

Primljen / Received: 17.3.2024.

Ispravljen / Corrected: 31.7.2024.

Prihvaćen / Accepted: 16.8.2024.

Dostupno online / Available online: 10.12.2024.

Numerička analiza učinka tipova dvostrukih fasada na ponašanje u slučaju požara

Autori:

Doc.dr.sc. **Mehmet Akif Yıldız**, dipl.ing.arch.

Sveučilišta Sakarya, Turska

Fakultet umjetnosti, dizajna i arhitekture

akifyildiz@sakarya.edu.tr

Autor za korespondenciju

Dr.sc. **Merve Ertosun Yıldız**, dipl.ing.arch.

Sveučilišta Sakarya

Fakultet umjetnosti, dizajna i arhitekture

merveertosun@sakarya.edu.tr

Pregledni rad

Mehmet Akif Yıldız, Merve Ertosun Yıldız

Numerička analiza učinka tipova dvostrukih fasada na ponašanje u slučaju požara

U ovom je radu uz primjenu numeričkog modela istraženo ponašanje dvostrukih fasada (engl. *Double Skin Façade* - DSF) u uvjetima požara, koje se razlikuju prema prirodnome protoku zraka. Četiri sustava dvostrukih fasada u ovisnosti o tipu projektirane šupljine - višekatni, koridorski, s otvorom i kao prozorska kutija - primijenjena su u projektiranoj trokatnoj prototipskoj poslovnoj zgradi, pri čemu su širenje dima i razvijene temperature analizirani simulacijama. Za višekatne i DSF sustave s otvorom koji tvore neprekidnu šupljinu u okomitome smjeru mora se uzeti u obzir učinak dimnjaka. Kod svih analiziranih DSF sustava temperatura u prostoru ureda nije dosegula vrijednosti rizika navedene u scenarijima. Za razliku od njih, sustavi sa smanjenim obujmom šupljeg prostora povezanog s prostorijom u kojoj je izbio požar uzrokovali su porast sobne temperature.

Ključne riječi:

dvostruka fasada, širenje dima, numerički model, razina temperature, dizajn šupljine

Research Paper - Subject review

Mehmet Akif Yıldız, Merve Ertosun Yıldız

Numerical analysis of the effect of double-skin façade types on fire behaviour

This study investigated the fire safety effect of double-skin façade (DSF) types that vary according to natural airflow through a numerical model. According to the cavity design, four DSF systems-multi-storey, corridor type, shaft type, and window-box type-were applied in the designed three-storey prototype office building, with the smoke spread based on fire and temperature levels analysed through simulation. Multi-storey and shaft-type DSF designs, which create a continuous cavity in the vertical direction, involve considering the chimney effect. In all the DSF designs, the office temperature did not reach the risk levels in the scenarios. By contrast, designs with a reduced cavity volume associated with the fire room caused the ambient temperature to increase.

Key words:

double-skin façade type, smoke spread, numerical model, temperature level, cavity design

1. Uvod

Uspostavljanje odnosa između izgrađenog i vanjskog okoliša odgovarajućim kriterijima projektiranja jedno je od temeljnih načela održivosti. Uz zdrav i ugodan životni prostor rješavanje problema vezanih uz klimatske promjene postalo je jedan od ključnih prioriteta u građevinske sektoru. Posljednjih se godina gradi sve više zgrada kod čijeg se projektiranja uzimaju u obzir klimatski podaci vezani uz djelovanje Sunca, vjetra, vlage i tlaka zraka u cilju uštede energije i resursa. U skladu s time projektiranje ovojnice zgrada, u kojima se prvi put uspostavlja odnos između klimatskih podataka i zgrade, karakterizira činjenica da tradicionalne izvedbe ne odgovaraju globalnim potrebama. Za fasadu, najkritičniju komponentu ovojnice zgrade, dvostruke fasade (engl. *Double Skin Façade* – DSF) pojavile su se kao alternativa tradicionalnih i jednostrukih ovješanih fasada jer omogućuju kontrolirano uvođenje vanjskih uvjeta okoliša u unutarnji prostor. Dvostruka fasada poželjna je u energetski učinkovitim konstrukcijama zbog svoje toplinske izolacije, regulacije tlaka vjetra i prirodne ventilacije koja omogućuje stvaranje prozora čak i na višim katovima.

Istraživanja su provedena uz pomoć numeričkog modeliranja kako bi se istražio doprinos DSF sustava smanjenju gubitka topline prirodnim odzračivanjem ili ljuskama. Ta istraživanja pokazuju da dizajn šupljine DSF-a uzrokuje to da se zrak uzet iz vanjskog okruženja uvodi u zatvorene prostore različitih dimenzija i orijentacija. Karakteristike šupljine DSF-a utječu na brzinu strujanja zraka ovisno o učinku dimnjaka i mijenjaju prijenose unutarnjeg i vanjskog zraka pri različitim brzinama. Osim toga simulacije su pokazale da se učinkovitost potrošnje energije različitih vrsta DSF-a mijenja ljeti i zimi [1-4].

DSF, koji se sastoji od vanjskog sloja, unutarnjeg sloja i zračne šupljine između tih dvaju slojeva, omogućuje kontrolirani prodor vanjskih zračnih struja u unutrašnjost i zaštitu od Sunca. Prirodni zrak koji ulazi u šupljinu DSF-a kroz otvor u vanjskom sloju uvlači se u unutarnji prostor kroz otvore za prozračivanje u unutarnjem sloju. Osim toga zagrijani i onečišćeni zrak iz unutrašnjosti uvlači se u šupljinu kroz ventilaciju na vrhu unutarnjeg sloja i ispušta na vrhu vanjskog sloja zbog učinka dimnjaka, koji se javlja kao posljedica toplinskih razlika u šupljini. Šupljina DSF-a, koja ima važnu ulogu u prirodnome prozračivanju upravljajući protokom zraka, također utječe na kretanje dima, plamena i drugih otrovnih plinova koji se stvaraju u požaru. Zato bi mjere prirodne ventilacije i zaštite od požara u sustavima s dvostrukom fasadom trebalo zajedno vrednovati. Poduzimanje potrebnih mjera opreza u fazi projektiranja kroz rješavanje sigurnosnih rizika od požara u sustavima s dvostrukom fasadom, koji se razlikuju ovisno o tome kako se tehnologija razvija, osigurava da su rizici svedeni na najmanju moguću mjeru tijekom upotrebe zgrade. Glavne metode dokazivanja ispunjenosti zahtjeva za sigurnost u slučaju požara u fazi projektiranja jesu numeričko modeliranje i ispitivanja u velikome mjerilu. Iako se u dostupnoj literaturi mogu pronaći istraživanja u kojima su primijenjene obje navedene metode,

numeričko modeliranje daje učinkovite i brze rezultate u usporedbi s ispitivanjima u velikome mjerilu, koja su ograničena troškovima, vremenom i projektiranjem ispitivanja. Zato je u ovome radu ponašanje sustava s DSF-om u požaru analizirano pomoću dinamičkog simulatora požara i modela simulacije požara. Glavna područja istraživanja u literaturi koja analizira rizike od požara u sustavima s DSF-om primjenjujući numeričke modele i cjelovite eksperimente su sljedeća:

- širenje dima kroz šupljinu u vanjski okoliš i između prostora
- opasnost od eksplozija i pucanja staklenih materijala u unutarnjim i vanjskim ljuskama uslijed visokih temperatura i tlaka
- klasifikacija utjecaja roleta postavljenih u šupljinu za zaštitu od Sunca na širenje požara.

Uobičajeno se kod DSF sustava u uvjetima požara analiziraju temperature i tlak te širenje plamena i dima. Modeliranje pomoću računalne dinamike fluida (engl. *Computational Fluid Dynamics* – CFD) primijenjeno je za numeričku analizu širenja požara pod utjecajem šupljine DSF-a, pri čemu djeluje prirodan protok zraka. Neki su radovi istraživali širenje dima mijenjanjem širine šupljine između 0,2 i 2 m. Sužavanje šupljine povećava učinak dimnjaka u šupljini i uzlaznu brzinu strujanja [5-8]. Ako je širina šupljine na donjoj granici, dim brzo ispunjava cijelu šupljinu i širi se prema gore. Međutim, povećanjem širine šupljine dim se ponajprije usmjerava prema vanjskom zidu. Ako je šupljina projektirana na širinu od 2 m ili veću, dim će teško doprijeti do vanjskog zida i bit će usmjeren prema gore duž unutarnjeg zida. Međutim, na kretanje dima u šupljini utječu brzina otpuštanja topline (engl. *heat release rate* – HRR), uvjeti ventilacije, fizička svojstva prostora i širina šupljine. U eksperimentalnim i numeričkim istraživanjima o učincima širine šupljine, brzine otpuštanja topline i ventilacijskih otvora na širenje požara utvrđeno je da su HRR i geometrija ventilacijskog otvora za šupljinu određene širine dva odlučujuća čimbenika za stvaranje dima [9-11].

