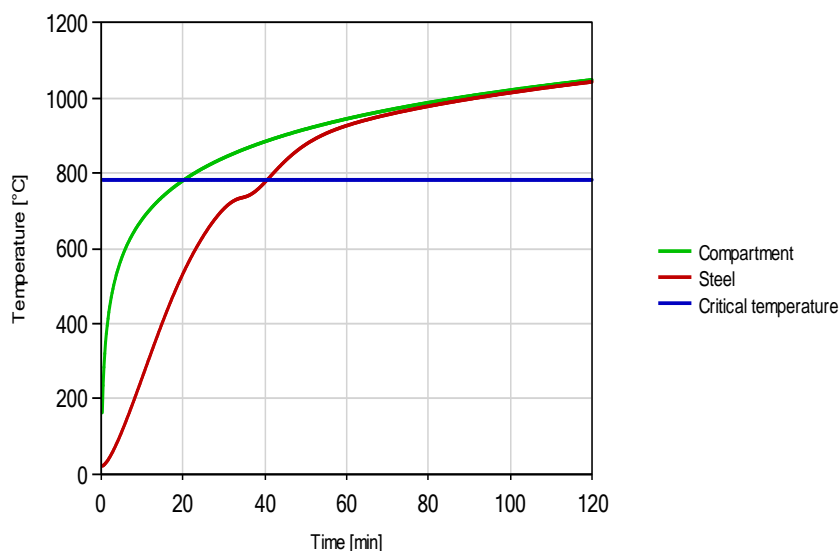
Standard fire curve, ISO 834

Section factor: $[A_m/V] = 96.0 \text{ m}^{-1}$
Modified section factor: $k_{sh} [A_m/V] = 54.3 \text{ m}^{-1}$

A critical temperature of 782.8 °C is reached after 40.52 minutes
Design moment: 140.000 kNm
Degree of utilization: 0.131

GRAPH

FIRE COMPARTMENT AND STEEL TEMPERATURE



[Maximum temperature] Compartment: 1049.0 °C at 120.00 min / Steel: 1043.8 °C at 120.00 min

5.3. Proračun prema naprednim metodama (ANSYS)

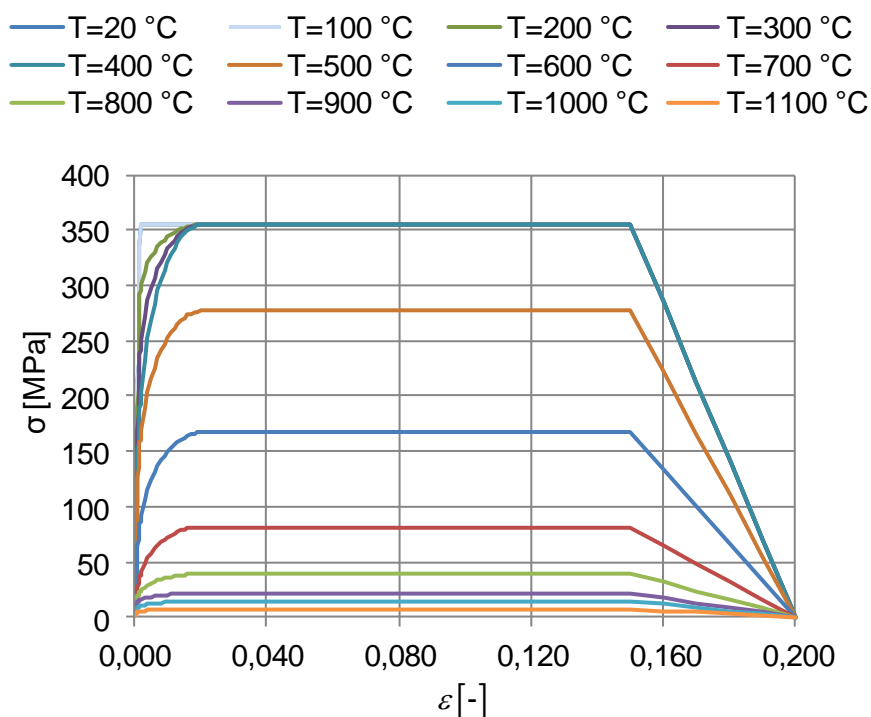
5.3.1. Prva faza

5.3.1.1. Pristup modeliranja

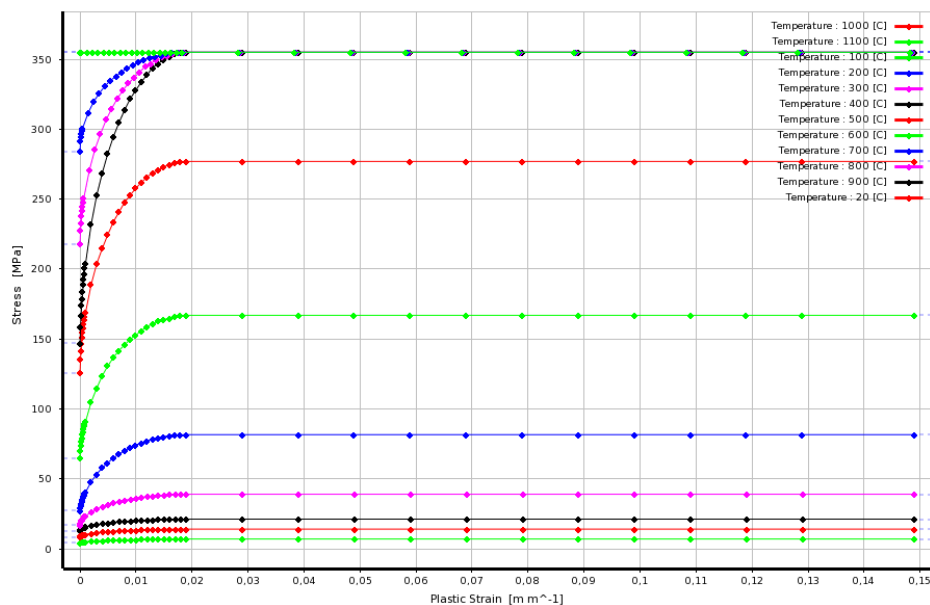
Čelični nosač izložen standardnom ISO požaru modeliran je u programskom paketu ANSYS 15.0. Karakteristike poprečnog presjeka i statičkog sustava uzete su sa svojim nominalnim vrijednostima. Ukrućenja hrpta uključena su u model.

Promjene karakteristika materijala pri povišenim temperaturama uzete su u obzir u skladu s EN 1993-1-2. Prema izrazima danim u tablici 3.2. dobili smo niz temperaturno ovisnih krivulja naprezanje-deformacija čelika S355 u Microsoft Excelu (slika 5.3.). Te krivulje poslužile su kao ulazni podaci za numerički model u paketu ANSYS (slika 5.4.).

Faktori smanjenja za odnos naprezanje-deformacija kod čelika za odabrane temperature uzeti su iz tablice 3.1. u HRN EN 1993-1-2. Specifična toplina i toplinska provodljivost čelika kao funkcije temperature uzete su prema slikama 3.4. i 3.5. iz HRN EN 1993-1-2.

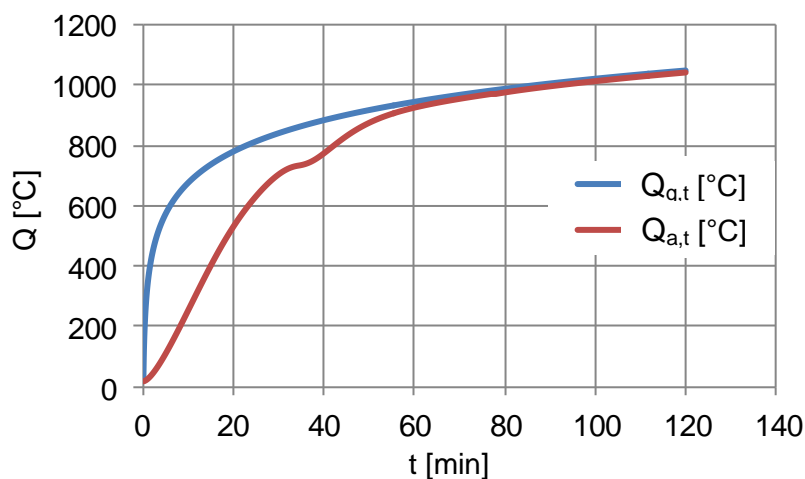


Slika 5.3. Krivulje naprezanje-deformacija ovisne o temperaturi (Microsoft Excel)



Slika 5.4. Krivulje naprezanje-deformacija ovisne o temperaturi (ANSYS)

Modeliranje izloženosti požaru iz peći na čelični nosač provedeno je prema pristupu danom u normama EN 1991-1-2 i EN 1993-1-2. Dobiveni vremenski odnosi temperature zraka prema standardnoj ISO krivulji i temperature čelika prikazani su na slici 5.5. (Microsoft Excel).

