

Martin Maglica, dipl. inž. grad.

u695888f@ecs.osaka-u.ac.jp

Yamadaoka, Suita, Prefektura Osaka 565-0871, Japonska



doc. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad.

peter.cesarek@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Jerneja Češarek Kolšek, univ. dipl. inž. grad.

jerneja.kolsek@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK/UDC: 614.841.5:658.2(497.45)Jesenice)

ANALIZA ZANESLJIVOSTI IN VARNOSTI POENOSTAVLJENIH PRISTOPOV K POŽARNI ANALIZI KONSTRUKCIJ, KOT JIH PREDLAGA EVROKOD, NA PRIMERU ARMIRANOBETONSKE STAVBE

ON RELIABILITY AND SAFETY OF SIMPLIFIED METHODS TO STRUCTURAL FIRE ENGINEERING AS PROPOSED IN EUROCODE USING AN EXAMPLE OF REINFORCED CONCRETE BUILDING

Povzetek

Za požarno analizo konstrukcij je skladno z Evrokodom danes dovoljena raba poenostavljenih in naprednejših pristopov. Za razliko od naprednih metod, za katere Evrokod žal podaja zgolj osnovne usmeritve, natančnejše pa metod ne opisuje, so poenostavljene metode opisane sorazmerno dobro. Verjetno jih tudi zato inženirji v praksi uporabijo najpogosteje. Med inženirji se pogosto pojavlja domneva, da so poenostavljene metode velikokrat pretirano na (kot pogovorno rečemo) "varni" strani, kar vzbuja sum, da so pogosto pretirane tudi projektne rešitve, npr. v smislu pretirane požarne zaščite konstrukcije. Po drugi strani pa se v znanstveni literaturi pojavljajo namigi, da bi v nekaterih specifičnih primerih te metode lahko bile nasprotno celo na "nevarni" strani. A da bi bolje raziskali tovrstna ugibanja in zvišali motivacijo inženirjev k učenju novih, naprednejših pristopov požarno varnega projektiranja, bomo v zvezi s tem potrebovali jasnejše dokaze, ti pa bodo morali temeljiti na primerih resničnih požarov stavb, ki so javnosti poznani iz preteklosti. Na enega takšnih primerov se opira tudi ta članek. V njem je analizirana AB-konstrukcija poslovne stavbe, podobne stavbi servisno-prodajne avtomobilске dejavnosti na Jesenicah, kjer se je konec leta 2016 zgodil hud požar.

Ključne besede: požarna analiza, AB-konstrukcije, požar avtomobilskih pnevmatik, naprednejša analiza, poenostavljena analiza

Summary

For fire analyses of structures, Eurocode generally allows the use of simplified calculation procedures as well as the use of more advanced methods. Only basic guidelines are provided for the latter while the former are relatively well described. This is probably the reason why in practice simplified procedures are still applied most often. There is often an assumption among engineers that simplified approaches frequently lead to exaggerated 'safe-side' solutions, such as excessive fire protection of the structure. On the other hand, there are indications in the scientific literature that these methods could even be 'unsafe' for some specific cases. But to investigate these suspicions in more detail and to increase the motivation of engineers to implement new, advanced design approaches, more evidence in this regard will be needed in the future, based on real cases of building fires known to the public from the past. This article contributes to this goal by analysing the RC structure of a building similar to the one used for the service and sales of cars in Jesenice, where a severe fire occurred in late 2016.

Key words: fire analysis, RC structures, fire of car tires, advanced analysis, simplified analysis

1 UVOD

Obravnavamo stavbo, namenjeno prodaji in servisu avtomobilov, v kateri se lahko glede na naravo dejavnosti v času njene življenjske dobe nakopičijo večje zaloge avtomobilskih pnevmatik. Te so sorazmerno enostavno vnetljive, prav tako pa pomenijo potencialno resno požarno obremenitev armiranobetonske (AB) nosilne konstrukcije stavbe, zato mora biti ta temu primerno dimenzionirana.

Predpostavke, na katerih običajno osnujemo poenostavljene metode za požarno analizo nosilne konstrukcije takšne stavbe, so glede na opisane specifičnosti objekta lahko vprašljive. Zato v primerjavi z naprednejšo metodo, ki jo osnujemo na realnejših predpostavkah, pričakujemo znatna odstopanja v rezultatih.

V prispevku predstavimo izsledke, ki so rezultat dela pred nekaj leti zaključenega doktorskega raziskovalnega projekta FIRESIM [Kolšek, 2018]. Ta se je med drugim posvetil razvoju naprednejših računalniških simulacij nekaterih znanih požarov, ki so se v bližnji preteklosti zgodili v Sloveniji, tudi požara avtomobilskih pnevmatik v AB-stavbi za prodajo in servis avtomobilov, ki se je konec leta 2016 zgodil na Jesenicah. Prav tako v prispevku predstavimo izsledke, ki so rezultat diplomske naloge [Maglica, 2021], kjer je bila omenjena simulacija požara na Jesenicah nadalje uporabljena še za analizo požarne odpornosti AB-stebrov, ki so v požaru jeseniške stavbe predstavljali enega najbolj toplotno obremenjenih delov nosilne konstrukcije.

2 PODATKI O STAVBI IN POŽARU

2.1 Obravnavana stavba

Lastnosti stavbe, ki jo izberemo za obravnavo v tem prispevku, temeljijo na karakteristikah poslovne stavbe na Jesenicah, ki jo je konec leta 2016 prizadel hud požar, opisan v delu [Kolšek, 2017]. Skladno s tem virom povzamemo del podatkov o stavbi, kot so namembnost stavbe, tip nosilne konstrukcije in lastnosti požarnega sektorja, kjer se zgodi požar (med drugim požarna obtežba, razporeditev in velikost odprtih, preko katerih med požarom poteka izmenjava zraka med zunanostjo in notranostjo sektorja). Del podatkov, ki v viru [Kolšek, 2017] niso navedeni (med drugim obtežba konstrukcije stavbe, tlorsne značilnosti stavbe izven območja prizadetega požarnega sektorja, vrsta betona, količina in vrsta armature), pa smiselno predpostavimo.

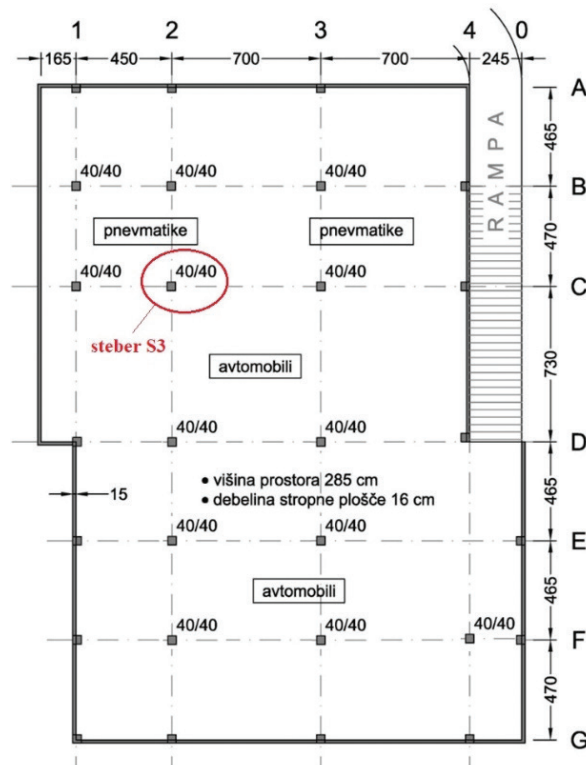
Stavba ima tri etaže (klet, pritličje in nadstropje). Nosilna konstrukcija je mešani sistem AB-sten in AB-okvirov, polnih AB-medetažnih plošč ter polne ravne AB-strešne plošče. Del kleti, kjer se zgodi požar, je tlorsne površine približno 600 m² in je enak delu kleti omenjene AB-stavbe na Jesenicah (slika 1). Razporeditev in količina požarne obtežbe v tem delu kleti je enaka, kot je bila v jeseniški stavbi tik pred požarom leta 2016. In sicer se v času požara tu skladišči približno 3000 avtomobilskih pnevmatik (zloženih v stolpiče 2,2 m visoko), v kleti pa je parkiranih tudi nekaj avtomobilov. Razporeditev omenjene požarne obtežbe je razvidna s slike 1.