Staklo koje tvori prozirne površine na fasadama gubi čvrstoću i puca pri visokim temperaturama, što utječe na razvoj požara jer se dim širi po staklenoj površini [12]. S povećanjem temperature stakla u šupljini DSF-a dolazi do pucanja u skladu sa svojstvima stakla. Pukotine koje se pojavljuju na unutarnjem staklu predstavljaju rizik za razvoj požara, dok pukotine na vanjskom staklu omogućuju izlazak dima u vanjski okoliš [13]. U nekim su istraživanjima ispitana fizikalna svojstva stakla kako bi se ispitalo ponašanje jednostrukog, dvostrukog, kaljenog i ravnog stakla u uvjetima požara, a rezultati pokazuju da do pucanja dolazi pri temperaturi od 450 °C za jednostruko staklo, 600 °C za dvostruko staklo i 800 °C za kaljeno i dvostruko staklo [14-16]. Osim toga, zbog smanjenja širine zazora, vrijeme pucanja stakla skraćeno je zbog brzog porasta temperature u zazoru. Što se tiče ponašanja u uvjetima požara u DSF sustavima, pri projektiranju treba razlikovati unutarnje i vanjsko staklo. Osim toga primjena kaljenog stakla debljine 12 mm ili veće u unutarnjem staklu sprječava širenje požara koji nastaje u zatvorenome prostoru.

Elementi za zasjenjivanje postavljeni su u šupljinu DSF-a kako bi se smanjilo rashladno opterećenje zgrade i spriječio neželjen solarni prinos koji utječe na razvijene temperature i širenje dima tijekom požara. Numerička istraživanja koja ne uzimaju u obzir svojstva zapaljivosti elemenata za zasjenjivanje pokazuju da položaj i kut elemenata u šupljini utječu na razvoj požara. Sjenila postavljena pod kutovima između 0° i 90° u blizini unutarnjeg i vanjskog stakla utjecala su na vrijeme loma unutarnjeg stakla i usmjeravala širenje dima, pri čemu se najviša temperatura površine unutarnjeg stakla kretala između 283°C i 840°C , ovisno o položaju roleta i kutu otvaranja letvice. Bez roleta najviše temperature unutarnje staklene površine kretale su se između 468°C i 614°C [17-19].

U ovome stoljeću bilježi se porast broja istraživanja koja se bave ponašanjem DSF sustava u požaru, posebno učincima materijala u DSF sustavima, fizikalnim svojstvima šupljine, fizikalnim svojstvima prostora, veličinom požara i lokacijom požara na razvoj požara. U skladu s time u ovome istraživanju provedena je numerička analiza učinaka različitih tipova DSF-a, projektiranih prema protoku zraka u šupljini, na razvoj požara.

2. Materijal i metoda

Ako se konstrukcije DSF-a razmatraju u kontekstu opasnosti od požara, najkritičnije područje rizika jest ono gdje zračna struja nastaje u okomitoj šupljini između unutarnjeg i vanjskog sloja. Uzlazna nepravilna strujanja zraka nastala u okomitoj šupljini izravno su utjecala na kretanje dima i otrovnih plinova tijekom požara. Iako se za klasifikaciju tipova DSF-a primjenjuju različite metode, u ovome istraživanju analiziran je razvoj dima, temperature i plamena različitih tipova DSF-a u odnosu na zračnu šupljinu koja ima najveći utjecaj na sigurnost od požara te je provedena usporedba prema tipu fasade.

U dostupnoj literaturi i ako se uzme u obzir projektiranje prirodne ventilacije ovisno o protoku zraka u praksi DSF sustavi dijele se na višekatne, koridorske, na one s otvorima i na one s prozorskom kutijom [16]. Na temelju hipoteze da bi ti tipovi DSF-a različito utjecali na prirodnu ventilaciju, udobnost u zatvorenome prostoru i sigurnost od požara simulacije i numeričke analize provedene su primjenom pristupa prema ciljanim svojstvima (engl. *performance-based*). U ovome radu, na temelju podataka iz



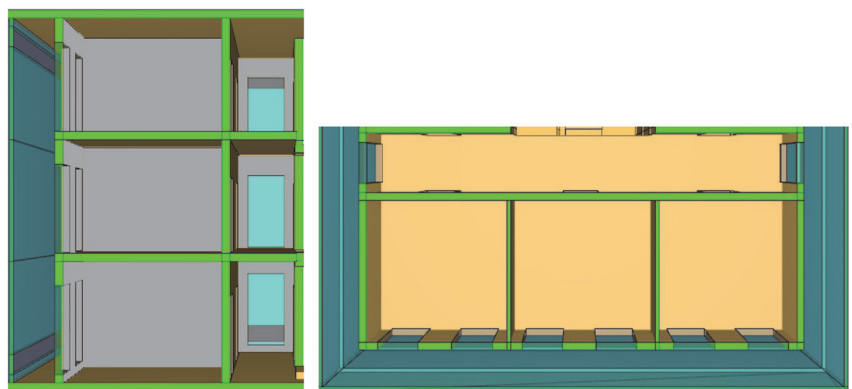
Slika 1. Faze modela temeljenog na uspješnosti

literature, numeričkim modelom istraženo je na koji način tipovi DSF-a pridonose prirodnoj ventilaciji te je ispitano njihovo ponašanje u uvjetima požara. Budući da se dim i drugi otrovni plinovi tijekom požara kreću paralelno sa strujanjem zraka, ponašanje u uvjetima požara za predmetni model vrijedit će i za projektiranje prirodne ventilacije. Faze istraživanja prikazane su na slici 1.

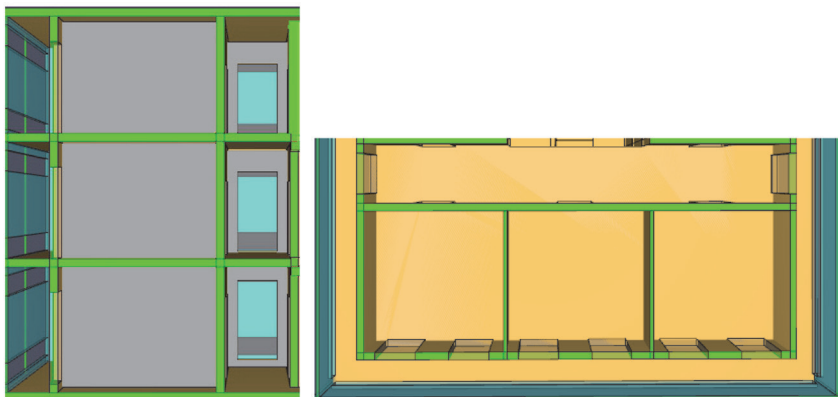
2.1. Utvrđivanje tipova dvostrukih fasada

Višekatni tip

U višekatnome tipu dvostrukih fasada (DSF-a) šupljina između vanjskog i unutarnjeg sloja nastavlja se neprekinuto kroz cijelu zgradu. Zrak koji ulazi u šupljinu kroz ventilacijske otvore smještene na podlozi vanjskog sloja zagrijava se, diže i ispušta iz gornje točke vanjskog sloja [20, 21]. Ventilacijskim otvorima željenih dimenzija u unutarnjemu sloju neprekinuti protok zraka u šupljini usmjerava se u unutarnje prostore. U tim sustavima postignuta je dobra izvedba u pogledu konstrukcije i akustike jer postoje samo dva otvora u vanjskome sloju u prizemlju i na višim razinama [22] (slika 2.).