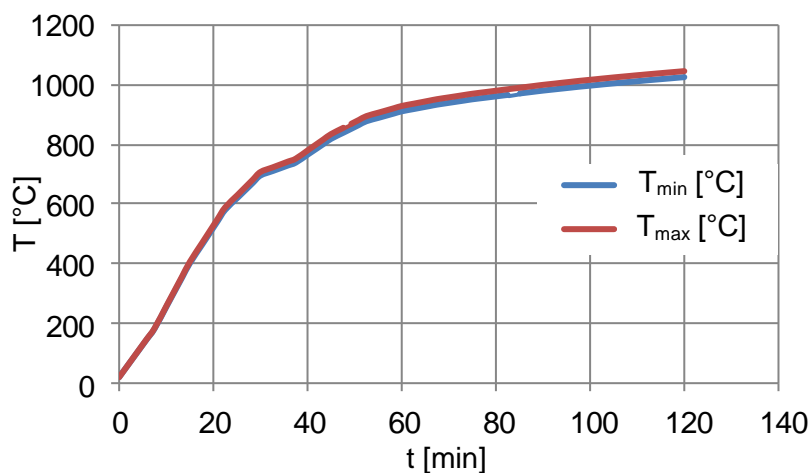


Slika 5.5. Temperatura zraka u požarnom odjeljku i temperatura čeličnog nosača

5.3.1.2. Temperature čeličnog nosača

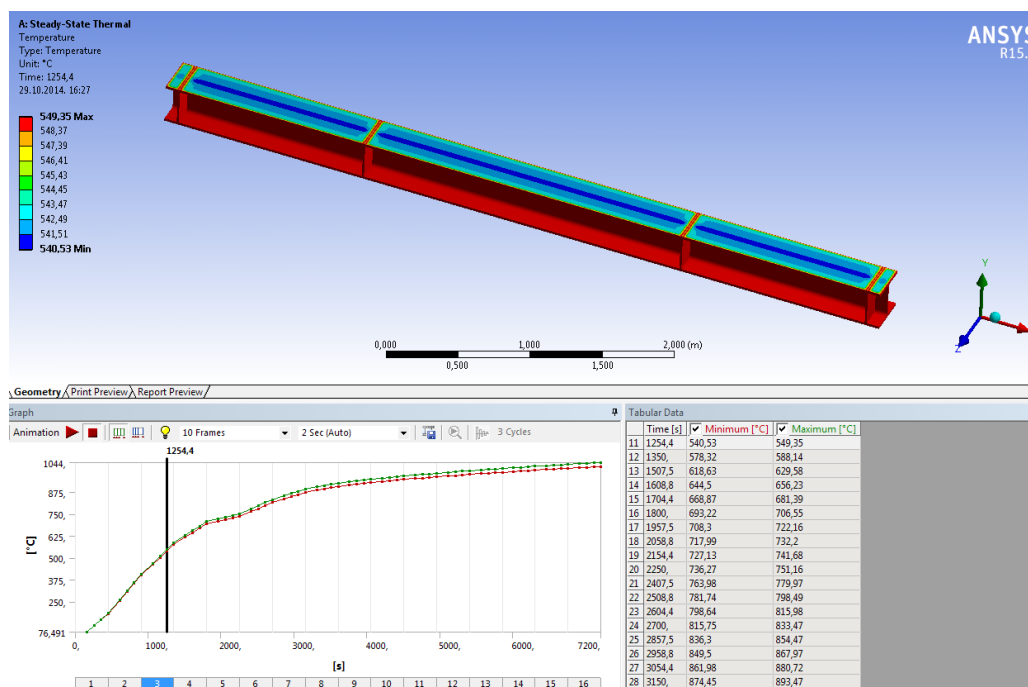
Činjenica da gornja pojasnica nije izložena požaru dodatno je uzeta u obzir koristeći *Steady-State Thermal* analizu u ANSYS-u. Pretpostavili smo da je temperatura gornje strane gornje pojasnice jednaka 20 °C i da koeficijent konvekcije iznosi

25 W/m²C. Sve druge strane presjeka imaju temperaturu čelika prikazanu na slici 5.5.



Slika 5.6. Temperatura u čeličnom nosaču

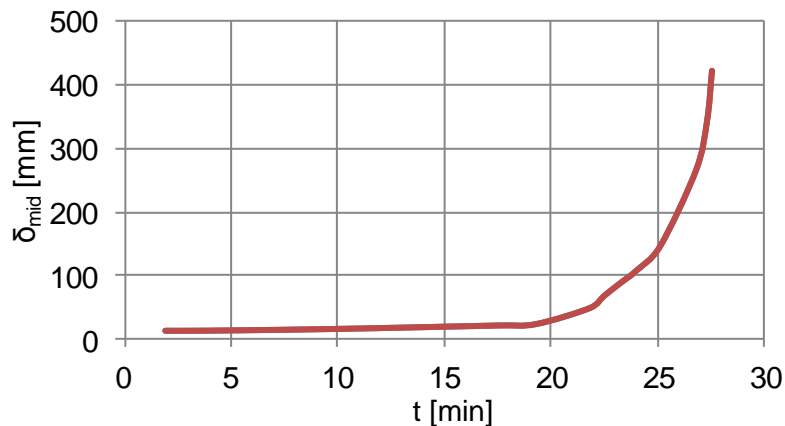
Maksimalna i minimalna temperatura razvijena u čeliku tijekom primjene standardnog ISO 834 požara prikazana je na slici 5.6. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču s označenim trenutkom otkazivanja dana je na slici 5.7.



Slika 5.7. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču s označenim trenutkom otkazivanja

5.3.1.3. Povijest progiba

Povijest progiba nosača tijekom izloženosti standardnom požaru dana je na slici 5.8.



Slika 5.8. Povijest progiba nosača

5.3.1.4. Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja

Otkazivanje nosača tijekom ispitivanja promatrano je kroz kriterije nosivosti, tj. prekoračenje graničnih vrijednosti progiba i brzine prirasta progiba. Kako bismo dobili što širi opseg rezultata, osim kriterija koje daje europska norma, promatrat ćemo i britanske uvjete. Vrijednosti su sljedeće:

a) prema EN 1363-1:

- granična vrijednost progiba

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot d} = \frac{5200^2}{400 \cdot 300} = 225,33 \text{ mm} \approx 225 \text{ mm}$$

- granična vrijednost brzine prirasta progiba

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 \cdot d} = \frac{5200^2}{9000 \cdot 300} = 10,01 \text{ mm/min} \approx 10 \text{ mm/min}$$

b) prema BS 476 Part 20 (BSI, 1987):

- granična vrijednost progiba

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

- granična vrijednost brzine prirasta progiba

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 \cdot d} = \frac{5200^2}{9000 \cdot 300} = 10,01 \text{ mm/min} \approx 10 \text{ mm/min},$$

koja je mjerodavna ukoliko je prekoračena vrijednost progiba od $L/30 = 5200/30 = 173,33 \text{ mm} \approx 173 \text{ mm}$.

Prema EN 1363-1 zabilježeno je da vrijeme otkazivanja, odnosno požarna otpornost nosača tijekom izloženosti standardnom požaru 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 zabilježen je u iznosu od 48 mm ($\sim L/110$), a maksimalna temperatura nosača 571 °C.

Prema BS 476 Part 20 vrijeme otkazivanja iznosi 25,5 min, jer je tada dosegnuta granična vrijednost progiba $L/30 = 5200/30 = 173 \text{ mm}$, a brzina prirasta progiba je prekoračena. U tom trenutku brzina prirasta progiba iznosila je 43,1 mm/min, središnji progib nosača zabilježen je u iznosu od 173 mm, a maksimalna temperatura nosača 636 °C.

5.3.2. Druga faza

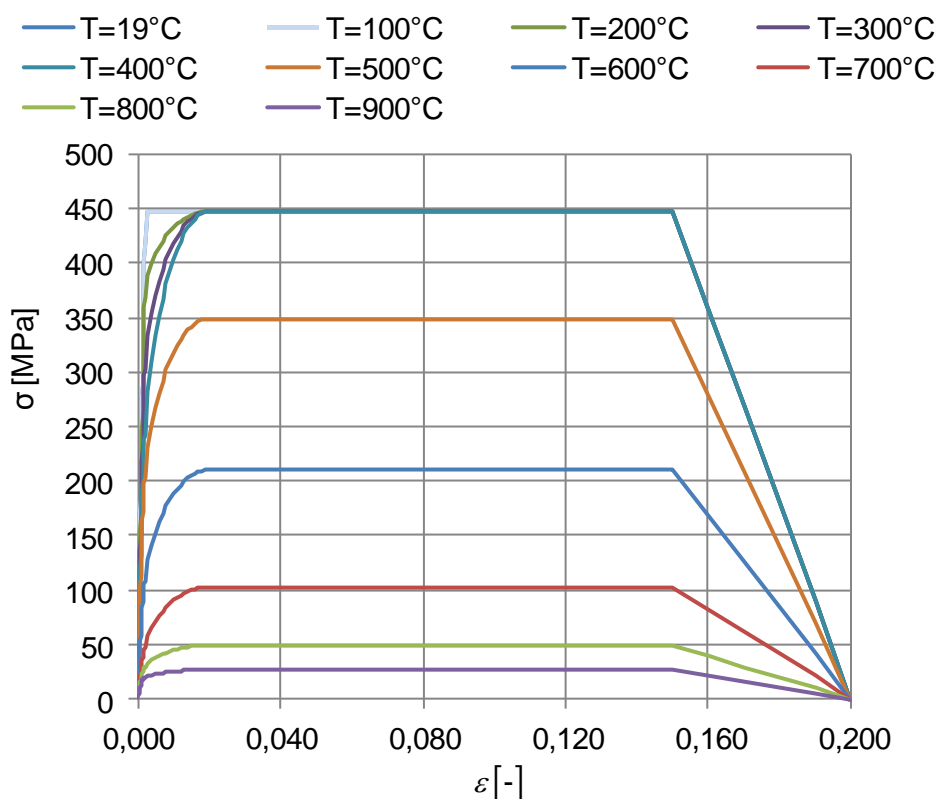
5.3.2.1. Pristup modeliranja

Kao i u prvoj fazi, čelični nosač izložen požaru modeliran je u programskom paketu ANSYS 15.0.

