

NUMERIČKO MODELOVANJE POŽARA VOZILA U ULIČNIM KANJONIMA / NUMERICAL MODELING OF VEHICLE FIRE IN STREET CANYONS

m-r Vera Velinova, Asocijacija za korporativnu bezbednost – Skoplje

Prethodno priopćenje

Apsrakt: U ovom radu izršene su simulacije za tri scenarija požara automobila u ulicama oblika kanjona različitih konfiguracija: požar automobila na kolovozu simetričnog uličnog kanjona; požar automobila na kolovozu u stepenasto rastućim kanjonima; požar automobila na kolovozu u stepenasto opadajućem uličnom kanjonu. S obzirom da je u radu korišćen programski paket FDS koji zahteva odgovarajuće ulazne parametre kao što su računarski domen, geometrija objekata, termičke osobine zastupljenih građevinskih materijala, vrste i osobine prisutnih zapaljivih materijala, lokacija žarišta požara, količina oslobođene toplote, veličina računarske mreže, posebna pažnja u okviru ovog dela rada je posvećena postavci simulacionih modela. Isto tako, analizirana je dinamika požara u uličnim kanjonima bez uticaja vetra. Rezultati simulacija ovog scenarija pokazuju da svi produkti požara nošeni svojim termičkim uzgonom napuštaju ulične konjone. Međutim, rezultati simulacija požara kada je prisutan vetar na krovu uličnih kanjona pokazuju da se struja produkata požara vraća u kanjone. U zavisnosti od brzine vetra produkti požara se vraćaju u ulicu dodirujući samo zgradu vetrovitoj strani ulice ili dostižu nivo kolovoza ulice i penju se duž zgrade na zavetrenoj strani kanjona. Zbog razlike u visinama zgrada, pod dejstvom vetra najveće se javlja u stepenasto rastućim kanjonima zbog pojačane recirkulacije uslovljene obrazovanim vrtlozima unutar kanjona. Koncentracije produkata požara na nivou pešaka zavise od količine prisutnog vazduha oko žarišta uslovljenog obrazovanim vrtlozima unutar kanjona pod dejstvom vetra.

Ključne riječi: simulacije, parametre, modela, vetra.

Abstract: In this paper are presented simulations of three scenarios of fire in the car in canyon shaped streets: Fire on symmetrical canyon street; Fire on step rising canyon street; Fire on step decreasing canyon street. Special consideration in the paper is given to FDS tool, as it is used for simulation. It requires parameters like compute domain, geometry of object, thermic capabilities of building materials, types and capabilities present flammable materials, start location of fire, amount of released heat. Dynamic of fire in canyon street is analyzed without wind influence. Results of simulation of these three scenarios show that all fire products carried with its thermic capabilities are leaving street canyons. In case if there is wind on the roof of street canyons, flow of fire product is returned into the street. Depending on the wind speed fire products are returned in the street beside building on the windy side of street or they reach street level and climb up by the building on the other side of street. Due to the building height difference and increased recirculation caused whirlwinds, under wind influence, largest pollution is in case of step increasing streets. Concentrations of fire products on pedestrians' levels depend on amount of present air around fire start point, caused by whirlwinds, under wind influence.

Keywords: simulations, parameters, models, wind.

1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Najveći nivoi zagađenja vazduha u gusto naseljenim urbanim područjima često se povezuju sa ulicama oblika kanjona, odnosno gradskim ulicama okruženim relativno visokim zgradama. Na kretanje zagađivača vazduha unutar uličnog kanjona utiču konfiguracija ulice i odnos širine ulice prema visini zgrade, geometrija zgrada, izvor zagađenja i uslovi koji vladaju u okolini ulice (smer i brzina vetra). Prisustvo vetra u uličnim kanjonima ima veliki uticaj na strujanje vazduha i kretanje zagađivača u uličnim kanjonima. Obrazac kretanja zagađivača unutar kanjona u velikoj meri zavisi od strujanja vetra na vrhu ulice i interakcije između atmosferskog strujanja i strujanja oko i u blizini zgrada. Jačina vrtloga vetra unutar uličnog kanjona uglavnom zavisi od brzine vetra na nivou krova. Različiti istraživači [1,16,15] su istraživali efekte odnosa širine i visine, geometrije uličnog kanjona i brzine vetra na distribuciju zagađivača. Mnogi istraživači su se koncentrisali na simulacije protoka vazduha unutar kanjona kako bi istražili fenomene turbulentnog strujanja kao što su postojanje vrtloga i recirkulacija zagađivača, [2,8,6].

