

Primljen / Received: 21.8.2024.

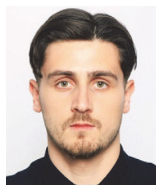
Ispravljen / Corrected: 12.4.2025.

Prihvaćen / Accepted: 26.4.2025.

Dostupno online / Available online: 10.7.2025.

Utjecaj različitih modelskih pristupa temeljenih na Eurokodu 2 na proračunanu požarnu otpornost AB stupova

Autori:



Marko Rogulj, dipl.ing.građ.
marko.rogulj1998@gmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Alen Harapin**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
alen.harapin@gradst.hr



Doc.dr.sc. **Peter Češarek**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani, Slovenija
Građevinski i geodetski fakultet
peter.cesarek@fgg.uni-lj.si



Doc.dr.sc. **Jerneja Češarek Kolšek**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani, Slovenija
Građevinski i geodetski fakultet
jerneja.cesarek-kolsek@fgg.uni-lj.si

Prethodno priopćenje

Marko Rogulj, Alen Harapin, Peter Češarek, Jerneja Češarek Kolšek

Utjecaj različitih modelskih pristupa temeljenih na Eurokodu 2 na proračunanu požarnu otpornost AB stupova

Ovaj rad istražuje utjecaj različitih modelskih pristupa na otpornost armiranobetonskih stupova na požar prema Eurokodu 2, primjenjujući ih na stvarnome primjeru iz prakse. Metodologija uključuje usporednu analizu pojednostavljenih i naprednih numeričkih simulacija, pri čemu se računalni program FDS (engl. Fire Dynamics Simulator) koristi za određivanje požarnih krivulja, a računalni program ABAQUS za toplinske i mehaničke analize. Rezultati pokazuju kako pretpostavke u modeliranju utječu na nosivost i otpornost na požar. Zaključci ističu potrebu za ravnotežom između sigurnosti i učinkovitosti te važnost varijabilnih osnih opterećenja i više toplinskih zona za točnu procjenu otpornosti na požar.

Ključne riječi:

požarna analiza, armiranobetonski stup, pojednostavljene metode, napredne metode, prirodni požari, EC2

Research Paper

Marko Rogulj, Alen Harapin, Peter Češarek, Jerneja Češarek Kolšek

On the effect of different Eurocode 2-based modelling choices on the calculated fire resistance of RC columns

This paper examines the impact of different modelling choices on the fire performance of RC columns using Eurocode 2 in a real-world case study. The methodology includes a comparative analysis of simplified and advanced numerical simulations, employing FDS for fire curves and ABAQUS for thermal and mechanical analyses. Results show how modelling assumptions affect load-bearing capacity and fire resistance. Conclusions emphasize balancing safety and efficiency, highlighting the importance of variable axial loads and multiple heat zones for accurate fire resistance assessment.

Key words:

fire analysis, RC column, simplified procedures, advanced procedures, natural fires, EC2

1. Uvod

U skladu sa zahtjevima norme EN 1992-1-2:2004 [1] požarne analize armiranobetonskih (AB) stupova mogu se provoditi na različite načine, uz različite razine preciznosti. Međunjima u praksi još uvijek prevladavaju takozvane metode analize elementa. Kao što i sam naziv sugerira, riječ je o metodama u kojima se AB stup promatra isključivo kao jedan (izolirani) konstruktivni element, dok se utjecaj okolne konstrukcije opisuje samo silama i momentima primijenjenima na krajevima elementa te posebno definiranim kinematičkim rubnim uvjetima. Osim toga često se primjenjuju i sljedeće pojednostavnjene pretpostavke:

- Rubne sile koje djeluju na stup smatraju se konstantnima tijekom požara, kao i rubni uvjeti.
- Promjena temperature u okolini stupa definira se tzv. nominalnom požarnom krivuljom iz norme EN 1991-1-2:2002 [2]. Ta krivulja ovisi o vremenu i općemu tipu očekivanog požara (standardni, vanjski ili ugljikovodični požar), ali ne ovisi o specifičnostima analiziranoga požarnog prostora (npr. površina poda, volumen, količina i raspored otvora, zapaljive prepreke), premda je poznato da i ti čimbenici utječu na dinamiku požara. Osim toga među nominalnim požarnim krivuljama najčešće se primjenjuje tzv. standardna požarna krivulja.
- Pretpostavlja se da je temperatura okoline stupa u određenome trenutku požara konstantna duž visine stupa i oko njegova opsega.
- Toplinski tokovi uslijed konvekcije i zračenja koji nastaju tijekom požara na dodirnoj površini između stupa i njegove okoline izračunavaju se prema preporukama za koeficijente konvekcije i zračenja iz normi EN 1991-1-2:2002 [2] i EN 1992-1-2:2004 [1].
- Deformacije stupa opisuju se izrazima teorije drugog reda umjesto izrazima pouzdanije geometrijski nelinearne teorije. Osim toga učinci visokih temperatura često se grubo kompenziraju smanjenjem veličine betonskoga poprečnog presjeka umjesto korištenjem stvarnog presjeka. Smanjeni betonski dio presjeka stupa smatra se tijekom cijelog trajanja požara na početnoj (okolnoj) temperaturi, a obično se definira tzv. metodom izoterme od 500 °C ili zonskom metodom, prema normi EN 1992-1-2:2004 [1].

Do sada su mnogi inženjeri postali svjesni toga da navedene pretpostavke u nekim slučajevima mogu podcijeniti otpornost stupa na požar. Iako su te pretpostavke "sigurne", mogu dovesti do nepotrebno skupih inženjerskih rješenja (npr. zahtjeva za prekomjernom protupožarnom zaštitom konstrukcije), što bi se do određene mjere moglo izbjeći izostavljanjem barem nekih pojednostavljenja. S druge strane, neke od pretpostavki mogu precijeniti otpornost stupova na požar i time biti "nesigurne". Nažalost, čini se da do danas još nije dovoljno razjašnjeno koja od tih pojednostavljenja treba prvo ukinuti (tj. koja najviše utječu na konzervativnost proračunanog rezultata ili su pak potencijalno nesigurna). Na to pitanje bit će odgovoreno u ovome radu. Kako

bi istraživanje imalo dodatnu vjerodostojnost, bit će provedeno na primjeru odabrane (stvarne) armiranobetonske zgrade i stvarnog požara koji je u toj zgradi izbio krajem 2016., a opisan je u radovima [3, 4].

2. Materijal i metode

2.1. Pripremne aktivnosti

Ovo istraživanje nastavak je dijela rezultata prikupljenih u sklopu poslijedoktorskog projekta [3]. Također predstavlja doradu i nadogradnju pripremnog rada provedenog u sklopu diplomskog rada Rogulj [5]. Analize prikazane u radu [5] provedene su ponajprije na numeričkim modelima s relativno grubom mrežom konačnih elemenata. Te su mreže bile prilagođene dostupnoj računalnoj opremi studenta, ograničenjima softverskih licenci te vremenskome okviru za izradu diplomskog rada. Ostale prilagodbe modela poput zanemarivanja doprinosa čelične armature i nosivosti tlačno opterećenog betona u stupu također su uvedene iz istih razloga. Međutim, radi povećanja razine pouzdanosti zaključaka navedene su prilagodbe izostavljene u analizama prikazanim u ovome radu, a istraživanje je ponovljeno i prošireno.

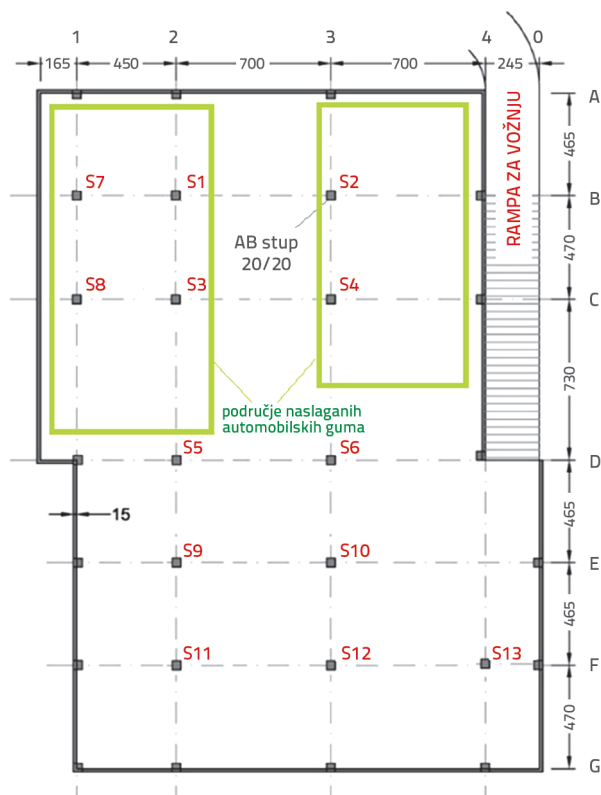
2.2. Istraživani slučaj

Analizira se armiranobetonska (AB) zgrada u vlasništvu tvrtke koja se bavi prodajom i servisiranjem automobila, a u čijemu dijelu podruma izbija požar. Pretpostavlja se da je taj dio podruma istovjetan dijelu podruma AB zgrade u Jesenicama (Slovenija), gdje je krajem 2016. izbio veliki požar, a kako je to prikazano u izvorima [3, 4]. Na temelju dostupnih podataka iz navedenih izvora za predmetni požarni odsjek zgrade koja se analizira u ovome radu preuzimaju se iste značajke, tj. nosiva konstrukcija, geometrijska obilježja, raspored gorivih prepreka te raspored i dimenzije prozora i vrata (vidi sliku 1.). Međutim, u odnosu na stvarne karakteristike požarnog odsjeka zgrade u Jesenicama, primjenjuje se jedna ključna razlika, a to je da su promijenjeni poprečni presjeci stupova u podrumu. Ta prilagodba provedena je kako bi svojstva stupova bila usklađena s ciljevima ovog rada te kako bi se rezultati prikazani u nastavku učinkovitije interpretirali. Detaljnije obrazloženje te prilagodbe slijedi u sljedećim poglavljima.

Požar u zgradi u Jesenicama [3, 4], izbio je u dijelu podruma, koji je tlocrtne površine od približno 600 m² (slika 1.). U vrijeme izbijanja požara u tom je prostoru bilo uskladišteno približno 3000 automobilskih guma (vidi zeleno označena područja na slici 1.), složenih u stupce visine 2,2 m, koje su činile primarno požarno opterećenje.

Nosivi sustav konstrukcije dijela zgrade prikazanog na slici 1. sastoji se od armiranobetonskih okvira, zidova i ploča. U skladu s ciljem ovog rada razmatrat će se ponašanje armiranobetonskih stupova pri požaru. Radi sažetosti prikaza detaljno će biti analiziran samo jedan stup koji se, prema pretpostavljenome

scenariju požara, smatra jednim od najizloženijih konstrukcijskih elemenata, i to stup S2 (njegov položaj vidi na slici 1.).