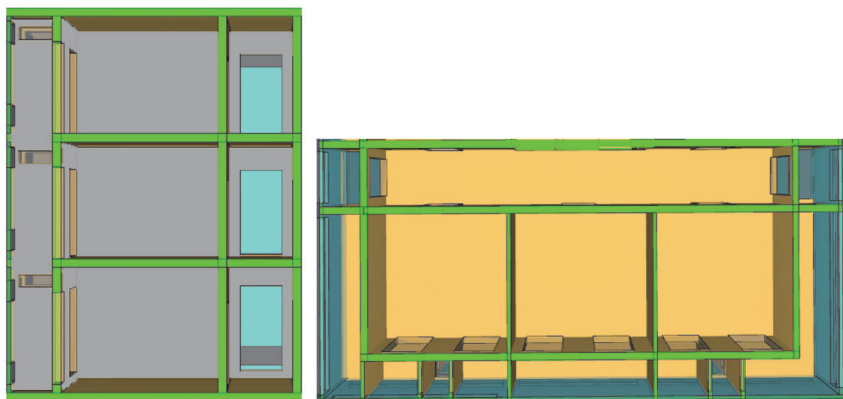
Slika 2. Presjek i plan višekatnog tipa dvostrukih fasada



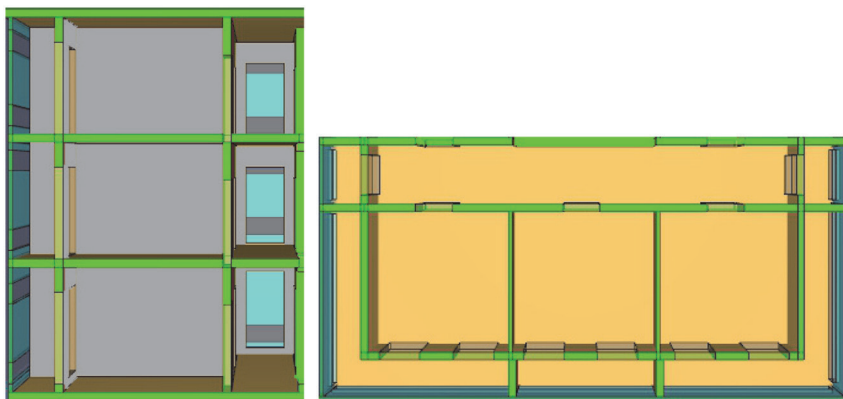
Slika 3. Presjek i nacrt koridorskog tipa dvostrukih fasada (DSF-a)

Koridorski tip

U koridorskim sustavima DSF-a šupljina je vodoravno podijeljena na svakome katu, s okomitim prijelazom između katova [23]. U vanjskoj ljusci otvori za zrak smješteni su kao ulazi i izlazi na svakome katu, osiguravajući da se svaki kat prozračuje zasebno. Ti sustavi omogućuju da se svježi zrak uvodi u šupljinu s donje razine svakoga kata, dok se onečišćeni i zagrijani zrak iz šupljine odvodi s gornje razine. Povećanje broja ventilacijskih otvora u vanjskoj ljusci uzrokuje miješanje čistog i prljavog zraka te poteškoće sa zvukom [20, 22] (slika 3.).



Slika 4. Presjek i nacrt dvostrukih fasada (DSF-a) s otvorom



Slika 5. Presjek i plan dvostrukih fasada (DSF-a) s prozorskom kutijom

Tip s otvorom

Sustavi DSF-a s otvorom, koji omogućuju protok zraka po katovima na temelju učinka dimnjaka u ventilacijskome kanalu, temelje se na kombinaciji višekatnog i koridorskog tipa DSF-a. Svježi zrak, koji u ventilacijsku šupljinu ulazi kroz otvore u vanjskoj ljusci na svakome katu, zagrijava se, diže i usmjerava u središnji kanal u visini zgrade. Protok je zraka brz jer su ti kanali uži od okomitih šupljina u drugim sustavima. To otežava kontrolu zraka u visokim zgradama [24, 25] (slika 4.).

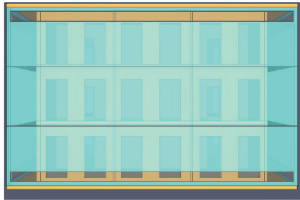
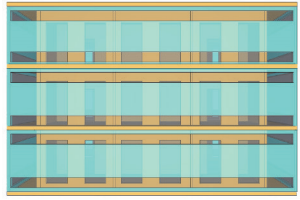
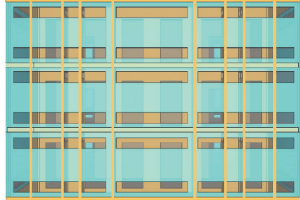
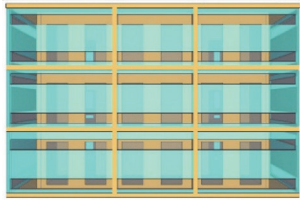
Tip s prozorskom kutijom

U sustavima DSF-a s prozorskom kutijom svaki je prostor vodoravno i okomito odvojen, uspostavljajući neovisan odnos sa šupljinom DSF-a. U tome sustavu otvori za ulazak i izlazak zraka u vanjskoj ljusci odvojeni su [20]. Za razliku od koridorskih i višekatnih tipova DSF-a, svaki prostor u tome sustavu osigurava ventilaciju, a da nisu međusobno povezani. Međutim, kratki vodoravni i okomiti razmaci između rešetki povećavaju opasnost od raspodjele zagrijanog i onečišćenog zraka između prostora. Osim toga povećanje broja rešetki u vanjskoj ljusci otežava cirkulaciju zraka i kontrolu buke [25] (slika 5.).

2.2. Svojstva modela

Prototip zgrade dimenzija 14 × 9 m imao je ukupnu tlocrtnu površinu od 126 m², tri kata i ukupnu visinu od 9 m. Zbog potrebe učinkovite kontrole prirodnog osvjetljenja i ventilacije uredima se pristupa kroz hodnik duž središnje osi zgrade (predviđene kao ured). Projektirana je dvostruka fasada koja okružuje cijelu zgradu i ima šupljinu širine od 1 m. Dok vanjska ljuska ima ulaze i izlaze za zrak na različitim lokacijama u skladu s tipom dvostruke fasade, ventilacijski otvori u unutarnjoj ljusci projektirani su na 90 × 110 cm, od čega dva po uredskoj jedinici. Kako bi se istražio visok rizik od razvoja požara, pretpostavljeno je da su ulazi i izlazi zraka, ventilacijski otvori i vrata prostorija otvoreni u svim scenarijima. S obzirom na to da su četiri vrste dvostruke fasade usmjerene na ispitivanje učinka na razvoj požara, fizikalna svojstva prototipa zgrade smatraju se nepromjenjivim vrijednostima projektirane konstrukcije. Uz nepromjenjiva projektna obilježja scenariji požara koji uključuju više katova, koridora, otvora, prozorskih kutija i dvostrukih fasada navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Scenariji modela

Scenarij	Tip fasade	Mjesto ulaza zraka	Mjesto izlaza zraka	Slika
1	Višekatni	Donja razina prizemlja	Gornja razina najvišega kata	
2	Koridor	Niža razina na svakome katu	Najviša razina na svakome katu	
3	Otvor	Niža razina na svakome katu	Najviša razina na svakome katu i razina stropa na dijelovima s otvorima	
4	Prozorska kutija	Niža razina na svakome katu	Najviša razina na svakome katu	

2.3. Određivanje nepouzdanosti modela

Prilikom modeliranja požara nekoliko čimbenika nepouzdanosti, uključujući određivanje metode numeričkog proračuna, računalnog programa i potrebnih primarnih resursa, mora biti odabrano u skladu s projektiranom konstrukcijom za provedbu scenarija i preciznost rezultata.

2.3.1. Odabir numeričkog modela

Za predviđanje požara upotrijebljeni su različiti modeli požara. Algebarski modeli najjednostavnije su matematičke jednadžbe koje se primjenjuju za predviđanje vrijednosti varijabli kao funkcija u prostoru i vremenu. Zonski su modeli složeniji, pojednostavljuju ponašanje sustava pretpostavljajući da su dani volumen ili područje homogeni, uniformni ili dobro izmiješani. Najsloženiji su modeli računalne dinamike fluida (engl. *Computational Fluid Dynamics* - CFD), poznati i kao modeli polja [26].

U modelu CFD parcijalne diferencijalne jednadžbe (Navier-Stokesove jednadžbe) termodinamičkih i aerodinamičkih varijabli rješavaju se u više točaka u odjeljcima [27]. CFD model za požare unutarnjih prostora primijenjen je za modeliranje

požara prema tzv. *performance-based* pristupu, jer je prikladan na toplinske tokove niske brzine, s težištem na prijenosu dima i topline u požaru.