V računskih analizah, predstavljenih kasneje v članku, se osredotočamo na preverjanje požarne odpornosti AB-stebrov v prizadetem delu kleti. Pri tem se osredotočamo le na steber, za

katerega določimo, da ga visoke temperature med požarom najbolj prizadenejo (na sliki 1 je to steber S3).

Izbrani steber S3 je visok 3 m, njegov prečni prerez je kvadratne oblike s stranico 40 cm. Potrebno vzdolžno armaturo v stebru in kvaliteto materialov ocenimo s pomočjo kontrole stebra na stalna projektna stanja, iz skupine mejnih stanj nosilnosti, kot jih definira Evrokod ([SIST, 2004a], [SIST, 2005a]). Upoštevamo, da steber S3 prenaša del stalne in koristne obtežbe s pripadajočega dela stropa kleti med osmi 1–3 ter B–C (glej sliko 1 za oznake osi). Ker predpostavimo, da je pripadajoči del tlorske pritličja in nadstropja stavbe enak delu tlorske kleti (slika 1), se v enakem odstotku preko stebra S3 prenaša tudi stalna in koristna obtežba AB-plošče med pritličjem in prvim nadstropjem ter stalna obtežba in obtežba snega z ravne strešne AB-plošče. Pri tem upoštevamo naslednje karakteristične vrednosti omenjenih obtežb: $g_{k, \text{strop}} = 5,8 \text{ kN/m}^2$, $g_{k, \text{streha}} \sim g_{k, \text{strop}} = 5,8 \text{ kN/m}^2$, $q_{\text{koristna, strop}} = 2,8 \text{ kN/m}^2$, $q_{\text{sneg, streha}} = 1,2 \text{ kN/m}^2$. Drugih obtežb na steber ne upoštevamo. Izkoriščenost stebra z vidika njegove osne nosilnosti je pri tako predpostavljeni obtežbi enaka 10 %, z vidika njegove upogibne nosilnosti pri znani osni sili pa je enaka 13,7 %.

Glede na navedene podatke zaključimo, da mora biti steber pri predpostavljeni obtežbi armiran s štirimi vzdolžnimi palicami premera 12 mm (v vsak vogal stebra namestimo eno palico). Za odmik težišča palice od roba prereza upoštevamo vrednost 4 cm (krovni sloj betona je 3,4 cm). Privzamemo beton trdnostnega razreda C40/50 in armaturno jeklo kvalitete B500.



Slika 1. Tlorski del kleti, v katerem se je zgodil požar (dimenzije so v cm).

Kot smo že omenili, zgoraj povzeti podatki o stavbi le delno posnemajo lastnosti jeseniške stavbe, saj v delu [Kolšek, 2017] vsi podatki niso na voljo. Ne glede na to pa je podatkov, ki so povzeti po tem viru, dovolj, da lahko tudi pri obravnavani stavbi predpostavimo, da se v njej zgodi primerljiv požar, kot se je leta 2016 zgodil v stavbi na Jesenicah (glej poglavje 2.2). Čeprav bi bilo možnih požarnih scenarijev sicer več, se zaradi preglednosti v tem prispevku osredotočimo le na slednjega. Hkrati nam podobnost s primerom jeseniškega požara omogoči tudi neposredno aplikacijo podatkov o vplivu požara na nosilno konstrukcijo kleti, ki so prav tako na voljo v delu [Kolšek, 2017] (poglavje 2.2), za validacijo naprednejših računskih modelov, ki jih predstavimo kasneje v članku.

2.2 Požarni scenarij

Kot domnevajo avtorji dela [Kolšek, 2017], se je požar v stavbi na Jesenicah leta 2016 najverjetneje zgodil zaradi vžiga pregretega kondenzatorja ene od stropnih svetilk nad delom kleti, kjer je bila v času požara skladiščena večja količina avtomobilskih pnevmatik. S kondenzatorja se je plamen razširil na ohišje svetilke in na gorljivo tanjšo izolacijsko oblogo, nameščeno pod spodnji rob AB-stropa kleti, od tod pa preko gorečih kapljic, ki so padale s stropa, na v kleti skladiščene pnevmatike. Požar je bil, kot navaja [Kolšek, 2017], pogašen po petih urah. V tem času, kot je bilo ocenjeno, pa so zgorele skoraj vse pnevmatike. Te so predstavljale glavno požarno obtežbo prostora. Opisani požarni scenarij predpostavimo tudi v primeru stavbe, ki jo obravnavamo v tem prispevku.

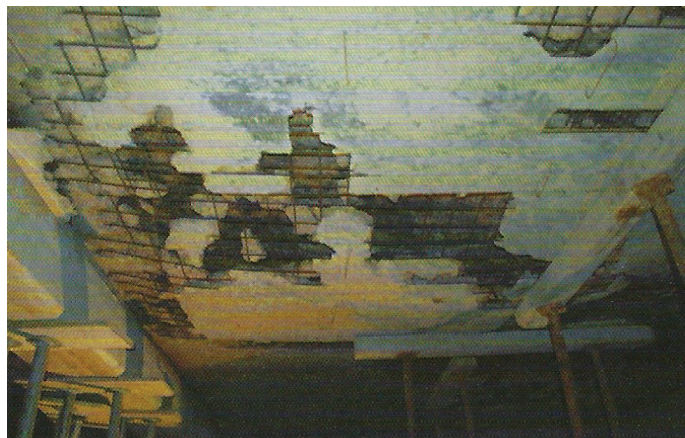
2.3 Vpliv na nosilno konstrukcijo prizadetega požarnega sektorja

Kot nadalje navaja Kolšek, je bila v požaru na Jesenicah najbolj poškodovana stropna plošča kleti, ki je mestoma razpadla na račun eksplozijskega luščenja betona. Luščenje je razgalilo tako zgornjo kot spodnjo armaturo (slika 2). Vidno poškodovani so bili tudi AB-stebri v območju, kjer so bile zložene avtomobilske pnevmatike (območje je prikazano na sliki 1), se pa ti med požarom niso opazneje luščili. Kljub opaženim poškodbam se med požarom ni porušil noben del konstrukcije. Ob pregledu pogorišča [Kolšek, 2017] so bili iz najbolj prizadetih AB-stebrov odvzeti vzorci betona. Laboratorijske analize teh vzorcev, izvedene na Zavodu za gradbeništvo (Ljubljana), so pokazale, da je bila med požarom izoterma 500 °C največ 5-8 cm pod površino stebra [Kolšek, 2017]. Ker so karakteristike požara in prizadetega požarnega sektorja jeseniške stavbe enake tovrstnim karakteristikam v stavbi, ki jo obravnavamo v tem prispevku, lahko podatke, predstavljene v tem poglavju, uporabimo v neposredni obliki tudi za validacijo računskih modelov, ki jih predstavimo v nadaljevanju.

3 DOKAZOVANJE POŽARNE ODPORNOSTI STEBRA S3 PO EVROKODU

Za vsako betonsko konstrukcijo, ki je izpostavljena požaru, Evrokod [SIST, 2005b] v splošnem zahteva izpolnitev pogoja $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$. Pri tem je $R_{fi,d,t}$ projektna odpornost konstrukcije v požarnem projektnem stanju pri času t , $E_{fi,d,t}$ pa je pripadajoča projektna vrednost notranjih sil. Seveda se obe vrednosti s časom spreminjata, zato je treba definirati čas t , do katerega

naj bo pogoj še izpolnjen. V tem prispevku se zaradi kasnejše validacije predstavljenih rezultatov najprej odločimo za čas, v katerem je gasilec na terenu uspelo pogasiti omenjeni požar (5 ur oz. 300 minut). Takšna izbira je smiselna, saj imamo za ta čas na voljo rezultate laboratorijskih preiskav vzorcev betona, odvzetih z jeseniškega pogorišča (poglavje 2.3), ki so osnova za izvedeno validacijo.



