

PERFORMANČNI NAČIN PROJEKTIRANJA POŽARNE ODPORNOSTI LEPLJENEGA LESENEGA NOSILCA – 1. DEL: MODELIRANJE RAZVOJA POŽARA V RAČUNALNIŠKEM PROGRAMU FDS

PERFORMANCE-BASED APPROACH TO FIRE SAFETY DESIGN OF GLULAM BEAM – PART 1: MODELLING THE DEVELOPMENT OF FIRE WITH THE FDS SOFTWARE

Sabina Huč, univ. dipl. inž. grad.

sabina.huc@gmail.com

dr. Matej Rozman, univ. dipl. inž. grad.

matej@giiip.si

GiiP, d. o. o., gradbeni inženiring, nepremičnine, projektiranje
Dobja vas 200, 2390 Ravne na Koroškem

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

jerneja.kolsek@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

doc. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.

tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si

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

Znanstveni članek

UDK 614.841.45:624.011.1

Povzetek | V prispevku je na primeru lepljenega lesenega nosilca, ki je del nosilne strešne konstrukcije športne dvorane v Dravogradu, predstavljen koncept performančnega načina projektiranja požarne odpornosti konstrukcijskega elementa. V prvem delu prispevka je z uporabo naprednega računalniškega programa Fire Dynamics Simulator za modeliranje požara prikazana prva faza požarne analize. Analiziranih je osem požarnih scenarijev, v katerih sta podrobneje prikazana dva načina modeliranja požara, to sta model polno razvitega požara ob predpostavki sočasnega vžiga skupine gorljivih predmetov in model postopnega širjenja požara od mesta vžiga na preostale gorljive predmete v prostoru. Predviden časovni potek hitrosti sproščanja toplote gorljivih elementov je v obeh modelih povzet po standardu SIST EN 1991-1-2. Izbrani so kritični požarni scenariji glede na najbolj neugoden potek maksimalne adiabatne temperature na površini lepljenih lesenih nosilcev. Nadaljevanje požarne analize, tj. toplotno-mehanska analiza požarnega odziva lepljenega lesenega nosilca, bo predstavljeno v drugem delu prispevka, ki je v pripravi.

Ključne besede: požarni scenarij, FDS, hitrost sproščanja toplote, požarna analiza, lepljeni leseni nosilec, performančni način

Summary | The paper presents a performance-based approach to fire design of a glulam beam. The analyzed glulam beam is part of the sports hall roof structure located in Dravograd. In the first part of the paper advanced computer software Fire Dynamics Simulator is used for modelling the development of fire to present the first phase of the fire analysis. Overall eight fire scenarios were analyzed in which two different ways of modelling the fire development are presented in detail. The first one is the model of fully developed fire assuming the simultaneous ignition of flammable objects and the second one is the model of the gradual spread of fire from the ignition source to other flammable objects in the compartment. The expected growth of the heat release rate of combustible elements in both models is taken according to the standard SIST EN 1991-1-2 (2004). Based on the most unfavourable growth of the maximum adiabatic surface temperature of the glulam beams critical fire scenarios were selected. The continuation of fire analysis, i.e. thermo-mechanical analysis of the glulam beam exposed to fire conditions, will be presented in the second part of the paper which is in preparation.

Keywords: fire scenario, FDS, heat release rate, fire analysis, glulam beam, performance-based approach

1 • UVOD

Varnost pred požarom je v Zakonu o graditvi objektov (ZGO-1, 2002) navedena kot ena izmed bistvenih zahtev, ki jih mora s svojimi lastnostmi in glede na svoj namen izpolnjevati vsak objekt. Cilj zagotavljanja varstva pred požarom je varovanje ljudi, živali, premoženja in okolja pred požarom in eksplozijo (ZVPoz, 2007). Nezaostna požarna varnost lahko privede do materialne škode, v najslabšem primeru je možna tudi izguba človeških življenj. Za preprečitev neželenih posledic požara in za zagotavljanje ustreznega nivoja požarne varnosti stavb se danes v vsakdanji inženirski praksi najpogosteje uporablja predpisni način projektiranja požarne varnosti.

Ideja predpisnega načina projektiranja požarne varnosti je zagotoviti potrebno požarno varnost objekta že pri arhitekturni zasnovi stavb z ustreznimi pasivnimi in aktivnimi ukrepi, ki se določijo glede na zahteve in priporočila smernic. Med pasivne ukrepe se uvršča izbira primernih gradbenih materialov, med aktivne ukrepe pa namestitve naprav za preprečitev, javljanje in gašenje požara ipd. V zadnjem času se je v študijah rekonstrukcij realnih požarov izkazalo, da je lahko predpisni način projektiranja požarne varnosti zaradi svoje enostavnosti tudi konservativen in stroškovno neučinkovit (Wang, 2013). To je privedlo do spoznanja, da je pri projektiranju požarne varnosti treba uvesti naprednejši pristop, t. i. performančni način,

ki bo varnejši in bolj realističen v primerjavi z do sedaj uveljavljenim predpisnim načinom. Namen performančnega načina projektiranja požarne varnosti je doseči zastavljeno stopnjo požarne varnosti s sodelovanjem projektantov, organov, pristojnih za požarno varnost in zavarovalnic. Pri tem se upoštevajo tako lastnosti objekta kakor tudi zahteve lastnika, uporabnika in okolice. Performančni način zajame spekter realnih požarov, ki lahko nastanejo v obravnavani stavbi, kar omogoča naprednejše in bolj efektivno projektiranje požarne varnosti v primerjavi s predpisnim načinom. Sočasno z uveljavljanjem performančnega pristopa se razvijajo napredni računski modeli za opis razvoja požara v stavbah in za opis mehanskega odziva požarno obremenjene konstrukcije. Projektiranje požarne varnosti stavb lahko razdelimo na dve fazi, in sicer primarno in sekundarno. Performančni način lahko uporabimo tako v primarni fazi, kjer za zagotovitev ustreznega nivoja požarne varnosti predvidimo aktivne in pasivne ukrepe, kakor tudi v sekundarni fazi projektiranja požarne varnosti stavb, v kateri se glede na zahtevano požarno odpornost nosilne konstrukcije požarnih sektorjev dimenzionirajo še posamezni konstrukcijski elementi. Požarno analizo konstrukcij, ki predstavlja sekundarno fazo projektiranja požarne varnosti stavb, smiselno razdelimo na tri matematično nepovezane faze. Performančni pristop lahko uporabimo že

v prvi fazi, v kateri s točnejšimi požarnimi modeli določimo časovni razvoj temperatur v požarnem sektorju. Dobljeni rezultati se nato uporabijo v drugi fazi požarne analize konstrukcij, imenovani toplotna analiza konstrukcije, kjer se določi časovno spreminjanje temperature po konstrukciji ali njenih delih med požarom. V tretji fazi požarne analize, imenovani tudi mehanska analiza konstrukcije, se z uporabo numeričnega modela dokazuje požarna varnost konstrukcije kot celote oziroma njenih delov v celotnem času izpostavljenosti požaru.

Prvi del prispevka z naslovom *Modeliranje razvoja požara v računalniškem programu FDS* na primeru novozgrajene športne dvorane, ki je del večnamenske dvorane ŠPIC D v Dravogradu (GiiP, 2011), obravnava načine modeliranja požara v programu Fire Dynamics Simulator (NIST, 2014). Analiziranih je osem požarnih scenarijev, v katerih sta prikazana dva načina modeliranja požara. Glede na napovedan najbolj neugoden razvoj maksimalne adiabatske temperature na površini lepljenih lesenih nosilcev, ki tvorijo nosilno strešno konstrukcijo obravnavane dvorane, med analiziranimi izberemo kritične požarne scenarije. S tem prikažemo uporabo performančnega načina projektiranja konstrukcijskega elementa v prvi fazi požarne analize. Druga in tretja faza požarne analize, tj. določitev toplotno-mehanskega odziva lepljenega lesenega nosilca, bo tematika drugega dela prispevka, ki bo objavljen samostojno.