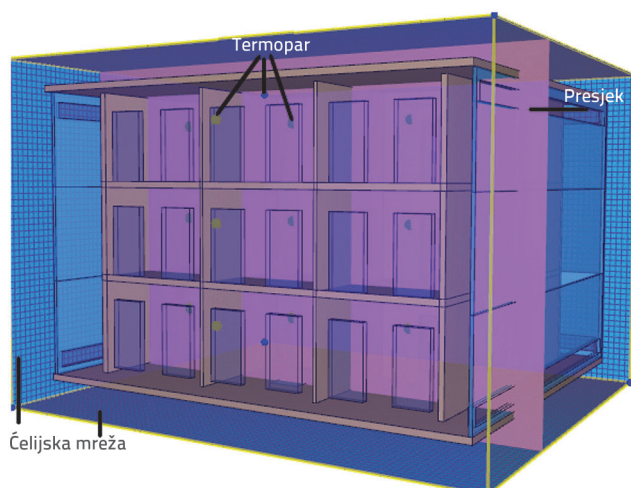
Za modeliranje požara upotrijebljen je dinamički požarni simulator (engl. *Fire Dynamic Simulator* - FDS), softver otvorenoga koda koji se upotrebljava za simulaciju modela na temelju računalne dinamike fluida. FDS upravlja i rješava ulazne parametre i jednadžbe preko tekstualnih datoteka i bilježi korisnički definirane izlazne podatke u datoteke. Istodobno program Smokeview podržava FDS izlazne datoteke i pomaže grafikom i animacijama. Budući da je FDS usmjeren na tekstualne datoteke, razvijeni su različiti programi trećih strana za stvaranje tekstualnih datoteka koje sadržavaju ulazne parametre koji su potrebni za FDS. U ovom je radu primijenjen simulacijski program PyroSim koji uključuje funkcije FDS-a i Smokeviewa te omogućuje geometrijsko uređivanje i označavanje granica. Program za simulaciju PyroSim jest korisničko sučelje koje rješava CFD jednadžbe u pozadini i ima softver otvorenoga koda FDS.

U mnogim su istraživanjima provedene evaluacije kako bi se valjanost programa za simulaciju požara potvrdila usporedbom stvarnih rezultata ispitivanja požara s rezultatima dobivenima

pomoću simulacijskih programa. FDS daje razumna predviđanja temperature i protoka kada se usporedba temperature plina, piroliza goriva i brzina izgaranja primjereno modeliraju. Osim toga rezultati dobiveni FDS-om za atrij i velika područja u skladu su s eksperimentalnim rezultatima. Zato se FDS može upotrijebiti za brzu provjeru ponašanja nekog sustava u požaru tijekom projektiranja [28-31].

2.3.2. Određivanje prostornih polja i mjernih uređaja

Za izradu trodimenzionalnog modela u programu PyroSim postavljeno je 308.000 ćelija, svaka veličine 0,2 × 0,2 × 0,2 m, kako bi se odredila ograničenja. Odabir odgovarajuće mrežne strukture i dimenzija ćelija kritičan je za razlučivost modela i točnost izlaznih vrijednosti. Presjeci su postavljeni u smjeru X2 za mjerenje temperature, kretanja dima i brzine, s termoparovima za mjerenje temperature na razini poda ureda i šupljine DSF-a (slika 6.).



Slika 6. Prikaz termoparova, mreže i presjeka u računalnome modelu

2.3.3. Projektna obilježja požara

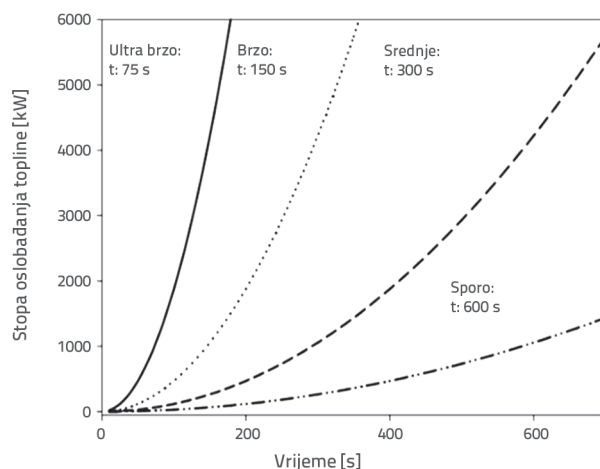
Brzina oslobađanja topline (engl. *heat release rate* - HRR) i brzina razvoja požara za bilo koju stavku izraženi su krivuljom razmjernoj kvadratu vremena. Krivulja je definirana najvećom brzinom oslobađanja topline i vremenom potrebnim za postizanje zadane vrijednosti brzine oslobađanja topline. Za projektiranje požara primijenjena je pojednostavljena jednačina za unos podataka o širenju požara u numerički model:

$$Q = \alpha t^p \quad (1)$$

gdje je:

- Q - brzina oslobađanja topline Btu/s [kW]
- α - koeficijent rasta požara Btu/s³ [kW/s²]
- t - vrijeme od nastanka požara [s]
- p - pozitivan eksponent.

Prema normi NFPA 92 B koja obrađuje sustave upravljanja dimom u trgovačkim centrima, atrijima i velikim prostorima, brzina porasta požara klasificirana je kao spora, srednja, brza ili ultrabrza. Referentni HRR za konstrukcije iznosi 1055 kW. U skladu s time krivulje rasta požara prikazane su na slici 7. za spore, srednje, brze i ultrabrze brzine porasta kako bi se dosegao referentni HRR od 1055 kW [32]. Na temelju standarda NFPA 92 kao referentni HRR odabrana je vrijednost od 1055 kW, brzina porasta požara klasificirana je kao brza, a koeficijent rasta požara koji se unosi u program za numeričko modeliranje iznosi 0,047 kW/s² prema jednačini.



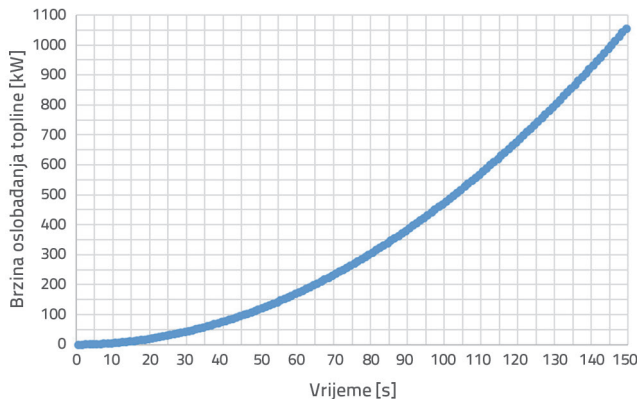
Slika 7. Brzina porasta požara u odnosu na referentni HRR za konstrukcije [33]

U uredu, koji se nalazi na središnjoj osi u prizemlju, kao izvor požara odabran je materijal površine od 1 m² na podu, na bazi poliuretanske pjene. Uzrok požara jest poliuretan GM27 (fleksibilna poliuretanska pjena) koji se sastoji od 1 atoma ugljika, 1,7 atoma vodika, 0,3 atoma kisika i 0,08 atoma dušika [26]. Utjecaj klimatskih parametara kao što su lokacija i prevladavajući vjetar nisu uzeti u obzir pri projektiranju. Svojstva projektiranog požara, čija je temperatura okoline utvrđena na stalnih 10 °C prije paljenja, prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Projektne značajke modela

Značajka	Vrijednost
Vrsta reakcije	Poliuretan GM27
Širenje požara	Brzo
Proizvodnja dima	0,198 g/g
Proizvodnja CO	0,042 g/g
Brzina oslobađanja topline (HRR)	1055 kW
Koeficijent porasta požara	0,047 kW/s ²
Trajanje simulacije	150 s
Temperatura okoline	10 °C

Promjena HRR-a za 150 sekundi s koeficijentom porasta požara od $0,047 \text{ kW/s}^2$ prema jednadžbi 1 i slici 7. za t^2 požara prikazana je na slici 8. za provjeru modela.



Slika 8. HRR krivulja za model

2.3. Nalazi modela

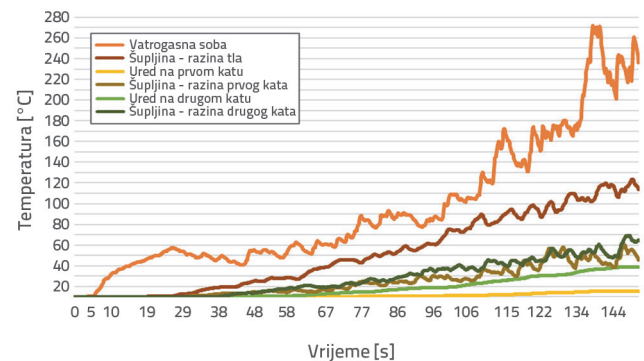
Analize dima i temperature za četiri scenarija prikazane su u tablici 1.