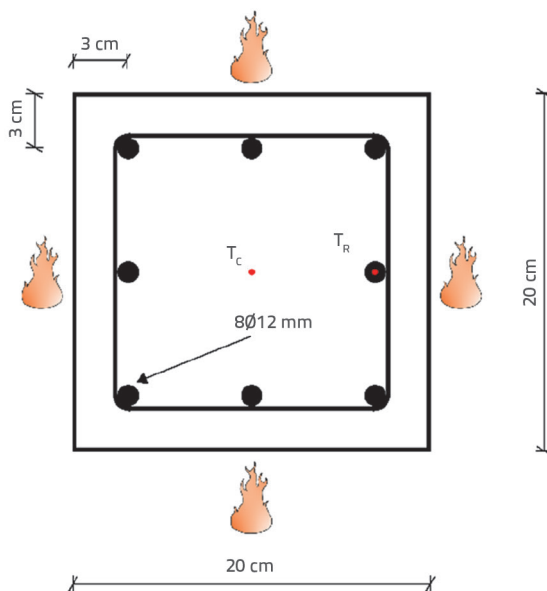
Slika 1. Tlocrt požarom zahvaćenog dijela podruma analizirane zgrade

U slučaju zgrade u Jesenicama armiranobetonski stupovi visoki su 3 metra. Ista visina preuzeta je i u ovaj rad. Međutim, stvarni stupovi imaju kružni poprečni presjek promjera 50 cm. Prema navodima iz izvora [3, 4], na početku požara 2016. ti su stupovi bili opterećeni tek do malog udjela svoje ukupne nosivosti u hladnome stanju, i to približno 10 %. Zbog tako niskog stupnja opterećenja stupovi su bez poteškoća podnijeli djelovanje požara, što je potvrđeno i terenskim pregledom nakon požara, navedenim u izvorima [3, 4]. Ipak, kako bi se u numeričkim požarnim analizama povećala vjerojatnost rušenja stupova, odnosno njihova kolapsa uslijed požara, a time omogućila i jasnija usporedba rezultata planirane parametarske analize (naprimjer, kroz vrijeme do sloma), u nastavku će se razmatrati stupovi veće vitkosti, s armaturom prema prikazu na slici 2. Odabrana je klasa betona C30/37, dok je armatura razreda B 500. Iako stupovi s poprečnim presjekom 20 × 20 cm, odabranim u ovome radu, nisu česta pojava u stvarnim građevinama, ipak mogu odgovarati geometrijskim značajkama stupova u zgradama u kojima su istodobno zadovoljena sljedeća dva uvjeta:

- Horizontalna djelovanja vjetrova i, ako je primjenjivo, potresa primarno preuzimaju armiranobetonski zidovi zgrade. Armiranobetonski stupovi imaju sekundarnu ulogu te ne sudjeluju znatno u preuzimanju horizontalnih opterećenja.

- Ostala (lokalna) horizontalna djelovanja poput udara vozila nisu relevantna za predmetnu zgradu.

Iako bi prvi uvjet bio ispunjen, naprimjer, kada bi dovoljan udio masivnih armiranobetonskih zidova bio uključen u cjelokupni sustav nosive konstrukcije zgrade, drugi uvjet zahtijeva da unutar zgrade nije moguće kretanje vozila. Iako taj drugi uvjet nije ispunjen za stvarnu zgradu u Jesenicama, pretpostavlja se da jest za zgradu razmatranu u ovome radu. U tome smislu promatrana zграда ne može se smatrati zgradom namijenjenom prodaji i servisu automobila u užemu smislu, već pomoćnom zgradom poduzeća koje se bavi takvim djelatnostima (npr. zgradom koja sadržava uredske prostore poduzeća te podrum predviđen za višesmjensku pohranu).



Slika 2. Pretpostavljeni poprečni presjek analiziranog armiranobetonskog stupa

Nadalje, pretpostavlja se da na vrh promatranog stupa S2 djeluje koncentrirano opterećenje $N_{0,Ed} = 1000$ kN. Ovisno o specifičnostima ostatka konstruktivnog sustava zgrade, to se opterećenje može smatrati dijelom proračunske osne sile u stupu koja odgovara osnovnoj kombinaciji djelovanja prema Eurokodu [6].

Koncentrirano opterećenje $N_{0,Ed} = 1000$ kN proračunano je za promatrani stup S2 na temelju pretpostavki koje odražavaju stvarnu zgradu:

- Zgrada je tipa P+P+2K (podrum + prizemlje + 2 kata; engl. B+U+2F).
- Geometrijske i nosive karakteristike relevantnih dijelova svih etaža, uključujući krov, iznad stupa S2 istovjetne su onima prikazanim na slici 1., pri čemu se može smatrati da odgovarajuće površine međukatne ploče koje utječu na osno opterećenje stupa S2 približno odgovaraju polovini površina omeđenih osima 2 i 4 te A i C na toj slici.

- Odgovarajuća djelovanja uzeta u obzir u skladu s normom EN 1991-1-1 [7] iznose: $g_k = 5,8 \text{ kN/m}^2$ (stalna djelovanja), $q_{k,1} = 2,5 \text{ kN/m}^2$ (korisna djelovanja) i $q_{k,2} = 1,21 \text{ kN/m}^2$ (snježno opterećenje, koje predstavlja tipičnu vrijednost za niže nadmorske visine u središnjoj Sloveniji, uz pripadni kombinacijski faktor $\psi_{1,2} = 0,5$).

To se opterećenje može smatrati dijelom proračunske osne sile u stupu koja odgovara osnovnoj kombinaciji djelovanja prema Eurokodu [6]. Radi osiguravanja dostatne nosivosti stupa odabrana je armatura sastavljena od 8 šipki promjera 12 mm ($8 \phi 12$). Ojačanje sastavljeno od 8 šipki promjera 12 mm ($8 \phi 12$) čini 2,3 % površine poprečnog presjeka betona, što je neznatno iznad srednje vrijednosti između minimalnih i maksimalnih vrijednosti definiranih normom EN 1992-1-1:2004 [20]. U kombinaciji s pretpostavljenim dimenzijama poprečnog presjeka stupa i svojstvima betona rezultira time da proračunano opterećenje stupa iznosi približno 70 % njegove krajnje nosivosti, relevantne za trajne projektne situacije prema [6]. Ta je vrijednost određena primjenom nelinearnoga mehaničkog modela stupa izrađenog u računalnom programu ABAQUS, koji je pripremljen na sličan način kao model za proračun požarnog odziva stupa opisan u poglavlju 2.3.3. Razlika je u tome što je analiza provedena za uvjete sobne temperature, da se opterećenje na stup nije promatralo kao konstantno, već je postupno povećavano sve do pojave sloma (izvijanja) stupa, te da su mehanička svojstva betona i čelične armature bila reducirana u skladu s uvjetima trajnih projektne situacija. Važno je napomenuti da je takva razina opterećenja (tj. 70 %) u skladu s odredbama norme EN 1992-1-2 [2], koja daje smjernice za proračun opterećenja relevantnog za projektiranje konstrukcije na djelovanje požara (vidi točku 2.4.2.(3) navedene norme, Napomenu 2). Također je u skladu s tipičnim razinama opterećenja koje se primjenjuju na stupove tijekom standardnih ispitivanja nosivosti konstrukcija u požaru (EN 1363-1 [8], EN 1365-4 [9]).

2.3. Požarna analiza stupa S2

Požarna analiza stupa S2 bit će podijeljena na sljedeća tri osnovna koraka:

1. korak: određivanje temperature okoline stupa (požarni scenarij)
2. korak: određivanje temperatura betona (toplinska analiza stupa)
3. korak: određivanje požarne otpornosti stupa (mehanička analiza stupa do njegova sloma, odnosno urušavanja).

2.3.1. Požarni scenarij (1. korak)

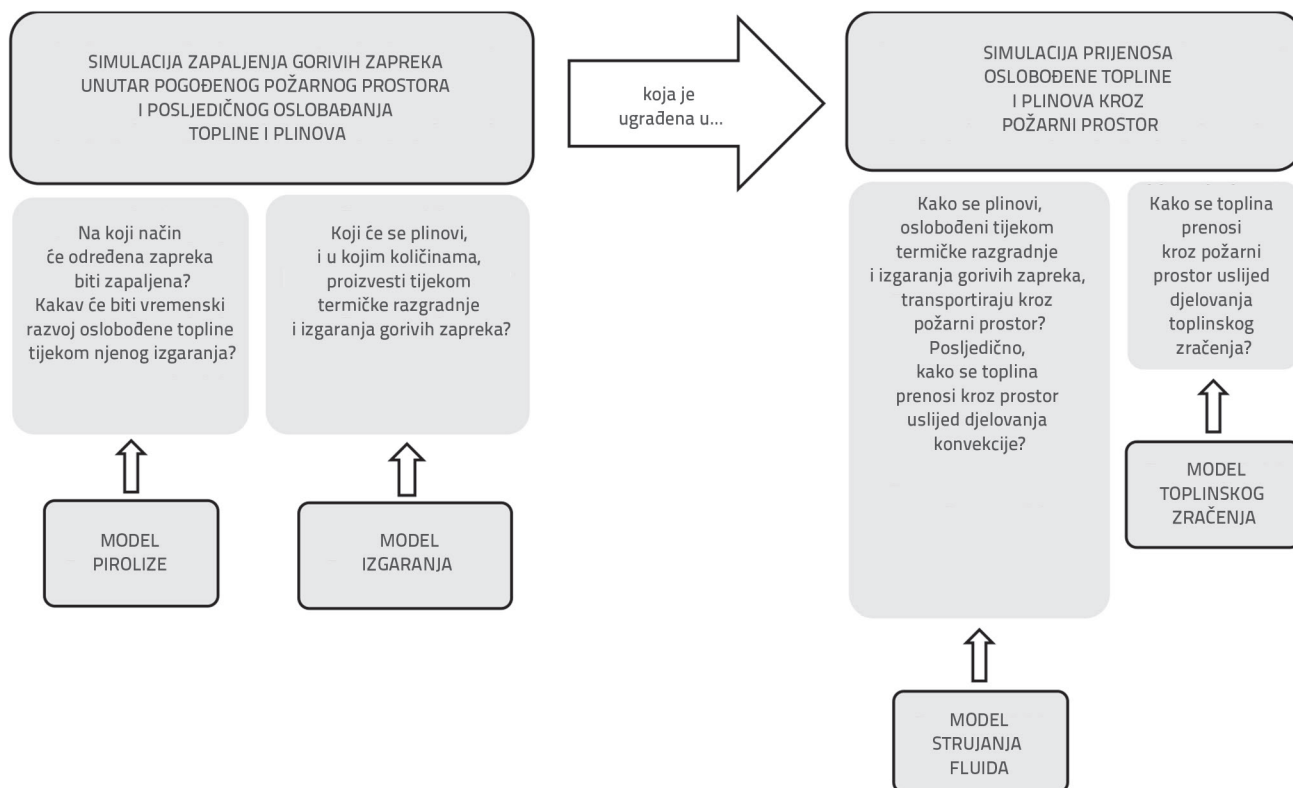
Požarni scenarij u svojemu najopćenitijem obliku jest vremenski i prostorno ovisna funkcija temperatura okoline konstrukcije izložene požaru, odnosno temperatura okolnog zraka koja je važna za konvektivni prijenos topline prema analiziranoj

konstrukciji i od nje te temperatura okolnih zidova i drugih zapreka koje s konstrukcijom izmjenjuju toplinu zračenjem. Tijekom potpuno razvijenog požara, koji nas najviše zanima s gledišta nosivosti konstrukcije zgrade, ta se funkcija često može pojednostaviti na vremenski ovisnu funkciju, tj. takozvanu požarnu krivulju. Primjenom požarne krivulje duž određene konstrukcije (ili njezina dijela) prihvaća se pretpostavka da će u određenome trenutku t temperatura okoline konstrukcije biti jednaka duž cijele konstrukcije i oko nje.

Uzimajući u obzir požarne krivulje predložene u normi EN 1991-1-2:2002 [2], požarni inženjer može birati između *nominalnih požarnih krivulja*, koje u pravilu opisuju samo fazu zagrijavanja, ali ne i fazu hlađenja požara, ili *parametarskih požarnih krivulja (prirodne požarne krivulje)*. Prve se definiraju jednostavnim analitičkim izrazima, dok se druge najčešće određuju pomoću naprednih numeričkih postupaka, naprimjer, u računalnim programima kao što je FDS (*Fire Dynamics Simulator*) [10]. Analitički izraz za određivanje parametarske požarne krivulje dostupan je i u jednome od informativnih dodataka normi EN 1991-1-2:2002 [2], no on ima nekoliko ograničenja te je zato primjenjiv samo za specifične slučajeve požara u zgradama.