2 • NUMERIČNO MODELIRANJE RAZVOJA POŽARA V ŠPORTNI DVORANI V DRAVOGRADU

Na nastanek in razvoj požara vpliva veliko dejavnikov, kot so na primer vir vžiga, vrsta in količina goriva, oblika ter velikost prostora in odprtin, prezračevanje, vrsta konstrukcije, obložnih materialov in možnosti gašenja. Poleg tega je požar kompleksen kemičen proces, ki vključuje veliko število kemijskih reakcij različnih gorljivih snovi s kisikom. Zaradi vpliva velikega števila parametrov ter upoštevanja fizikalnih in kemijskih pojavov med požarom je računalniško modeliranje gorenja in širjenja požara v prostoru izjemno zahtevna naloga. Uporaba računalniških programov na področju modeliranja požara, ki temeljijo na matematičnih modelih dinamike tekočin (ang. CFD), je zato v znanosti in stroki razširjena šele dobro desetletje. Trenutno najbolj razširjen računalniški program te vrste je Fire Dynamics Simulator (v nadaljevanju FDS).

2.1 Opis programa FDS

Program FDS že vrsto let razvijajo raziskovalci ameriškega inštituta NIST (ang. National Institute of Standards and Technology) v sodelovanju s finskim inštitutom VTT Technical Research Centre of Finland. Prva verzija je bila objavljena leta 2000. Program bere vhodne parametre iz tekstovne datoteke, uporabniško določene izhodne podatke, ki so namenjeni obdelavi in prikazu rezultatov, pa zapiše v različne tipe datotek. Smokeview (SMV) je spremljevalni menijski program, namenjen branju izhodnih datotek FDS in grafičnemu prikazovanju rezultatov simulacij. Programski paket FDS je brezplačno dostopen na svetovnem spletu. Zadnji objavljeni različici sta FDS 6.1.2 in SMV 6.1.12, opremljeni tudi z najnovejšimi navodili za uporabo ter obširnimi priročniki o delovanju, verifikaciji in validaciji programske opreme. Uporaba programa FDS se lahko znatno poenostavi s 3D-grafičnim uporabniškim vmesnikom PyroSim, ki samodejno generira vhodne zapise in izhodne datoteke programa FDS (TE, 2014).

Osnovna funkcija programa FDS so simulacije časovnega in krajevnega razvoja požara v prostoru. Program lahko napove razvoj in prenos dima, toplote, plamena, ogljikovega oksida in drugih snovi po požarnem prostoru, prav tako so mogoče simulacije odkrivanja požara s toplotnim javljalnikom in gašenje požara s šprinklerji. Kot takšno je orodje uporabno v širšem kontekstu načrtovanja požarne

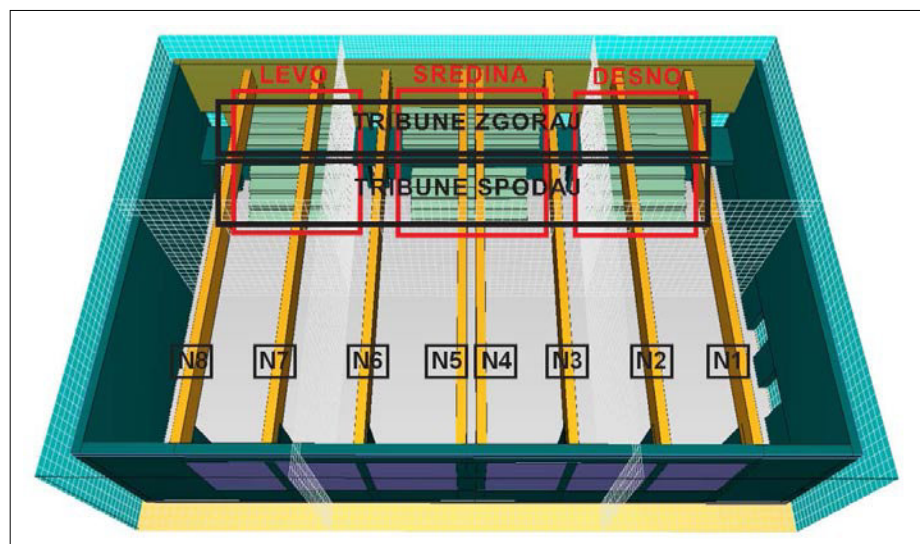
varnosti, na primer za projektiranje požarno varnih objektov, oceno varnosti obstoječih stavb, rekonstrukcijo požarov pri preiskavi po nesrečah ali za pomoč pri usposabljanju gasilskih enot. Programski paket vsebuje tudi orodja za analizo evakuacije ljudi in modeliranje situacij, ki sicer ne vključujejo pojavov, povezanih s požarom, so pa prav tako pomembne za kakovostno življenje ljudi, kot na primer prezračevalni sistem v stavbah. V nadaljevanju se osredotočimo zgolj na modeliranje požara oziroma požarnih scenarijev v programu FDS. Druge predstavljene zmožnosti programa vsebinsko ne sovpadajo z obravnavano temo, zato se jim v prispevku ne posvečamo.

2.2 Vhodna datoteka FDS za modeliranje požara

V tem poglavju predstavimo bistvene komponente vhodne datoteke FDS za računalniško simuliranje razvoja požara v obravnavani športni dvorani, ki je del večnamenske dvorane ŠPIC D v Dravogradu (GiiP, 2011). Datoteka vsebuje podatke o velikosti in delitvi računske mreže, globalni kemijski reakciji, lokaciji gorljivih elementov in količini energije, ki jo bodo ti sprostili z gorenjem, toplotnih lastnosti uporabljenih materialov, geometrijski zasnovi požarnega prostora in opazovanih količinah.

Športno dvorano v modelu obravnavamo kot en požarni sektor pravokotnih tlorisnih dimenzij 29,70 m x 44,70 m x 9,05 m. V programu jo umestimo v nekoliko večjo računsko domeno, ki jo razdelimo na šest računskih območij (mrež), in tako izkoristimo možnost paralelnega računanja. V vseh analiziranih primerih je celica mreže, v kateri je simulirano gorenje, dimenzij 0,30 m x 0,30 m x 0,30 m. Preostalih pet mrež sestavljajo celice dimenzij 0,60 m x 0,60 m x 0,60 m. Skupno število računskih celic je približno 200.000. Meje računskega prostora odpremo v vseh smereh, razen v negativni smeri koordinate z. S tem onemogočimo kopičenje dima in izsevane toplote okrog modela in se izognemo napačnim napovedim rezultatov.

Športno dvorano v modelu sestavljata igralna površina in prostor, namenjen tribunam za gledalce v dveh nivojih. Na balkonu širine 3,90 m so fiksne, pod njim pa premične tribune. Tribune so v obeh etažah razdeljene na tri dele, ločene s po dvema izhodoma širine 1,20 m in višine 2,40 m. Dodatno sta na skrajnih koncih tribun v vsaki etaži locirana še dva izhoda širine 1,80 m in višine 2,40 m. Tako je celoten kompleks tribun za gledalce sestavljen iz šestih posameznih tribun in osmih izhodov (slika 1). V modelu sta na krajši strani dvorane ustvarjeni še dve odprtini širine 2,40 m. Slednji predstavljata izhoda, ki vodita v sosednjo manjšo večnamensko dvorano in prostor za shranjevanje orodja. Okenske odprtine, ki so razporejene na steni, nasproti tribun, kakor tudi kupole na strehi so med simulacijo zaprte. Ker ima športna dvorana velik volu-



Slika 1 • Model športne dvorane v programu FDS s prikazanim poimenovanjem tribun in lepljenih lesenih nosilcev. Stropna konstrukcija namenoma ni prikazana v celoti zaradi boljše preglednosti slike

men, se predvidi in kasneje tudi izkaže, da je ob opisanih ventilacijskih pogojih simuliran požar kontroliran z zalogo gorljivega materiala. Izbrani ventilacijski pogoji, ki ostanejo enaki med celotno simulacijo, predvidevajo najslabši možni požarni scenarij z vidika ventilacije, tj. v primeru, da odpove kontakt s požarno centralo in se naravno prezračevanje v dvorani ne vzpostavi na predviden način, kar pomeni z avtomatskim odprtjem kupol na strehi in oken na vzdolžni strani dvorane.