S obzirom na to da je saobraćaj glavni izvor zagađenja vazduha u gradskim ulicama, mnoga istraživanja su se fokusirala na emisije vozila u okviru urbanih kompleksa sa lošom ventilacijom. Okolne zgrade podstiču akumulaciju zagađivača izazvanih saobraćajem, jer je razmena vazduha ograničena zbog izolacionog efekta zgrada. Zbog toga izduvni gasovi vozila kruže unutar slabo provetrenih urbanih uličnih kanjona. Koncentracije zagađivača mogu biti nekoliko puta veće od onih na neometanim lokacijama sa dobrom cirkulacijom vazduha. Kombinacija emisije zagađivača iz vozila i smanjene disperzije uzrokovane zgradama može dovesti do lošeg kvaliteta vazduha na nivou pešaka, [10].

Galatioto i *Bell* [3] su sprovedli istraživanja mereći koncentracije ugljenmonoksida i azotdioksida u zavisnosti od nivoa saobraćajnog toka, orijentacije preovlađujućeg vetra u odnosu na ulicu, brzine vetra, temperature i barometarskog pritiska.

Xie i saradnici [17] su pomoću terenskih merenja i CFD modeliranja odredili prostornu distribuciju zagađivača povezanih sa saobraćajem u uličnim kanjonima. Ova studija je pokazala da koncentracije zagađujućih materija usled sagorevanja goriva u motorima vozila zavise od obima saobraćaja, pravca i brzine vetra koji značajno utiče na distribuciju koncentracija zagađujućih materija u kanjonu ulice.

Huang i saradnici [15] su na osnovu rezultata eksperimentalnog istraživanja zagađenja uličnog kanjona u aerotunelu, numerički simulirali distribucije zagađivača za 90 scenarija uličnih kanjona. Rezultati su pokazali da pravac i brzina vetra imaju veliki uticaj na disperziju zagađujućih materija u kanjonima. Kvalitet vazduha u uličnim zonama na nivou pešaka se povećava sa smanjenjem emisije zagađivača iz vozila ali je kvalitet vazduha unutar uličnog kanjona i dalje lošiji od onog izvan uličnog kanjona.

Prethodno analizirane studije su fokusirane na izduvne gasove vozila koji kruže unutar slabo provetrenih urbanih struktura. Međutim, loš kvalitet vazduha unutar uličnih kanjona može nastati kao posledica intenzivnijih izvora zagađenja vazduha kao što su požar automobila, autobusa ili požar vozila koje prevozi zapaljive materije. Transport goriva se odvija kroz gradove jer je najčešće nemoguće koristiti alternativne puteve. Ovaj transport je opasan jer postoji mogućnost curenja i u određenim okolnostima može doći do akcidenta praćenog požarom ili eksplozijom. Pešić i saradnici [11,12] su koristeći CFD LES metod analizirali požar kamiona cisterne sa

benzinom u idealnom uličnom kanjonu da bi procenili rizik po ljudsko zdravlje i životnu sredinu. Numerički rezultati su pokazali da u slučaju kritične vrednosti vetra na krovu uličnog kanjona, produkti požara struje unutar kanjona. Sa povećanjem brzine vetra, koncentracije ugljenmonoksida i čađi opadaju, dok koncentracije ugljendioksida rastu sa povećanjem visine iznad tla uličnog kanjona. Longitudinalne koncentracije zagađivača vazduha usled požara takođe rastu sa povećanjem brzine vetra. S obzirom na činjenicu da se tokom odvijanja saobraćaja češće dešavaju akcidenti praćeni požarima automobila, veći broj istraživača je posvetio pažnju numeričkim simulacijama takvih požara u regularnim uličnim kanjonima.