Slika 2. Poškodbe stropne plošče prizadetega dela kleti jeseniške stavbe [Kolšek, 2017].

Projektna vrednost notranjih sil $E_{fi,d,t}$ v pogoju $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$ se določa pri obtežni kombinaciji za neugodna projektna stanja:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ali } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

Pri tem so $G_{k,j}$ stalni vplivi na konstrukcijo, $Q_{k,1}$ in $Q_{k,i}$ so prevladujoč in drugi spremenljivi vplivi, A_d pa neugodni vplivi (v obravnavanem primeru vplivi požara). Vplivi A_d so pri tem lahko neposredni, na primer vpliv visokih temperatur na mehanske lastnosti materiala. Lahko pa so posredni in odvisni od lastnosti konstrukcije. Med slednjimi najprej izpostavimo visokotemperaturno eksplozivno luščenje betona, ki bi lahko v določenem trenutku požara hipno zmanjšalo učinkoviti prerez stebra v večjem delu njegove višine (kot kažejo eksperimenti, je temu običajno izpostavljena zlasti srednja tretjina višine). Omenimo še spremembe robnih pogojev, ki bi jih v obravnavanem primeru morebiti prav tako lahko povzročilo lokalno luščenje betona v območju podpor. Vendar luščenje stebrov ni bilo opaženo med pregledom pogorišča, zato ga zanemarimo tudi v nadaljnjih analizah. Nazadnje med posredne vplive požara, ki bi lahko bili pomembni za obravnavani primer, štejemo ovirano temperaturno raztezanje stebra, zaradi katerega bi se lahko v stebru inducirale dodatne tlačne napetosti. Ta vpliv v prispevku zanemarimo. Skladno z Evrokodom (glej člena 2.4.2(4) in 2.4.2(5) [SIST, 2005b]) je takšna predpostavka dovoljena za analizo posameznih elementov, ki so izolirani od preostalega dela konstrukcije (takšen pristop uporabimo tudi v predstavljenih analizah), če se odpornost elementa preverja pri izpostavljenosti standardnemu požaru (člen 2.4.1(3) [SIST, 2005b]). Kadar pa odpornost elementa preverjamo pri izpostavljenosti naravnemu požaru (kot ga bomo tudi mi pri naprednejšem tipu analize), je požarna odpornost elementa zadostno dokazana le, kadar se vpliv omenjenih zanemarnjenih vplivov preveri še v kombinaciji z analizo večjega dela konstrukcije. Zainteresirani

bralec lahko predlog takšne nadgradnje izračuna poišče v literaturi kot na primer v delu [Erklavec, 2012] za primer AB-konstrukcije ali pa v delu [Kralj, 2019] za primer jeklene konstrukcije, kjer so ti vplivi še toliko bolj pomembni. Za obravnavano konstrukcijo pa so takšne analize predmet aktivnih nadaljnjih raziskav avtorjev. Kratek komentar na to, kako bi vplivi oviranih temperaturnih deformacij lahko vplivali na zaključke o zanesljivosti in varnosti poenostavljenih pristopov k požarni analizi AB-konstrukcij, je kljub temu podan v poglavju 7.

Za obravnavani steber S3 izračunamo, da sta relevantni vrednosti notranjih sil v požarnem projektnem stanju enaki $N_{Ed} = -1198 \text{ kN}$ in $M_{Ed} = -23,15 \text{ kNm}$.

Postopek dokazovanja požarne odpornosti stebra S3, ki ga prikazemo v nadaljevanju, razdelimo v tri bistvene faze. V prvi fazi določimo požarni scenarij in temu pripadajočo *požarno krivuljo*, ki opiše, kako se pri požaru s časom spreminja temperatura okolice opazovanega konstrukcijskega elementa. Skladno s tem v drugi fazi (*toplotna analiza*), določimo, kako se s časom spreminjajo temperature samega elementa. V tretji fazi (*mehanska analiza*) pa analiziramo, kako se zaradi vpliva naraščanja temperatur stebra med požarom spreminja njegov mehanski odziv (deformacije). Vsako izmed omenjenih analiz v poglavju 4 najprej izvedemo po poenostavljenem postopku, v poglavju 5 pa uporabimo naprednejše pristope.

4 POENOSTAVLJENA ANALIZA STEBRA S3

4.1 Požarni scenarij

Požarni scenarij v splošnem pomeni časovno odvisno funkcijo temperaturnega polja plinov v notranjosti tistega dela stavbe, ki ga je prizadel požar. Pri analizah konstrukcije v požaru tak način podajanja temperature okolice običajno poenostavimo v eno ali več preprostejših požarnih krivulj. Ko določeno požarno krivuljo nato pripišemo vzdolž določenega dela konstrukcije, sprejememo predpostavko, da je ob izbranem času požara t temperatura okolice okrog tega dela konstrukcije homogena.

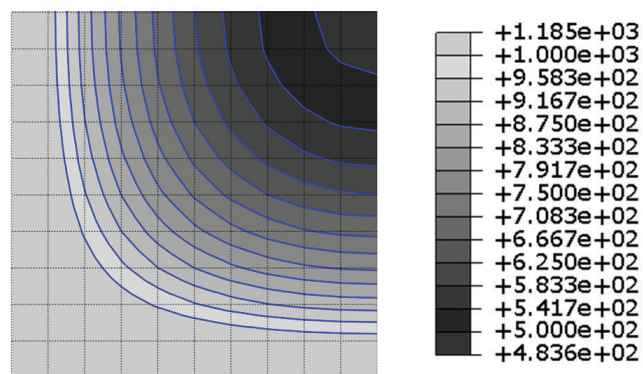
Požarne krivulje so v Evrokodu [SIST, 2004b] podane v obliki enovrstičnih obrazcev (funkcij časa), s katerimi lahko hitro določimo eno od t. i. nazivnih požarnih krivulj (standardna, ogljikovodikova ali krivulja zunanega požara). V dodatku A tega standarda pa je predstavljena še preprosta analitična procedura za določitev natančnejše parametrične krivulje. Za stavbo oz. požar, ki ju obravnavamo, bi bila za izvedbo poenostavljene požarne analize med nazivnimi krivuljami verjetno najbolj smiselna ogljikovodikova krivulja, saj obravnavamo požar odpadnih avtomobilskih pnevmatik, ki so v splošnem proizvod iz materialov skupine ogljikovodikov. Po drugi strani pa se zdi smiselna tudi raba standardne požarne krivulje, ki sicer predstavlja požar celuloznega tipa, a se po napotkih Evrokoda uporabi tudi v vseh drugih primerih, kadar v študiji požarne varnosti stavbe ni eksplicitno zahtevano drugače (velika večina primerov iz vsakdanje inženirske prakse). Parametrične krivulje skladno z metodo iz dodatka A [SIST, 2004b] ne moremo določiti, ker je ta metoda med drugim primerna za požarne sektorje s tlorsko površino manjšo kot 500 m^2 , česar pa obravnavani požarni sektor ne izpolnjuje. Poleg tega je ta metoda primerna za požare, kjer je požarna obtežba pretežno celuloznega tipa.

V nadaljevanju predpostavimo, da imamo opravka z najpogostejšim scenarijem iz prakse, to je, da požarna krivulja v študiji požarne varnosti stavbe ni posebej določena, in se zato privzame, da je za dokazovanje požarne odpornosti konstrukcije uporabljena standardna požarna krivulja.

4.2 Toplotna analiza stebra S3

Pri standardni požarni krivulji lahko toplotno analizo v poenostavljeni obliki izvedemo že s preprostim odčitavanjem temperatur prečnega prereza stebra iz temperaturnih profilov, kot jih na primer prikazuje dodatek A [SIST, 2005b]. Za obravnavani primer bi prišli v poštev profili, ki so tu podani za kvadraten prečni prerez dimenzij $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, ki je segrevan iz vseh štirih strani (varna stran v primerjavi s prerezom $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$). Žal so profili podani le za čas do 240 minut požara, kar se ne sklada z obravnavanim primerom. Temperaturni profil za čas 300 minut (pet ur) zato povzamemo po delu [Kolšek, 2018] in ga prikazujemo na sliki 3.