Potek gorenja in širjenje požara v programu FDS nadzorujemo tudi z globalno kemijsko reakcijo v plinski fazi. Podajanje reakcije zahteva podatke o zgorevalni toploti ali količini sproščene toplote na enoto porabljenega kisika in podatke o razmerju števila atomov kemijskih elementov oziroma spojin, s katerimi se določi sestava goriva in produktov gorenja. Pri analizi požarnih scenarijev v obravnavani športni dvorani uporabimo podatke za poliuretansko reakcijo, ki jih predlaga priročnik SFPE Handbook (Tewarson, 2008).

Športno dvorano dejansko tvori veliko število različnih gradbenih materialov. Model v tem smislu zelo poenostavimo, saj definiramo le nekaj osnovnih materialov. Te večinoma uvozimo iz obstoječe FDS-knjžnice, pri tem pa njihovih materialnih lastnosti (gostota, specifična toplota, toplotna prevodnost) ne spreminjamo. Za modeliranje nosilnih betonskih sten debeline 0,30 m tako uporabimo material concrete z izjemo stene za zgornjimi tribunami, kjer betonskemu sloju debeline 0,30 m dodamo še notranjo obložno leseno plast debeline 0,02 m, ki ji predpišemo material yellow pine. Enako sestavo predpišemo tudi flom, medtem ko strojno konstrukcijo modeliramo z 0,22 m debelim slojem materiala foam in 0,02 m debelim slojem materiala yellow pine. Strešno konstrukcijo tvorijo še leseni lepljeni nosilci višine 1,80 m in debeline 0,20 m, ki so poenostavljeno modelirani enakomerno pravokotne oblike po celotni dolžni. Nosilec je predpisan material yellow pine. Lastnosti preostalih dveh materialov, uporabljenih pri modeliranju dvorane, pridobimo iz dostopne literature. Tribunam v modelu predpišemo debelino 0,01 m in lastnosti materiala polipropilen, tj. gostota je 1100,0 kg/m³, specifična toplota je 1,6 kJ/(kg K) in toplotna prevodnost je 0,3 W/(m K), kot jih podajata Hietaniemi in Mikkola (Hietaniemi, 2010). Okenskim odprtinam v modelu debeline 0,005 m predpišemo material steklo z materialnimi lastnostmi, kot jih predlaga Drysdale (Drysdale, 1998), tj. gostota je 2700,0 kg/m³, specifična toplota je 0,84 kJ/(kg K) in toplotna prevodnost je 0,76 W/(m K).

V programu FDS je mogoče definirati različne vrste merilnikov. V prvi fazi požarne analize želimo določiti maksimalne temperature v okolici lepljenih lesenih nosilcev. V ta namen v programu FDS po celotni dolžini nosilcev namestimo merilnike za merjenje adiabatne temperature na površini (*ang.* Adiabatic Surface Temperature). Adiabatna temperatura na površini nosilca v programu FDS predstavlja vpliv toplotnega toka iz zraka na trdno površino in je neodvisna od materialnih lastnosti površine. Ta temperatura ni enaka ne temperaturi zraka in ne temperaturi, merjeni na površini trdne snovi, ampak je definirana tako, da je primerna za izvoz v druge kompatibilne računalniške programe za računanje prevajanja toplote po trdni snovi. Izračunan potek adiabatne temperature na površini nosilca bo nadalje uporabljen v toplotno-mehanski analizi lepljenega lesenega nosilca, ki bo ločeno predstavljena v drugem delu prispevka.

2.3 Izbor požarnih scenarijev

Za določitev požarnih scenarijev ni enolično napisanih pravil, zato njihovo načrtovanje v splošnem temelji na znanju in izkušnjah. Ključna je opredelitev vira vžiga in količine toplote, ki se sprošča med razvojem požara. Iz spektra možnih požarnih scenarijev se nato na podlagi izbranih kriterijev določi kritične. Največjo požarno obtežbo obravnavane športne dvorane predstavljajo tribune za gledalce. Pri načrtovanju požarnih scenarijev smo tako upoštevali predpostavko, da je vir vžiga na posamezni tribuni, razvit požar pa ostane lokaliziran in se ne razširi na sosednje tribune. Širjenje požara preprečujejo relativno veliki odmiki med tribunami, kjer ni dodatne zaloge gorljivih predmetov. Po opisanih kriterijih za izbor požarnega scenarija smo v športni dvorani sprva zasnovali šest požarnih scenarijev z razvitim lokaliziranim požarom na vsaki izmed šestih tribun, kasneje pa še dva dodatna požarna scenarija ter preverjali njihov temperaturni vpliv na požarno nosilnost lepljenih lesenih nosilcev. Obravnavani požarni scenariji so opisani v nadaljevanju.

2.4 Modeliranje požara v programu FDS

V splošnem obstaja več pristopov modeliranja vžiga in gorenja elementov, ki narekujejo razvoj požara v prostoru. Prvi, teoretično najbolj realističen pristop je uporaba piroliznega modela, ki je vgrajen tudi v program FDS. Efektivna uporaba piroliznega modela zahteva poznavanje velikega števila različnih parametrov za opis kemičnih reakcij ter ma-

terialnih in toplotnih lastnosti materialov, ki jih je mogoče določiti le s pomočjo v ta namen opravljenih eksperimentov. Pirolizni modeli so danes še v razvojni fazi in kot takšni predmet aktivnih znanstvenih raziskav. Opisane omejitve in kompleksnost uporabe piroliznega modela za simuliranje požara v športni dvorani presega okvirje tega dela prispevka, zato ga v nadaljevanju ne obravnavamo.

Drugi, bolj uveljavljen pristop modeliranja požara je preprostejši od prvega, saj zahteva manj podanih parametrov. Gorljivim elementom v prostoru se poleg materialnih lastnosti predpiše še potek hitrosti sproščanja toplote (*ang.* Heat Release Rate, v nadaljevanju *HRR*) s pripadajočo temperaturo vžiga. Najenostavnejši, a nemalokrat tudi najbolj primeren, je tretji način modeliranja požara, kjer se vnaprej definiran potek *HRR* predpiše večjemu delu površine sektorja. Pri tovrstnem modelu se ne ukvarjamo s simulacijo gorenja posameznih predmetov v prostoru, ampak požar definiramo kot sočasno gorenje skupine predmetov. Ta način modeliranja je primeren zlasti za simulacije polno razvitih požarov.

V analiziranih požarnih scenarijih v obravnavani športni dvorani za modeliranje požara v računskem okolju FDS uporabimo prej opisano načina s predpisanim potekom *HRR*. Idealizirano projektno sproščanje toplote (predpisani potek *HRR*, slika 2) povzamemo po standardu SIST EN 1991-1-2 (SIST, 2004) in pri tem upoštevamo naslednje parametre:

- RHR_f (MW/m²) – maksimalna hitrost sproščanja toplote na enoto površine 1 m²,
- t_a (s) – čas za doseg hitrosti sproščanja toplote 1 MW,
- $q_{f,d}$ (MJ/m²) – projektna gostota požarne obtežbe na enoto površine 1 m²,
- A_f (m²) – maksimalna površina požara, ki je lahko celoten požarni sektor v primeru enakomerno porazdeljene požarne obtežbe ali manjša površina v primeru lokaliziranega požara.