Kada se primjenjuje nominalna požarna krivulja prema normi EN 1991-1-2:2002 [2], tada se odabire isključivo na temelju općeg tipa požara, odnosno *standardna požarna krivulja* za celulozni požar, *vanjska požarna krivulja* za požar koji zahvaća vanjski element konstrukcije (npr. nadstrešnicu) ili *uglikovodična požarna krivulja* za požar uzrokovan ugljikovodicima (npr. požar u industrijskoj hali). Međutim, kod parametarskih požarnih krivulja uzimaju se u obzir i druge specifičnosti građevine kao što su veličina požarnog odjeljka, količina i raspored zapaljivih prepreka, veličina i raspored otvora u zgradi poput prozora i vrata (koji tijekom požara omogućuju dotok svježeg zraka i time mogu povećati brzinu izgaranja) itd.

Među gore spomenutim nominalnim požarnim krivuljama prema normi EN 1991-1-2:2002 [2] standardna požarna krivulja najčešće se primjenjuje u praksi, jer je upravo ona ta koju treba primijeniti u svakome slučaju, osim ako projektant požarne sigurnosti ne odredi drugačije zahtjeve (nažalost, do danas se takav pristup i dalje često susreće u inženjerskoj praksi). Zato će se, kad god se u analizama ovog rada razmatra nominalna požarna krivulja, primjenjivati standardna požarna krivulja. Međutim, kada se predlaže prirodna požarna krivulja, ona će biti generirana pomoću požarnih simulacija izrađenih u široko poznatome programskom paketu FDS. FDS simulacije u sklopu ovog istraživanja provodit će se u verziji 5.5.3 navedenoga programskog paketa [10] (razlozi za odabir upravo te verzije bit će objašnjeni u nastavku), a kombinirat će analize postupnog paljenja i izgaranja zapaljivih prepreka smještenih oko požarnog odjeljka te pripadajućeg oslobađanja topline i plinova kao proizvod izgaranja i analize prijenosa topline i plinova kroz požarni odjeljak i prema vanjskome prostoru (slika 3.). Temelj za simulacije prijenosa topline i plinova bit će izrazi *računalne dinamike fluida* (engl. *computational fluid dynamics* - CFD) i *modeli toplinskog zračenja*. To su isti izrazi koji se naširoko primjenjuju i u



Slika 3. Opća shema računalnih simulacija korištenih u FDS analizama ovog rada za definiranje prirodnih požarnih krivulja

drugim znanstvenim disciplinama poput strojarstva i fizike. Zato su u prošlosti bili predmet brojnih znanstvenih istraživanja te su danas dostupni za neposrednu primjenu u mnogim programskim paketima za požarno inženjerstvo, uključujući FDS. Nasuprot tome, modeli za paljenje zapaljivih prepreka i pripadajuće oslobađanje topline (*modeli pirolize*) te plinova (*modeli izgaranja*) još su uvijek u fazi intenzivnog razvoja i do danas su u velikoj mjeri odgovornost svakog projektanta zaštite od požara.

Model pirolize

Brzina pirolize čvrstog materijala ovisi o temperaturi, a u FDS-u [10] regulirana je dvama osnovnim izrazima. Prvi je Arrheniusov izraz, prema kojemu je svaki materijal određen s nekoliko vrsta intermolekularnih veza koje se raspadaju pri različitim temperaturama. Zato je smanjenje mase materijala tijekom njegove pirolize zbroj doprinosa N_j reakcija, izraz (1):

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\sum_{j=1}^{N_j} A_j \alpha^{N_j} e^{-\frac{E_j}{RT}} \quad (1)$$

gdje su α omjer trenutačne mase materijala u odnosu na njegovu početnu masu, T temperatura materijala, a R univerzalna plinska konstanta (8,31431 J/K·mol). A_j , E_j i N_j elementi su tzv. kinetičkog tripleta reakcije rednog broja j , pri čemu je A_j predeksponencijalni faktor u jedinici s^{-1} , E_j energija aktivacije u jedinici kJ/k·mol, a N_j red reakcije. Smatraju se konstantama i u pravilu se

ne određuju laboratorijskim ispitivanjima, već se definiraju numeričkim prilagođavanjem izraza (1) prema rezultatima termogravimetrijske analize (engl. *Thermogravimetric Analysis - TGA*), npr. [10-13]. Prilagodba se u pravilu provodi primjenom genetskih algoritama ili sličnih optimizacijskih metoda. Rezultati TGA ispitivanja koji se primjenjuju u tome kontekstu ne smiju odgovarati samo jednoj zadanoj brzini zagrijavanja, već moraju obuhvaćati više različitih brzina zagrijavanja kako bi konačno definirani (konstantni) kinetički parametri odgovarali (tj. unutar prihvatljivih granica) različitim režimima zagrijavanja kojima materijal može biti izložen u stvarnome požaru.

Nadalje, klasični Fourierov izraz provođenja topline u neporoznim čvrstim tijelima primjenjuje se u računalnom programu FDS [10] za opis pirolize materijala, izraz (2):

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}_s'' \quad (2)$$

gdje je X smjer prijenosa topline, a \dot{q}_s'' , ρ , c_p , k su konstante koje predstavljaju unutarnji izvor topline, tj. toplinu reakcija rednog broja N_j , te triplet toplinskih parametara materijala (gustoća, specifični toplinski kapacitet i toplinska vodljivost). Iako bi u ovome slučaju mjerenje vrijednosti \dot{q}_s'' , ρ , c_p , k bilo izvedivo pomoću relativno jednostavnih ispitivanja materijala (barem pri uvjetima sobne temperature), i ti se parametri definiraju posebno oblikovanim numeričkim podešavanjima, pri čemu

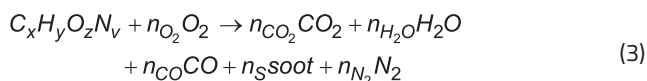
se rezultati modela pirolize, temeljenog na izrazima (1) i (2), prilagođavaju rezultatima ispitivanja na konusnome kalorimetru (vidi [10, 11]). I u ovome slučaju potrebno je definirati fiksni skup vrijednosti parametara koji će unutar prihvatljivih odstupanja odgovarati različitim mogućim uvjetima izgaranja materijala. Zato bi se u procesu trebali primjenjivati rezultati nekoliko ispitivanja konusnim kalorimetrom provedenih pri različitim toplinskim tokovima konusnog radijatora umjesto rezultata jednog ispitivanja.

Kao što je prethodno objašnjeno, parametri A_f , E_f , N_j i $\dot{q}_{s,i}$, ρ , c_p , k definiraju se numeričkim podešavanjem FDS modela pirolize (koji se temelji na Arrheniusovu i klasičnome Fourierovu izrazu) prvo na rezultate TGA ispitivanja, a zatim na rezultate ispitivanja konusnim kalorimetrom.

Kao što je to predloženo u [10, 11], tijekom takvog podešavanja korišteni algoritam (npr. genetski algoritam) treba pozivati FDS kako bi generirao TGA i konusno kalorimetrijske testne simulacije. Iako bi, barem za prilagodbu TGA podacima, bilo jednostavnije riješiti samo Arrheniusov izraz bez korištenja simulatora, njegova primjena osigurava da je rješenje odmah primjenjivo u FDS-u za daljnje analize. Istodobno to znači da vrijednosti dobivenih kinetičkih i toplinskih parametara mogu biti specifične za verziju FDS-a, uz napomenu da se opći oblik izraza koje FDS primjenjuje pri simulacijama TGA i/ili konusnoga kalorimetra može mijenjati između različitih verzija FDS-a.

Model izgaranja

Model izgaranja definira izraz kemijske reakcije u plinovitoj fazi, odnosno reakciju goriva, para i kisika (stehiometrijski izraz). U FDS-u [10] dostupna su dva moguća načina definiranja te reakcije: jednostavniji model omjera smjese (engl. *mixture fraction model*) i složeniji model izgaranja s konačnom brzinom reakcije (engl. *finite rate combustion model*). U svrhu ovog rada korišten je prvi model. Kako je navedeno u [10], primjenom modela omjera smjese pretpostavlja se da reakcija ima sljedeći oblik, izraz (3):



Korisnik FDS-a treba navesti samo kemijsku formulu goriva, zajedno s prinosima CO, čađe i H₂ te udjelom vodika u čađi. Za neke od najtipičnijih kemijskih reakcija odgovarajuće vrijednosti mogu se pronaći u literaturi (npr. u [14]). Radi potpunosti moguće je definirati i udio N₂ u gorivu te udio drugih kemijskih komponenti. FDS će interno koristiti te podatke za izračun količine proizvoda sagorijevanja koji nastaju.

FDS simulacija požara u Jesenicama 2016.

Napredna računalna rekonstrukcija požara koji je 2016. izbio u Jesenicama izrađena je u radu [3], a upravo taj model primijenjen je i kao osnova u ovome radu. Treba napomenuti da su detalji Kolšekova modela prikazani i u [15]. U Kolšekovu modelu

[3] računski domena definirana je u trodimenzionalnome koordinatnom sustavu, prateći glavne geometrijske značajke dijela zgrade zahvaćenog požarom (slika 1.), pri čemu su u sva tri smjera dodani odgovarajući prošireni dijelovi domene kako bi se smanjio mogući negativan utjecaj granica mreže konačnih elemenata. Otvoreni otvor (*Open Vent*) postavljen je preko cijeloga gornjeg dijela računski domene radi ulaska svježega vanjskog zraka i odvođenja dima. Toplinska svojstva (gustoća, toplinska vodljivost, specifični toplinski kapacitet) vanjskih armiranobetonskih zidova i armiranobetonskog stropa (debljine 20 cm) postavljena su u skladu s preporukama norme EN 1992-1-2:2004 [1], a stražnja strana tih površina definirana je kao izložena (*EXPOSED*) prema uputama iz [10]. Otvori u zidovima, tj. prozori i vrata, modelirani su primjenom funkcije *HOLE*. Osim toga za modeliranje pirolize materijala automobilskih guma korišteni su parametri za materijal poli(metil-metakrilat) (PMMA), kako su prikazani u diplomskome radu Matala [11]. Uzimajući u obzir relevantne sličnosti između gorenja PMMA-e i automobilskih guma [16-18], dodatna obrazloženja za taj odabir navedena su u [3, 15]. Kao što je već prethodno objašnjeno, tijekom prilagodbe parametara pirolize materijala alat primijenjen za podešavanje obično poziva izvođenje simulacija TGA-e (termogravimetrijske analize) i testova na konusnome kalorimetru, što je bio slučaj i u radu [11]. Primjena FDS-a u tome procesu osigurava da je dobiveno rješenje primjenjivo u FDS-u za kasniju upotrebu, no također znači da određene vrijednosti parametara mogu biti specifične za verziju FDS-a. Zato je ista verzija FDS-a koja je korištena u [11] upotrijebljena i u analizama iz [3, 15] te u analizama ovog rada. Debljina svih guma (samo zapaljivi slojevi) uzeta je kao 0,04 m. Za razliku od detaljnog modeliranja pirolize izgaranja guma, za opis kemijske reakcije u plinovitoj fazi postavljen je jednostavniji model omjera smjese, a kako je to predloženo u [3, 15]. Razlog jest taj što je cilj ovog FDS modeliranja bio izračunati temperature u zahvaćenome požarnom prostoru, dok detaljna analiza nastanka i prijenosa plinovitih spojeva nije bila u fokusu. Nadalje, FDS simulacija provedena je primjenom jedinstvene uniformne mreže s veličinom ćelije 20 × 20 × 20 cm. Takva mreža može djelovati relativno grubo, ali omogućuje dovoljnu numeričku učinkovitost modela te, kao što je to prikazano u [3, 15], pokazuje se dovoljnom za postizanje rezultata prihvatljive točnosti. U radovima [3, 15] to je demonstrirano tako da je model požara u Jesenicama, ukratko opisan u prethodnome dijelu rada, prvo korišten za izračun maksimalne dubine izoterme od 500 °C kako se razvijala u najviše zahvaćenim stvarnim stupovima u Jesenicama (tj. okruglim stupovima promjera 50 cm). Rezultati su upućivali na to da se ta dubina nalazi otprilike 6 cm ispod površine stupova, dok su eksperimentalni rezultati laboratorijskog ispitivanja uzoraka betona uzetih iz tih stupova tijekom njihova pregleda nakon požara upućivali na dubinu od 5 do 8 cm. Treba napomenuti da je izvješće o pregledu nakon požara također prikazano u [3, 4].