Prvi scenarij: višekatni model DSF-a

Razine slojeva dima u različitim vremenima za prvi scenarij u kojemu se DSF šupljina nastavljala vodoravno i okomito na četiri strane zgrade navedene su u tablici 3. Kako se gustoća dima u prostoriji u kojoj je izbio požar povećavala, dim je prolazio od vrata do hodnika i stubištem se širio prema gore. Dim se nakon 60 sekundi proširio u ured na gornjemu katu, u smjeru osi prostorije u kojoj je izbio požar i nakon 70 sekundi u urede na gornjemu katu. Potom se širenje ubrzalo na pročelju prostorije u kojoj je izbio požar. Ta je prostorija bila ispunjena dimom po završetku

gorenja. S obzirom na ispuštanje dima u vanjski okoliš kroz otvore za zrak koji su se nalazili na gornjoj razini vanjske ljuške, a koji su se nastavljali duž četiriju fasada, širenje dima bilo je ograničeno na pročelje na kojemu je požar izbio. Međutim, stubišni prostor u unutrašnjosti, koji ima neprekidan okomiti šuplji prostor, uzrokovao je širenje dima po unutaršnjim prostorima.

S obzirom na to da tlak raste s porastom temperature, a da učinak dimnjaka raste ovisno o tlaku, temperatura u šupljini i učinak dimnjaka izravno su proporcionalni. Što je temperatura na gornjoj razini šupljine bila viša, to je protok zraka u šupljini bio usmjereniji prema gore. Temperature razvijene u uredu i u šupljini prikazane su na slici 9., s najvišom zabilježenom temperaturom okoline od $271,67 \text{ }^\circ\text{C}$. U uredima je najviša temperatura iznosila $38,79 \text{ }^\circ\text{C}$, i to na gornjemu katu prostorije koja je gorila, dok je temperatura šupljina na razini navedene prostorije, na razini prizemlja, dosegla $123,59 \text{ }^\circ\text{C}$ i $69,41 \text{ }^\circ\text{C}$ na razini zadnjega kata.



Slika 9. Temperaturne vrijednosti izmjerene termoparovima za prvi scenarij

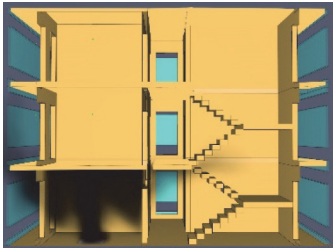
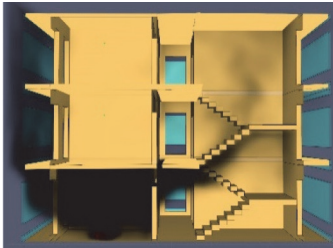

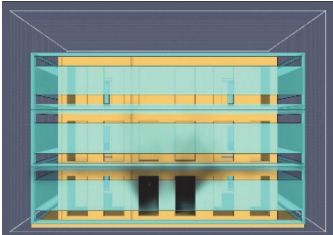
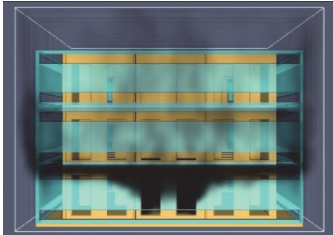
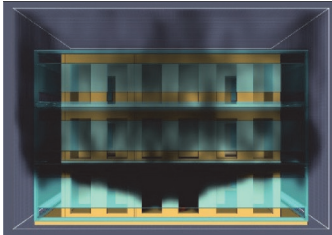
Drugi scenarij: model koridorskog tipa DSF-a

U tablici 4. prikazane su razine slojeva dima razvijenog u različitim vremenima za drugi scenarij, odnosno za sustav

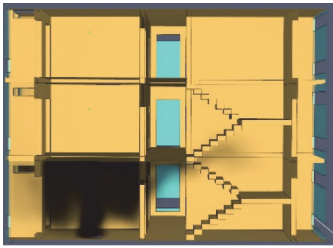
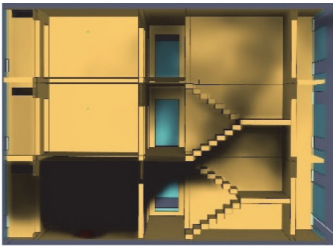
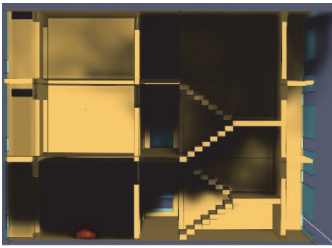
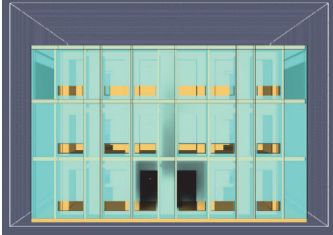
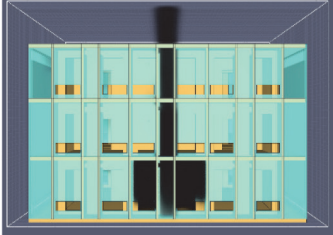
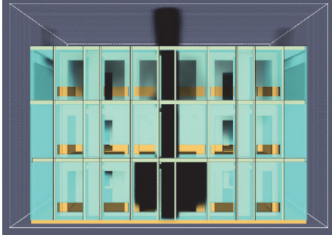
Tablica 3. Širenje dima u prvome scenariju za sustav dvostrukih fasada višekatnog tipa

	40 s	80 s	120 s
Dio zgrade			
Fasada			

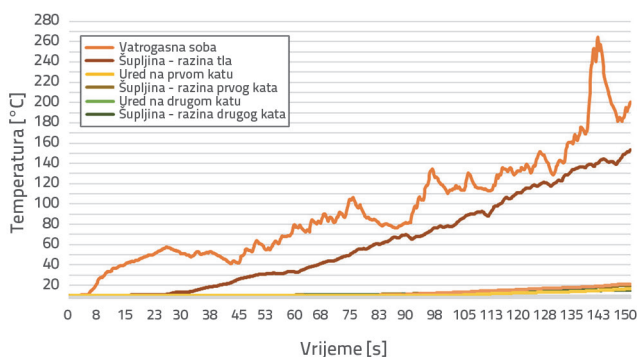
Tablica 4. Širenje dima u drugome scenariju za sustav dvostrukih fasada koridorskog tipa

	40 s	80 s	120 s
Dio zgrade			
Fasada			

Tablica 5. Širenje dima u trećemu scenariju za sustav dvostrukih fasada s otvorom

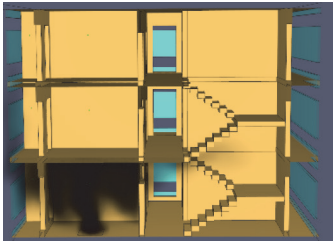
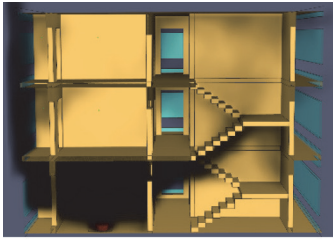
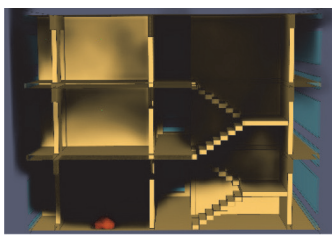
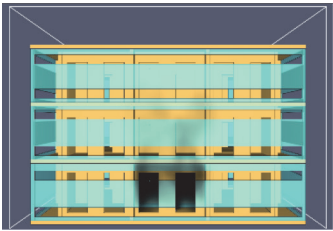
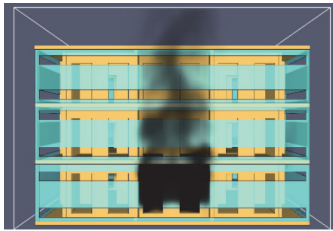
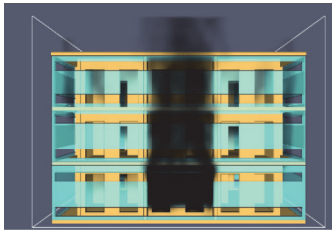
	40 s	80 s	120 s
Dio zgrade			
Fasada			

dvostruke fasade koridorskog tipa, koji uzrokuje neprekinute šupljine vodoravno duž razina katova u zgradi. Dim koji se iz prostorije u kojoj je izbio požar širio u šupljinu isprva je dosegno vanjštinu zgrade na izlazu za zrak vanjske ljuske zbog prekinutog šupljeg prostora na razini kata. Kako se gustoća dima u šupljini povećavala, došlo je do vodoravnog širenja uzduž šupljine, pri čemu je zbog ventilacijskih otvora širenje bilo ograničeno na fasadu uz prostoriju u kojoj je gorio požar. S obzirom na to da se dim mogao širiti duž fasade samo u ograničenoj mjeri, širenje dima u unutarnje prostorije u stubištu bilo je vrlo slabo. Na slici 10. prikazana je temperatura okoline, ureda i šupljine u drugome scenariju. Zahvaljujući vodoravnim brisolejima koji osiguravaju da plamen ne dosegne gornje točke šupljine, temperature u gornjim točkama i uredima bile su smanjene.