Temperatura betona [°C]:



Slika 3. Temperature po prečnem prerezu stebra dimenzij $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ po petih urah izpostavljenosti standardnemu požaru (prikazana le četrtina prereza zaradi simetrije). Modro obarvane izoterme na sliki povezujejo točke s temperaturo 1000 °C , 958 °C ..., 542 °C in 500 °C . Stranica celice v mreži, napeti preko prereza, je dolga 2 cm .

4.3 Mehanska analiza stebra S3

V tem poglavju za izvedbo zadnje faze poenostavljene požarne analize stebra (tj. mehanske analize) uporabimo dva pristopa po metodi reduciranega prečnega prereza, kot ju predlaga [SIST, 2005b]. To sta metoda izoterme 500 °C in metoda območij. Tako pri eni kot pri drugi metodi je postopek sledeč:

- Določimo debelino zunanje betonske plasti elementa, za katero predpostavimo, da ne prispeva k njegovi nosilnosti pri opazovanem času požara. Postopek določitve je drugačen pri eni in drugi metodi, pri čemer je metoda izoterme 500 °C praviloma (lahko tudi precej) konservativnejša.
- V preostalem delu prereza predpostavimo intaktno nosilnost betona (privzamemo enako trdnost, kot jo ima ta pred začetkom požara).
- Pri računu nosilnosti armature upoštevamo trdnost in elastični modul armaturnega jekla, reducirana za faktor, ki

skladno s standardom [SIST, 2005b] pritiče temperaturi armaturne palice ob opazovanem času požara.

- Steber s tako reduciranim betonskim prerezom ter tako reduciranimi materialnimi karakteristikami armaturnega jekla analiziramo po postopkih za AB-stebre pri običajni temperaturi. Za potrebe tega prispevka se odločimo za metodo, ki temelji na nazivni ukrivljenosti, ki jo opisuje poglavje 5.8.8 standarda [SIST, 2005b].

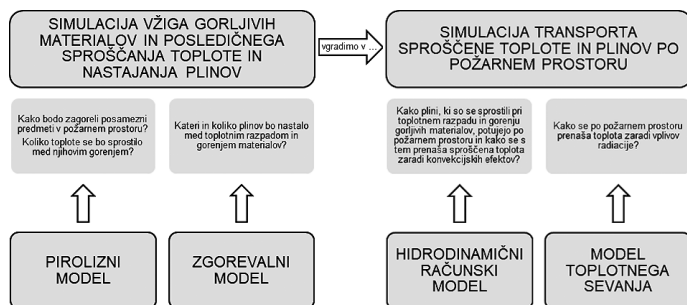
Glede na opisani postopek lahko z metodo izoterme 500 °C za obravnavani primer ugotovimo, da znaša reducirana širina stebra, znotraj katere je temperatura betona nižja od 500 °C, po petih urah požara zgolj 6 cm (slika 3). Jasno je, da je steber po tej metodi ob tem času že porušen. Pri metodi območij, pri kateri pa širino sodelujočega betonskega prereza določimo po obrazcih iz poglavja 3.3.3 standarda [SIST, 2005b], pa je reducirana širina stebra enaka 21 cm. Skladno z metodo, ki temelji na nazivni ukrivljenosti, nas to pripelje do zaključka, da steber pri opazovanem času požara svojo nosilnost sicer še ohranja, je pa izkoriščenost njegove nosilnosti 83 % (vrednost ustreza izkoriščenosti glede na upogibno nosilnost stebra pri znani osni sili in pri obtežbi za požarna projektna stanja). Podrobnosti izračunov so podane v delu [Maglica, 2021].

5 NAPREDNEJŠA ANALIZA STEBRA S3

5.1 Požarni scenarij (računalniška simulacija predvidenega požara)

Za potrebe določitve naprednejše (bolj zanesljive) požarne krivulje uporabimo natančno računalniško simulacijo predvidenega požara, za katerega smo predhodno predpostavili, da bo enak požaru v jeseniški stavbi.

Računalniške simulacije požarov, ki so v uporabi danes, so različnih vrst in zahtevnosti, s tem pa tudi različne natančnosti. Pri tem se v skupino najnatančnejših uvrščajo tiste, ki so kombinacija štirih osnovnih tipov računskih modelov, ki med simulacijo med sabo ves čas komunicirajo in izmenjujejo rezultate. To so pirolizni model, zgorevalni model, hidrodinamični model in model toplotnega sevanja (radiacije). Kaj so odgovornosti posamezne skupine modelov, znotraj simulacije požara, je v poenostavljeni obliki prikazano na sliki 4.



Slika 4. Shema računalniške simulacije požara, uporabljene v obravnavam primeru.

Hidrodinamični računski modeli (CFD modeli – angl. »Computational Fluid Dynamics«) in modeli toplotnega sevanja so danes že dobro razviti, k čemur največ prispeva dejstvo, da se

ti modeli tradicionalno uporabljajo tudi v drugih naravoslovnih disciplinah, kot so strojništvo, energetika in fizika. Drugače je s piroliznimi modeli, ki so specifični za področje požarnega inženirstva in opisujejo vžig in hitrost gorenja različnih gorljivih predmetov, ter z zgorevalnimi modeli, ki opisujejo sproščanje plinov pri njihovem gorenju. Želja uporabnikov računalniških orodij, predstavljenih na sliki 4, je že leta enaka, in sicer, da bi bile v tovrstne računalniške programe vgrajene tudi knjižnice materialov z že podanimi osnovnimi parametri za pirolizne modele in modele zgorevanja. Dejstvo je, da bi bilo takšni želji zelo težko ugoditi, saj je gorenje tudi načeloma enakega materiala lahko zelo odvisno od njegovih specifičnih lastnosti (točne kemijske sestave, ki je do neke mere pogosto poslovna skrivnost proizvajalca) in fizikalnega stanja (vlažnosti, termične obdelave, obdelave z zaviralci gorenja ...). Tako ostaja odgovornost za določitev parametrov piroliznih in zgorevalnih modelov na ramenih vsakokratnega uporabnika.

Za modeliranje jeseniškega požara iz leta 2016 izberemo prosto dostopno programsko orodje FDS [NIST, 2010]. Osnovno shemo modela, ki ga v njem pripravimo, prikazuje slika 5. Znotraj računske domene se tu območje opazovanega dela kleti razteza med koordinatama $X = -17$ m in $X = 14$ m v smeri X , v smeri Y med $Y = -7,7$ m in $Y = 14,5$ m, v smeri Z pa med $Z = 0$ m in $Z = 2,85$ m. Prvo območje, kjer so v stolpiče zložene avtomobilske pnevmatike, je kvadratne oblike in se razteza med koordinatama $X = -16,5$ m in $X = -7,5$ m ter med koordinatama $Y = 5,5$ m in $Y = 11,5$ m. Podobno velja za drugo območje, ki se razteza med koordinatama $X = -3,9$ m in $X = 16,5$ m ter med koordinatama $Y = -6$ m do $Y = -1,8$ m. Višina posameznega stolpiča je 2,2 m, stranica poenostavljene oblike pnevmatike (okrogla pnevmatika je poenostavljeno simulirana kot kvadratna) pa je enaka 0,4 m. Debelina gume je 0,04 m (upoštevani so le gorljivi deli pnevmatike). Posamezni stolpiči pnevmatik stojijo tesno eden ob drugem.

V modelu so z opcijo HOLE definirane tudi odprtine v stenah opazovanega dela kleti, skozi katere se med požarom izmenjujeta svež zunanji zrak in zadimljen zrak iz notranjosti kleti. Pozicije in velikosti odprtin podaja preglednica 1, medtem ko so oznake odprtin prikazane na sliki 5.