Kako bi se u cijelosti ostvarili ciljevi ovog rada, prethodno opisani model prema Kolšeku [3] dodatno je nadograđen. Naime, u

izvornome modelu armiranobetonski stupovi zahvaćenog dijela podruma, odnosno stupovi S1–S13 prikazani na slici 1., nisu bili posebno modelirani, dok su u ovome radu dodani kao dodatne krute zapreke unutar modela. Razlog tome bio je što je jedan od učinaka koji se trebao ispitivati poslije u radu također bio učinak koeficijenta konvektivnog prijenosa topline (engl. *convective heat transfer coefficient* - CHTC), no uređaj namijenjen za mjerenje CHTC-a mogao se pričvrstiti isključivo na čvrstu površinu unutar programskog paketa FDS. Naime, vrijednost koeficijenta konvektivnog prijenosa topline (CHTC) općenito ne ovisi samo o temperaturi plina, već i o brzini strujanja plina te o vrsti gibanja plina (laminarno ili turbulentno), pri čemu oba čimbenika ovise o svojstvima površine. Zapreke koje su predstavljale stupove S1 – S13 u FDS [10] modelu bile su modelirane tako da je svaka strana svakog stupa bila modelirana kao površina debljine 10 cm, s toplinskom izolacijom s unutarnje strane (*INSULATED*) i odgovarajućim toplinskim svojstvima betona kako je to predloženo u [1]. Četiri uređaja za mjerenje koeficijenta prijenosa topline (*HEAT TRANSFER COEFFICIENT*) postavljena su na površinu svakog stupa na visini od 2,5 m odnosno 30 cm ispod stropa podruma, po jedan na svakoj od četiri strane. Krivulja CHTC-a, koja prikazuje promjene koeficijenta prijenosa topline kroz vrijeme i koja se poslije upotrebljava u drugome koraku postupka, izračunana je kao prosječna vrijednost dobivena iz mjerenja četiriju mjernih uređaja. Uz to uređaji za mjerenje adijabatske temperature površine (engl. *adiabatic surface temperature* - AST) bili su postavljeni na istim položajima, a njihovi su rezultati naknadno obrađeni na isti način, izračunavanjem prosječne vrijednosti. Prosječna vrijednost AST-a zatim je korištena za definiranje požarne krivulje u drugome koraku postupka.

U drugom koraku postupka, koji će biti opisan u nastavku rada, temperature betona unutar volumena AB stupa izračunavat će se pomoću klasičnoga Fourierova izraza, pri čemu će konvektivni i zračenjem uvjetovani prijenos topline na granici čvrstog tijela ovisiti o požarnoj krivulji. Požarna krivulja jest temperatura okoline konstrukcije kojoj je izložena tijekom požara. Pojam "okolina" u tome kontekstu odnosi se na okolni zrak koji razmjenjuje toplinu s analiziranom konstrukcijom konvekcijom i na temperaturu okolnog plamena, zidova i drugih zapreka u požarnome prostoru koje razmjenjuju toplinu zračenjem. Očito je da se primjenom požarne krivulje, koja je funkcija ovisna samo o vremenu, a ne i o prostoru, pretpostavlja da je temperatura svih tih komponenti (zraka, plamena, zidova i drugih zapreka unutar požarnog prostora) u osnovi ista ili vrlo slična.

Ipak, ovisno o specifičnostima analiziranog slučaja i trenutačnoj fazi požara, ta pretpostavka možda neće uvijek biti u cijelosti točna. Zato se temperatura požarne krivulje mora smatrati fiktivnom, a ne stvarnom temperaturom. U FDS-u [10] ta fiktivna temperatura naziva se adijabatska temperatura površine (AST). AST se izračunava tako da je neto konvektivni i radijacijski toplinski tok na čvrstoj površini, izračunan pomoću CFD-a i radijacijskih modela u FDS-u, jednak izrazu koja se primjenjuje u drugome koraku postupka:

$$\dot{q}_r'' + \dot{q}_c'' = \varepsilon\sigma(T_{AST}^4 - T_c^4) + h(T_{AST} - T_c) \quad (4)$$

U izrazu (4) zbroj na lijevoj strani predstavlja ukupni toplinski tok (zračenjem i konvekcijom) koji ulazi kroz graničnu površinu, tj. vanjsku površinu promatranog stupa, dok oznake T_c , ε i h na desnoj strani predstavljaju svojstva te površine (temperaturu površine stupa, koeficijent emisije zračenja i koeficijent konvektivnog prijenosa topline). T_{AST} označava temperaturu okoline stupa, a σ jest Stefan-Boltzmannova konstanta.

2.3.2. Toplinska analiza stupa (2. korak)

Model za proračun vremenski ovisnih temperatura stupa S2 postavljen je u programu ABAQUS [19] kao standardna Fourierova analiza nestacionarnog prijenosa topline kroz neporozne čvrste materijale. Za beton su korišteni mreža gustoće $0,01 \times 0,01 \times 0,01$ [m] te linearni prostorni konačni elementi tipa DC3D8. Armatura je diskretizirana pomoću štapnih konačnih elemenata tipa DC1D2. Požarna krivulja definirana je na temelju rezultata prethodnog, prvog koraka analize. Ako je u tome koraku odabrana nominalna požarna krivulja, tada je koeficijent prijenosa topline konvekcijom (u daljnjemu tekstu: CHTC) uzet kao $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ [2]. U slučaju kada je korištena prirodna požarna krivulja izvezena iz programa FDS [10], CHTC je bio pretpostavljen kao $35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ili su vrijednosti CHTC-a bile izravno uvezene iz FDS modela. U skladu s preporukom iz [1], koeficijent zračenja betonske površine u svim je analizama postavljen na 0,7. Nadalje, gustoće betona i armature smatrane su konstantnima, tj. 2500 kg/m^3 za beton i 7850 kg/m^3 za čelik, dok su toplinska vodljivost i specifični toplinski kapacitet definirani kao temperaturno ovisni te postavljeni prema prijedlozima iz [1]. U definiranju toplinskoga kapaciteta betona uzet je u obzir beton s 2 % vlage.

U većini slučajeva analiziranih u ovome radu uzeta je samo jedna požarna krivulja koja je djelovala duž cijele visine stupa. Međutim, u nekim su slučajevima radi usporedbe definirane dvije ili više karakterističnih toplinskih zona (termalnih zona). Time se uzima u obzir činjenica da su u stvarnim požarima u zgradama temperature zraka ispod stropa više nego one pri tlu, jer se topliji zrak uzgonom diže, dok se hladniji spušta.

2.3.3. Mehanička analiza stupa (3. korak)

U požaru armiranobetonski (AB) stup može se srušiti ponajprije iz jednog od dvaju mogućih razloga: zbog gubitka nosivosti poprečnog presjeka ili izvijanja stupa i posljedičnoga gubitka stabilnosti. To koji će od tih dvaju mehanizama uzrokovati slom konstrukcije prije ovisi o vitkosti stupa. Međutim, vitkost se mijenja tijekom vremena kao neizravna posljedica visokih temperatura u betonu koje dovode, naprimjer, do postupnog smanjenja razine čvrstoće materijala u vanjskim (toplijim) slojevima stupa, delaminacije tih slojeva uslijed ljuštenja betona i sličnog.

U ovome su radu za procjenu požarne otpornosti stupa primijenjene tri odabrane metode proračuna prema normi EN 1992-1-2:2004 [1], koje sve uzimaju u obzir oba mehanizma mogućega konstruktivnog sloma (gubitak nosivosti presjeka ili izvijanje). Prve dvije metode pojednostavljene su metode koje se temelje na teoriji druge razine (2. reda) kako bi se uzela u obzir deformacija stupa te analizi temperature poprečnog presjeka i pripadne čvrstoće materijala pristupaju na manje (pojednostavljena metoda 1.) ili više (pojednostavljena metoda 2.) precizan način. Treća je metoda naprednija te se ne temelji samo na detaljnoj analizi temperaturnih stanja materijala, nego i na opisu deformacija stupa prema materijalno i geometrijski nelinearnoj teoriji višeg reda.

Pojednostavljena "Metoda 1"

Ta metoda predstavlja tzv. metodu *reduciranog presjeka*, u kojoj se najprije mora odrediti reducirani (umanjen) betonski dio poprečnog presjeka stupa za promatrano trajanje požara. To se izvodi tzv. metodom 500 °C izoterme. Prema toj metodi, pretpostavlja se da se čvrstoća i modul elastičnosti betona u cijelosti očuvaju do temperature betona od 500 °C. Iznad te temperature nosivost betona smatra se potpuno izgubljenom. Nakon što se odredi reducirani betonski presjek, tj. površina betona omeđena izotermom od 500 °C, može se provjeriti nosivost stupa, naprimjer, metodom temeljenom na nominalnoj zakrivljenosti, koja je dobro poznata iz osnovnog proračuna vitkih AB stupova na uobičajenim (sobnim) temperaturama (vidi točku 5.8.8. norme EN 1992-1-1:2004 [20]). Pri tom se pristupu u obzir uzima samo reducirani betonski presjek, za koji se pretpostavlja da zadržava početnu čvrstoću materijala. Međutim, armatura se razmatra s umanjenom čvrstoćom, ovisno o njezinoj stvarnoj temperaturi, u skladu s prijedlogom iz EN 1992-1-2:2004 [1].

Pojednostavljena "Metoda 2"

Ta je metoda slična prethodno opisanoj pojednostavljenoj metodi 1. te se temelji na odredbama iz Dodatka B.3 norme EN 1992-1-2:2004 [1]. Umjesto da se u obzir uzima samo beton unutar 500 °C izoterme, analizira se cijelo betonsko područje presjeka. Za svaku točku poprečnog presjeka prvo se iz rezultata toplinske analize očitava stvarna temperatura, a zatim se određuje pripadna nosivost stupa na savijanje prvog reda $M_{0,Rd}$ koja odgovara osnovj unutarnoj sili $V_{0,Ed}$ koristeći unaprijed definiranu relaciju $M-\kappa$ (moment – zakrivljenost). Postupak se može sažeti kako slijedi:

- Euler-Bernoullijeva hipoteza, koja tvrdi da poprečni presjeci štapnih konstrukcijskih elementa ostaju nedeformirani i okomiti na uzdužnu os elementa u bilo kojemu trenutku u vremenu, primjenjuje se pomoću izraza:

$$\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + z \cdot \kappa \quad (5)$$

gdje se κ smatra poznatom veličinom, dok je ε_0 , koji označava uzdužnu deformaciju stupa u težištu njegova poprečnog

presjeka, nepoznat. $\varepsilon(y, z)$ predstavlja uzdužnu deformaciju u točki (y, z) poprečnog presjeka, što može odgovarati betonu ili armaturi. Pretpostavlja se da armatura, smještena u točki (y_s, z_s) , i okolni beton imaju jednake deformacije, odnosno: $\varepsilon_c(y_s, z_s) = \varepsilon_s(y_s, z_s)$. Također, pri povišenim temperaturama uzdužna deformacija (y, z) definirana je kao zbroj mehaničkih i toplinskih deformacija:

$$\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + z \cdot \kappa = \varepsilon_m(y, z) + \varepsilon_{th}(y, z) \quad (6)$$

Prema normi EN 1992-1-2:2004 [1], toplinske deformacije $\varepsilon_{th}(y, z)$ izračunavaju se kao: $\varepsilon_{th}(y, z) = \alpha_T \Delta T(y, z)$, gdje je α_T koeficijent relativnoga toplinskog širenja, također definiran u [1].