Hu [13,14] i *Zhang* [4] sa saradnicima su sprovedli numeričke studije o prisustvu jakih termičkih uzgona uslovljenih požarima automobila u idealnom uličnom kanjonu. Obrazac disperzije produkata požara je podeljen na četiri režima pri različitim brzinama vetra, pri čemu je najopasnija situacija u slučaju takozvane recirkulacije dima. Uglavnom, kada dođe do požara u uličnom kanjonu, ukoliko je smer vetra normalan u odnosu na zgradu, konvektivna struja produkata požara bi se kretala prema zgradi u zavetrini. Ako je brzina vetra dovoljno velika, dim bi, vraćajući se nazad do žarišta požara cirkulisao unutar uličnog kanjona, što predstavlja veliku opasnost za bezbednost ljudi i imovine unutar kanjona.

Zhang i saradnici [5] su istraživali uticaj oblika krovova zgrada regularnog uličnog kanjona na strujanje vetra kao esencijalnog parametra koji uslovljava zagađenje vazduha u uličnim kanjonima. Simulirajući požar vozila unutar kanjona koristeći programski paket FDS i menjajući ugao krovova zgrada došli su do zaključka da se obrasci strujanja i disperzija produkata požara mogu posmatrati kroz tri režima, odnosno recirkulacioni, kvazi-recirkulacioni i ne-recirkulacioni režim. Ustanovili su da nivo zagađenja unutar uličnog kanjona, indeksiranog preko koncentracije ugljendioksida raste sa pojavom recirkulacionog režima.

Wang i saradnici [19] su ispitivali recirkulaciju dima požara u regularnom uličnom kanjonu menjajući lokaciju automobila unutar uličnog kanjona. Naime, simulirajući požar automobila koji se nalazi na različitim lokacijama (od 3 do 15 m) u odnosu na zgradu u zavetrini došli su do zaključka da je recirkulacija dima podeljena u tri režima u zavisnosti od lokacije požara.

Prethodno navedene studije su analizirale zagađenje vazduha usled požara automobila u idealnom uličnom kanjonu. Samo nekoliko istraživanja uzelo je u obzir mogućnost da požar može nastati u stepenasto rastućim uličnim kanjonima. *Tao* i *Wang* [18] sa saradnicima su koristeći programski paket FDS analizirali uticaj vetra na disperziju produkata požara unutar pomenutih kanjona. Numerički rezultati su pokazali da u slučaju postojanja perpedikularnog vetra na osu uličnog kanjona, dim struji u suprotnom smeru od smera strujanja vazduha, odnosno prema nizvodnoj zgradi i vraća se u ulični kanjon.

2. SIMULACIJE POŽARA AUTOMOBILA U ULICAMA OBLIKA KANJONA

U procesu modeliranja požara neophodno je izračunati i odrediti zone u kojima će se ispoljiti njegovi štetni efekti na okružujuću sredinu. Tokom požara velika količina toksičnih zagađivača intenzivno kontaminira vazduh i zbog toga trenutno ugrožava zdravlje ljudi i negativno utiče na životnu sredinu. S obzirom da produkti požara kontaminiraju vazduh, njihova disperzija je jedan od osnovnih i najvažnijih delova analize rizika od požara.

Zbog toga je u radu, simuliran požar automobila u ulicama oblika kanjona različitih konfiguracija. Simulacije su rađene za tri scenarija:

- Scenario I - požar automobila na kolovozu u simetričnom uličnom kanjonu;
- Scenario II - požar automobila na kolovozu u stepenasto rastućim uličnim kanjonima;
- Scenario III - požar automobila na kolovozu stepenasto opadajućeg uličnog kanjona.

S obzirom da različiti faktori utiču na strujanje vazduha i njegovih zagađivača unutar i iznad uličnih kanjona, među kojima je vetar glavni parametar koji određuje obrasce strujanja, analizirana je disperzija produkata požara u kanjonima za dva slučaja:

- Slučaj I - bez postojanja vetra na krovu uličnih kanjona;
- Slučaj II - sa vetrom različitih brzina na krovu uličnih kanjona koji značajno utiče s jedne strane na provetrenost kanjona, ali sa druge strane i na intenzivno zagađenje vazduha unutar kanjona.