Vzrok nastanka požara in širjenje plamena do faze, ko se v požarnem prostoru vnamejo vsi stolpiči avtomobilskih pnevmatik, v modelu povzamemo po predvidevanjih iz vira [Kolšek, 2017]. Predpostavimo torej, da se najprej vname stropna svetilka, nato pa se plamen od tam po gorljivi oblogi stropa kleti hitro razširi po vsej površini stropa. Skupna količina gorljivih snovi je v tej začetni fazi požara še relativno majhna, zato predpostavimo, da ima sproščena toplotna energija zanemarljiv vpliv na analizirane AB-stebre. Zato gorenja teh snovi v simulacijo požara posebej ne vključimo. Bistveno pa na to vplivajo stolpiči skladiščene pnevmatike, ki se s časom vnamejo zaradi gorljivih kosov izolacije in svetil, ki padajo s stropa. Ker ti zagotovo padajo z večje površine stropa, lahko predpostavimo, da se vsi stolpiči pnevmatik vnamejo približno sočasno. Gorilnike, s katerimi v modelu sprožimo začetni vžig stolpičev, pa zato razporedimo enakomerno po celotnem območju, kjer se ti nahajajo (slika 5). Da so predpostavke in poenostavitve, omenjene v tem odstavku, ustrezne, kasneje pokaže validacija modela, ki jo predstavimo v poglavju 6.

oznaka odprtine	pozicija glede na tloris kleti	višina odprtine [m]
vrata v hodnik (izhod proti zunanosti preko stopnišča na koncu hodnika)	$X = -4,8 \text{ m}$ do $X = -3,8 \text{ m}$	2
vrata v spiralno stopnišče (izhod proti strehi)	$X = -2,8 \text{ m}$ do $X = -1,8 \text{ m}$	2
vrata v hodnik, ki predstavlja povezavo s preostalim delom kleti	$X = 0,2 \text{ m}$ do $X = 1,2 \text{ m}$	2
vhod na območje uvozne rampe	$Y = 12,1 \text{ m}$ do $Y = 14,4 \text{ m}$	3
izhod z območja uvozne rampe	$Y = 12,1 \text{ m}$ do $Y = 14,4 \text{ m}$	3
okno v steni med območjem uvozne rampe in preostalim delom kleti	$X = -5 \text{ m}$ do $X = -2 \text{ m}$	0,9
okno v severni zunanji steni kleti	$Y = 0,5 \text{ m}$ do $Y = 1,5 \text{ m}$	1
okno v zunanji steni uvozne rampe	$X = -16,8 \text{ m}$ do $X = 11,6 \text{ m}$	2,2

Preglednica 1. Odprtine v stenah numeričnega modela obravnavanega dela kleti.

5.1.1 Pirolizni model gume

Piroliza je toplotna degradacija gorljive trdne snovi, do katere pride med segrevanjem materiala. Pri tem se lomijo vezi med molekulami, pri čemer se sproščajo plini, masa materiala pa se zmanjšuje. V naprednih simulacijah požara opišemo pirolizo trdne snovi z dvema osnovnima enačbama [NIST, 2010]:

- Arrheniusovo enačbo termogravimetričnega razpada snovi, kjer upoštevamo, da se različne kemijske vezi v materialu rušijo pri različnih temperaturah:

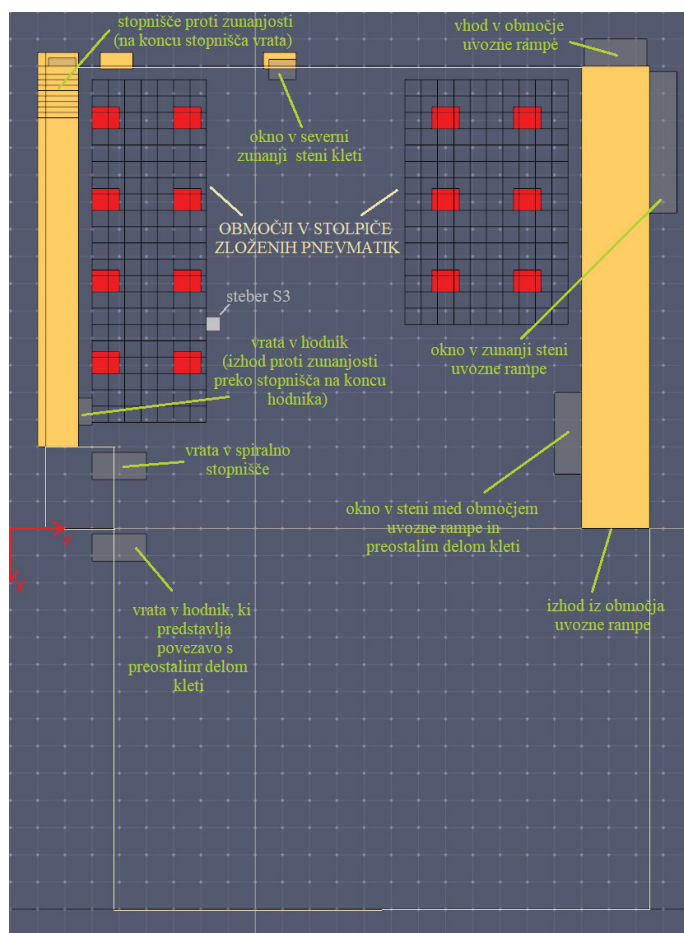
$$\frac{d\alpha}{dt} = - \sum_{j=1}^{N_j} A_j \alpha^{N_j} e^{-\frac{E_j}{RT}} \alpha_{O_2}^{N_{O_2}} \quad (2)$$

V enačbi (2) je $\alpha(t)$ delež konverzije trdne snovi v plinasto fazo ob času t , T pa je temperatura snovi. R nadalje označuje univerzalno plinsko konstanto, α_{O_2} in N_{O_2} pa koncentracijo kisika in temu pripadajoč koeficient. Koeficienti A_j , E_j in N_j so trije kinetični koeficienti reakcije 'j' ($j = 1, \dots, N_j$).

- Fourierovo enačbo prevajanja toplote skozi snov:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} k \frac{\partial T}{\partial x_i} + \dot{q}_s''' \quad (3)$$

V enačbi (3) je x_i ($i = X, Y, Z$) smer prevajanja toplote skozi snov, $\dot{q}_s'''$ pa je reakcijska toplota zgoraj omenjenih notranjih reakcij N_j , ρ , c_p , k so gostota, toplotna prevodnost in specifična toplota snovi, ki predstavljajo tri toplotne koeficiente snovi.



Slika 5. Model prizadetega dela kleti v programskem orodju FDS z označenimi odprtinami in območji v stolpiče zloženih pnevmatik. Rdeče obarvani pravokotniki označujejo območja gorilnikov, ki jih uporabimo za sprožitev gorenja pnevmatik na začetku simulacije.

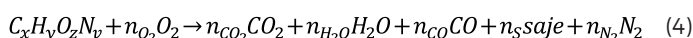
Pirolizni model v napredni računalniški simulaciji požara bo enolično določen, kadar bomo za vsak gorljiv material požarnega sektorja znali določiti set njegovih toplotnih in kinetičnih parametrov (A_j , E_j , N_j , pri čemer je $j = 1, \dots, N_j$, ter ρ , c_p , k). Tak postopek vključuje iteracijsko numerično prilagajanje rezultatov piroliznega modela, opisanega z enačbama (2) in (3), meritvam iz visokotemperaturnih materialnih eksperimentov ([Lautenberger, 2007], [Lautenberger, 2011], [McGrattan, 2015]), kot sta na primer preskus TGA (angl. Thermo-Gravimetric Analysis) in preskus s konusnim kalorimetrom (slika 6). Rezultate piroliznega modela pri tem prilagajamo na način, da postopno spreminjamo vrednosti njegovih kinetičnih in toplotnih parametrov.