Maksimalno površino požara A_f definira uporabnik sam, medtem ko parametra RHR_f in t_a glede na rabo stavbe predpisuje standard. Projektna gostota požarne obtežbe $q_{f,d}$ (MJ/m²) se skladno s standardom izračuna po enačbi

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad (1)$$

kjer je zgorevalni faktor, δ_{q1} faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja, δ_{q2} faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na naselitev, $\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$

faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov, in $q_{t,k}$ (MJ/m²) karakteristična gostota požarne obtežbe na enoto ploščine tal. Vrednosti parametrov, ki nastopajo v enačbi 1, so v standardu predstavljene tabelarično. Na sliki 2 je na ordinatni osi prikazana hitrost sproščanja toplote HRR (MW) na abscisni osi pa čas trajanja požara t (s). Čas t_1 (s), ki opredeli trajanje faze naraščanja požara t^2 , določimo z izrazom

$$t_1 = t_a \cdot \sqrt{HRR_{max}} \quad (2)$$

kjer je HRR_{max} (MW) maksimalna hitrost sproščanja toplote, zapisana kot produkt

$$HRR_{max} = RHR_f \cdot A_{fi} \quad (3)$$

Toplota $Q_{fi,d,1}$ (MJ), ki se sprosti v fazi naraščanja požara t^2 , je enaka integralu hitrosti sproščanja toplote

$$Q_{fi,d,1} = \int_0^{t_1} HRR dt = \frac{1}{3} \cdot HRR_{max} \cdot t_1 \quad (4)$$

Vodoravni plato (HRR_{max}) se konča, ko dogori 70 % celotne požarne obtežbe, ki se izračuna kot produkt površine požara A_{fi} (m²) in projektne gostote požarne obtežbe $q_{fi,d}$ (MJ/m²). Hkrati je celotna požarna obtežba enaka sproščeni toploti med požarom $Q_{fi,d}$ (MJ), kar se zapiše z integralom celotne krivulje hitrosti sproščanja toplote

$$Q_{fi,d} = \int_0^{\infty} HRR dt = q_{fi,d} \cdot A_{fi} \quad (5)$$

Sproščena toplota v fazi razvitega požara $Q_{fi,d,2}$ (MJ) se izračuna z izrazom

$$Q_{fi,d,2} = 0,7 \cdot Q_{fi,d} - Q_{fi,d,1} \quad (6)$$

čas t_2 (s), ki omejuje fazo razvitega požara pa kot

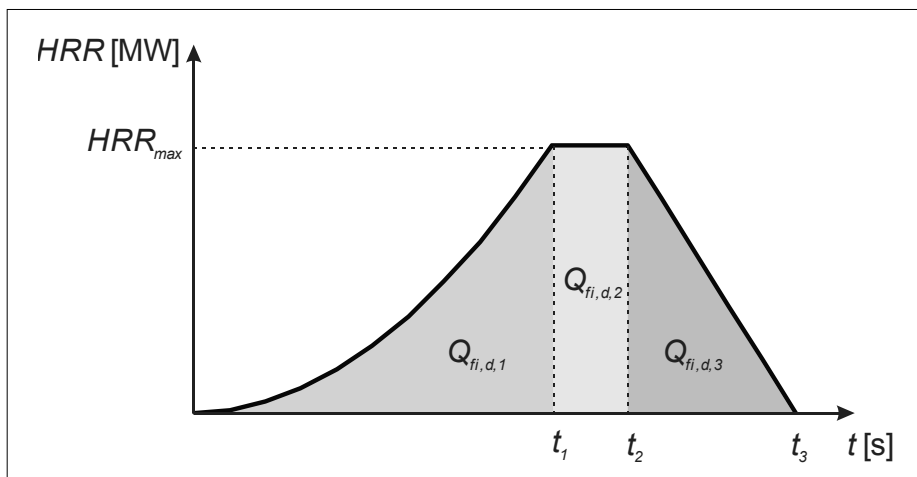
$$t_2 = t_1 + \frac{Q_{fi,d,2}}{HRR_{max}} \quad (7)$$

Celotno trajanje požara izrazimo s časom t_3 (s)

$$t_3 = t_2 + 2 \cdot \frac{Q_{fi,d,3}}{HRR_{max}} \quad (8)$$

kjer $Q_{fi,d,3}$ (MJ) predstavlja preostalih 30 % celotne požarne obtežbe, ki dogori v fazi pojenja požara

$$Q_{fi,d,3} = 0,3 \cdot Q_{fi,d} \quad (9)$$



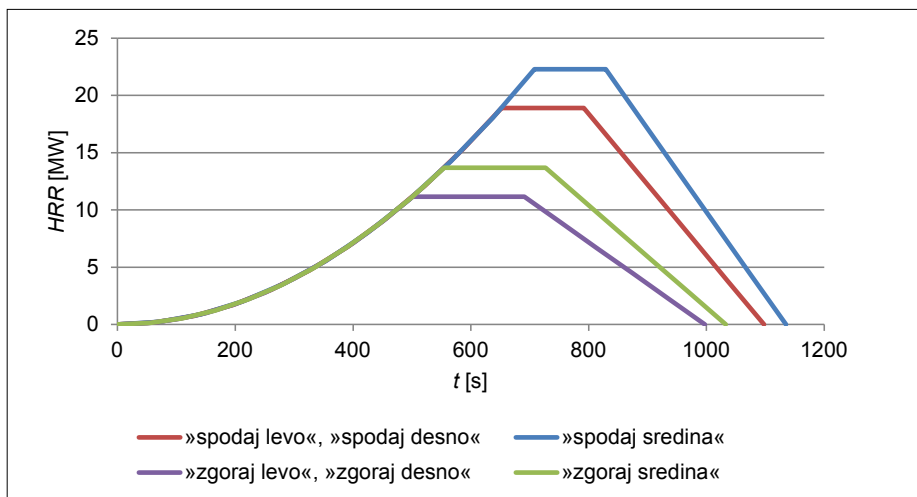
Slika 2 • Idealiziran časovni potek sproščanja toplote po SIST EN 1991-1-2

V prvem sklopu analiz (prvih šest požarnih scenarijev) za modeliranje požara v obravnavani športni dvorani uporabimo najpreprostejši način, tj. način, kjer obravnavamo polno razvit požar oz. sočasno gorenje ene tribune. Celotno požarno obtežbo tribune s predpisanim potekom HRR sorazmerno razdelimo na pet površin (velikost slednjih je odvisna od požarnega scenarija), ki jih postavimo na vrhne dele stopničasto oblikovanih tribun. Drugih gorljivih elementov v modelu ne predvidimo. Za opis lastnosti lokaliziranega požara, ki se razvije na posamezni tribuni, skladno s standardom upoštevamo hiter razvoj požara (tj. $t_a = 150$ s) in stopnjo rasti požara $RHR_f = 0,50$ MW/m². Projektna gostota požarne obtežbe je enaka $q_{fi,d} = 255,0$ MJ/m² in je izračunana po enačbi (1), pri čemer so upoštevane naslednje vrednosti parametrov: $q_{t,k} = 300$ MJ/m², $m = 1$, $\delta_{q1} = 1,70$, $\delta_{q2} = 1,0$, $\delta_{n1} = 1,0$, $\delta_{n2} = 1,0$, $\delta_{n3} = 1,0$, $\delta_{n4} = 0,73$, $\delta_{n5} = 0,87$, $\delta_{n6} = 1,0$, $\delta_{n7} = 0,78$, $\delta_{n8} = 1,0$,

$\delta_{n9} = 1,0$ in $\delta_{n10} = 1,0$. Podan potek HRR ni enak v vseh predvidenih požarnih scenarijih (slika 3), saj je odvisen od površine požara, tj. površine posamezne tribune A_{fi} (m²). V preglednici 1 prikazujemo ime požarnega scenarija, ki ustreza tribuni, na kateri se razvije požar (slika 1), in pripadajoče površine tribun A_{fi} (m²).