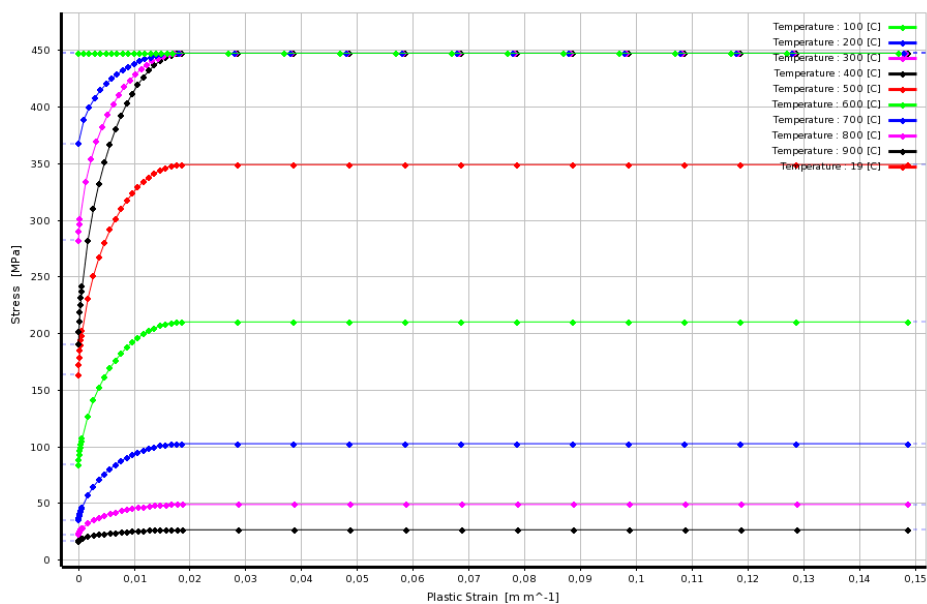
Prema izrazima danim u tablici 3.2. dobili smo niz temperaturno ovisnih krivulja naprezanje-deformacija čelika S355 u Microsoft Excelu (slika 5.9.). Te krivulje poslužile su kao ulazni podaci za numerički model u paketu ANSYS (slika 5.10.).

Faktori smanjenja, specifična toplina i toplinska provodljivost čelika uzete su kao i za prvu fazu.

Umjesto nominalne vrijednosti granice popuštanja čelika od 355 MPa iz prve faze, u drugoj fazi korištena je prosječna vrijednost izmjerene granice popuštanja od 447,5 MPa.



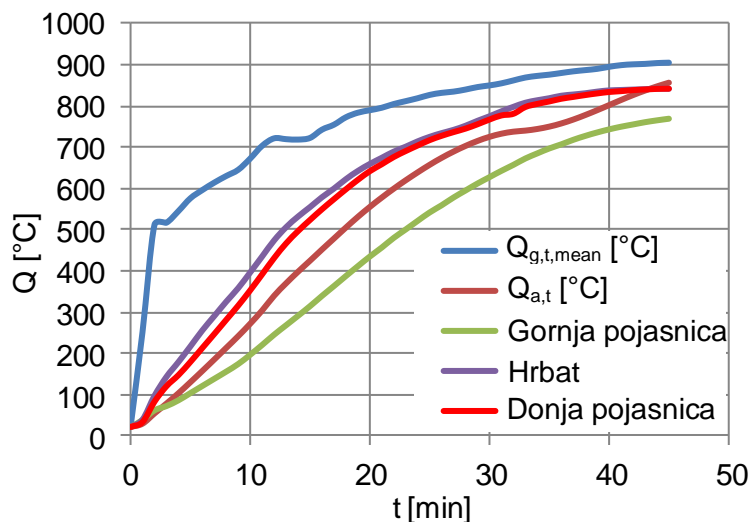
Slika 5.9. Krivulje naprežanje-deformacija ovisne o temperaturi (Microsoft Excel)



Slika 5.10. Krivulje naprežanje-deformacija ovisne o temperaturi (ANSYS)

U drugoj fazi modeliranja izloženosti požaru čeličnog nosača primijenjene su izmjerene temperature čeličnog profila, tj. njegove gornje pojasnice, hrpta i donje

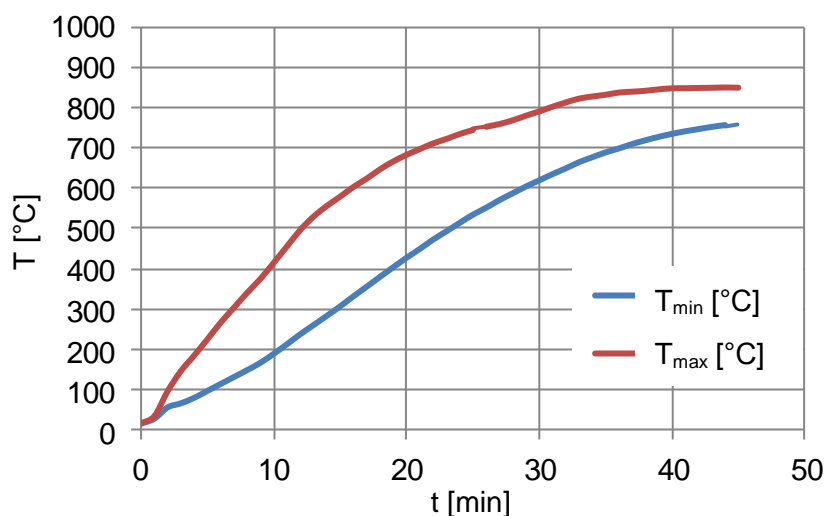
pojasnice iz tablice 4.3. (slika 5.11.). Također je korištena mjerena temperatura peći iz tablice 4.2.



Slika 5.11. Temperatura zraka u požarnom odjeljku i temperatura čeličnog nosača (izračunate i izmjerene vrijednosti)

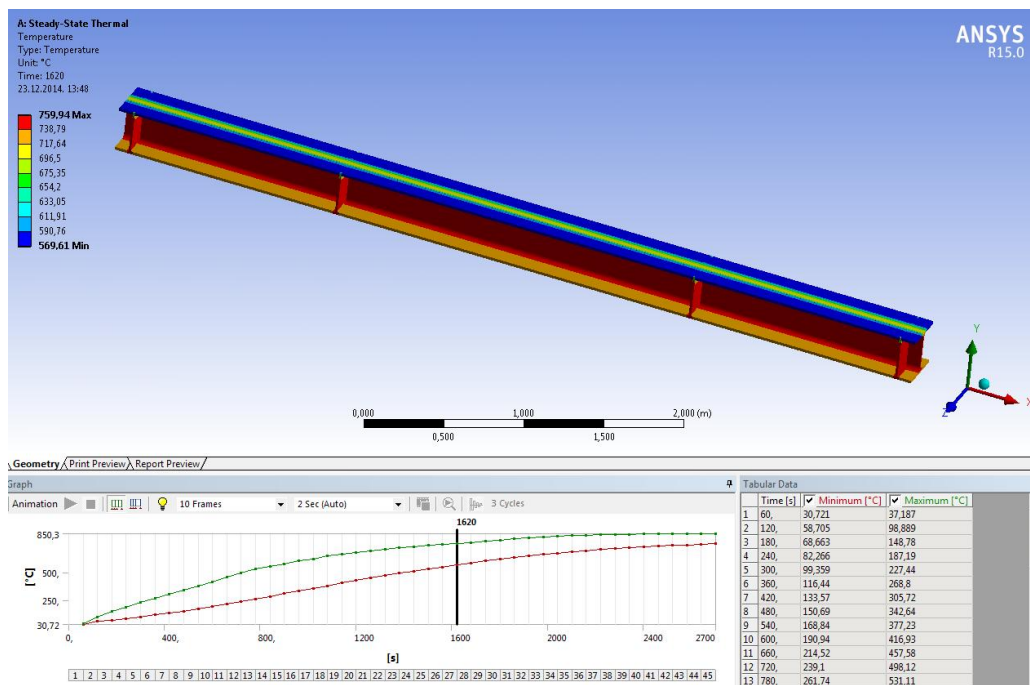
5.3.2.2. Temperature čeličnog nosača

U ovoj fazi također je korištena *Steady-State Thermal* analiza u ANSYS-u. Pretpostavili smo da je temperatura gornje strane gornje pojasnice jednaka 19 °C i da koeficijent konvekcije iznosi 25 W/m²C. Sve druge strane presjeka imaju temperaturu čelika prikazanu na slici 5.11.