- Zatim se izraz (6) unosi u odnose naprezanje – mehaničko istezanje za beton i armaturu na povišenim temperaturama, $\sigma_c(\varepsilon_{m,c})$ i $\sigma_s(\varepsilon_{m,s})$, kako je navedeno u [1].
- U trećemu koraku odnosi $\sigma_c(\varepsilon_{m,c})$ i $\sigma_s(\varepsilon_{m,s})$ primjenjuju se u poznatome konstitutivnome izrazu za konstrukcijske elemente grednog tipa, koji definira da je osna sila u poprečnome presjeku elementa jednaka poprečno-presječnome integralu uzdužnih normalnih naprezanja σ :

$$N = \int_A \sigma(y, z) dA = \int_{A_c} \sigma_c(y, z) dA_c + \int_{A_s} \sigma_s(y, z) dA_s \quad (7)$$

- Napominjemo, da se u izrazu (7) uzima u obzir da se poprečni presjek stupa sastoji od dvaju dijelova: betonskog dijela (područje A_c) i armature (područje A_s).
- Integrali iz izraza (7) mogu se riješiti, naprimjer, pojednostavljenim postupkom u kojemu se betonski presjek dijeli na manje pravokutne dijelove, uz pretpostavku da je naprezanje u svakoj točki određenoga pravokutnog područja jednako naprezanju u težištu tog područja. Time se izraz (7) pojednostavljuje u sljedeći oblik:

$$N = \int_A \sigma(y, z) dA = \sum_{A_{c,i}} \sigma_{c,i} A_{c,i} + \sum_{A_{s,j}} \sigma_{s,j} A_{s,j} \quad (8)$$

Gdje $\sigma_{c,i}$ označava naprezanje u težištu i -toga pravokutnog dijela betonskog presjeka, $A_{c,i}$ površinu tog dijela, $\sigma_{s,j}$ naprezanje u j -toj uzdužnoj armaturnoj šipki stupa, a $A_{s,j}$ odgovarajuću površinu poprečnog presjeka te šipke.

- Stvarna vrijednost osne sile sada se može uvrstiti u izraz (8) ($N = N_{0,Ed}$), a nepoznata veličina ε_0 može se izračunati.
- Nakon toga može se izračunati moment M koji odgovara prethodno zadanoj vrijednosti zakrivljenosti κ :

$$M = \int_A \sigma(y, z) \cdot z dA = \sum_{A_{c,i}} \sigma_{c,i} z_{c,i} A_{c,i} + \sum_{A_{s,j}} \sigma_{s,j} z_{s,j} A_{s,j} \quad (9)$$

gdje su $z_{c,i}$ i $z_{s,j}$ koordinate težišta betonskog dijela presjeka i armature.

- U dobivenoj krivulji $M-\kappa$ maksimalna vrijednost momenta M predstavlja savojnu otpornost stupa u njegovu deformiranom stanju (odnosno M_{Rd}). Međutim, tako dobiven M nije prikladan za usporedbu s $M_{0,Ed}$ jer je $M_{0,Ed}$ izračunan

uzimajući u obzir ravnoteže sila u nedeformiranome stanju stupa. Zato je potrebno odrediti i krivulju $M_0-\kappa$, naprimjer, kako je predloženo u [20]:

$$M_0 = M - M_2 \quad (10)$$

U izrazu (10) M jest moment savijanja prema teoriji drugog reda koji odgovara određenoj zakrivljenosti κ , dok je M_0 odgovarajući moment prema teoriji prvog reda. Također, M_2 je nazivni moment drugog reda definiran kao:

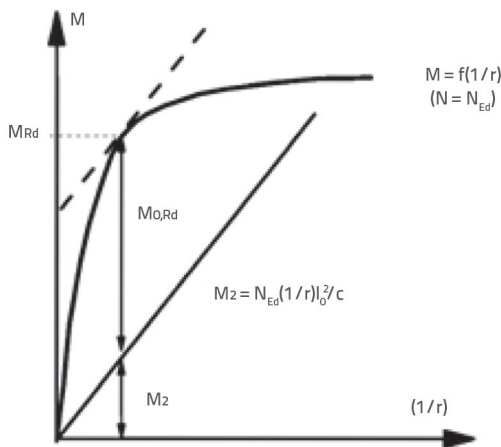
$$M_2 = N_{0,Ed} e_2 \quad (11)$$

gdje je:

$$e_2 = \frac{1}{r} l_0^2 \frac{1}{c} \quad (12)$$

Ovdje je $1/r$ zakrivljenost stupa ($= \kappa$), l_0 njegova duljina izvijanja (računana u skladu s normom EN 1992-1-1 [20], odjeljkom 5.8.3.2.), a c koeficijent približne vrijednosti $c \approx 10$.

Na kraju granični moment nosivosti stupa prema teoriji prvog reda M_{Rd} može se očitati iz krivulje $M_0-\kappa$ i to za onu vrijednost κ pri kojoj M_0 dostiže svoj maksimum (odnosno, vrijednost M_0 neposredno prije nego što krivulja počne opadati).



Slika 4. Shematski prikaz određivanja graničnog momenta nosivosti stupa drugog reda i graničnog momenta nosivosti prvog reda (M_{Rd} i $M_{0,Rd}$) prema prijedlogu iz [1]

Sada se vrijednosti $M_{0,Ed}$ i $M_{0,Rd}$ mogu usporediti:

- $M_{0,Ed} < M_{0,Rd} \rightarrow$ stup može izdržati pretpostavljeni požar
- $M_{0,Ed} > M_{0,Rd} \rightarrow$ stup ne može izdržati pretpostavljeni požar.

Napredna metoda

Napredni proračunski model temelji se na geometrijski i materijalno nelinearnoj teoriji mehanike čvrstih tijela pri visokim temperaturama. Model je izrađen u programu ABAQUS [19], a geometrija je prenesena iz toplinskog modela, iz drugog koraka analize. Stup je zatim diskretiziran primjenom

konačnih elemenata tipa C3D8 za beton i štapnih elemenata tipa T3D2 za čeličnu armaturu. Korištena je jednaka gustoća mreže kao i u toplinskome modelu, tj. $0,01 \times 0,01 \times 0,01$ [m]. Zatim su postavljeni odgovarajući kinematički rubni uvjeti. Na donjemu kraju stupa sve rotacije i pomaci čvorova fiksirani su (zadani na nulu), dok su na gornjemu kraju horizontalni pomaci svih čvorova spriječeni tako da je horizontalni pomak jednoga referentnog čvora (koji se podudara s osi stupa) bio onemogućen, a na preostale čvorove presjeka primijenjeno je ograničenje krutog tijela (engl. *rigid body constraint*). Na vrhu stupa primijenjena je koncentrirana uzdužna sila veličine 1000 kN. Kako bi se neizravno inducirao učinak početne geometrijske nesavršenosti stupa, u sredini visine stupa uvedeno je malo poprečno opterećenje. Na taj je način u stupu ostvaren odgovarajući maksimalni savojni moment od $M_{0,Ed} = 0,285$ kNm. Što se tiče relevantnih svojstava materijala, ponovno su korištene konstantne gustoće za beton i armaturu (2500 kg/m^3 i 7850 kg/m^3), dok su za temperaturno ovisan koeficijent toplinskog istezanja te odnose naprezanja i deformacija korišteni prijedlozi prema normi EN 1992-1-2:2004 [1].

2.4. Analiza utjecaja različitih modelskih pretpostavki na proračunanu požarnu otpornost stupa S2

2.4.1. Model 0: referentni model

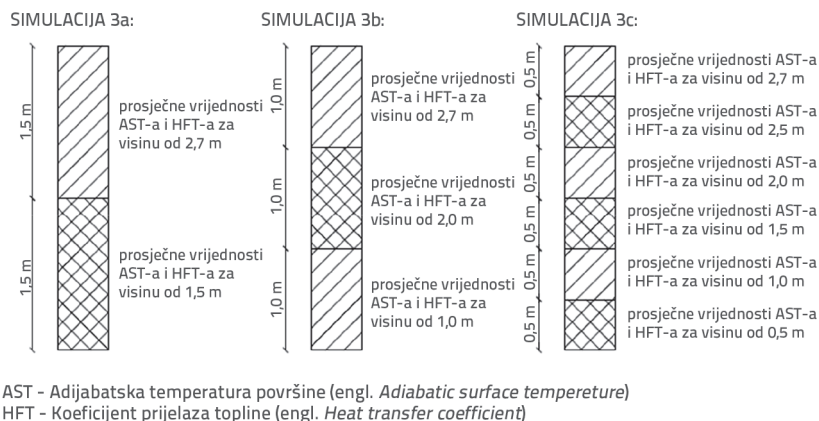
Model 0 definiran je kao referentni model u ovome radu. U 1. koraku primjenjuje se FDS model prema opisu iz poglavlja 2.3.1. Iz tog se koraka preuzimaju adijabatske temperature površine (AST temperature) i vrijednosti koeficijenta konvektivnog prijenosa topline (CHTC) za stup S2 na visini od 2,5 m iznad razine tla, a navedeni se podaci koriste za definiranje požarne krivulje i krivulje CHTC-a u sljedećem koraku. Drugi korak izvodi se u programu ABAQUS, u skladu s opisom iz poglavlja 2.3.2. Po završetku toplinske analize (2. korak) rezultati se u obliku temperaturnih polja prenose u odgovarajući model iz 3. koraka, tj. model za proračun požarne otpornosti. U tom se koraku stup analizira primjenom napredne metode opisane u poglavlju 2.3.3.

2.4.2. Model 1: ispitivanje utjecaja CHTC-a

Za razliku od *modela 0*, gdje su korištene CHTC vrijednosti preuzete iz FDS-a, u *modelu 1* koristi se prijedlog norme EN 1991-1-2:2002 [2], prema kojemu se u 2. koraku primjenjuje konstantna vrijednost CHTC-a od $35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sve ostale značajke modela jednake su kao u referentnome *modelu 0*.

2.4.3. Model 2: istraživanje utjecaja postupka iz 3. koraka

Svrha *modela 2* jest dodatno istražiti implikacije odabrane matematičke interpretacije konstrukcijskog odziva stupa, kako je primijenjena u 3. koraku. Značajke 1. i 2. koraka u tom



Slika 5. Toplinske zone u modelima 3a (lijevo), 3b (sredina) i 3c (desno)

su modelu preuzete kao u modelu 0. Međutim, u 3. koraku primijenjena su dva pojednostavljena modela teorije drugog reda, a kako je to opisano u poglavlju 2.3.3. *Pojednostavljena metoda 1. (model 2a)* i *Pojednostavljena metoda 2. (Model 2b)*. U oba slučaja (*modeli 2a i 2b*) konstrukcijska analiza stupa ponavlja se u različitim trenucima trajanja požara sve dok se ne odredi vrijeme sloma stupa S2, odnosno trenutak kada su $M_{0,Ed}$ i $M_{0,Rd}$ međusobno jednaki.

2.4.4. Model 3: istraživanje utjecaja broja toplinskih zona

U modelu 0 samo je jedna požarna krivulja primijenjena duž cijele visine stupa, dok se u skupini *modela 3* primjenjuje dvije (*model 3a*), tri (*model 3b*) ili šest (*model 3c*) takvih krivulja za prikaz temperature okoline stupa u dvije, tri ili šest različitih toplinskih zona (u nastavku koristi se kratica HZ – engl. *Heat Zone*). Na isti način primjenjuju se i vrijednosti CHTC-a. Odabrane toplinske zone raspoređene su duž visine stupa i imaju jednaku visinu (slika 5).