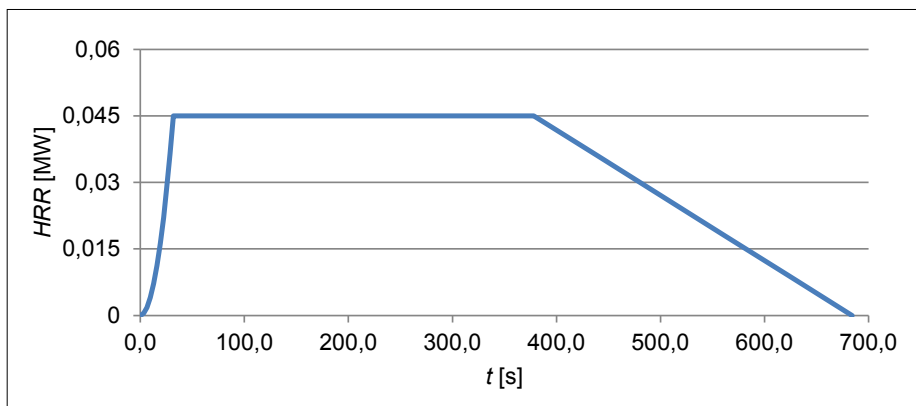
Požarni scenarij	A_{fi} (m ²)
»spodaj desno«	37,80
»spodaj sredina«	44,55
»spodaj levo«	37,80
»zgoraj desno«	22,32
»zgoraj sredina«	27,36
»zgoraj levo«	22,30

Preglednica 1 • Prvi sklop analiziranih požarnih scenarijev s pripadajočo površino tribune, na kateri je predpisan požar



Slika 3 • Predpisan potek hitrosti sproščanja toplote (HRR) v šestih požarnih scenarijih

Med simuliranimi prvimi šestimi požarnimi scenariji (spodaj levo, spodaj sredina, spodaj desno, zgoraj levo, zgoraj sredina, zgoraj desno) izberemo najbolj neugodne glede na časovni razvoj maksimalne adiabatne temperature na površini lepljenih lesenih nosilcev. Najbolj neugodne požarne scenarije nato modeliramo še na drug, nekoliko bolj zahteven način, s čimer v nadaljevanju prikažemo še osnovni princip modeliranja gorenja z upoštevanjem lastnosti gorljivih predmetov oz. materialov. V dodatnih dveh modelih gorljivim površinam (tribune) predpišemo ustrezno debelino in izbrane materialne karakteristike polipropilena. Poleg tega podamo temperaturo vžiga, ki predstavlja temperaturo na površini gorljivega elementa, pri kateri program prične vbrizgavati zgorevalne pline v računski prostor, ki ob zadostni količini kisika proizvedejo predviden potek HRR . V obeh dodatnih požarnih scenarijih za temperaturo vžiga površine gorljivega elementa izberemo vrednost $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hopkins, 1995). Potek HRR po vžigu površine pa podamo skladno s standardom, podobno kot v prvem sklopu požarnih scenarijev (prvih šest požarnih scenarijev). Pri tem spremenimo le površino požara oz. površino



Slika 4 • Potek hitrosti sproščanja toplote (HRR), predpisan površini tribun v dodatnih dveh požarnih scenarijih

sproščanja toplote, ki jo tokrat definiramo kot površino posamezne celice $A_n = 0,09\text{ m}^2$, ostali parametri za opis poteka HRR pa ostanejo enaki, tj. $t_{\alpha} = 150\text{ s}$, $RHR_t = 0,50\text{ MW/m}^2$ in $q_{t,d} = 255,0\text{ MJ/m}^2$. Prav tako ostaneta nespremenjeni tudi predvidena požarna obtežba $Q_{n,d}$ (MJ) in maksimalna hitrost sproščanja toplote HRR_{max} (MW). Potek HRR , ki ga na tak način predpišemo tribunam, je prikazan na sliki 4. Nazadnje v dodatnih dveh modelih določimo še vir vžiga. Definiramo ga v obliki

manjše gorljive površine, $A_n = 0,54\text{ m}^2$, ki ji predpišemo enakomerno hitrost sproščanja toplote na enoto površine $RHR_t = 1852,0\text{ MW/m}^2$ za čas 300 s od začetka simulacije. Od 300 . sekunde dalje opazujemo gorenje materiala polipropilen oz. razvoj požara po površini tribune. Pričakujemo postopno širjenje požara in posledično drugačen napovedan potek hitrosti sproščanja toplote kot pri primerljivih požarnih scenarijih iz prvega sklopa.

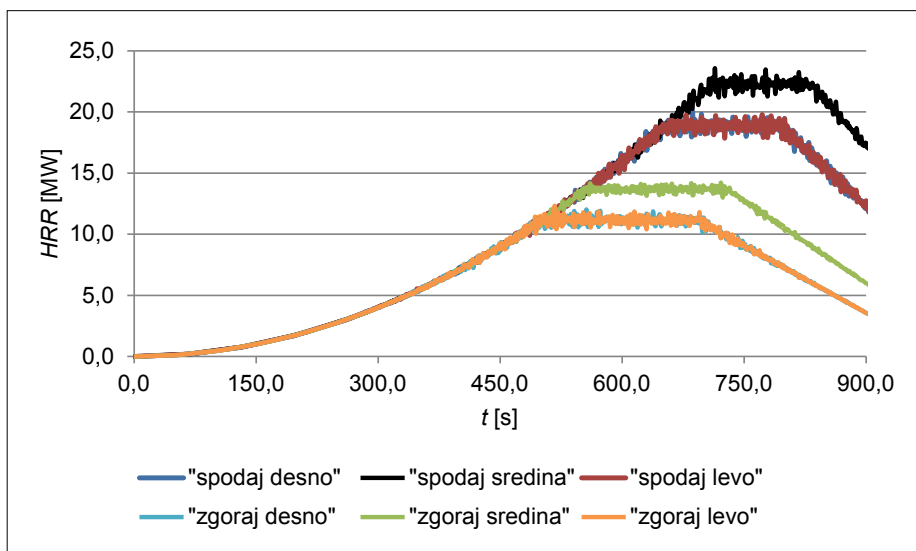
3 • REZULTATI

V nadaljevanju podrobneje predstavimo rezultate s programom FDS analiziranih osmih požarnih scenarijev v obravnavani športni dvorani v Dravogradu. Osredotočimo se zlasti na napovedane poteke HRR in maksimalne adiabatne temperature na površini lesenih lepljenih nosilcev v posameznem požarnem scenariju. Oznake lepljenih lesenih nosilcev, ki si z desne proti levi sledijo v zaporedju od N1 do N8 (slika 1), naj služijo lažji interpretaciji rezultatov. Rezultate simulacij prikazujemo za prvih 900 s (15 min.) požara, kar ustreza času, ko se v vseh požarnih scenarijih že razvijejo maksimalne temperature. Faza pojemanja požara v požarni analizi lepljenih lesenih nosilcev ne igra pomembnejše vloge, zato grafično ni vedno prikazana.

Najprej predstavimo rezultate prvih šestih požarnih scenarijev, kjer je predviden razvoj lokaliziranega požara na vsaki izmed tribun: spodaj levo, spodaj sredina, spodaj desno, zgoraj levo, zgoraj sredina ali zgoraj desno. Kot je opisano v poglavju 2, je požar na tribunah v vseh šestih primerih modeliran s

predpisanim potekom HRR celotne zaloge predvidenih gorljivih materialov (tribuna), ki zagotovo sočasno. Na sliki 5 je za posamezne

primere prikazan izračunan potek HRR . Razberemo lahko, da je v vseh primerih požar kontroliran z zalogo gorljivega materiala.