Slika 5.12. Temperatura u čeličnom nosaču

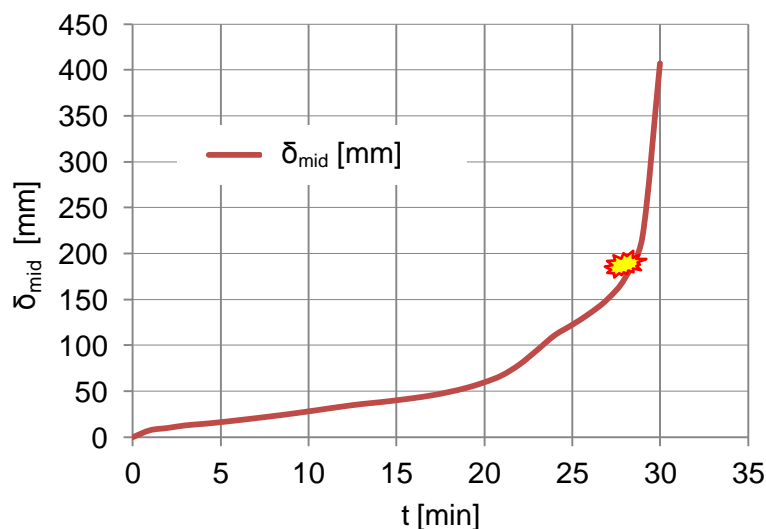
Maksimalna i minimalna temperatura razvijena u čeliku tijekom simulacije požara prikazana je na slici 5.12. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču s označenim trenutkom otkazivanja dana je na slici 5.13.



Slika 5.13. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču s označenim trenutkom otkazivanja

5.3.2.3. Povijest progiba

Povijest progiba nosača tijekom simulacije požarnog ispitivanja dana je na slici 5.14.



Slika 5.14. Povijest progiba nosača

5.3.2.4. Vrijeme otkazivanja i kriteriji otkazivanja

Otkazivanje nosača tijekom ispitivanja promatrano je kroz kriterije nosivosti, tj. prekoračenje graničnih vrijednosti progiba i brzine prirasta progiba čije su vrijednosti iste kao u prvoj fazi.

Prema EN 1363-1 zabilježeno je da vrijeme otkazivanja, odnosno požarna otpornost nosača tijekom izloženosti standardnom požaru 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 zabilježen je u iznosu od 150 mm, a maksimalna temperatura nosača 760 °C.

Zabilježeno je da požarna otpornost nosača tijekom izloženosti požaru iznosi 28 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 23 mm/min, središnji progib nosača zabilježen je u iznosu od 173 mm, a maksimalna temperatura nosača 769 °C.

6. USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA

6.1. Diskusija rezultata različitih metoda proračuna

U nastavku se prikazuje usporedba vrijednosti požarne otpornosti dobivene pojednostavljenim metodama prema europskim normama u poglavlju 5.2. i naprednim metodama kompjuterskim programom ANSYS u poglavlju 5.3. Unutar pojednostavljenih metoda dani su rezultati za ručni proračun i proračun u programu Elefir-EN. Posebno će se razmatrati rezultati po fazama, te uspoređivati s rezultatom laboratorijskog ispitivanja.

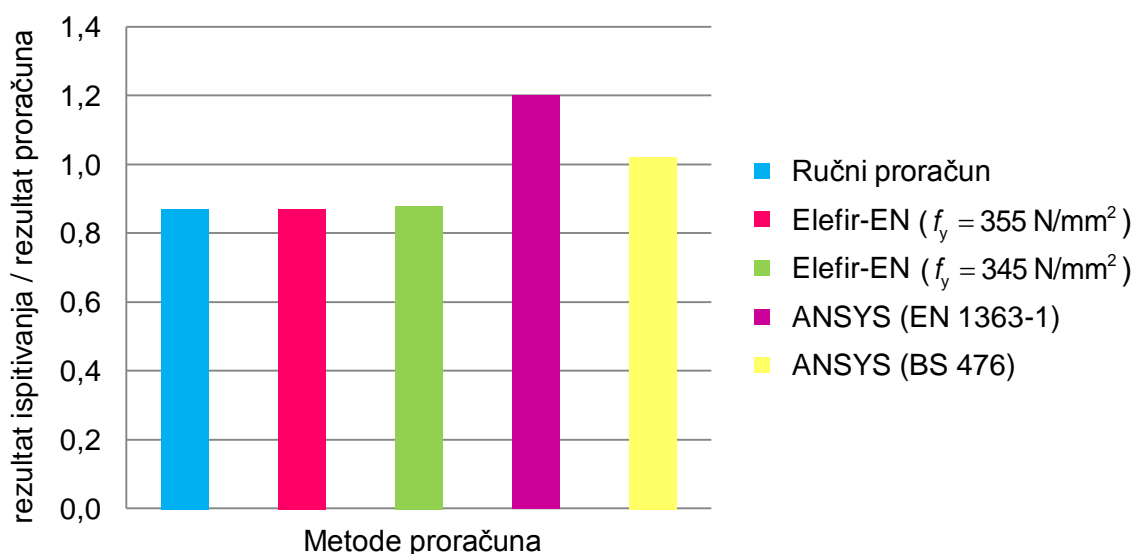
Tablica 6.1. Usporedba vrijednosti požarne otpornosti za prvu fazu

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

Srednja vrijednost požarne otpornosti proračunate za prvu fazu različitim metodama iznosi $\overline{t_{fi,d}} = 27,4 \text{ min}$, standardna devijacija $\sigma = 3,69 \text{ min}$, te koeficijent varijacije $V = 13,5 \%$.

Uspoređujući vrijednost dobivenu u laboratoriju (26 min) s rezultatima iz prve faze (tablica 6.1.), vidljivo je da proračun prema normama, ručno i programom Elefir-EN, znatno precjenjuje otpornost elementa. Ako se vodimo preporukom koju daje Elefir-EN za elemente s debljinom većom od 16 mm, i koristimo čelik s manjom granicom popuštanja $f_y = 345 \text{ N/mm}^2$, vrijednost otpornosti se malo bolje poklapa s vrijednošću dobivenom u laboratoriju. S druge strane, napredne metode daju nešto

konzervativnije rezultate na strani veće pouzdanosti. Korištenjem kriterija otkazivanja prema europskim normama, dobije se konzervativnije rješenje u odnosu na ono dobiveno primjenom kriterija prema britanskim normama. Uzimanje u obzir i britanskih kriterija otkazivanja pokazalo se ispravnim korakom, jer se otpornost gotovo poklapa s onom iz laboratorijskog ispitivanja. Radi preglednosti usporedbe, omjer rezultata proračuna i rezultata laboratorijskog ispitivanja po metodama za prvu fazu prikazan je na slici 6.1. Ako je omjer rezultata ispitivanja i rezultata proračuna po pojedinoj metodi veći od jedan, ona je konzervativna, inače ne zadovoljava.



Slika 6.1. Omjer rezultata ispitivanja i proračuna po metodama za prvu fazu

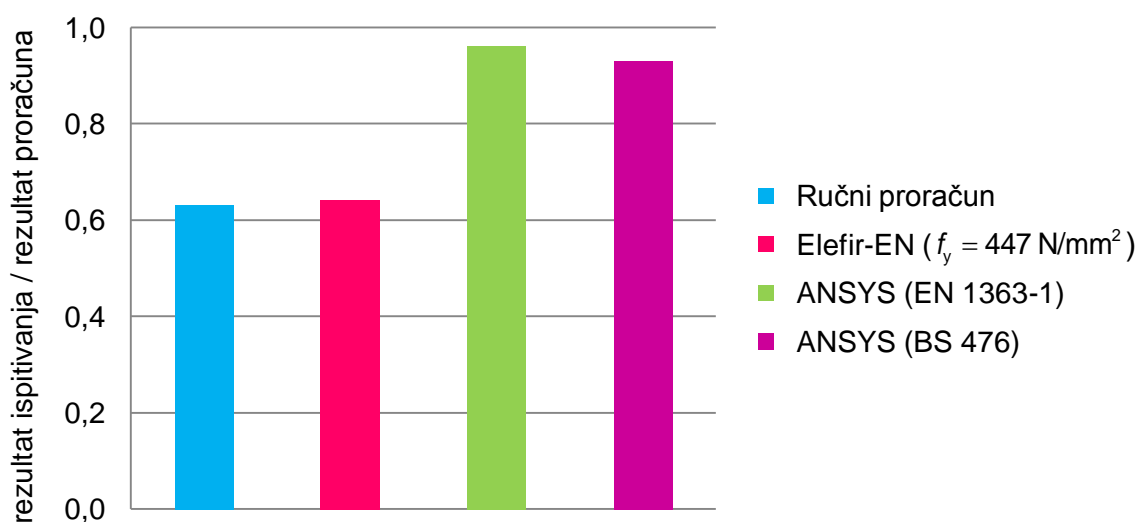
Ipak, bilo koji zaključci dobiveni usporedbom laboratorijskog ispitivanja i prve faze ne mogu se smatrati pouzdanima, jer ulazni podaci nisu kompatibilni. Zato bi rezultate druge faze (tablica 6.2.) trebalo promatrati kao mjerodavne.