Za svaku zonu vrijednost AST-a i/ili CHTC-a na visini Z iznad razine tla i u određenome trenutku t trajanja požara uzima se kao srednja vrijednost rezultata četiriju odgovarajućih FDS uređaja, tj. AST ili HFT uređaja, pri čemu je svaki od njih postavljen na jednu od četiriju površina stupa, na konkretnoj visini Z.

Osim što se u obzir uzimaju različite toplinske zone, kako je to prethodno objašnjeno, u 1. i 2. koraku skupine *modela 3* ne primjenjuju se nikakve dodatne promjene u odnosu na *model 0*. Postupak 3. koraka u *modelima 3* istovjetan je onome u *modelu 0*.

2.4.5. Model 4: istraživanje utjecaja promjenjivosti iznosa osnog opterećenja

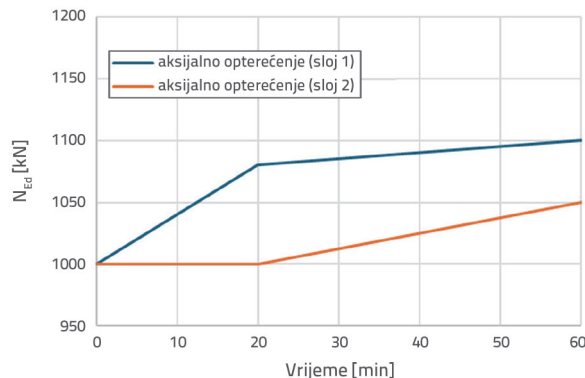
U pojednostavljenim metodama analize elemenata za procjenu požarne otpornosti armiranobetonskih stupova prema normi EN 1992-1-2:2004 [1] stup se analizira pod konstantnim mehaničkim opterećenjem koje ostaje jednako početnome

opterećenju $N_{0,Ed}$, tj. opterećenju na početku požara. Međutim, danas je poznato (npr. [21, 22]) da se kod stvarnih požara u AB konstrukcijama opterećenje na stupu može mijenjati tijekom vremena, ponajprije zbog ograničenih temperaturnih deformacija u ranim fazama požara te postupnog smanjenja krutosti stupa i preraspodjele opterećenja na susjedne dijelove konstrukcije u kasnijim fazama, kada se stup približava svojoj požarnoj otpornosti. Ipak, u stručnoj literaturi nedostaju konkretni podaci o tome koliki utjecaj takva aproksimacija može imati na rezultat proračuna. U konkretnome

slučaju analiziranome u ovome radu to se pitanje istražuje u sklopu *modela 4*.

Točna procjena utjecaja promjene osnog opterećenja na stup S2 zahtijevala bi dodatno modeliranje cijeloga konstrukcijskog sustava pogođenog dijela podruma, no to nije predmet ovog rada. Zato se primjenjuju samo približne procjene promjene osne sile u stupu S2, temeljene na podacima iz relevantne literature. U skladu sa zaključcima Mostafeija [21] i Tadića [22], promjene unutarnjih sila u stupovima AB okvira uzrokovane požarom uvelike ovise o načinu na koji se zagrijevaju susjedni dijelovi konstrukcije u odnosu na režim zagrijavanja samog stupa. Dodatno, čini se da bi se trebao očekivati barem 10-postotni maksimalni porast osne sile. Zato su u ovome radu razmotrena dva moguća scenarija promjene osne sile kao realistična za stup S2 (vidi sliku 6.). Točnije procjene tih učinaka planiraju se u budućim istraživanjima autora.

Postupci 1. i 2. koraka u *modelima 4a i 4b* bili su istovjetni onima u *modelu 0*. Postupak 3. koraka također je bio istovjetan, osim u dijelu koji se odnosi na osno opterećenje primijenjeno na vrhu stupa. Za razliku od *modela 0*, ono više nije bilo konstantno (1000 kN u svim trenucima), već je slijedilo promjenjivi tijekom prikazan na slici 6.



Slika 6. Dva tijeka djelovanja osnog opterećenja stupa primijenjena u modelima 4a i 4b

2.4.6. Model 5: istraživanje utjecaja odabira požarne krivulje

Model 5 konačno istražuje utjecaj odabira požarne krivulje. Umjesto prirodne požarne krivulje, koja je do sada bila ugrađena u prvi korak svih prethodnih modela, primjenjuje se standardna požarna krivulja koja je predložena u normi EN 1991-1-2:2002 [2]. U inženjerskoj praksi ona nedvojbeno predstavlja najčešće korištenu normiranu požarnu krivulju. Sve ostale značajke od 1. do 3. koraka postupka ostaju nepromijenjene u odnosu na model 0.

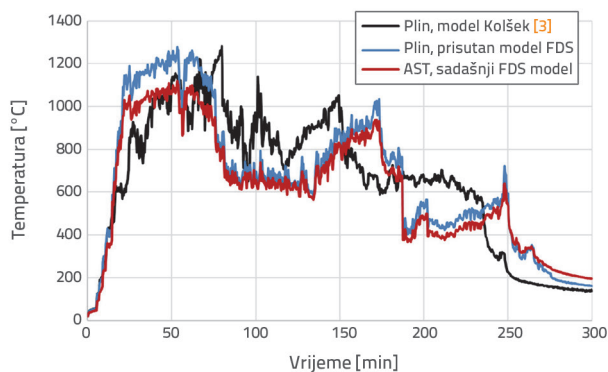
3. Rezultati i rasprava

3.1. Rezultati FDS analiza – 1. korak

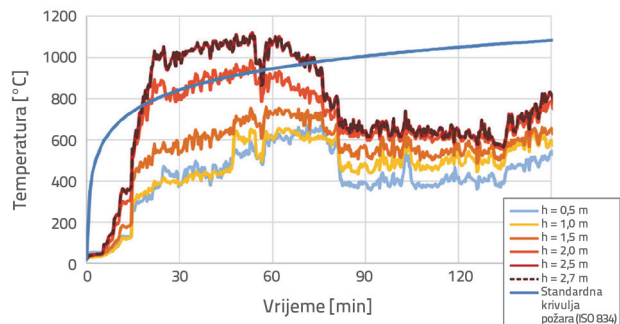
Na slici 7. prikazana je prosječna AST temperatura za stup S2, dobivena na temelju autorovih FDS proračuna, a kako je to prethodno opisano (crvena krivulja). Radi usporedbe prikazan je i grafikon temperatura plinova izmjerenih na istoj lokaciji (plava krivulja). Iako oba grafikona pokazuju sličan opći tijek, uočljive su razlike u veličinama temperatura u određenim područjima.

Nadalje, na istoj slici prikazan je grafikon pripadnih temperatura plinova izračunanih primjenom izvornoga Kolšekova modela [3] (crna krivulja). I na njoj se mogu uočiti razlike u općemu tijeku krivulje i u postignutim temperaturama u usporedbi s vrijednostima temperatura plinova iz sadašnjeg modela. To upućuje na određenu numeričku osjetljivost konstruiranog modela razvoja požara. Treba podsjetiti na to da je jedina razlika između izvornog i sadašnjeg modela bila u tome jesu li stupovi S1 – S13 bili uključeni kao dodatne fizičke prepreke u modelu. Ta činjenica bit će uzeta u obzir pri formuliranju glavnih zaključaka rada.

Na slici 8. prikazana je usporedba prirodnih požarnih krivulja, izračunanih pomoću sadašnjeg FDS modela i primijenjenih u modelima 0 – 4, te standardne požarne krivulje primijenjene u modelu 5.

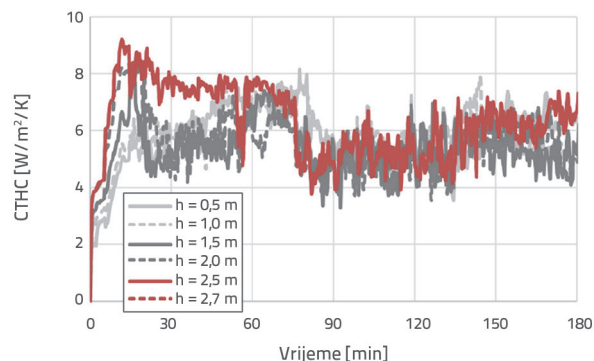


Slika 7. Prosječna temperatura plinova (plava krivulja) i prosječna temperatura AST-a (crvena krivulja) za stup S2 na visini od 2,5 m iznad razine tla, izračunane pomoću trenutnog FDS modela (radi usporedbe prikazane su i temperature plinova na istoj lokaciji dobivene izvornim Kolšekovim modelom [3] (crna krivulja))



Slika 8. Adijabatske temperature površine (AST) za stup S2 na različitim visinama iznad razine tla (izračunane pomoću trenutnog FDS modela) u usporedbi sa standardnom požarnom krivuljom

Nadalje, na slici 9. prikazani su rezultati sadašnjeg FDS modela za vremenski ovisne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom (CHTC). Uočljivo je da se dobivene vrijednosti znatno razlikuju u odnosu na konstantnu vrijednost od 35 W/m²K, koja se prema normi EN 1991-1-2:2002 [2] preporučuje za korištenje u kombinaciji s prirodnom požarnom krivuljom.



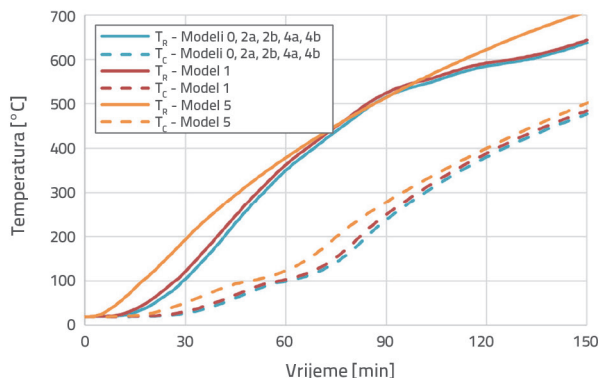
Slika 9. Koeficijent konvektivnog prijelaza topline (CHTC) za stup S2 na različitim visinama iznad razine tla (izračunan pomoću trenutnog FDS modela)

3.2. Rezultati toplinskih analiza – 2. korak

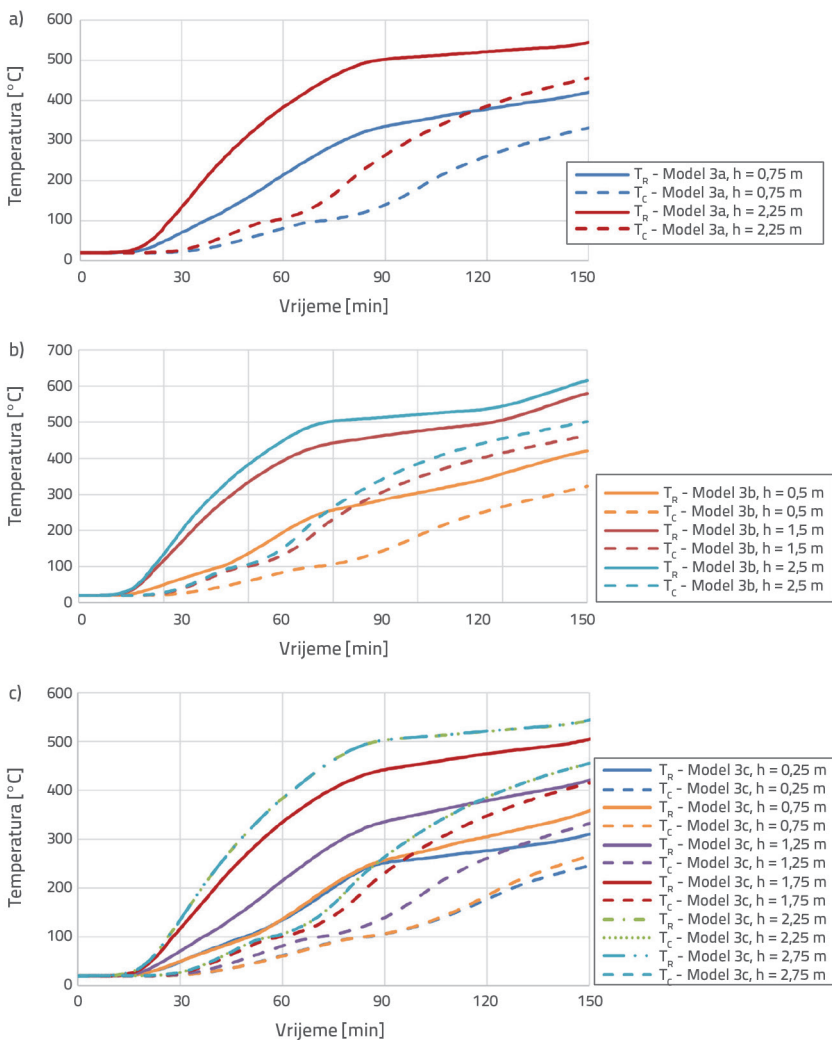
Na slici 10. prikazan je razvoj temperature za modele s jednom toplinskom zonom na dvije točke presjeka stupa na polovini visine. Točka T_R nalazi se uz bočnu armaturu, dok se točka T_C nalazi u središtu poprečnog presjeka (vidi sliku 2.). Može se primijetiti da su oblici krivulja međusobno slični i zato se ne očekuje da će odabir požarne krivulje i CHTC-a imati znatan utjecaj na rezultate mehaničke analize.