Slika 10. Temperaturne vrijednosti izmjerene termoparovima za drugi scenarij

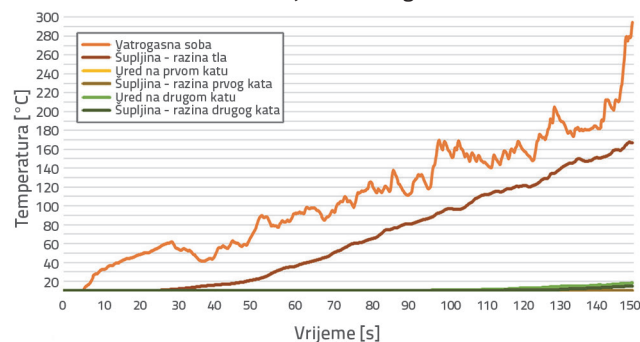
Tablica 6. Širenje dima u četvrtome scenariju za sustav dvostrukih fasada s prozorskom kutijom

	40 s	80 s	120 s
Dio zgrade			
Fasada			

Najviša temperatura okoline iznosila je 264,39 °C, a najviša temperatura u šupljini 153,76 °C, i to na razini kata. Budući da se dim i plamen nisu proširili kroz šupljinu do gornjih katova ni okomito, temperatura u uredima blizu prostorije u kojoj je izbio požar iznosila je 21,17 °C. Temperatura u uredima na ostalim katovima nije rasla.

Treći scenarij: model DSF-a s otvorom

Razine slojeva dima razvijenog u različitim vremenima za sustav tipa DSF-a s otvorima, koji omogućava ispuštanje zagađenog zraka iz prostora kroz ulazni otvor projektiran u šupljini DSF-a, navedene su u tablici 5. U tom se konceptu dim koji iz goruće prostorije ulazi u šupljinu DSF-a usmjerava u kanal kroz ventilacijske otvore u ulaznome otvoru i brzo kreće prema gore zahvaljujući učinku dimnjaka. Dim koji izlazi iz zgrade kroz zračne izlaze u gornjoj točki ulaznog otvora nije se širio po fasadi, no širio se iz prostorije u kojoj je izbio požar prema hodniku i stubištu te uzrokovao kretanje unutar zgrade.



Slika 11. Temperaturne vrijednosti izmjerene termoparovima za treći scenarij

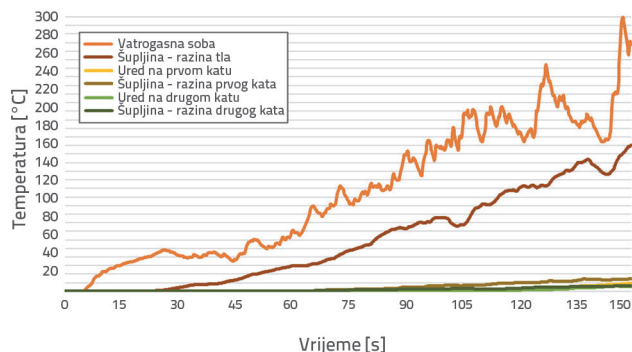
Na slici 11. prikazane su razine temperature u okolini, uredu i šupljini za treći scenarij. Zahvaljujući pločama na katovima i

ulaznome otvoru koji zadržava dim i plamen pri diferencijalnim tlakovima, razvijene su temperature ostale niske, osim u prostoriji u kojoj je izbio požar i u prizemlju s dvostrukom fasadom. Najviša temperatura iznosila je 294,62 °C u prostoriji u kojoj je izbio požar odnosno 167,39 °C u prizemlju s dvostrukom fasadom uz prostoriju u kojoj je izbio požar. Što se tiče uredskih prostorija, najviša temperatura zabilježena je u uredu na drugome katu i iznosila je 18,22 °C.

Četvrti scenarij: model DSF-a s prozorskom kutijom

Razina dimnog sloja u scenariju koji uključuje prozorsku kutiju, u kojemu je šupljina DSF-a projektirana zasebno za svaki prostor, prikazana je u tablici 6. S obzirom na to da je šupljina okomito ograničena pločom na gornjemu katu i vodoravno zidovima u svakoj prostoriji, dim koji je iz prostorije u kojoj je izbio požar prolazio u šupljinu nije se širio na fasadu. Ulazi i izlazi za zrak projektirani za svako ograničeno područje šupljine osiguravaju odvod dima iz šupljine. S obzirom na to da su prizemni otvori za zrak vanjske ljuske i dovod zraka na prvome katu bili u neposrednoj blizini, dim se iz vanjskog okoliša vratio u zgradu kroz dovod zraka na prvome katu. Ta situacija uzrokovala je širenje dima prema uredu na prvome katu, čak i pri niskome intenzitetu. U tom se scenariju dim širio stubištem na gornje katove.

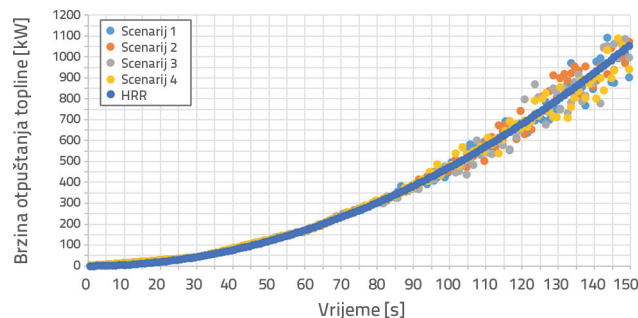
Zbog vodoravne i okomite zatvorenosti DSF šupljina u prostorima temperaturne vrijednosti porasle su samo na razinama prostorije u kojoj je izbio požar i prizemlja šupljeg prostora. Najviša temperatura izmjerena je u prostoriji u kojoj je izbio požar i iznosila je 329,69°C odnosno 180,67°C u šupljini DSF-a koja se nalazila uz navedenu prostoriju na razini prizemlja. U uredima izmjerena je temperatura od 19,22°C na prvome katu i 16,18°C na drugome. Viša temperatura na prvome katu posljedica je požara koji se širio iz laza za zrak vanjskog sloja u prizemlju i vraćao na prvi kat preko ulaza za zrak (slika 12.).



Slika 12. Temperaturne vrijednosti izmjerene termoparovima za četvrti scenarij

Verifikacijski model

Vrijednosti brzine otpuštanja topline (HRR) ovisne o vremenu i dobivene pomoću programa PyroSim kao rezultat scenarija modela koji se sastoji od četiriju različitih tipova DSF-a dobivene su pomoću programa Microsoft Excel. Grafikon dobiven iz jednadžbe 1. prikazan je na slici 8., dok su vrijednosti HRR-a dobivene na temelju četiriju scenarija prikazane na slici 13. U skladu s time vremenski grafikon vrijednosti HRR-a dobivenih iz matematičkih izračuna i vrijednosti HRR-a dobivenih iz rezultata modela prikazuje bliske krivulje ovisne o vremenu, što potvrđuje kompatibilnost matematičkih izračuna i numeričkog modela.