Tablica 6.2. Usporedba vrijednosti požarne otpornosti za drugu fazu

METODA		POŽARNA OTPORNOST $t_{fi,d}$ [min]
Ručni proračun prema europskim normama		41,0
Proračun u programu Elefir-EN ($f_y = 447 \text{ N/mm}^2$)		40,5
Proračun prema naprednim metodama (ANSYS)	EN 1363-1	27,0
	BS 476 Part 20	28,0

Srednja vrijednost požarne otpornosti proračunate za drugu fazu različitim metodama iznosi $\overline{t_{fi,d}} = 34,1$ min, standardna devijacija $\sigma = 7,66$ min, te koeficijent varijacije $V = 22,5$ %.

Međutim, vidi se da druga faza pokazuje odstupanje i u pojednostavljenim i naprednim metodama proračuna. Njome se pokazalo da rezultati normiranog proračuna, zbog povećane granice popuštanja, daju još veću otpornost i tako u većoj mjeri odstupaju od one iz laboratorijskog ispitivanja. Za drugu fazu dobiveni su rezultati koji se međusobno ne poklapaju niti unutar proračuna prema normama. To možemo pripisati tome što ručni proračun zahtjeva očitavanje iz nomograma, koje je vrlo često neprecizno. Proračunom programom ANSYS dobivene su otpornosti koje se bolje poklapaju s rezultatom laboratorijskog ispitivanja u odnosu na pojednostavljene metode. Ipak, u ovom slučaju malo su precijenila rezultat laboratorijskog ispitivanja. Kriteriji otkazivanja prema europskim normama i u ovoj su fazi dali nešto konzervativnije rješenje u odnosu na britanske. Međutim, iako niti jedno rješenje nije zadovoljavajuće s obzirom na rezultat dobiven ispitivanjem, riješenje programskim paketom ANSYS uz kriterij otkazivanja EN 1363-1 najbolje procjenjuje stvarno ponašanje. Omjer rezultata laboratorijskog ispitivanja i rezultata proračuna po metodama za drugu fazu prikazan je na slici 6.2.



Slika 6.2. Omjer rezultata ispitivanja i proračuna po metodama za drugu fazu

6.2. Diskusija rezultata *Round Robin* studije

6.2.1. Prva faza

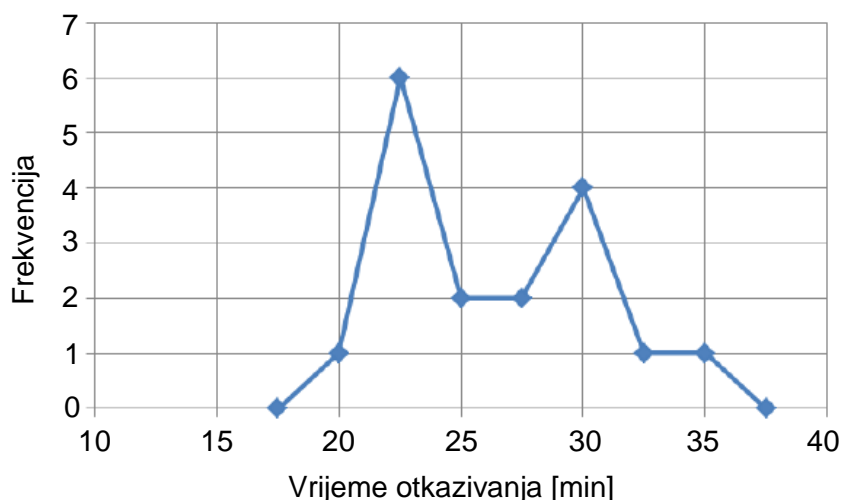
Vrijednosti požarne otpornosti koje su poslali sudionici *Round Robin* studije (tablica 4.1.) znatno se razlikuju. Vidljivo je da rezultati dobiveni pojednostavljenim metodama iz Eurokodova daju veću požarnu otpornost u odnosu na rezultate proračuna naprednim metodama.

Kako su sudionici studije koristili različite kriterije otkazivanja, njihovi su rezultati prilagođeni kriteriju prema EN 13501-2.

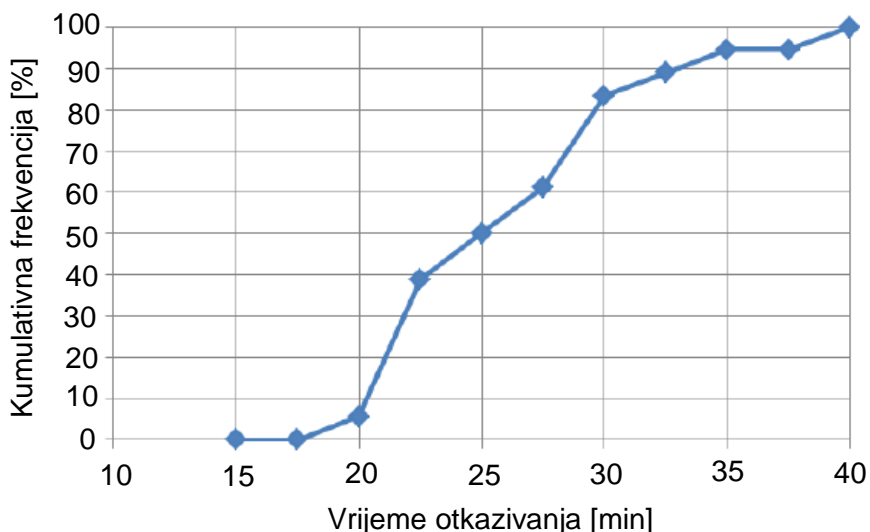
Uzimajući u obzir sve rezultate, srednja vrijednost otpornosti iznosi 23,8 min, standardna devijacija 4,5 min, a koeficijent varijacije 19 %. Ukoliko zanemarimo rezultate pojednostavljenih metoda, dobivamo srednju vrijednost od 22,7 min, standardnu devijaciju od 2,6 min, te koeficijent varijacije od 12 %, što već daje bolju sliku. Iako ovi rezultati ne mogu dati valjane usporedbe, ne može se zanemariti njihovo postojanje, budući da oslikavaju raznolikost u mogućnosti odabira kriterija.

Za prilagođene rezultate, srednja vrijednost požarne otpornosti iznosi 25,9 min, standardna devijacija 5,0 min, te koeficijent varijacije 19 %. Ukoliko zanemarimo rezultate pojednostavljenih metoda srednja vrijednost iznosi 24,9 min, standardna devijacija 4,1 min, a koeficijent varijacije 17 %.

Na slici 6.3. prikazana je učestalost pojavljivanja (frekvencija) prilagođenih rezultata, a na slici 6.4. kumulativne frekvencije.



Slika 6.3. Frekvencije prilagođenih rezultata



Slika 6.4. Kumulativne frekvencije prilagođenih rezultata

Točnost svakog rezultata može se prikazati pomoću vrijednosti Z definirane kao:

$$z_i = \frac{y_i - m}{s} \quad (6.-1.)$$

pri čemu je:

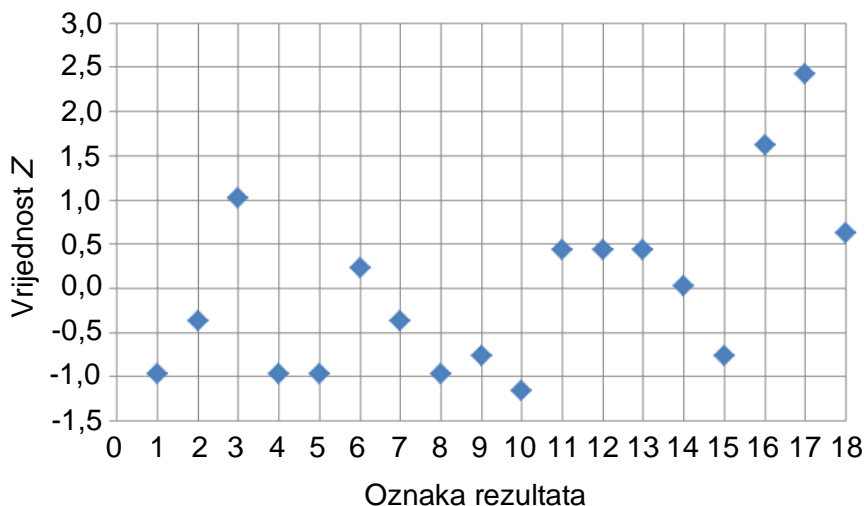
y_i - rezultat i ,

m - srednja vrijednost svih rezultata,

s - standardna devijacija.