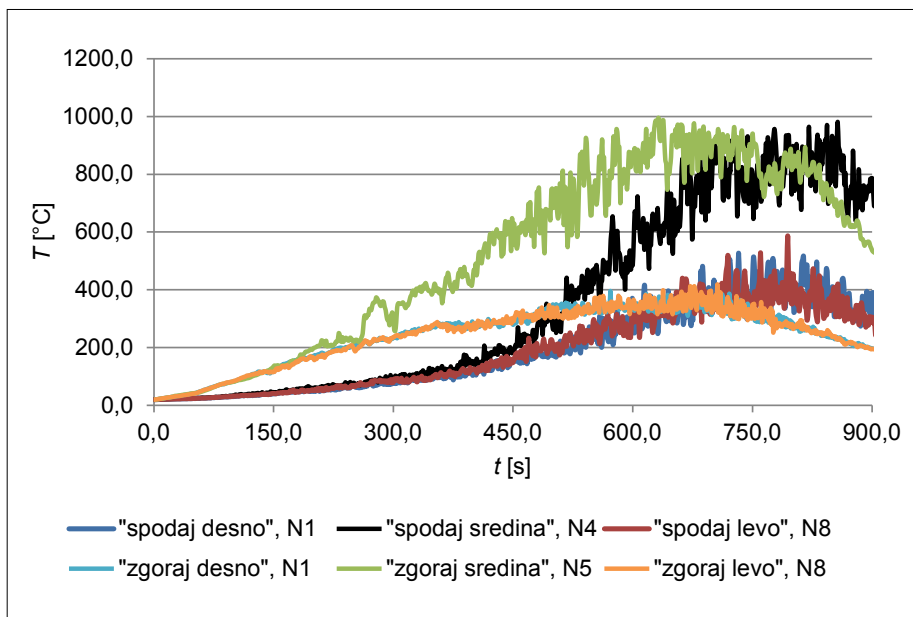
Slika 5 • S programom FDS napovedan potek hitrosti sproščanja toplote (HRR) v šestih požarnih scenarijih

Kisika je v prostoru dovolj, zato se *HRR* razvije po predpisanem režimu.

Slika 6 predstavlja izračunan potek maksimalne adiabatne temperature na površini lepljenih lesenih nosilcev za posamezni požarni scenarij. Opazimo, da požar, modeliran na spodnji oziroma zgornji levi tribuni, povzroči maksimalno adiabatno temperaturo na površini nosilca N8, analogno požar, modeliran na spodnji oziroma zgornji desni tribuni, povzroči maksimalno adiabatno temperaturo na površini nosilca N1, požar, modeliran na spodnji oziroma zgornji sredinski tribuni, pa povzroči maksimalno adiabatno temperaturo na površini nosilca N4 oziroma N5. S slike 6 razberemo še, da sta z vidika požarne nosilnosti lepljenih lesenih nosilcev najbolj neugodna požarna scenarija spodaj sredina in zgoraj sredina, pri katerih doseže maksimalna adiabatna temperatura na površini lepljenega lesenega nosilca vrednosti povprečno okrog 900 °C. V preostalih požarnih scenarijih so maksimalne izračunane adiabatne temperature na površini nosilcev bistveno nižje in se gibljejo okoli 400 °C. To gre pripisati predvsem manjši zalogi gorljivega materiala, saj so stranske tribune dimenzijsko manjše od sredinskih, kakor tudi modeliranim ventilacijskim pogojem.

Pri prikazu drugega, nekoliko bolj kompleksnega načina modeliranja požara v programu FDS izhajamo iz ugotovljenih najbolj neugodnih požarnih scenarijev iz prvega sklopa računskih simulacij, tj. scenarijev spodaj sredina in zgoraj sredina. V dodatnih dveh požarnih scenarijih opustimo predpostavko, da vsa predvidena količina gorljivih predmetov v prostoru zagori naenkrat, namesto tega pa privzamemo postopno širjenje požara, ki je odvisno od materialnih karakteristik gorljivih elementov (tribune), predpisane temperature vžiga in debeline materiala polipropilen kot tudi lokacije vira vžiga. Dodatna požarna scenarija poimenujemo "spodaj sredina mat" in "zgoraj sredina mat", pri čemer prvi del besednih zvez pove lokacijo vira vžiga, zadnji del (mat) pa nakazuje način modeliranja požara z upoštevanjem materialnih lastnosti gorljivih elementov.

Slika 7 primerja napovedan potek *HRR* v dodatnih dveh požarnih scenarijih "spodaj sredina mat" in "zgoraj sredina mat" z napovedanim potekom *HRR* v sorodnih požarnih scenarijih spodaj sredina in zgoraj sredina. Napovedan potek *HRR* se v omenjenih požarnih scenarijih bistveno razlikuje. Poleg samega poteka so opazne tudi raz-

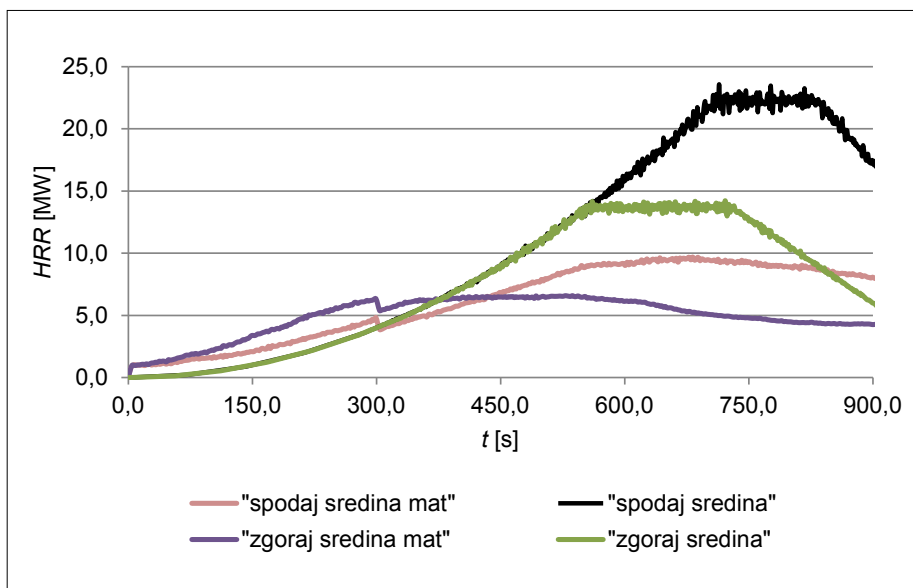


Slika 6 • S programom FDS napovedan potek maksimalne adiabatne temperature na površini lepljenega lesenega nosilca v šestih požarnih scenarijih. V legendi je poleg imena požarnega scenarija napisana tudi oznaka nosilca, na površini katerega je dosežena maksimalna adiabatna temperatura

like v maksimalni doseženi *HRR*, ki je v primeru "spodaj sredina mat" skoraj 10 MW, v primeru "zgoraj sredina mat" pa približno 6 MW. V obeh dodatnih primerih sta napovedani maksimalni hitrosti sproščanja toplote nižji kot v požarnih scenarijih s predpisanim potekom *HRR*, tj. spodaj sredina (22,275 MW) in zgoraj sredina (13,68 MW).

Pri 300 s je na grafih "spodaj sredina mat" in "zgoraj sredina mat" opazen padec *HRR* za pribl. 1 MW, kar je posledica odstranitve vira vžiga.