3. POSTAVKA MODELA

FDS zahteva određene ulazne parametre, kao što su: računarski domen, geometrija objekata, termičke osobine zastupljenih građevinskih materijala, vrste i osobine prisutnih zapaljivih materijala, lokacija žarišta požara, količina oslobođene toplote, veličina računarske mreže, kao i granični uslovi, [7].

i. Računarski domen

Za numeričko modelovanje požara automobila dizajniran je računarski domen određenih dimenzija. Naime, dizajniran je domen širine 36 m, dužine 36 m i visine 36 m u kome su dizajnirane zgrade uličnih kanjona. Nivo tla računarskog domena je setovan kao čvrsta granica. Vrh i ostale strane domena su setovane kao otvorene da bi se simulirali realni uslovi otvorenog prostora, odnosno da bi vetar slobodno ulazio i napuštao računarski domen i da bi se omogućila disperzija produkata požara. Prostor oko zgrada je takođe setovan kao otvoreni prostor.

U računarskom domenu je setovana ambijentalna temperatura od 20 °C.

ii. Konfiguracija uličnih kanjona

U računarskom domenu su na njegovim suprotnim stranama dizajnirane zgrade koje obrazuju ulične kanjone. Širina (W) uličnih kanjona je 18 m, dok je njihova dužina (L) 36 m. S obzirom da je odnos dužine ulice i visine zgrada 2, odnosno da je njihov odnos manji od 3 ulični kanjoni predstavljaju takozvane kratke kanjone. Širina svih zgrada (W_z) na granicama računarskog domena iznosi 9 m, odnosno širina zgrada iznosi polovinu širine uličnih kanjona ($W_z = 1/2 W$). Pošto su numeričke simulacije rađene za tri scenarija, dizajnirane su zgrade različitih konfiguracija, odnosno različitih spratnosti:

- Scenario I - Simetrični ulični kanjon je dizajniran sa geometrijskim odnosom 1 tako da predstavlja regularan kanjon (tabela 1). Naime, širina uličnog kanjona i visine okružujućih zgrada su setovane na 18 m ($W = H_z$);
- Scenario II - Kod stepenasto rastućih uličnih kanjona dizajnirana je nizvodna zgrada konstantne visine 18 m dok su visine uzvodnih zgrada prikazane u tabeli 1;

- Scenario III - Kod stepenasto opadajućeg uličnog kanjona dizajnirana je uzvodna zgrada visine 18 m i nizvodna zgrada visine 15 m.

Tabela 1. Visine uzvodnih i nizvodnih zgrada kanjona

Vrsta kanjona	Visina zgrada, [m]		
	Uzvodna zgrada (H_u)	Nizvodna zgrada (H_n)	Odnos
Simetrični	18 (6 spratova)	18 (6 spratova)	1
Stepenasto rastući	15 (5 sprata)	18 (6 spratova)	0,83
	12 (4 sprata)	18 (6 spratova)	0,66
Stepenasto opadajući	18 (6 spratova)	15 (5 sprata)	1,2

Pretpostavljeno je da su sve zgrade izgrađene od armiranog betona sa prozorima od aluminijumskih profila. Termodinamičke osobine zastupljenih građevinskih materijala prikazane su u tabeli 2. Svi prozori u zgradama su zatvoreni što je realan scenario za jesenje i zimske vremenske uslove.

Tabela 2. Osobine građevinskih materijala na normalnoj temperaturi

Materijal	Debljina [m]	Gustina [kg/m ³]	Koeficijent toplotne provodljivosti [W/mK]	Specifična toplota [J/kg°C]
Beton	0,025	2100	1,4	880
Aluminijum	-	2710	225	900
Staklo	0,006	2500	0,76	840

iii. Parametri vetra

U principu vetar prouzrokuje ubrzano strujanje vazduha, a samim tim i povijanje plamena i kretanje dima pru požaru na otvorenom prostoru. S obzirom da je prisustvo vetra glavni parametar koji određuje obrasce strujanja vazduha unutar uličnih kanjona, on predstavlja odlučujući faktor i za distribuciju zagađivača unutar kanjona. Zbog toga je na desnoj strani računarskog domena za:

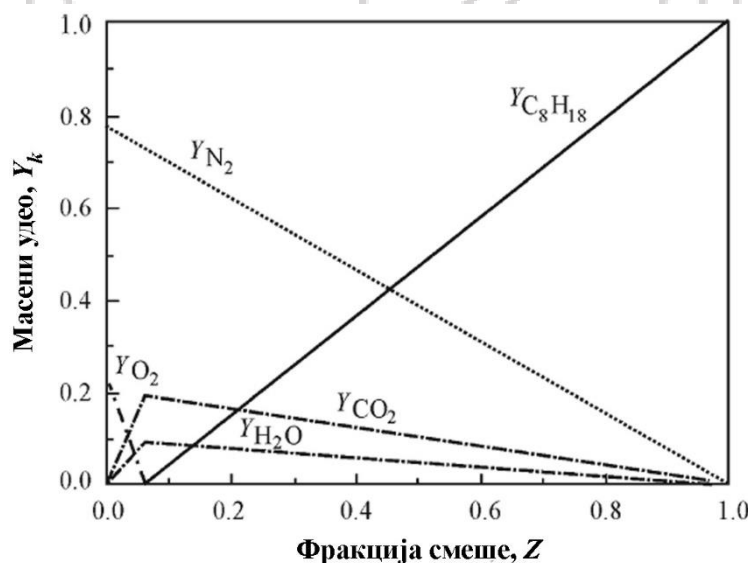
- Slučaj I - bez postojanja vetra na krovu uličnih kanjona najpre setovan „realni“ vetar, odnosno setovan je početni uslov brzine vetra od 0,3 m/s sa profilom $u = u_o(z/z_o)^p$, gde je $z_o = 0$ m i $p = 0,2$.
- Slučaj II - sa vetrom različitih brzina na krovu uličnih kanjona čije su vrednosti prikazane u tabeli 3.

Tabela 3. Brzine vetra na desnoj strani kanjona

Vrsta kanjona	Odnos uzvodne i nizvodne zgrade	Brzina vetra iz okolne sredine, u [m/s]				
Simetrični	1,0	0,3	2,5	5,0	7,0	10,0
Stepenasto rastući	0,83	0,3	1,5	2,5	4,0	5,0
	0,66	0,3	1,5	2,5	4,0	5,0
Stepenasto opadajući	1,2	0,3	1,5	2,5	4,0	5,0

iv. Parametri požara

Požari vozila se dešavaju usled akcidenata prouzrokovanih saobraćajnim nezgodama ili curenja goriva iz njihovih rezervoara. Zbog toga se takvi požari tretiraju kao požari lokve (eng. *pool fires*). Požar lokve benzina, odnosno požar automobila dimenzija 4,0 m x 2,0 m x 1,7 m je setovan na centru kolovoza uličnih kanjona. S obzirom da je po svom hemijskom sastavu benzin smeša ugljovodonika i da je njegova glavna komponenta oktan (C_8H_{18}), u skladu sa bazom podataka softvera FDS, hemijska reakcija sagorevanja “OCTANE” je usvojena za simulaciju požara i obrazovanje produkata sagorevanja, [15]. Odnos između smeše frakcija benzina i masenih frakcija njegovih produkata u slučaju potpunog sagorevanja je prikazan na slici 1, [10]. Naime, sagorevanje benzina je praćeno obrazovanjem produkata potpunog sagorevanja kao što su ugljendioksid (CO_2) i vodena para (H_2O), kao i produktima nepotpunog sagorevanja, kao što je obrazovanje ugljenmonoksida (CO) i čađi, odnosno nesagorelog ugljenika.