Slika 13. Grafički prikaz vrijednosti HRR-a pomoću numeričkog modela i matematičkih izračuna

3. Diskusija

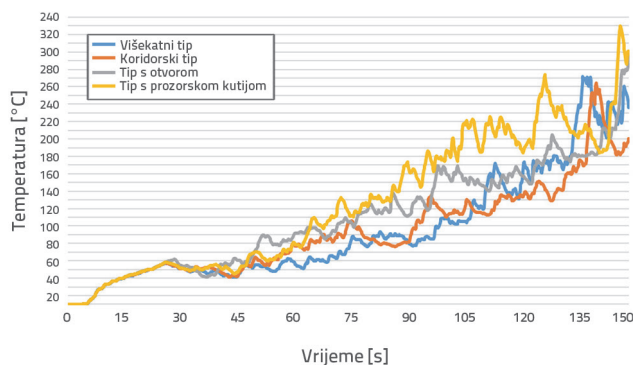
Primjenom numeričkog modela istražen je utjecaj projektirane prirodne ventilacije različitih tipova dvostrukih fasada na ponašanje u uvjetima požara, širenje dima, strategije odimljavanja i temperature razvijene u prostorima. U svim se scenarijima dim koji se spuštao sa stropa prostorije u kojoj je nastao požar kretao ponajprije u šupljinu zahvaljujući strujanju zraka. Visina šupljine, položaj vodoravnih i okomitih barijera te položaj ulaza i izlaza za izrak utjecali su na kretanje dima u šupljini i unutar zgrade.

U višekatom tipu DSF šupljine, zbog učinka dimnjaka izazvanog velikom visinom šupljine, dim je prolazio u šupljinu i brzo se širio prema gore, a odvod dima započeo je iz

otvora za zrak na gornjemu katu. Međutim, kako se brzina oslobađanja topline pri požaru povećala, gustoća i brzina širenja dima povećali su se, a dim se proširio iz šupljine do posljednjega kata uređa i od vrata goruće prostorije do stubišta, kroz hodnik. Što se tiče DSF šupljine koridorskog tipa, s obzirom na to da je visina šupljine bila samo na razini jednog kata, u šupljini nije nastupio učinak dimnjaka. Dim koji je prolazio u šupljinu počeo je izlaziti iz otvora za zrak na razini kata, no zbog nedovoljnog odvođenja dima iz otvora za zrak i ograničenja visine šupljine vrijeme širenja dima od šupljine goruće prostorije do zgrade bilo je kraće u odnosu na višekatnu dvostruku fasadu. Kako se šupljina nije neprekinuto širila između katova, urede na gornjim katovima od prostorija u kojima je nastao požar nije ispunio dim. U sustavu DSF-a s otvorima, gdje se zagrijani i onečišćeni zrak koji dopijeva u šupljinu ispušta kroz otvore, dim koji je prolazio u šupljinu širio se do otvora kroz ventilacijske otvore. Dim koji se brzo širio prema gore zahvaljujući visokome učinku dimnjaka koji se javlja u tankim i dugim otvorima izbacivao se izvan zgrade s vrha otvora. S obzirom na to da u šupljini DSF-a nije bilo izravnom izlaza za zrak i dovoljno ventilacijskih otvora u ulaznome otvoru, brzina prijenosa i gustoća dima iz goruće prostorije u hodnik bili su veći u odnosu na druge tipove DSF-a. U slučaju DSF-a s prozorskom kutijom, dok se dim kretao slično kao i kod koridorskog tipa, povećao se intenzitet širenja dima iz goruće prostorije u hodnik zbog ograničenih vodoravnih i okomitih područja širenja dima u šupljinu i nedovoljan prirodni izlaz za zrak.

Kada je u pitanju širenje požara duž fasade, scenariji su pokazali da se sustavi dvostruke fasade razlikuju. U višekatom tipu DSF-a dim se širio prema gore duž razine goruće prostorije, dosežući gornju razinu ljuske prije nego što se vodoravno proširio na zadnjoj razini kata po fasadi. Kod koridorskog se tipa dim horizontalno širio od prostorije u kojoj je izbio požar do ploče na prvome katu, s time da je prolazak dima do razine prizemlja bio ograničen na fasadu. Kod DSF sustava s otvorom dim koji se širio iz goruće prostorije u šupljinu prelazio je u ulazni otvor, pri čemu je prolazak dima u goruću prostoriju bio ograničen razinom fasade prizemlja i otvorom. Kod dvostruke fasade s prozorskom kutijom dim se širio na razini pročelja prizemlja zahvaljujući vodoravnoj i okomitoj raspodjeli fasadne šupljine. Zbog malog razmaka između ulaza i izlaza za zrak u vanjskoj ljusci dim je ponovno prodirao u šupljinu DSF-a iz otvorenog okruženja i širio se duž gornjih etaža goruće prostorije na fasadi.

Analizirajući temperaturu okoline tijekom simulacije prema tipu DSF-a, razvijene temperature bila su najviše u modelu s prozorskom kutijom, a najniže u modelu koridorskog tipa. U višekatom DSF modelu temperatura okoline iznosila je 271,67 °C za 138 s i 264,39 °C za 141 s u modelu koridorskog tipa. U modelu tipa s otvorom najviša temperatura od 294,62 °C postignuta je za 150 s, dok je u modelu tipa s prozorskom kutijom najviša temperatura od 329,69 °C postignuta za 148 s (slika 14.).



Slika 14. Vremenski ovisne promjene u temperaturi okoline u različitim modelima DSF-a

4. Zaključak

Istražen je učinak vrste DSF-a, koji se razlikuju prema različitim dizajnima šupljina, na razvoj požara i provedena numerička analiza razvoja dima i temperature. Rezultati simulacije upućuju na to da se učinak tipova DSF-a na razvoj požara i njihovi učinci na prirodno prozračivanje razlikuju. U višekatom modelu došlo je do brzog kretanja zraka i dima kroz zgradu zbog veće visine šupljine. Suprotno tome, u modelu s otvorom visina ulaznog otvora bila je visoka, širina uska, a duljina okna niska, što upućuje na to da je učinak dimnjaka bio najveći. U drugim modelima, budući da je visina šupljine bila samo na razini jednog kata, kretanje dima i protoka zraka usporilo se, a dim unutar zgrade pojavljivao se neredovito. Ti su scenariji otkrili da odgovarajući dizajn šupljine doprinosi izvlačenju dima iz izlaza za zrak vanjske ljuske.

Dizajn šupljine, ulaza i izlaza za zrak u tipovima DSF-a utjecao je na razine temperature u požaru, a smanjenje volumena šupljine povezanog s prostorijom u kojoj je izbio požar uzrokovalo je povećanje temperature okoline. Razine temperature u uredima bile su ispod 60 °C, što predstavlja graničnu vrijednost koju ljudska koža može podnijeti. Temperatura je bila viša nego u šupljinama ostalih vrsta zbog širenja plamena na urede na gornjim katovima, u šupljinama koje su se neprekidno nastavljale okomito.

LITERATURA

- [1] Eškinja, Z., Ružič, S., Kuljača, O.: Modelling heat loss through multi storey double skin corridor façade as preliminaries for an energy efficient control strategy, GRAĐEVINAR, 70 (2018) 11, pp. 931-942, <https://doi.org/10.14256/JCE.2021.2017>
- [2] Gökşen, F., Aycam, İ.: Thermal performance assessment of opaque ventilated façades for residential buildings in hot humid climates, GRAĐEVINAR, 75 (2023) 3, pp. 225-237, <https://doi.org/10.14256/JCE.3576.2022>
- [3] Qurraie, B.S., Bakirhan, E.K.: Evaluation of facade systems in different climate zones regarding energy, comfort, emission, and cost, Arab Journal of Basic and Applied Sciences 30 (2023) 1, pp. 123-136, <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2115202>
- [4] Hou, K., Li, S., Wang, H.: Simulation and experimental verification of energy saving effect of passive preheating natural ventilation double skin façade, Energy Exploration & Exploitation 39 (2021) 1, pp. 464-487, doi:10.1177/0144598720956288
- [5] Chow, B.K., Hung, W.Y.: Effect of cavity depth on smoke spreading of double-skin façade, Building Environment, 41 (2006) 7, pp. 970-979, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.009>
- [6] Livkiss, K., Svensson, S., Husted, B., van Hees, P.: Flame heights and heat transfer in façade system ventilation cavities, Fire Technology, 54 (2018) 3, pp. 689-713, doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0706-2>

Ovo je istraživanje analiziralo učinak vrsta DSF-a prema Oesterleu na širenje požara, no ostali konstrukcijski parametri koji utječu na razvoj požara nisu bili uzeti u obzir. Zato je razmatranje svih projektnih i okolišnih uvjeta kao istih pomoglo u otkrivanju učinaka četiriju različitih vrsta DSF-a na razine temperature i širenje dima. Zahvaljujući uključivanju projektnih parametara kao što su dimenzije šupljine, položaj i dimenzijske značajke ventilacijskih otvora, dimenzijske značajke prostorija, prirodni i mehanički sustavi odimljavanja i ugradnja protupožarnih zaklopki tamo gdje je to potrebno, dim se može odvoditi kroz šupljinu. Uključivanje tih parametara dizajna u model pruža nove mogućnosti evaluacije za buduća istraživanja.