Nadalje, na slici 11. prikazan je razvoj temperature u točkama T_R i T_C za modele 3a, 3b i 3c, u kojima se istražuje učinak različitog broja toplinskih zona. Za model 3a temperature su prikazane u poprečnim presjecima na polovinama visine dviju zona, za model 3b na polovinama visine triju zona, a za model 3c na polovinama visine šest zona. Uočava se da donji dio stupa ostaje znatno hladniji od gornjeg dijela, pa se može očekivati

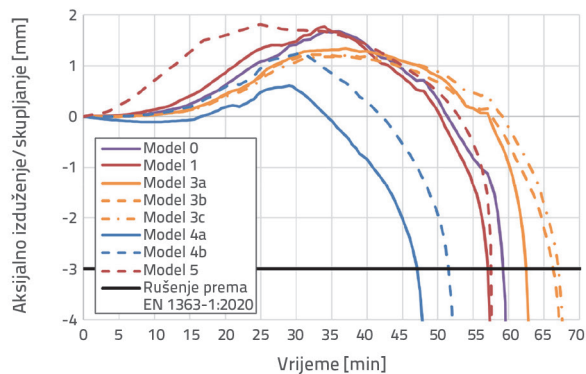
da će podjela stupa na više od jedne toplinske zone utjecati na rezultate mehaničke analize.



Slika 10. Promjena temperature u točki armature T_R i u središtu stupa T_C za modele 0, 1, 2a, 2b, 4a, 4b i 5



Slika 11. Promjena temperature u točki armature T_R i u središtu stupa T_C za: a) Model 3a, b) Model 3b, c) Model 3c



Slika 12. Vremenski razvoj osnovnog pomaka (produljenja/skraćenja) vrha stupa

3.3. Rezultati mehaničkih analiza

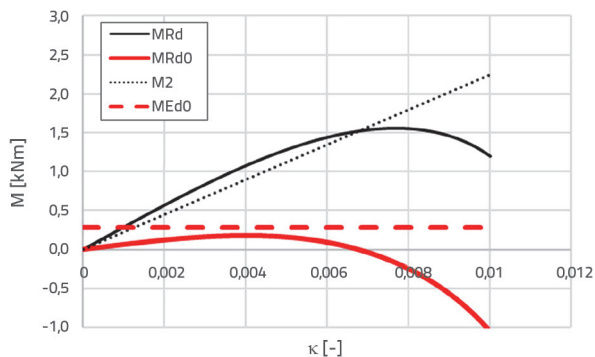
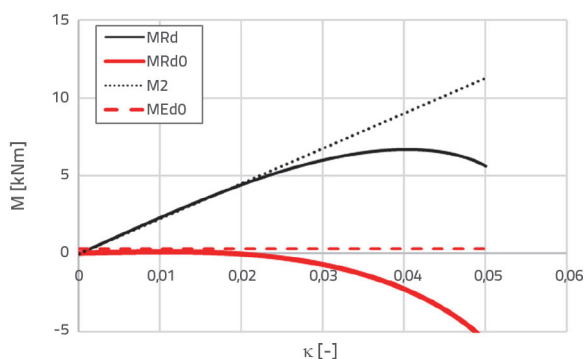
U standardiziranim ispitivanjima požarne otpornosti norma EN 1363-1:2020 [8] uobičajeno se primjenjuje za dobivanje općih smjernica i zahtjeva u vezi s požarnom otpornošću nosivih konstrukcija. Među ostalim, ta norma odnosi se na nosive stupove, uključujući armiranobetonske stupove, pri čemu se za potonje definiraju specifične granične vrijednosti za veličinu i brzinu vertikalnog skraćenja stupa pri kojima se ispitivanje treba prekinuti te se smatra da je stup postigao svoju požarnu otpornost. Ta je opća ideja analogno primijenjena u skupinama *modela 0, 1 i 3 – 5* radi određivanja trenutka sloma. Na slici 12. prikazani su grafikoni vertikalnih pomaka vrha stupa, izračunanih u *modelima 0, 1 i 3 – 5*, prikazanih u odnosu na maksimalno dopušteno skraćenje definirano kao: $c = (\text{visina stupa [mm]} / 100)$, a kako je propisano normom EN 1363-1:2020 [8].

Međutim, za skupinu *modela 2 u 3.* koraku korišten je drugačiji pristup u opisu mehaničkog odziva stupa u odnosu na ostale modele te zato nije proveden proračun vertikalnih pomaka stupa. Zbog toga je požarna otpornost stupa u tim slučajevima definirana na drugačiji način – kao vrijeme trajanja požara u kojemu početni moment savijanja stupa $M_{0,Ed}$ postaje jednak $M_{0,Rd}$, uzimajući u obzir unaprijed definirani odnos $M-\kappa$ (vidi poglavlje 2.3.3.). Na slikama 13. i 14. prikazani su odnosi $M-\kappa$ za *modele 2a i 2b* u trenucima kada $M_{0,Ed}$ postaje jednak $M_{0,Rd}$, odnosno u 40. minuti za *model 2a* i u 45. minuti za *model 2b*.

Tablica 1. Vremena sloma za sve modele

Model	0	1	2a	2b	3a	3b	3c	4a	4b	5
t_{slom} [min]	59	57	40	45	62	66	67	47	51	57

Rezultati vremena do sloma (označeno kao t_{slom}) za stup S2 izračunani na prethodno opisan način sažeti su u tablici 1.

Slika 13. Model 2a: krivulje M- κ za $t = 40$ minutaSlika 14. Model 2b: krivulje M- κ za $t = 45$ minuta

3.4. Rasprava

U tablici 2. prvo su sažete osnovne značajke svakog od triju koraka prethodno analiziranih modela (vidi stupce 2. – 4.). Za 1. korak prvo je navedena vrsta požarne krivulje koja se definira u tome koraku (prirodna ili nominalna), zajedno s izvorom njezine definicije, tj. FDS [10] ili EC1 [2]. Također je prikazan broj toplinskih zona (HZ) koje se uzimaju u obzir duž visine stupa.

Za 2. korak naveden je izvor požarne krivulje (ili više njih) i koeficijenta prijelaza topline konvekcijom (CHTC) koji su korišteni (FDS [10] ili EC1 [2]) te broj toplinskih zona (HZ) koji se ponovno bilježi.

Na kraju izneseni su i glavni podaci za 3. korak. Oni se odnose na vrstu primijenjene metode postupka (jedna od triju opisanih u poglavlju 2.3.3.) te na vrstu osne sile primijenjene na vrh stupa (konstantna ili promjenjiva). Dodatna specifikacija za promjenjivo opterećenje navedena je u zgradama i odnosi se na jedan od dvaju analiziranih tijekova osnog opterećenja (vidi sliku 6.).

Usporedba osnovnog rezultata svakog modela, tj. vremena do sloma stupa S2 (t_{collapse}), s odgovarajućim rezultatom referentnog modela 0 omogućuje procjenu učinka pojedinih parametara analiza. Kratki sažetak usporedbe dan je u posljednja četiri stupca tablice 2. U analizama u kojima je preciznost opisa analiziranog problema povećana zbog primijenjenih promjena, u šestome stupcu dodan je znak "↑" uz informaciju o istraživanome parametru. Suprotno tome koristi se znak "↓", ako je preciznost analize smanjena. Očigledno je da bi, slijedeći uobičajena inženjerska načela, smanjenje preciznosti analize trebalo rezultirati rezultatom koji je na "sigurnoj strani" u usporedbi s rezultatom preciznijih modela. Nažalost, to se u ovome slučaju ne pokazuje uvijek točnim (vidi posljednji stupac tablice 2.).

U sedmome stupcu tablice 2. prikazana su i odstupanja između promatranih modela 1 do 5 u odnosu na referentni model 0, izražena u postotcima. Model 1 ne pokazuje očito odstupanje u odnosu na model 0. Podsjetimo na to da su u modelu 0 primijenjene pouzdanije vremenski ovisne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom (CHTC).

Vrijednosti u tablici 2. preuzete su iz FDS modela, dok je u modelu 1 primijenjena pojednostavljena konstantna vrijednost toga koeficijenta, a u skladu s prijedlogom norme EN 1991-1-2:2002 [2].

To pokazuje da je učinak dvaju mogućih odabira vrijednosti za CHTC u opisanome slučaju zapravo gotovo pa zanemariv. Zaključak se na prvi pogled može činiti neočekivanim u odnosu na velike razlike u iznosima CHTC-a primijenjenima u tim dvama modelima. Ipak, velike razlike u vrijednostima CHTC-a ne znače neophodno i velike razlike u proračunanim temperaturama poprečnog presjeka, jer će prevladati utjecaj zračenja (podsjetimo, temperature okoline stupa podignute su na četvrtu potenciju u proračunu toplinskog toka zračenjem; vidi izraz (4)). Međutim, veće odstupanje, tj. 24 do 32 %, uočeno je između modela 0 i skupine modela 2. To upućuje na to da je u analizu uveden stupanj konzervativnosti, kada se geometrijski nelinearan opis konstrukcijskog odziva zamijeni jednostavnijom teorijom drugog reda u 3. koraku, zapravo primjetan za analizirani slučaj građevine i požara. Ipak, dokazana je sigurna strana (engl. *safe-side*) u primjeni aproksimacija teorije drugog reda.