Vrijednosti Z za svaki rezultat prikazane su na slici 6.5. Interpretacija vrijednosti Z je sljedeća:

- $|z_i| \leq 2$: točnost rezultata je zadovoljavajuća,
- $2 < |z_i| \leq 3$: točnost rezultata je upitna,
- $3 < |z_i|$: točnost rezultata je nezadovoljavajuća.

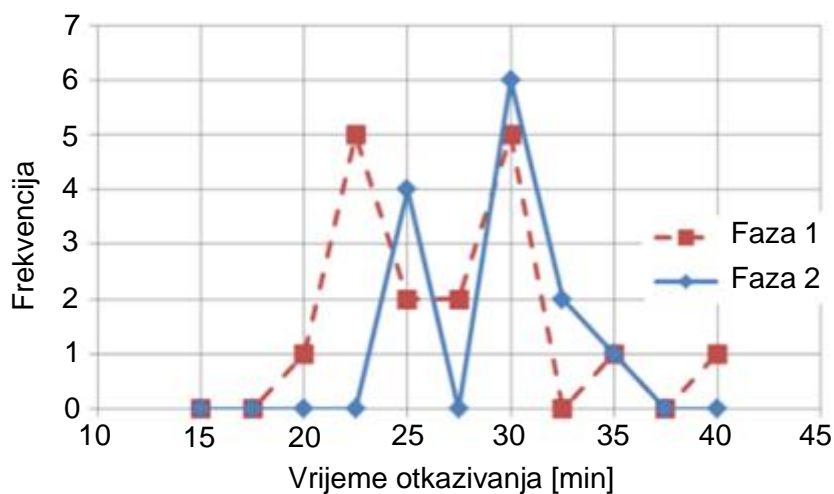


Slika 6.5. Vrijednost Z za svaki rezultat

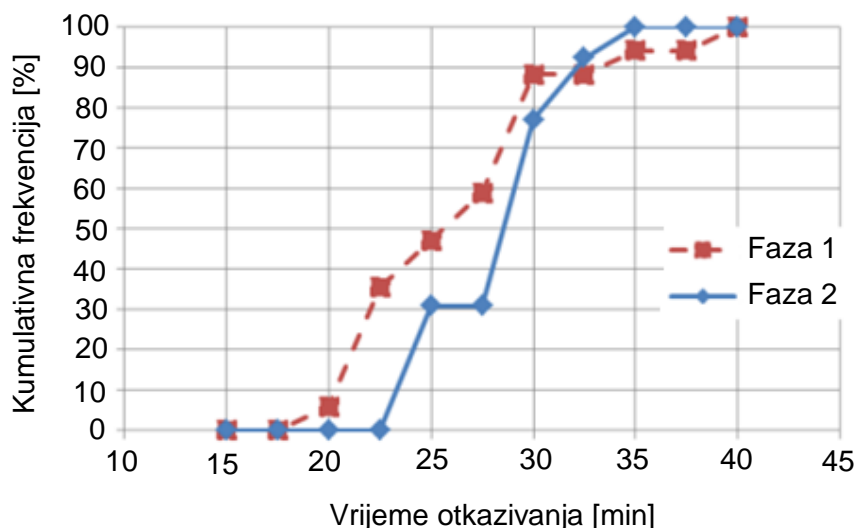
6.2.2. Druga faza

Prosječna vrijednost prilagođene požarne otpornosti u analizi druge faze iznosi 28,2 min, standardna devijacija je pritom 2,7 min, a koeficijent varijacije 9,7 %. Rezultati se dovoljno dobro podudaraju s rezultatima prve faze za koje je srednja vrijednost požarne otpornosti iznosi 24,9 min, standardna devijacija 4,1 min, a koeficijent varijacije 17 %. Za obje faze, iz ukupnih su rezultata izuzete vrijednosti dobivene pojednostavljenim metodama.

Frekvencija i kumulativna frekvencija prilagođenih rezultata požarne otpornosti za drugu fazu prikazane su na slikama 6.6. i 6.7., uz vrijednosti iz prve faze za lakšu usporedbu. Iz slika je vidljivo da je za drugu fazu rasipanje rezultata uže u odnosu na prvu fazu.

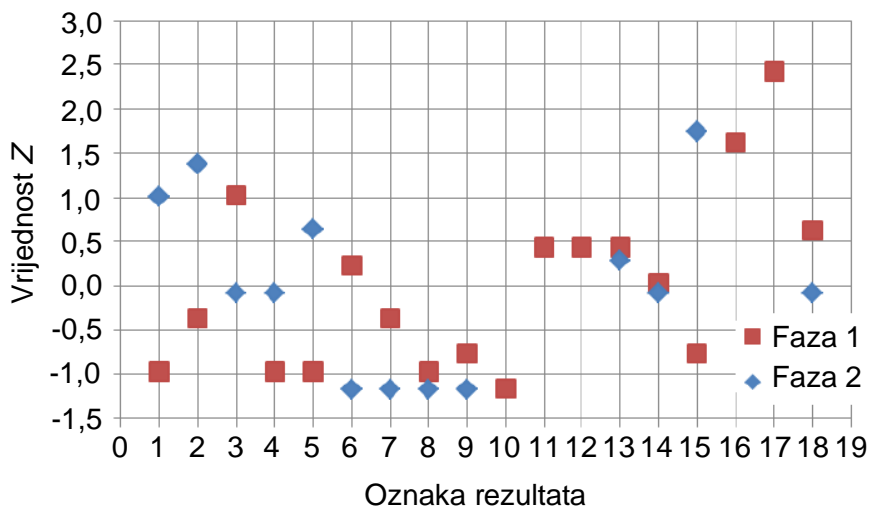


Slika 6.6. Frekvencije prilagođenih rezultata



Slika 6.7. Kumulativne frekvencije prilagođenih rezultata

Kao i u prvoj fazi, izrazom (6.-1.) izračunata je vrijednost Z za prilagođene rezultate požarne otpornosti. U svrhu usporedbe, vrijednosti Z za prvu i drugu fazu prikazane su na slici 6.8. Generalno gledajući, ne postoji značajna razlika u rasipanju vrijednosti Z između faza. Osim toga, izvještaj rezultata s najmanjom vrijednosti Z nije bio uključen u drugu fazu pa je točnost svih rezultata zadovoljavajuća, tj. $|z_i| \leq 2$.



Slika 6.8. Vrijednosti Z za rezultate prve i druge faze

7. ZAKLJUČAK

7.1. Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja

Suprotno očekivanju, pokazano je da proračun požarne otpornosti 'običnog' čeličnog konstrukcijskog elementa prema europskim normama, [17], ne daje konzervativna rješenja, odnosno norme precjenjuju njegovu požarnu otpornost. Odstupanje rezultata koje daje norma naspram onima koje daje ispitivanje još je izraženije u drugoj fazi proračuna, koja je zbog realnije definiranih ulaznih podataka mjerodavna. Ovi rezultati jasno upućuju na činjenicu da bi europske norme, odnosno metode za proračun požarne otpornosti čeličnih konstrukcija trebalo preispitati.

Napredne metode temeljene na metodi konačnih elemenata očekivano se bolje poklapaju sa stvarnim rezultatima dobivenim iz laboratorijskog ispitivanja provednog u Švedskoj. Međutim, problem naprednih metoda simulacije požarne otpornosti problem je velika neujednačenost u načinu modeliranja i odabiru kriterija otkazivanja, te značajna podložnost subjektivnim procjenama projektanta. To su potvrdili i rezultati *Round Robin* studije gdje su sudionici su bili slobodni pratiti pravila bilo kojeg standarda i primijeniti bilo koje metode koje smatraju prikladnima. U većini slučajeva, koristili su numeričke metode temeljene na toplinskom djelovanju i odgovoru materijala iz Eurokodova, te različite pretpostavke u skladu s odabranim pristupom proračunu.

Uzrok velikog rasipanja rezultata *Round Robin* studije su dva problema. Prvi problem proizlazi iz grešaka samoga sudionika i/ili metode koju je koristio. Drugi problem je što kriteriji otkazivanja nisu usklađeni kod svih sudionika. Neki od njih koristili su kriterije prema europskim normama, dok su ostali koristili i druge dostupne kriterije. Upravo taj veliki izbor metoda i kriterija, te njihove interpretacije vodi do znatne neujednačenosti u rezultatima simulacije ovog naizgled 'trivijalnog' problema.

U ovom radu pokazano je da europske norme značajno precjenjuju požarnu otpornost jednostavno oslonjenog čeličnog nosača. U procesu izrade druge generacije europskih normi, koji upravo počinje, za početak je potrebno imati verificirane napredne metode, kako bi se eventualne izmjene mogle provjeravati brzo

i uz mali utrošak financijskih sredstava. Zbog toga primarni cilj treba biti kalibriranje postojećih numeričkih metoda. Unutar toga obavezna je unifikacija kriterija otkazivanja kao posljednjeg koraka naprednih analiza. Naravno, pri tome svaka izmjena metoda proračuna požarne otpornosti, i pojednostavljenih i naprednih, mora biti potkrijepljena direktno ili indirektno, preko kalibriranih numeričkih simulacija, rezultatima laboratorijskih ispitivanja.