Podobno, kot je opisano v prejšnjem odstavku, je bil za potrebe računalniškega modela jeseniškega požara v sklopu projekta FIRESIM razvit pirolizni model gume, in sicer s pomočjo vzorca nepogorele pnevmatike, ki je bil odvzet s pogorišča (slika 6). V prispevku kot zadosten približek uporabimo pirolizni model za polimetil metakrilat (angl. polymethyl methacrylate, PMMA), objavljen v delu [Matala, 2008]. Kot so pokazali rezultati preskusov s konusnim kalorimetrom, izvedeni znotraj

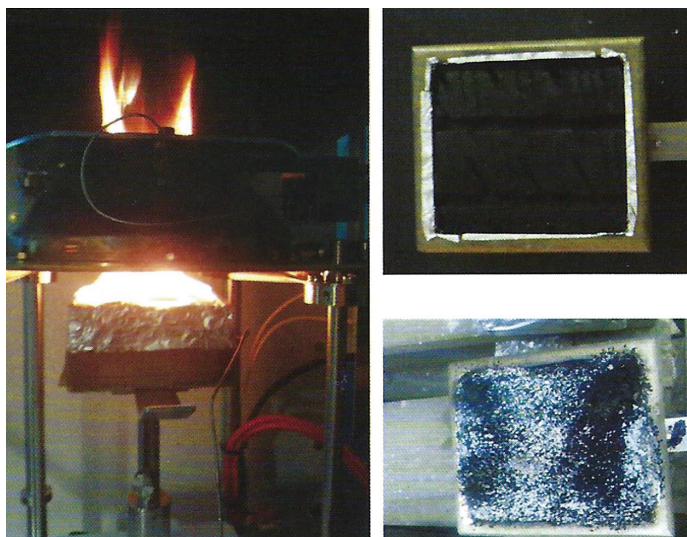
projekta FIRESIM, in kot kažejo rezultati iz dostopne znanstvene literature (npr. [Rybinski, 2013], [Wang, 2018], [Simionescu, 2019]), je gorenje PMMA po svojih osnovnih značilnostih podobno gorenju avtomobilske pnevmatike (zlasti oblika in magnituda krivulje hitrosti sproščanja toplote).

5.1.2 Zgorevalni model

Zgorevalni model je v programskem orodju FDS določen s stehiometrično enačbo (enačba kemijske reakcije v plinasti fazi) [NIST, 2010]. Z njo je določena sestava plinastega goriva, ki je posledica toplotnega razpada snovi, in sestava nastalih produktov gorenja. Poenostavljena oblika stehiometrične enačbe predpostavlja, da so molekule plinaste zmesi, ki nastane zaradi toplotnega razpada materiala, sestavljene iz ogljika (C), vodika (H), kisika (O) in dušika (N). Ob reakciji s kisikom iz zraka pa te tvorijo vodo (H_2O), ogljikov dioksid (CO_2), saje in ogljikov monoksid (CO):



Za enolično določitev enačbe (4) FDS od uporabnika eksplicitno zahteva le specifikacijo koeficientov x , y , z in v na levi strani enačbe (4), na desni pa specifikacijo deleža mase goriva, ki se pretvori v ogljikov monoksid (n_{CO}), in deleža mase goriva, ki se pretvori v dim (n_s). Drugi koeficienti se lahko v FDS poračunajo avtomatsko z notranjimi algoritmi.

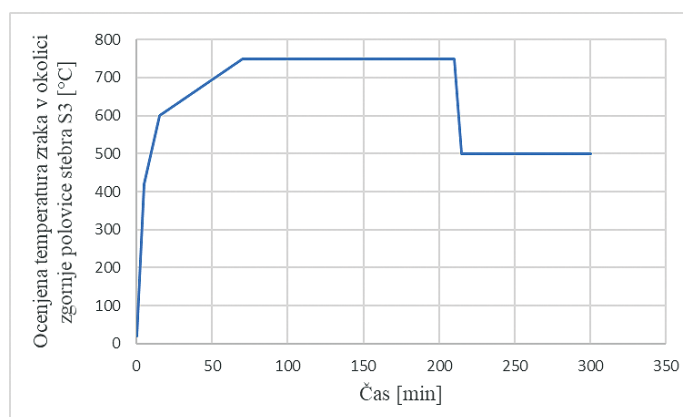


Slika 6. Preskus s konusnim kalorimetrom (levo). Vzorec pnevmatike, odvzete z jeseniškega pogorišča pred preskusom (desno zgoraj) in po njem (desno spodaj) [Kolšek, 2017].

Cilj analiz, ki jih prikazujemo v nadaljevanju, je čim natančnejša določitev temperatur okolice obravnavanega stebra S3, ne pa tudi natančna določitev plinastih produktov, ki so med gorenjem nastajali (ti bi bili pomembni, kadar bi s simulacijo načrtovali evakuacijo iz stavbe med požarom). Zato jeseniški požar poenostavljeno opišemo kot tipičen požar ogljikovodikov. Takšen požar je npr. požar kerozina. Za slednjega vrednosti omenjenih koeficientov lahko poiščemo v dostopni literaturi [Hurley, 2016].

5.1.3 Požarna krivulja

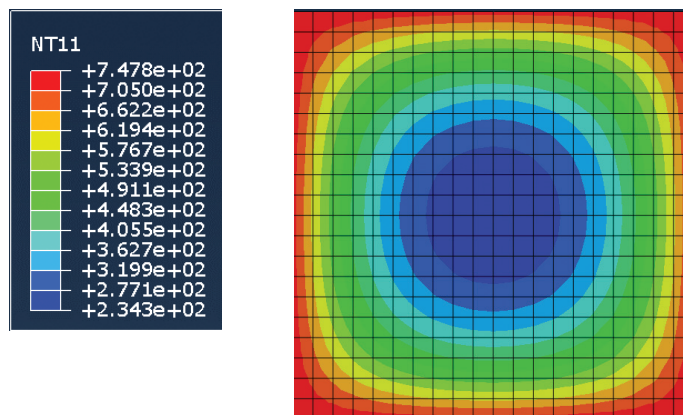
Iz opisanega modela za računalniško simulacijo jeseniškega požara lahko izvozimo požarno krivuljo za nadaljnjo toplotno analizo opazovanega stebra S3 (slika 7). Krivulja predstavlja časovni razvoj temperature okolice stebra, izmerjene v točki, ki glede na tloris kleti (glej sliko 1) sovпада s pozicijo stebra S3 in je na višini 2,5 m od tal kleti. V analizah, ki sledijo, predpostavimo, da je tak razvoj temperatur enak vzdolž celotne višine stebra, čeprav je jasno, da je to poenostavitev in da so temperature, ki se razvijejo ob nižje ležečih predelih stebra, v splošnem nižje. Takšna poenostavitev je na varni strani, a kot kažejo prve preliminarne analize avtorjev, rezultata ne spremeni bistveno (do največ 8 %).



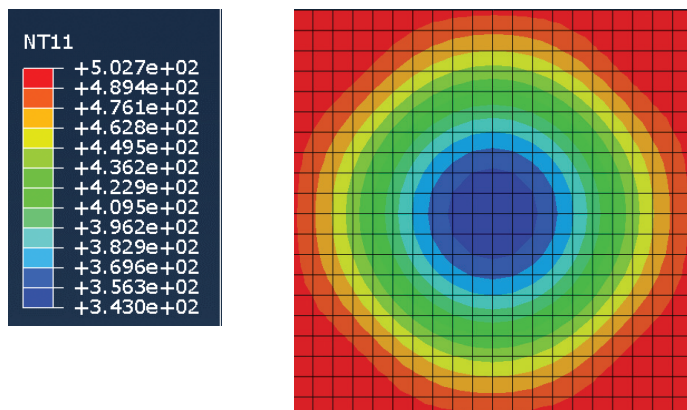
Slika 7. Požarna krivulja za nadaljnjo toplotno analizo stebra S3 [Maglica, 2021].

5.2 Toplotna analiza stebra S3

Toplotna analiza stebra S3, ki jo opisujemo v nadaljevanju, je analiza nestacionarnega prevajanja toplote po trdni snovi, ki jo izvedemo v računalniškem programu Abaqus [Simulia, 2011]. Osnovne enačbe toplotne analize so podane v delu [Maglica, 2021]. Temperatura okolice stebra je predstavljena s požarno krivuljo na sliki 7. Rezultat toplotne analize so temperaturna polja, ki se razvijejo vzdolž prečnega prereza stebra v odvisno-



Slika 8. Temperaturni profil stebra S3 po 3,5 ure izpostavljenosti temperaturam okolice, kot jih definira krivulja na sliki 7.