Daljnjom analizom utjecaja uvođenja dviju toplinskih zona duž visine stupa (npr. gornje toplije i donje hladnije zone) u modelu 3a, u odnosu na pretpostavku jedinstvene zone (model 0), pri čemu se za svaku zonu primjenjuju zasebne požarne i konvektivne (CHTC) krivulje, ponovno je uočena tek manja razlika između uspoređenih modela. U ovome slučaju vrijeme do sloma promatranog stupa produljuje se za 5 %, što upućuje na to da je pretpostavka jedinstvene toplinske zone zapravo konzervativna aproksimacija, odnosno aproksimacija "na sigurnoj strani". Još izraženije produljenje vremena do sloma

Tablica 2. Sažetak glavnih značajki i rezultata sastavljenih modela

Model	Požarna analiza			$t_{collapse}$ [min]	Istraživani parametar (promjena preciznosti analize)	Odstupanje $t_{collapse}$ [min/%]	Primjena pojednostavljena: sigurno / nesigurno***
	1. korak Vrsta požarne krivulje, izvor definicije požarne krivulje (broj toplinskih zona (HZ))	2. korak Izvor požarne krivulje, CTHC (broj toplinskih zona (HZ))	3. korak Vrsta primijenjene metode postupka, Vrsta osne sile				
0	Prirodna, FDS (1)	FDS, FDS (1)	Napredna, Konstantna	59	-	-	-
1	Prirodna, FDS (1)	FDS, EC 1 (35 W/m ² K) (1)	Napredna, Konstantna	57	CTHC (↓)	-2 / -3%	sigurno
2a	Prirodna, FDS (1)	FDS, FDS (1)	Pojednostavljena 1, Konstantna	40	Postupak 3. koraka (↓)	-19 / -32%	sigurno
2b	Prirodna, FDS (1)	FDS, FDS (1)	Pojednostavljena 2, Konstantna	45	Postupak 3. koraka (↓)	-14 / -24%	sigurno
3a	Prirodna, FDS (2)	FDS, FDS (2)	Napredna, Konstantna	62	Broj HZ (↑)	+3 / +5%	sigurno
3b	Prirodna, FDS (3)	FDS, FDS (3)	Napredna, Konstantna	66	Broj HZ (↑)	+7 / +12%*	sigurno
3c	Prirodna, FDS (6)	FDS, FDS (6)	Napredna, Konstantna	67	Broj HZ (↑)	+8 / +14%**	sigurno
4a	Prirodna, FDS (1)	FDS, FDS (1)	Napredna, Promjenjiva (tip 1)	47	Promjenjivost osnog opterećenja (↑)	-12 / -20 %	nesigurno
4b	Prirodna, FDS (1)	FDS, FDS (1)	Napredna, Promjenjiva (tip 2)	51	Promjenjivost osnog opterećenja (↑)	-8 / -14 %	nesigurno
5	Nominalna (standardna), EC1 (1)	EC 1, EC 1 (25 W/m ² K) (1)	Napredna, Konstantna	57	Požarna krivulja (↓)	-2 / -3 %	Nije određeno

* +6 % u odnosu na model 3a
 ** povećanje od +1,5 % u odnosu na model 3b
 *** Sigurno: Pretpostavke korištene u modelu podcjenjuju požarnu otpornost stupa.
 Nesigurno: Pretpostavke korištene u modelu precjenjuju požarnu otpornost stupa.

zabilježeno je pri dodatnome povećanju broja zona, i to s dvije (*model 3a*) na tri (*model 3b*) odnosno šest zona (*model 3c*). U tim slučajevima vrijeme do sloma promatranog stupa produljuje se za 12 % odnosno 14 %.

Usporedba rezultata *modela 4* i *modela 0* prikazuje utjecaj uzimanja u obzir varijabilnosti osne sile primijenjene na vrh stupa S2. Iako bi se pouzdanost rezultata analize u takvim modelima trebala povećati zbog točnijeg prikaza osne sile, to se, kao što je i očekivano, ne pokazuje točnim u analiziranome slučaju. Time se upućuje na činjenicu da zanemarivanje učinka ograničenoga toplinskog produljenja stupa, koje se u stvarnim požarima zgrada u pravilu javlja zbog prisutnosti okolne konstrukcije, predstavlja nesigurnu pretpostavku.

Usporedba rezultata *modela 5* s rezultatima *modela 0* konačno pokazuje učinak potencijalne inženjerske odluke o primjeni

pojednostavljene standardne požarne krivulje iz norme EN 1991-1-2:2002 [2] umjesto napredne krivulje prirodnog požara dobivene CFD analizom. Rezultati obaju modela prilično su slični, što je i očekivano s obzirom na to da opći tijek FDS krivulje i standardne požarne krivulje ne pokazuje znatne razlike do trenutka sloma stupa. FDS krivulja predviđa nešto više temperature između 20. i 30. minute požara, no istodobno prikazuje znatno niže temperature prije 20. minute. Ipak, primjenom standardne krivulje zabilježeno je skraćivanje vremena do sloma t_{slom} od 3%. Taj zaključak može se smatrati "sigurnim", no s obzirom na numeričku osjetljivost modela razvoja požara koji stoji iza FDS analize, uočena razlika od 3% preniska je da bi se mogla pouzdano potvrditi (vidi rezultate na slici 7. i odgovarajuću raspravu o usporedbi temperatura plinova dobivenih iz Kolšekova modela [3] i ovog FDS modela).

3.5. Komentar na primjenjivost dobivenih rezultata

Autori smatraju da, čak i kada bi za parametarsku analizu u ovomee radu bili odabrani stupovi većih poprečnih presjeka, odnosno presjeka češćih dimenzija kakvi se nalaze u stvarnim građevinama, to ne bi utjecalo na opće zaključke rada. U tom bi slučaju stupovi u provedenim analizama vjerojatno ostali stabilni te usporedba vremena do sloma ne bi bila moguća. Ipak, usporedba nosivosti nakon požara i dalje bi bila izvediva te bi pokazala slične zaključke.

4. Zaključak

Ovo istraživanje sustavno je ispitalo utjecaj različitih modelskih pretpostavki na požarnu otpornost armiranobetonskih (AB) stupova u skladu s normom EN 1992-1-2:2004 [20], koristeći primjer iz stvarnog života. Analiza je provedena na odabranoj AB zgradi te na temelju požara koji je izbio u toj zgradi krajem 2016. Pojednostavljenja u toplinskoj i mehaničkoj analizi mogu smanjiti računalno opterećenje i troškove projektiranja, no njihova sigurnost mora se pozorno procijeniti.

Metodologija se temeljila na komparativnoj analizi više pristupa modeliranju, od pojednostavljenih metoda do naprednih numeričkih simulacija. Konkretno, u istraživanju su korišteni *Fire Dynamics Simulator* (FDS) za generiranje prirodnih požarnih krivulja te ABAQUS za toplinsku i mehaničku analizu. Analiza požara bila je podijeljena u tri osnovna koraka: određivanje temperature okoliša stupa (scenarij požara), toplinska analiza stupa i mehanička analiza do sloma.

Rezultati su pokazali kako pojedine pretpostavke utječu na ključne pokazatelje učinkovitosti poput nosivosti i požarne otpornosti. Naprimjer, uporaba konstantnoga koeficijenta konvekciskog prijelaza topline imala je zanemariv utjecaj na konačni konstruktivni odgovor (*model 1*), dok je pojednostavljena mehanička teorija dala konzervativne

rezultate s razlikom od 32 % u vremenu do sloma u odnosu na geometrijski nelinearni model (*modeli 2a i 2b*). Pretpostavka o dvjema zonama prijenosa topline produljila je vrijeme do sloma za samo 5 %, dok je daljnja podjela na tri (*model 3b*) i šest zona (*model 3c*) produljila to vrijeme za 12 % odnosno 14 %. Promjenjiva osna sila znatno je utjecala na vrijeme sloma, ističući važnost razmatranja promjenjivih osnih opterećenja (*modeli 4a i 4b*). Uporaba standardne požarne krivulje rezultirala je s 3 % kraćim vremenom do sloma, što sugerira da je standardna krivulja primjenjiva za analize u fazi zagrijavanja (*model 5*). Ključni pronalasci za inženjersku praksu:

- Konstantan koeficijent konvektivnog prijenosa topline: Primjena konstantnog koeficijenta iz norme EN 1991-1-2:2002 sigurna je i ne utječe znatno na konačni konstruktivni odgovor.
- Pojednostavljena mehanička analiza: Ta metoda praktična je i sigurna, pružajući konzervativne rezultate u odnosu na preciznije, geometrijski nelinearne modele.
- Jedna toplinska zona: Pretpostavka o jednoj toplinskoj zoni duž visine stupa daje konzervativne rezultate. Modeliranje s trima toplinskim zonama predstavlja uravnotežen pristup bez pretjerano konzervativnih rezultata.
- Konstantna osna sila: Ta je pretpostavka nesigurna. Promjenjiva osna sila treba se uzeti u obzir, osobito u slučajevima s ograničenom toplinskom deformacijom.
- Standardna požarna krivulja: U većini slučajeva prihvatljiva je za rutinsko projektiranje. Prirodne požarne krivulje daju realističnije rezultate u slučajevima s velikom varijabilnošću požarnog opterećenja.

Razumijevanjem utjecaja tih pojednostavljenja inženjeri mogu donositi informirane odluke koje uravnotežuju sigurnost i učinkovitost, izbjegavajući nepotrebno predimenzioniranje, a istodobno osiguravajući cjelovitost konstrukcije tijekom požara.

LITERATURA

- [1] EN 1992-1-2:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, European Committee for Standardization, 2004.
- [2] EN 1991-1-2:2002, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire, European Committee for Standardization, 2002.
- [3] Kolšek, J.: Final report on postdoctoral project Fire-safe accommodation of highly combustible materials in steel-framed structures: Development of models and experimental verification (Project No. Z7-7677, Sponsor: Slovenian Research and Innovation Agency), project website: <http://arrs-firesim.zag.si/>, 2018 (the report is kept in the personal archives of the autor).
- [4] Kolšek, J., Rebec, A.: Analysis of the load-bearing structure after the fire of the ASP building in Jesenice, *Fire*, 23 (2017) 4, pp. 18-22, accessible at: <http://arrs-firesim.zag.si/ajax/DownloadHandler.php?file=2057> (August 9, 2024).
- [5] Rogulj, M.: Fire analyses of RC columns: effect of different parameters on final calculation of fire resistance, Master's thesis, University of Split, Faculty of civil engineering, architecture and geodesy, 2022.
- [6] EN 1990:2002, Eurocode - Basis of structural design, European Committee for Standardization, 2002.
- [7] EN 1991-1-1:2002, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, European Committee for Standardization, 2002.
- [8] EN 1363-1:2020, Fire resistance tests - Part 1: General requirements, European Committee for Standardization, 2020.
- [9] EN 1365-4:1999, Fire resistance tests for loadbearing elements - Part 4: Columns, European Committee for Standardization, 1999.
- [10] FDS, Fire Dynamics Simulator Version 5.5.3: Users' guide, National Institute of Standards and Technology, 2010.

- [11] Matala, A.: Estimation of solid phase reaction parameters for fire simulation, Master's thesis, Helsinki University of Technology, Faculty of Information and Natural Sciences, 2008.
- [12] Lautenberger, C., Fernandez Pello, C.: Optimization algorithms for material pyrolysis property estimation, *Fire Safety Science*, pp. 751-764, 2011.
- [13] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E.: *Fire Dynamics Simulator, Technical reference guide, Volume 1: Mathematical model*, National Institute of Standards and technology, USA, 2023.
- [14] Hurley, M.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th edition, Springer, 2016.
- [15] Češarek, P., Maglica, M., Češarek Kolšek, J.: On reliability and safety of EC2-proposed simplified methods to fire design of RC columns in real building fires, *Structural Safety* (in preparation to be submitted to the journal), 2024.
- [16] Wang, N., Zhang, M., Kang, P., Zhang, J., Fang, Q., Li, W.: Synergistic effect of graphene oxide and mesoporous structure on flame retardancy of nature rubber/IFR composites, *Materials*, 11 (2018) 6, pp. 1-13.
- [17] Rybinski, G.P. Janowska, M. Jozwiak, M.: Thermal stability and flammability of styrene-butadiene rubber (SBR) composite, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 113 (2013), pp. 43-52.
- [18] Simionescu, T.M., Minea, A.A., Balbis dos Reis, P.N.: Fire Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene Enhanced with Organic Montmorillonite and Exolit Fire Retardant, *Applied Sciences*, 9 (2019), pp. 1-14.
- [19] ABAQUS, Version 6.11, Dassault Systems Simulia Corp., 2011.
- [20] EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, 2004.
- [21] Mostafaei, H.: Hybrid fire testing for assessing performance of structures in fire - Application, *Fire Safety Journal*, 56(2013), pp. 30-38, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.12.003>.
- [22] Tadić, I.: Fire analysis of RC columns: Accounting for realistic (variable) axial load by modelling a larger part of the structural system, Master's thesis, University of Split, Faculty of civil engineering, architecture and geodesy, 2022.