7.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Na temelju prikazanih rezultata i izvučenih zaključaka u ovom istraživanju preporučuje se temeljito daljnje znanstveno istraživanje naprednih metoda i modela. U tu svrhu, svakako mogu poslužiti istraživanja i analize prikazane u ovom radu. Preporučuje se ovdje opisanu *Round Robin* studiju proširiti s obzirom na:

1. broj nominalno istih ispitivanja,
2. različite uvjete pridržanja i požara,
3. dijelove ili cijele konstrukcije,
4. broj sudionika kod proračuna.

S obzirom na utvrđena precjenjivanja i značajnu neujednačenost rezultata koja daju analizirane metode za proračun požarne otpornosti potrebno je u inženjerskoj, ali i znanstvenoj, praksi promijeniti pristup problemu požara u čeličnim konstrukcijama. Problem postaje još znakovitiji kada se shvati činjenica da ni napredne metode simulacije nužno ne daju pouzdane rezultate.

Budući da je požar relativno novo izvanredno djelovanje prema Eurokodu, neminovno je usavršavanje kadrova, a u budućnosti i izrada proračuna realnog požarnog opterećenja. Riječ je o nedovoljno istraženoj disciplini, pa se pristup u analizi pouzdanosti građevine u slučaju djelovanja požara treba temeljiti kako na dosadašnjem iskustvu, tako i na novim, ovdje opisanim saznanjima. Izmjene postojećih metoda i izrada pouzdanih kriterija otkazivanja čeličnih konstrukcija kod požarnog djelovanja mora biti prioritet ne samo iz aspekta očuvanja imovine, već prvenstveno zbog zaštite dragocjenih ljudskih života.

8. ZAHVALA

Zahvaljujemo se Sveučilištu u Zagrebu na ukazanom povjerenju i Građevinskom fakultetu na ustupanju licenciranih programskih paketa potrebnih za izradu ovoga rada.

Posebno se zahvaljujemo Tehničkom istraživačkom centru u Švedskoj na pozivu na sudjelovanje u znanstvenom istraživanju i svim sudionicima međunarodne *Round Robin* studije na uspješnoj zajedničkoj suradnji.

Najveću zahvalu upućujemo mentoru doc. dr. sc. Davoru Skejću na stručnom vodstvu i uloženom trudu.

9. POPIS LITERATURE

- [1] B. Peroš i I. Boko, *Sigurnost konstrukcija u požaru*, Split: Sveučilište u Splitu, 2015.
- [2] B. Androić, D. Dujmović i I. Džeba, *Čelične konstrukcije 1*, Zagreb: IA Projektiranje, 2009.
- [3] The British Constructional Steelwork Association; Tata Steel, *Steel Construction: Fire Protection*, London, 2013.
- [4] B. Androić, D. Dujmović i I. Džeba, *Suvremeni pristup dokazu požarne otpornosti konstrukcija*, *Građevinar*, br. 58, pp. 455-462, 2006.
- [5] HRN EN 1991-1-2, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-2 – Opća djelovanja: Djelovanja na konstrukcije izložene požaru*, Zagreb, 2008.
- [6] J. A. Purkiss, *Fire Safety Engineering: Design of Structures*, Oxford: Elsevier, 2007.
- [7] S. R. S. Kumar i A. R. S. Kumar, *Design of Steel Structures I*, Chennai: Indian Institute of Technology Madras.
- [8] J.-M. Franssen i P. Vila Real, *Fire Design of Steel Structures*, Brussels: European Convention for Constructional Steelwork, 2010.
- [9] Programski paket Elefir-EN, *Fire Design of Steel Structural Members According to Eurocode 3*, 2010.
- [10] Programski paket ANSYS 16.0, 2014.
- [11] 9-11 Research, <http://911research.wtc7.net/mirrors/guardian2/fire/SCI.htm>.
[Pristup: 29. ožujka 2015.]
- [12] Steel Construction, http://www.steelconstruction.info/Fire_testing.
[Pristup: 29. ožujka 2015.]
- [13] One Stop Shop in Structural Engineering,
<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/Design/prescriptive/Standard%20Fire%20Test/conditions.htm>.
[Pristup: 29. ožujka 2015.]
- [14] Y. Dong i X. Li, *The Behaviors of H-section Steel Beam in Fire*, *Fire Safety Science-Proceedings*, Peking, 2005.
- [15] HRN EN 1363-1, *Ispitivanja otpornosti na požar – 1. dio: Opći zahtjevi*, Zagreb, 2012.
- [16] A. Drustrup, T. D. Jensen i J. Jørgensen, *EN 1363-1 Fire resistance tests - Part*

- 1, Danish Institute of Fire and Security Technology, 2008.
- [17] HRN EN 1993-1-2, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1-2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara, Zagreb, 2008.
- [18] I. Boko, N. Torić i B. Peroš, *Analiza otpornosti čeličnih konstrukcija u požaru*, Građevinar, br. 64, pp. 631-640, 2012.
- [19] J. B. Schleich, *Maximum stress level of structural steel in function of the temperature – strain hardening included – through numerical simulations of uniformly heated steel beams during transient state bending tests*, Working documents, Luxembourg, 1988-1989.
- [20] D. E. Wainman i B. R. Kirby, *Compendium of UK Standard Fire Test Data: Unprotected Structural Steel – 1 & 2*, British Steel Corporation, 1988.
- [21] B. R. Kirby i R. R. Preston, *High Temperature Properties of Hot-Rolled Structural Steels for Use in Fire Engineering Design Studies*, Fire Safety Journal, br. 13, pp. 27-37, 1988.
- [22] Leonardo da Vinci Pilot Project, *Implementation of Eurocodes: Design of Buildings for the Fire Situation*, Luxembourg, 2005.
- [23] HRN EN 1994-1-2, Eurokod 4: Projektiranje spregnutih konstrukcija od čelika i betona – Dio 1-2: Opća pravila – Projektiranje konstrukcija na djelovanje požara, Zagreb, 2008.
- [24] Figes Engineering, <http://www.figes.com.tr/english/ansys/ansys.php>.
[Pristup: 2. travnja 2015.]
- [25] Desktop Engineering, <http://www.deskeng.com/de/when-two-plus-two-makes-more-than-four/>.
[Pristup: 2. travnja 2015.]
- [26] D. Lange i L. Boström, *Round robin on calculations: Steel beam with standard fire exposure*, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, 2015.
- [27] 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.

Popis slika:

Slika 1.1. Razorno djelovanje požara na čelične konstrukcije.....	2
Slika 1.2. Raspodjela temperature u čeličnim profilima.....	3
Slika 1.3. Zaštita stupa laganom pločastom oblogom.....	4
Slika 1.4. Zaštita elemenata premazom – početni izgled (lijevo) i reakcija uslijed požara (desno), [3].....	5
Slika 1.5. Utjecaj temperature na čvrstoću čelika	8
Slika 3.1. Cardington požarno ispitivanje na kompletnoj konstrukciji [11].....	12
Slika 3.2. Požarno ispitivanje čeličnih elemenata: stup (lijevo) [13] i greda (desno) [14].....	13
Slika 3.3. Otkazivanje uvjeta cjelovitosti – zapaljenje pamučnog jastučića (lijevo) i nastajanje otvora (desno), [16].....	14
Slika 3.4. Peć za ispitivanje čeličnih elemenata na požar.....	16
Slika 3.5. Standardna ISO požarna krivulja u usporedbi s 50 ispitivanja prirodnih požara, [22].....	17
Slika 3.6. Faze za vrijeme razvoja realnog požara	18
Slika 3.7. Ovisnost naprezanje-deformacija ugljičnog čelika pri povišenim temperaturama.....	24
Slika 3.8. Faktori smanjenja pri povišenim temperaturama.....	26
Slika 3.9. Utjecaj oblika poprečnog presjeka na učinak zasjenjenja	28
Slika 3.10. Određivanje faktora presjeka uključujući učinak sjene	28
Slika 3.11. Nomogram za nezaštićene čelične elemente.....	31
Slika 3.12. Nomogram za zaštićene čelične elemente.....	31
Slika 3.13. Mogućnosti s obzirom na protupožarnu zaštitu	32
Slika 3.14. Mogućnosti s obzirom na protupožarnu zaštitu	33
Slika 3.15. Opterećenja elementa koja se mogu analizirati u programu Elefir-EN....	33