Slika 9. Temperaturni profil stebra S3 po 5 urah izpostavitve temperaturam okolice, kot jih definira krivulja na sliki 7.

sti od časa. Sliki 8 in 9 prikazujeta temperaturni polji pri času 3,5 ure (210 min), ko doseže temperatura zraka v okolici stebra najvišjo vrednost, in pri času 5 ur (300 min), kar predstavlja konec požara.

5.3 Mehanska analiza stebra S3

Naprednejši postopek mehanske analize je lahko vsaka nadgradnja poenostavljenega postopka iz poglavja 4.3, ki nas pripelje do natančnejših rezultatov. Načinov možne nadgradnje je veliko, v nadaljevanju uporabimo postopek natančnejšega opisa spreminjanja toplotnih in mehanskih lastnosti materiala s temperaturo. To pomeni, da namesto zgolj reducirane dela betonskega prereza, na katerem predpostavimo začetno temperaturo in začetne, tj. ne reducirane mehanske lastnosti, upoštevamo celoten prerez in realno razporeditev temperatur po njem. Predstavica takšne metode je metoda iz dodatka B.3 standarda [SIST, 2005b]. Ta metoda je modifikacija metode nazivne ukrivljenosti [SIST, 2005a], ki smo jo uporabili v poglavju 4.3, saj v vsaki točki prereza (v odvisnosti od temperature materiala) upošteva drugačne materialne karakteristike betona, tj. drugačno napetostno deformacijsko zvezo $\sigma - \epsilon_m$. Tu smo s simbolom σ označili normalne napetosti, s simbolom ϵ_m pa mehanske deformacije. Poleg mehanskih v vsaki točki upoštevamo tudi temperaturne deformacije (ϵ_{th}), preostale deformacije (deformacije lezenja in prehodne deformacije) pa zanemarimo. Podrobnosti postopka so, med drugim, bralcu dostopne v delih [Maglica, 2021] in [Šmid, 2020].

Ker temperatura zraka v okolici stebra S3 (slika 7) ne narašča ves čas požara, temperaturni profil, ki pripada času 5 ur, seveda ni nujno tisti, ki je merodajen za mehansko analizo stebra. Drži sicer, da bo ob tem času jedro stebra segreto najbolj, a bodo temperature v njegovih zunanjih slojih betona pri tem času že nižje kot ob času 3,5 ure. Zagotovo je zato nosilnost stebra smiselno preveriti tudi ob času 3,5 ure. Dodatno bi v splošnem veljalo preveriti tudi katerega od vmesnih časov med 3,5 in 5 urami požara. V obravnavanem primeru se izkaže, da ti niso merodajni, zato se jim v nadaljevanju tega prispevka ne posvečamo.

Največja izkoriščenost upogibne nosilnosti analiziranega stebra S3 pri nespremenljivi osni sili iz požarnega projektne

stanja je bila dosežena 3,5 ure po začetku požara in je enaka 17,5 %. Za primerjavo omenimo, da je bila izkoriščenost stebra pri tej osni sili ob začetku požara enaka 10 %.

6 POVZETEK REZULTATOV IN VALIDACIJA MODELOV

S poenostavljenim pristopom k požarni analizi stebra S3, kot smo ga prikazali v poglavju 4, smo ocenili, da bo po petih urah požara stebel že porušen (metoda izoterme 500 °C) ali pa bo ta dosegel 83 % svoje izkoriščenosti (metoda območij). Pri naprednejšem pristopu je največja izkoriščenost upogibne nosilnosti, ki jo za stebel izračunamo znotraj opazovanih petih ur požara, enaka zgolj 17,5 %. Dodatno velja poudariti, da je pri naprednejšem pristopu računsko ocenjena največja globina izoterme 500 °C med požarom približno 6 cm pod površino stebra. Ta ugotovitev se lepo ujema z rezultati pregleda pogorišča in spremljajočih laboratorijskih analiz odvzetih vzorcev betona [Kolšek, 2017], ki so to globino ocenili med 5 in 8 cm. Primerjava dokazuje, da smo se realni oceni požarne odpornosti konstrukcije veliko bolje približali z naprednejšim pristopom. Razlika v primerjavi s poenostavljenim pristopom pa je izredno velika.

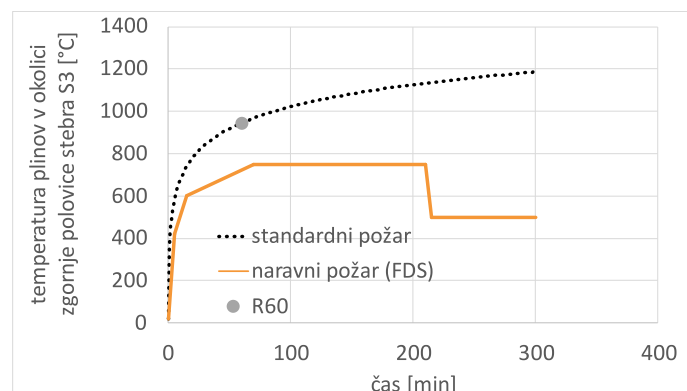
7 DISKUSIJA O REZULTATIH: JE TOREJ POENOSTAVLJENI PRISTOP PRI OBRAVNAVANEM PRIMERU NA PREVEČ VARNI STRANI?

Odgovor na zastavljeno vprašanje je vse prej kot preprost in je odvisen od tega, kateri čas požara se nam zdi smotrno upoštevati pri poenostavljenem pristopu in katerega pri naprednejšem. Je res pri obeh smiselno upoštevati čas 5 ur?

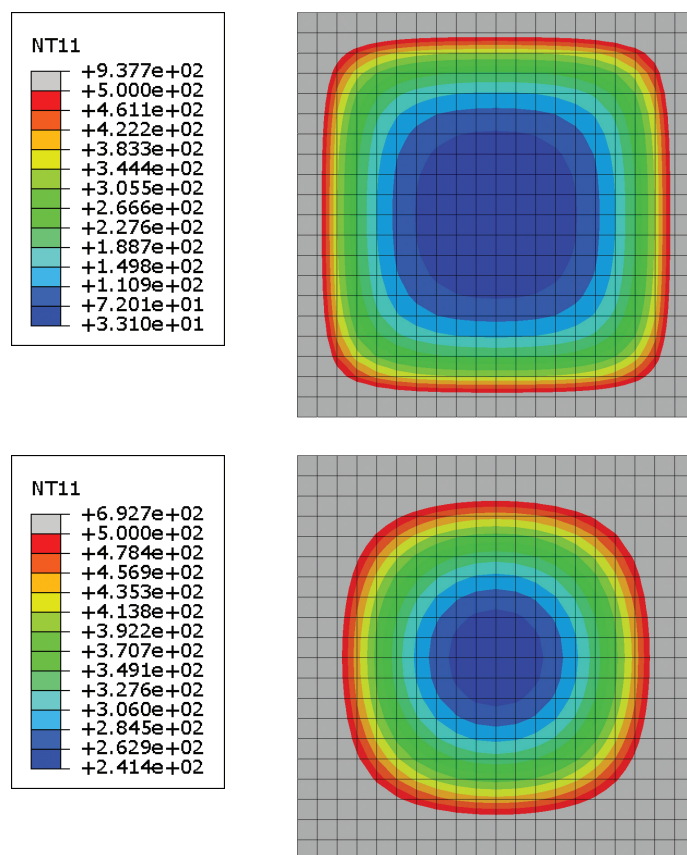
Odgovor je seveda da, če govorimo o naprednejši analizi, pri kateri naj bi se čim bolj približali realnemu dogajanju. Glede na to, da se je požar v obravnavani stavbi že zgodil, namreč vemo, da je čas 5 ur tisti čas, ki je enak dejanskemu. Poleg tega smo pri naprednejši analizi izbrali vhodne parametre požarne analize tako, da so temperature stebra čim bolj sledile dejanskim (slednje smo dokazali v poglavju 6). Verjetno pa je k izbiri opazovanega časa treba pristopiti drugače, kadar govorimo o poenostavljenem pristopu.