Zaštita od požara u zgradama može se uzeti u obzir već u fazi projektiranja, a čimbenici rizika u fazi upotrebe mogu se minimizirati poduzimanjem odgovarajućih mjera opreza. Primjena numeričkog modeliranja, temeljenog na uspješnosti u praćenju odluka o zaštiti od požara prije izgradnje zgrade, i utvrđivanje nedostataka pruža prednosti za uvođenje ranih sigurnosnih mjera. Posljedično, učinci tipova DSF-a s različitim šupljinama i dizajnom ventilacije na sigurnost od požara istraženi su pomoću numeričkog modela temeljenog na uspješnosti predstavljenog u ovome istraživanju, a rezultati su pokazali da različiti tipovi utječu na razvoj požara i razine razvijene temperature unutar zgrade. U sklopu istraživanja visoka razina opasnosti od požara osigurana je projektom koji pokriva situacije u kojima se sve projektirane komponente smatraju nepromjenjivima, otvori poput prozora, vrata i stubišta su otvoreni, a požar izbija u prizemlju. U tome smjeru istražen je samo učinak tipova dvostruke fasade na razvoj požara, a ostali konstrukcijski zahtjevi za sigurnost od požara mogu se ispuniti uključivanjem drugih konstrukcijskih elemenata u buduća istraživanja numeričkog modeliranja.

Zahvala

Autori izražavaju zahvalnost recenzentima koji su svojim vrijednim doprinosom znatno poboljšali kvalitetu ovog rada.

- [7] Thomas, G., Al-Janabi, M., Donn, M.: Designing double skin facade venting regimes for smoke management, *Fire and Materials*, 42 (2018) 5, pp. 549–560, <https://doi.org/10.1002/fam.2509>
- [8] Chow, C.L.: Numerical Simulations on Airflow to The Double-Skin Facade Cavity By An Adjacent Room Fire, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vancouver, pp. 439–448, 2010.
- [9] Chow, C.L.: Full-scale burning tests on double-skin façade fires, *Fire and Materials*, 37 (2013) 1, pp. 17–34, [10.1002/fam.1127](https://doi.org/10.1002/fam.1127).
- [10] Chow, C.L.: Numerical studies on smoke spread in the cavity of a double-skin façade, *J. Civ. Eng. Management*, 17 (2011) 3, pp. 371–392, [10.3846/13923730.2011.595075](https://doi.org/10.3846/13923730.2011.595075).
- [11] Miao, L., Chow, C.L.: A study on window plume from a room fire to the cavity of a double-skin façade, *Applied Thermal Engineering*, 129 (2018) 3, pp. 230–241, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.125>
- [12] Dembele, S., Rosario, R.A., Wen, J.X.: Thermal breakage of window glass in room fires conditions—Analysis of some important parameters, *Building Environment*, 54 (2012) 4, pp. 61–70, [10.1016/j.buildenv.2012.01.009](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.009)
- [13] Liu, S., Kong, X., Yang, H., Fan, M., Zhan, X.: Numerical study of thermal characteristics of double skin facade system with middle shade, *Frontiers Energy*, 15 (2017) 7, pp. 222–234, [10.1007/s11708-017-0480-8](https://doi.org/10.1007/s11708-017-0480-8).
- [14] Ni, Z., Lu, S., Peng, L.: Experimental study on fire performance of double-skin glass facades, *Journal of Fire Sciences*, 30 (2012) 5, pp. 457–472, [10.1177/0734904112447179](https://doi.org/10.1177/0734904112447179).
- [15] Chow, W.K., Hung, W.Y., Gao, Y., Zou, G., Dong, H.: Experimental study on smoke movement leading to glass damages in double-skinned façade, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 3, pp. 556–566, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.005>
- [16] Kang, K.: Assessment of a model development for window glass breakage due to fire exposure in a field model, *Fire Safety Journal*, 44 (2009) 3, pp. 415–424, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.09.002>
- [17] Abdoh, D.A., Kodur, V.R., Liew, K.M.: Smoothed particle hydrodynamics modeling of the thermal behavior of double skin facades in fires considering the effects of venetian blinds, *Applied Mathematical Modelling*, 84 (2020) 3, pp. 257–376, [10.1016/j.apm.2020.02.033](https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.02.033).
- [18] Huang, Y., Yeboah, S., Shao, J.: Numerical data on fire in the cavity of naturally ventilated double skin façade with venetian blinds, *Data in Brief*, 46 (2023) 1, pp. 108859–108873, [10.1016/j.dib.2022.108859](https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108859).
- [19] Huang, Y., Yeboah, S., Shao, J.: Numerical investigation of fire in the cavity of naturally ventilated double skin façade with venetian blinds, *Building Services Engineering Research and Technology*, 44 (2023) 1, pp. 45–61, <https://doi.org/10.1177/01436244221129763>
- [20] Oesterle, L., Lieb, R.D., Lutz, M., Heusler, W.: *Double Skin Facades: Integrated Planning*, Prestell, Munich, 2001.
- [21] Preet, S., Mathur, J., Mathur, S.: Influence of geometric design parameters of double skin façade on its thermal and fluid dynamics behaviour: A comprehensive review, *Solar Energy*, 236 (2022), pp. 249–279, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.055>
- [22] Gubina, E.: A technical review of double skin facades, Doctoral Dissertation, Technical University of Wien, 2021, Wien.
- [23] Aksamija, A.: Thermal, energy and daylight analysis of different types of double skin facades in various climates, *Journal of Facade Design and Engineering*, 6 (2018) 1, pp. 1–39, [10.7480/jfde.2018.1.1527](https://doi.org/10.7480/jfde.2018.1.1527)
- [24] Wang, R., He, S., Yue, H.: Numerical study of smoke spread upon shaft-box type double skin facades, *Procedia Engineering*, 211 (2018), pp. 755–761, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.072>
- [25] Dong, Q., Zhao, X., Song, Y., Qi, J., Shi, L.: Determining the potential risks of naturally ventilated double skin façades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191 (2024), pp. 1140664, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114064>
- [26] Hurley, M.J., Rosenbaum, E.R.: Heusler, W.: Performance Based Design, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, eds. Hurley, M. J., Gottuk, D., Hall, J. R., Harada, K., Kuligowski, E., Puchovsky, M., Torero, J., Watts M., Wiecek, C., Springer, New York, pp-1233-1261, 2016.
- [27] McGrattan, K.: *Fire Dynamics Simulator (Version 4) – Technical Reference Guide*, NIST, Washington, 2006.
- [28] Yuen, A.C.Y., Yeoh, G.H., Alexander, R., Cook, M.: Fire scene reconstruction of a furnished compartment room in a house fire. *Case Studies in Fire Safety*, 1 (2014), pp. 29–35, <https://doi.org/10.1016/j.csfs.2014.01.001>
- [29] Anderson, J., Boström, L., Jansson, R., Milovanović, B.: Modeling of fire exposure in facade fire testing, *Fire and Materials*, 42 (2018) 5, pp. 475–483, <https://doi.org/10.1002/fam.2485>
- [30] Gutiérrez-Montes, C., Sanmiguel-Rojas, E., Viedma, A., Rein, G.: Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3 MW fires in a 20 m cubic atrium. *Building and Environment*, 44 (2009), pp. 1827–1839, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.010>
- [31] Bjegović, D., Banjad Pečur, I., Milovanović, B., Jelčić Rukavina, M., Alagušić, M.: Comparative full-scale fire performance testing of ETICS systems, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 5, pp. 357–369, <https://doi.org/10.14256/JCE.1347.2015>
- [32] NFPA: NFPA 92: Standard for Smoke Control Systems, National Fire Protection Association, Quincy, 2021.
- [33] Bwalya, A.C., Sultan, M.A., Benichou, N.: Design Fires for Fire Safety Engineering: a State-of-The-Art Review, CIB World Building Congress, Rotterdam, pp. 1–13, 2014.