Slika 3.16. Temperatura u profilu HEA 300 grijanom sa svih strana nakon 30 minuta izloženosti standardnom požaru	36
Slika 3.17. Temperatura u profilu HEA 300 grijanom s tri strane nakon 30 minuta izloženosti standardnom požaru	37
Slika 3.18. Temperatura u profilu HEA 300 s betonskom pločom na gornjoj pojasnici	38
Slika 3.19. Temperatura u profilu HEA 200 umetnutom u betonski zid nakon 60 minuta izloženosti standardnom požaru	39
Slika 3.20. Model stropne čelične grede izložene požaru u programskom paketu ANSYS, [25]	41
Slika 4.1. Geometrija ispitivanog nosača	44
Slika 4.2. Točke u kojima su sudionici računali temperaturu.....	46
Slika 4.3. Temperature u točki 1	46
Slika 4.4. Temperature u točki 2	47
Slika 4.5. Temperature u točki 3	47
Slika 4.6. Temperature u točki 4	47
Slika 4.7. Temperature u točki 5	48
Slika 4.8. Temperature uzimajući u obzir svedeni kapacitet	48
Slika 4.9. Izračunati odnosi vrijeme-progib	49
Slika 4.10. Točke na koje su postavljeni temperaturni senzori.....	51
Slika 4.11. Čelični nosač postavljen u peć za ispitivanje.....	51
Slika 4.12. Temperature zraka tijekom ispitivanja u usporedbi s ISO 834 krivuljom ..	52
Slika 4.13. Temperature čelika tijekom ispitivanja	52
Slika 4.14. Povijest progiba tijekom ispitivanja.....	53
Slika 4.15. Nosač nakon ispitivanja	53
Slika 4.16. Usporedba izračunatih i izmjerenog (krivulja 0) odnosa vrijeme-progib ..	54

Slika 4.17. Povijest progiba u drugoj fazi proračuna	58
Slika 5.1. Nomogram za nezaštićene čelične elemente	62
Slika 5.2. Nomogram za nezaštićene čelične elemente	64
Slika 5.3. Krivulje naprezanje-deformacija ovisne o temperaturi (Microsoft Excel) ...	70
Slika 5.4. Krivulje naprezanje-deformacija ovisne o temperaturi (ANSYS)	71
Slika 5.5. Temperatura zraka u požarnom odjeljku i temperatura čeličnog nosača ..	71
Slika 5.6. Temperatura u čeličnom nosaču	72
Slika 5.7. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču s označenim trenutkom otkazivanja.....	72
Slika 5.8. Povijest progiba nosača	73
Slika 5.9. Krivulje naprezanje-deformacija ovisne o temperaturi (Microsoft Excel) ...	75
Slika 5.10. Krivulje naprezanje-deformacija ovisne o temperaturi (ANSYS)	75
Slika 5.11. Temperatura zraka u požarnom odjeljku i temperatura čeličnog nosača (izračunate i izmjerene vrijednosti)	76
Slika 5.12. Temperatura u čeličnom nosaču	76
Slika 5.13. Vremenska distribucija temperature u čeličnom nosaču s označenim trenutkom otkazivanja.....	77
Slika 5.14. Povijest progiba nosača	77
Slika 6.1. Omjer rezultata ispitivanja i proračuna po metodama za prvu fazu	80
Slika 6.2. Omjer rezultata ispitivanja i proračuna po metodama za drugu fazu.....	81
Slika 6.3. Frekvencije prilagođenih rezultata.....	82
Slika 6.4. Kumulativne frekvencije prilagođenih rezultata	83
Slika 6.5. Vrijednost Z za svaki rezultat	84
Slika 6.6. Frekvencije prilagođenih rezultata.....	84
Slika 6.7. Kumulativne frekvencije prilagođenih rezultata	85
Slika 6.8. Vrijednosti Z za rezultate prve i druge faze.....	85

Popis tablica:

Tablica 3.1. Temperature u peći za zagrijavanje prema ISO požarnoj krivulji	14
Tablica 3.2. Izrazi za određivanje temperaturno ovisnih dijagrama naprezanje-deformacija ugljičnih čelika.....	25
Tablica 3.3. Faktori presjeka A_m/V za nezaštićene čelične elemente	29
Tablica 3.4. Faktori presjeka A_p/V za čelične elemente izolirane materijalom za zaštitu od požara	30
Tablica 4.1. Rezultati požarne otpornosti u minutama	50
Tablica 4.2. Prosječne vrijednosti temperature u peći	55
Tablica 4.3. Temperature čelika	56
Tablica 4.4. Rezultati požarne otpornosti u minutama	59
Tablica 6.1. Usporedba vrijednosti požarne otpornosti za prvu fazu	79
Tablica 6.2. Usporedba vrijednosti požarne otpornosti za drugu fazu	80

10. SAŽETAK

Maja Milanović, Ivana Rogić i Ana Šitum

Procjena metoda za proračun požarne otpornosti čeličnog nosača

Požarno inženjerstvo, kao relativno nova znanstvena disciplina, zahtjeva ozbiljno usavršavanje s obzirom na poguban utjecaj požara na ljudske živote i imovinu. Ovaj rad izrađen je u sklopu znanstvenog istraživanja u svrhu poboljšanja metoda za proračun požarne otpornosti elemenata čeličnih konstrukcija.

Prema dosadašnjem iskustvu, procjena požarne otpornosti čeličnih elemenata prema europskim normama je, uglavnom, konzervativna. S druge strane, napredne metode su izuzetno neujednačene, što je razumljivo s obzirom na činjenicu da postoji mnoštvo naprednih kompjuterskih programa, a opće znanje i unificiranost kriterija je neusklađeno. Kako bi se pojednostavljene normirane metode mogle unaprijediti potrebno ih je testirati na rezultate laboratorijskih ispitivanja. Puno je jednostavnije, i jeftinije, jednostavne metode unaprijediti korištenjem numeričkih simulacija koje moraju biti kalibrirane u odnosu na rezultate ispitivanja.

U ovom radu opisan je prvi korak, te je prikazana usporedba rezultata dobivenih primjenom različitih metoda i rezultata laboratorijskih ispitivanja. Obrađene su pojednostavljene i napredne metode proračuna požarne otpornosti čeličnog nosača. Unutar pojednostavljenih (normiranih) metoda objašnjen je ručni proračun i proračun u programskom paketu Elefir-EN. Za proračun naprednom metodom odabran je sofisticirani programski paket ANSYS.

Nadalje, predstavljena je međunarodna *Round Robin* studija u kojoj je 11 sudionika, od kojih je jedan bio i Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, neovisno provelo proračun (procjenu) požarne otpornosti čeličnog nosača na temelju jednakih ulaznih podataka. Nosač istih karakteristika ispitan je u uvjetima standardnog ISO požara u Tehničkom istraživačkom centru u Švedskoj, koji je bio inicijator *Round Robin* studije. Prikazana je usporedba rezultata svih sudionika studije, te je dana kompletna analiza koja je bila doprinos Sveučilišta u Zagrebu (Građevinskog fakulteta) ovom međunarodnom istraživanju.

Nakon razrade i diskusije rezultata zaključeno je, suprotno očekivanju, da europske norme značajno precijenjuju požarnu otpornost ovog 'trivijalnog' problema. S druge strane, napredne metode zbog svoje složenosti i neusklađenosti razine znanja i kriterija otkazivanja, daju izuzetno neujednačene procjene.

Preporučuje se daljnja istraživanja proširiti na nova laboratorijska ispitivanja iz čega će proizaći pravila za modeliranje naprednim metodama i usuglašeni kriteriji otkazivanja. Tek potom, na kalibriranim numeričkim metodama može se ostvariti poboljšanje jednostavnih metoda proračuna koje će osigurati zahtjevanu razinu pouzdanosti na europskoj razini.

Ključne riječi: požarna otpornost, čelični nosač, *Round Robin* studija, pojednostavljene metode proračuna na požar, napredne metode proračuna na požar

11. SUMMARY

Maja Milanović, Ivana Rogić i Ana Šitum

Assessment of Methods for Calculating Steel Beam Fire Resistance

Fire engineering, as a relatively new scientific discipline, requires serious development in regard to the disastrous effects of fire on human life and property. This paper was written as part of the scientific research in order to improve resistance calculation methods for steel structural elements.

According to previous experience, fire resistance assessment according to EN standards is mostly conservative. On the other hand, advanced methods are extremely unadjusted, which is understandable considering how many advanced softwares there are, and general knowledge and criteria equalization is unharmonized. In order to improve simplified standardized methods they should be tested with laboratory results. It is much easier and cost-effective to improve simplified methods using numerical simulation that must be calibrated compared to test results.

This paper describes first step and shows comparison between different method results and laboratory test results. It deals with simplified and advanced fire resistance calculation methods for steel beam. The use of simplified calculation form and software Elefir-EN is explained within standard methods. ANSYS is chosen as the sophisticated software for the advanced analysis.

Furthermore, this paper presents international *Round Robin* study in which 11 participants, one of which was the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, independently conducted fire resistance assessment analysis for steel beams based on equal input data. Beam with the same characteristics was subjected to laboratory testing in terms of the standard ISO fire in Technical Research Institute of Sweden, which initiated *Round Robin* study. Comparison of all study participants results, and a complete analysis given as University in Zagreb's (Faculty of Civil Engineering) contribution for the international research is shown.

After the elaboration and discussion of the results, it has been concluded, contrary to expectations, that European standards overestimate fire resistance of this 'trivial' problem. On the other side, the advanced methods give extremely unadjusted assessments due to its complexity and uneven level of knowledge and failure criteria.

It is recommended to expand further research with new laboratory tests which will result with rules for modelling with advanced methods and harmonized failure criteria. Only then, with calibrated numerical methods, the improvement of simplified calculation methods can be realized to assure required reliability level at the European level.

Key words: fire resistance, steel beam, *Round Robin* study, simplified fire calculation methods, advanced fire calculation methods