Slika 8 nadalje primerja izračunane časovne razvoje maksimalne adiabatne temperature na površini nosilcev v širih požarnih scenarijih. Kljub temu da je maksimalna hitrost

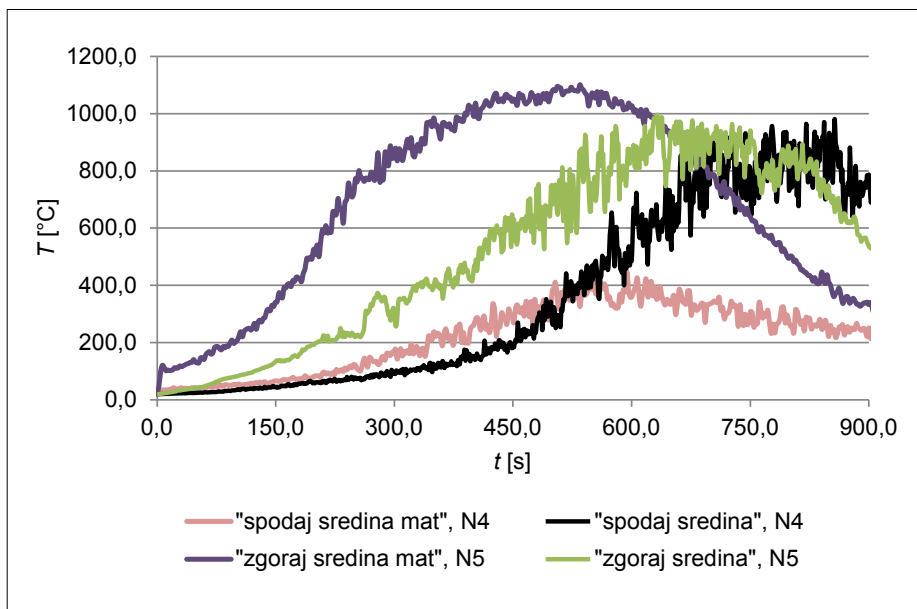


Slika 7 • Primerjava s programom FDS napovedanega poteka hitrosti sproščanja toplote (*HRR*) v požarnih scenarijih "spodaj sredina mat", "zgoraj sredina mat", spodaj sredina in zgoraj sredina

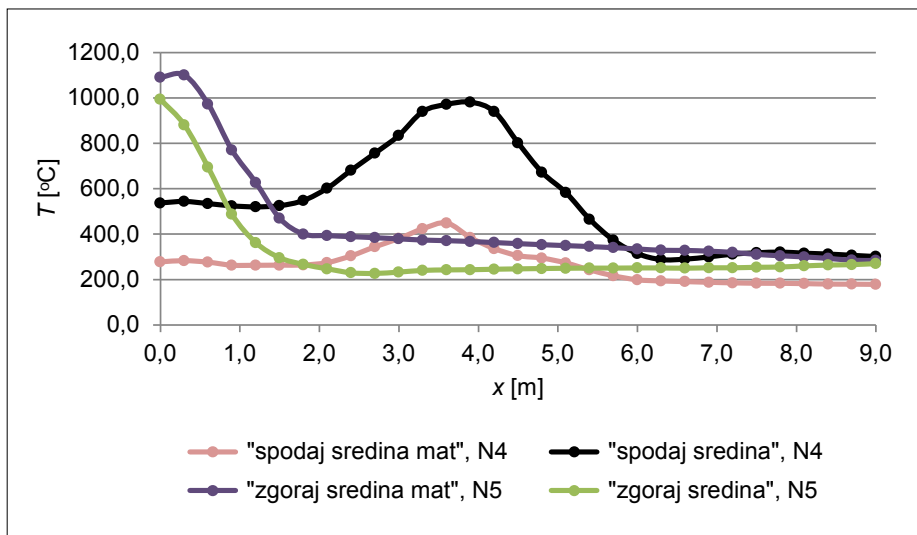
sproščanja toplote v požarnem scenariju "spodaj sredina mat" za slabe 4 MW višja kot v požarnem scenariju "zgoraj sredina mat", je s slike 8 razvidno, da so izračunane maksimalne adiabatne temperature na površini nosilca v prvem primeru kar za približno 700 °C nižje kot v drugem primeru. Nasploh je napovedana maksimalna adiabatna temperatura na površini nosilca v požarnem scenariju "spodaj sredina mat" najnižja med vsemi, od napovedi v sorodnem požarnem scenariju spodaj sredina se krepko razlikuje (približno 400 °C).

Na sliki 9 so za požarne scenarije "spodaj sredina mat", spodaj sredina, "zgoraj sredina mat" in zgoraj sredina prikazane ovojnice napovedanih maksimalnih adiabatnih temperatur na površini nosilcev N4 oziroma N5, merjene vsakih 0,30 m vzdolž nosilcev. Ovojnice prikazujemo na začetnih devetih metrih nosilca, saj se od tod naprej do konca nosilca maksimalne adiabatne temperature na površini zanemarljivo malo znižajo. Začetno krajišče nosilca je ob steni za tribunami, končno krajišče pa na nasprotni strani dvorane, ob steni z odprtinami. Dolžina nosilca je 28,30 m. Pričakovano se razvijejo najvišje adiabatne temperature na površini nosilca neposredno nad tribuno, na kateri je definiran požar, nato pa padajo po dolžini nosilca oziroma z oddaljenostjo od lokacije požara. Zaradi nehomogenega temperaturnega polja vzdolž nosilca se izkaže, da sta z vidika požarne odpornosti nosilca kritična dva požarna scenarija. Do 1,5 m dolžine nosilca najvišje maksimalne adiabatne temperature na površini povzročijo požarni scenarij "zgoraj sredina mat", po ostali dolžini pa požarni scenarij spodaj sredina.

Na sliki 10 je prikaz napovedi razvoja požara in temperatur zraka v programu FDS pri karakterističnih časih 300 s, 600 s in 900 s za požarna scenarija (a) zgoraj sredina in (b) "zgoraj sredina mat". Opazimo, da se pri gorenju tribune v primeru b, kjer je požar modeliran z upoštevanjem materialnih karakteristik gorljivega materiala polipropilen, celice vžigajo ena za drugo, kar povzroči "potovanje" plamena in s tem spreminjanje površine požara od sredine proti levi strani tribune (slika 10b zgoraj). V požarnem scenariju zgoraj sredina (slika 10a) pa je površina požara, ki je na sliki prikazana v rdeči barvi, skupaj s potekom *HRR* določena kot vhodni podatek in ostane med simulacijo konstantna. Na spodnjem delu slike 9b so pri časih 300 s, 600 s in 900 s prikazane še napovedane temperature zraka v ravnini pred nosilcem N5.



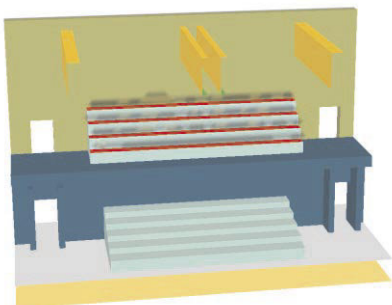
Slika 8 • Prikaz s programom FDS napovedanega poteka maksimalne adiabatne temperature na površini lepljenega lesenega nosilca v požarnih scenarijih "spodaj sredina mat" in "zgoraj sredina mat". Za primerjavo sta dodani še krivulji iz požarnih scenarijev spodaj sredina in zgoraj sredina. V legendi je poleg imena požarnega scenarija napisana tudi oznaka nosilca, na površini katerega je napovedana maksimalna adiabatna temperatura



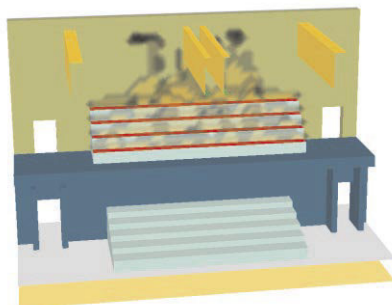
Slika 9 • Ovojnice maksimalnih adiabatnih temperatur na površini nosilcev N4 oziroma N5 izračunanih s programom FDS vsakih 30 cm vzdolž njihove dolžine v požarnih scenarijih "spodaj sredina mat" in spodaj sredina oziroma "zgoraj sredina mat" in zgoraj sredina. Rezultati so prikazani do dolžine nosilca x = 9,0 m