V inženirski praksi bi požarni inženir, če bi ta pri projektiranju požarne varnosti stavbe sledil slovenski smernici TSG-1-001 [MOP RS, 2019], glede na karakteristike stavbe verjetno zahteval požarno odpornost konstrukcije R60 (to je 60 minut). Pri tem bi se zahteva nanašala na izpostavljenost standardnemu požaru. Tudi nosilna konstrukcija stavbe in njena morebiti potrebna požarna zaščita bi tako bili projektirani ob teh predpostavkah. Zato razmislimo še, kakšna bi bila razlika med enim in drugim pristopom, če bi pri poenostavljeni analizi, ki smo jo izvedli za standardni požar, opazovali le čas 60 minut. Izkaže se, da je bila velika razlika med pristopoma, ki smo ju opazili v poglavju 6, predvsem posledica velikih razlik v požarnih krivuljah (slika 10), s tem pa tudi velikih razlik v temperaturnih poljih prereza ob specifičnih časih, zato si tokrat oglejmo le temperaturne pro

le. Primerjavo kaže slika 11. Tu sta profila pri obeh analizah prikazana za najbolj kritičen čas požara. Pri poenostavljeni analizi, kjer temperatura okolice ves čas narašča, je to končni opazovani čas 60 min, pri napredni analizi pa čas 3,5 ure oz. 210 minut.



Slika 10. Primerjava požarnih krivulj, ki sta bili uporabljeni pri poenostavljenem (...) in naprednejšem (-) pristopu.



Slika 11. Primerjava temperaturnih profilov prečnega prereza stebra S3 po 60 minutah standardnega požara (zgoraj) in po 210 minutah naravnega požara (spodaj). Območje s temperaturami nad 500 °C je obarvano sivo.

Ugotovimo lahko, da bi se rezultat primerjave obeh pristopov v tem primeru bistveno spremenil. Razlika med enim in drugim pristopom bi se sicer zmanjšala, vendar bi se poenostavljeni pristop tokrat izkazal kot pristop na "nevarni" strani. K temu bi dodaten delež lahko prispevalo tudi ovirano temperaturno raztezanje stebra, ki smo ga v naprednejšem modelu sicer zanemarili (glej poglavje 3). Če pa bi ga upoštevali, bi to lahko rezultiralo v večji tlačni osni sili stebra v začetnih fazah požara pri naprednejšem pristopu, s čimer bi bila "nevarna" stran poenostavljenega pristopa lahko še bolj izrazita. Vendarle pa je slednje odvisno predvsem od geometrijskih karakteristik preostale konstrukcije, s katero je stebel monolitno povezan, in temperatur, ki se med požarom razvijejo v njej.

8 SKLEP

V članku smo predstavili primer požarnega projektiranja AB-stebra poslovne stavbe, katere lastnosti so podobne lastnostim stavbe za servis in prodajo avtomobilov na Jesenicah, ki jo je leta 2016 prizadel hud požar. Večino podatkov o stavbi in požaru smo privzeli iz razpoložljive literature, preostanek pa smo smiselno predpostavili. Steber smo analizirali pri požarnem scenariju, ki je bil enak omenjenemu požaru jeseniške stavbe, in sicer najprej po danes že dobro uveljavljenih poenostavljenih postopkih, ki se v inženirski praksi uporabljajo najpogosteje, in po naprednejši metodi. Validacija obeh pristopov, ki smo jo opravili z eksperimentalnimi rezultati iz dostopne literature, je pokazala, da smo se z naprednejšo metodo realnemu stanju približali neprimerljivo bolje. V krajši diskusiji rezultatov ob koncu članka smo ugotovili, da bi poenostavljeni pristop pri obravnavanem primeru lahko označili celo kot (kot temu rečemo pogovorno) pristop na "nevarni strani".

Naprednejši model požara v kleti analizirane stavbe, ki smo ga predstavili v prispevku, je bil zasnovan za obravnavo enega od možnih požarnih scenarijev, ki se lahko tam zgodijo, in je bil predpostavljeno enak požaru v omenjeni jeseniški stavbi. Zasnova takšnega modela je seveda lažja v primerjavi s situacijo, ko bi bilo tak model treba zasnovati npr. za potrebe Študije požarne varnosti stavbe, torej za požar, ki se še ni zgodil in bi ga bilo zato treba predvideti vnaprej. V tem primeru bi simulaciji, predstavljeni v tem prispevku, zagotovo dodali še simulacije več drugih možnih scenarijev, pri čemer bi bilo najprej treba predvideti različne možne vrste, količine in razporeditve gorljivih snovi v kleti, za kar pa bi bilo v prvi vrsti zelo pomembno projektantovo dobro poznavanje dejanske namembnosti kleti. Če bi rezultate teh simulacij potrebovali le za požarno analizo nosilne konstrukcije kleti, podobno kot v tem prispevku, bi bil podatek o razlogu vžiga teh snovi manj pomemben. Pomemben pa bi lahko bil še razmislek o tem, ali se vnamejo vse gorljive snovi hkrati ali je širjenje požara postopno.

9 ZAHVALA

Delo P. Češarka in J. Č. Kolšek je bilo opravljeno v okviru raziskovalnih programov P2-0158 in P2-0260, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS). Za podporo se zahvaljujemo.

10 PRISPEVKI AVTORJEV

M. Maglica: pregled literature, izvedba računskih analiz

P. Češarek: metodologija, pisanje članka, razvoj računskega orodja za izvedbo mehanskih analiz stebra, konceptualizacija

J. Č. Kolšek: pregled literature, pisanje članka, metodologija, razvoj računskega orodja za izvedbo naprednih požarnih analiz, izvedba računskih analiz, konceptualizacija

11 LITERATURA

Erklavec, K., Projektiranje in ocena požarne odpornosti izolirane AB stebra v večetažni poslovni stavbi, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2012.

Hurley, M. (Editor-in-Chief), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th edition, Springer, 2016.

Kolšek, J., Rebec, A. Analiza nosilne konstrukcije po požaru objekta ASP na Jesenicah, POŽAR, strokovna revija za varstvo pred požari, 23(4), 18-22, 2017.

Kolšek, J., FIRESIM – Požarno-varno umeščanje gorljivih materialov v stavbe z jekleno okvirno nosilno konstrukcijo: Razvoj modelov in verifikacija z eksperimenti, Zaključno poročilo podoktorskega projekta, ARRS, Z7-7677, <http://arrs-firesim.zag.si>, 2018.

Kralj, B., Vpliv požara v načrtovanem jeklenem prizidku na nosilnost obstoječega armiranobetonskega objekta, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2019.

Lautenberger, C., A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids, doktorska disertacija, University of California, Berkeley, 2007.

Lautenberger, C., Fernandez Pello, C., Optimization Algorithms for Material Pyrolysis Property Estimation, Fire Safety Science, 10, 751-764, 2011.

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.

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.

MOP RS, Tehnična smernica TSG-1-001:2019: Požarna varnost v stavbah, Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije, 2019.

NIST, Fire Dynamics Simulator 5.5.3, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2010.

Rybinski, P., Janowska, G., Jozwiak, M., Jozwiak, M., Thermal stability and flammability of styrene-butadiene rubber (SBR) composites, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 113, 43-52, 2013.

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, 9,1-14, 2019.

Simulia, Abaqus 6.11, Dassault Systmes Simulia Corp., 2011.

SIST, SIST EN 1990, Evrokod – Osnove projektiranja konstrukcij, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2004a.

SIST, SIST EN 1991-1-2, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi: Vplivi požara na konstrukcije, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2004b.

SIST, SIST EN 1992-1-1, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005a.

SIST, SIST EN 1992-1-2, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila - Projektiranje požarnovarnih konstrukcij, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005b.

Šmid, G., Analiza karakterističnih nosilnih elementov stavbe za zdravstveno oskrbo v različnih projektnih stanjih, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2020.

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(6), 1-13, 2018.