(a) Požarni scenarij zgoraj sredina

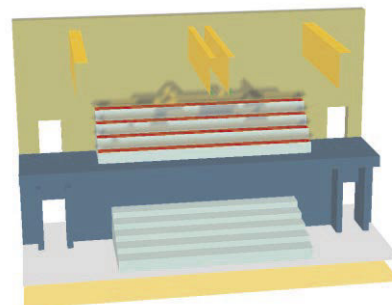
$t = 300$ s



$t = 600$ s

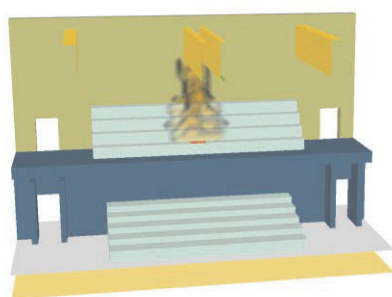


$t = 900$ s

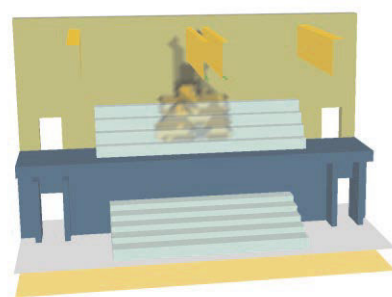


b) Požarni scenarij "zgoraj sredina mat"

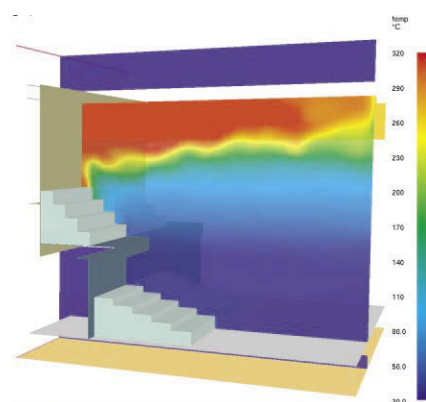
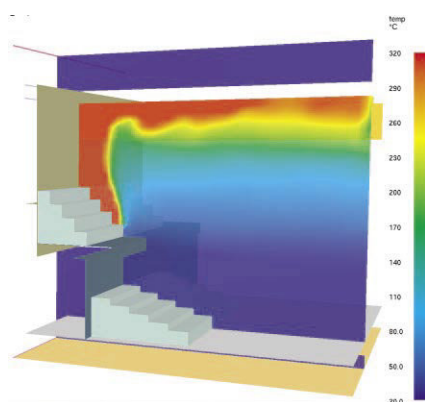
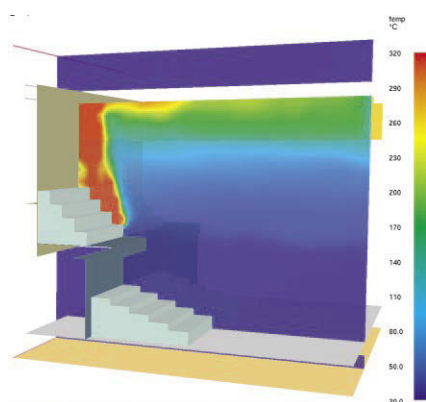
$t = 300$ s



$t = 600$ s



$t = 900$ s



Slika 10 • S programom FDS napovedan (a) razvoj požara v požarnem scenariju zgoraj sredina, (b zgoraj) razvoj požara v požarnem scenariju "zgoraj sredina mat" in (b spodaj) temperatura zraka v okolici nosilca N5 v požarnem scenariju "zgoraj sredina mat" pri časih 300 s, 600 s in 900 s

4 • SKLEP

V tem delu prispevku sta na primeru športne dvorane prikazana dva načina modeliranja požara v računalniškem programu FDS. Predstavljene so potrebni vhodni podatki in anali-

ziranih osem požarnih scenarijev. V šestih je požar modeliran s predpisanim potekom *HRR* in upoštevana je predpostavka, da predvideni gorljivi elementi v prostoru (posamezna

tribuna) zagorijo istočasno. V dodatnih dveh požarnih scenarijih pa je dopuščena možnost postopnega širjenja požara po površini gorljivega elementa (tribuna) ob upoštevanju materialnih lastnosti, debeline in temperature vžiga materiala polipropilen. Rezultati analiz so prikazani na grafih časovnega razvoja *HRR* in maksimalne adiabatne temperature na

površini lepljenih lesenih nosilcev. Pomembna je ugotovitev, da sta zaradi neenakomernega temperaturnega polja vzdolž lepljenih lesenih nosilcev z vidika njihove požarne odpornosti kritična dva požarna scenarija, in sicer na delu nosilca nad gorljivo tribuno tisti, v katerem je požar modeliran z upoštevanjem karakteristik gorljivih elementov, po preostali površini nosilca pa tisti, kjer je požar modeliran na najenostavnejši način, tj. s predpisanim potekom *HRR*. To pomeni, da iz rezultatov ne moremo izpeljati splošne potrditve

pričakovanja, da je v vseh primerih merodajen tisti požarni scenarij, kjer je požar modeliran nekoliko podrobneje, tj. poleg predpisanega poteka *HRR* so upoštevane še karakteristike gorljivega materiala. Poleg zadostne mere ustreznega predznanja terjajo podrobnejši modeli namreč tudi določitev ustreznih karakteristik materialov, ki so za rezultat simulacije običajno odločilnega pomena. Te karakteristike je nemalokrat mogoče pridobiti le iz usmerjenih eksperimentov. V primeru, da ustrezni eksperimentalni podatki niso na voljo, lahko

postane zanesljivost rezultatov podrobnejšega modeliranja požara v FDS vprašljiva. V drugem delu prispevka, ki je v pripravi, bosta predstavljeni še druga faza, v kateri iz tukaj prikazanega napovedanega poteka maksimalne adiabatne temperature na površini lepljenega lesenega nosilca določimo spreminjanje temperature v karakterističnih prečnih prerezi vzdolž nosilca, in tretja faza požarne analize, v kateri z uporabo naprednih računskih metod po standardu SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005) preverimo še požarno odpornost lepljenega lesenega nosilca.

5 • ZAHVALA

Prispevek je nastal v okviru operacije KROP 13: Razvoj in implementacija projektantskih metod v gradbeno podjetje z lastno projektivo

in operativo – Priložnost za konkurenčno prednost na trgu, št. OP13.2.1.1.07.0018, ki jo po pogodbi št. C2130-14-090118 financirata

Republika Slovenija, Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo, in Evropska unija, Evropski socialni sklad.

6 • LITERATURA

Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, John Wiley and Sons, str. 33, 1998.

GiiP, d. o. o., *Študija požarne varnosti*, Večnamenska dvorana ŠPIC D, 2011.

Hietaniemi, J., Mikkola, E., *Design Fires for Fire Safety Engineering*, VTT Working Papers 139, str. 73, 2010.

Hopkins, D., *Predicting the ignition time and burning rate of thermoplastics in the cone calorimeter*, University of Maryland, NIST-GCR-95-677, str. 49, 1995.

NIST, VTT, *Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV)*, 2014.

SIST EN 1991-1-2:2004 – Evrokod 1 – Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije, 2004.

SIST EN 1995-1-2:2005 – Evrokod 5 – Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila – Projektiranje požarno varnih konstrukcij, 2005.

TE, *Thunderhead Engineering, PyroSim User Manual*, 2014.

Tewarson, A., *Generation of Heat and Gaseous, Liquid and Solid Products in Fires*, The SFPE Handbook for Fire Protection Engineering, Section 3, Chapter 3-4, 2008.

Wang, Y., Burgess, I., Wald, F., Gillie, M., *Performance-Based Fire Engineering of Structures*, CRC Press, 369 str., 2013.

ZGO-1, *Zakon o graditvi objektov*, Uradni list RS, št. 110, 2002.

ZVPoz, *Zakon o varstvu pred požarom*, uradno prečiščeno besedilo, Uradni list RS, št. 3, 2007.