Slika 1. Odnos smeše frakcija benzina i masenih frakcija produkata sagorevanja

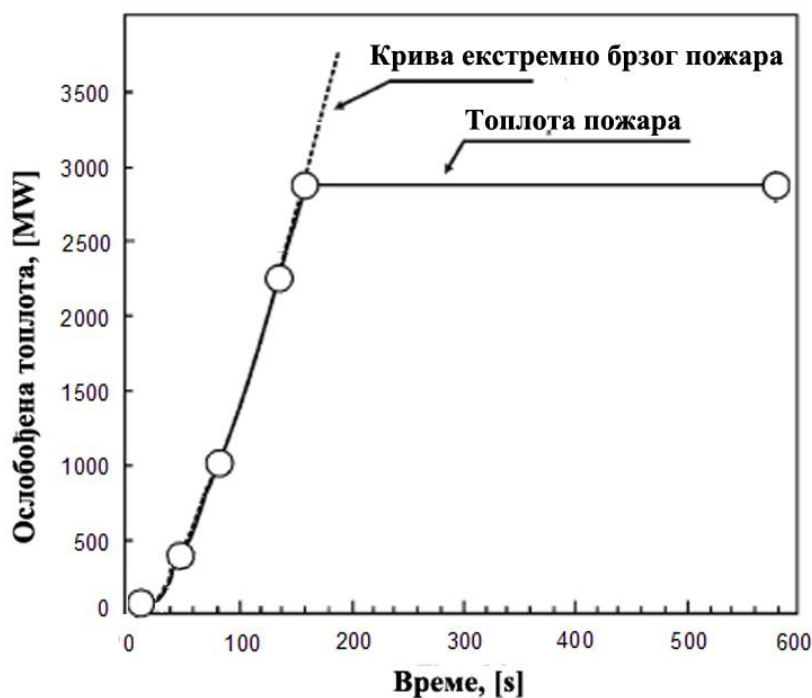
Količina oslobođene toplote tokom požara (eng. *heat release rate* - HRR) zavisi od toplote sagorevanja materije koja gori, kao i površine žarišta požara i oslobođene toplote po jedinici površine (eng. *heat release rate per unit area* - HRRPUA). Da bi se odredila toplota oslobođena tokom sagorevanja benzina neophodno je najpre odrediti stopu njegovog isparavanja. S obzirom

da je gustina benzina 0,75 kg/l, može se usvojiti da je stopa isparavanja oko 10 kg/s. Toplota njegovog sagorevanja je oko 43,7 MJ/kg. S obzirom na prethodno navedene činjenice, kao i da se tokom požara automobila oslobodi toplota od 5 MW [31], a da je vreme simulacija 600 sekundi, odgovarajuća HRR tokom simulacija iznosi 3 MW. Za ispitivanje uticaja požara na okolnu sredinu veoma je važno odrediti intenzitet požara. Generalno, intenzitet požara zavisi od nekoliko faktora, kao što su prosečna vrednost specifičnog požarnog opterećenja, karakteristike prostora zahvaćenog požarom, kao i uslova ventilacije. Za potrebe numeričkih simulacija, faza razvoja požara je određena t^2 modelom požara. t^2 model požara omogućava izračunavanje brzine oslobađanja toplote u fazi razvoja požara na osnovu koeficijenta rasta požara. Naime, kod velikog broja požara, brzina oslobađanja toplote u fazi njegovog razvoja u funkciji vremena se određuje na osnovu izraza

$$\dot{Q} = \alpha t^2, (1)$$

gde je $\dot{Q}$ - brzina oslobađanja toplote, α - koeficijent rasta požara, t - vreme.

U skladu sa odredbama standarda NFPA 80A pretpostavljeno je da je požar velikog intenziteta, odnosno da se radi o ekstremno brzom požaru, [9]. Zbog toga je i kriva oslobađanja toplote (HRR) usvojena kao ekstremno brza, odnosno 3 MW se dostiže u 110-toj sekundi i nakon toga je HRR konstantno 3 MW (slika 2).



Slika 2. Kriva oslobađanja toplote tokom požara

v. Numerička mreža

Pri izvođenju LES simulacija neophodna je relativno visoka rezolucija numeričke mreže zbog toga što se sa finijom mrežom dobijaju tačnija numerička rešenja jednačina hidrodinamičkog modela softverskog paketa FDS. Međutim, finija mreža zahteva veće računarske resurse i duže vreme proračuna. Zbog toga je veoma važno odrediti odgovarajuću veličinu mreže koja može optimizirati tačnost rešenja i vreme proračuna. Kvalitet rezolucije mreže zavisi od veličine požara i veličine ćelija mreže. Veličina ćelija mreže zavisi od količine oslobođene toplote tokom požara i osobina ambijentalnog vazduha. Kombinacijom pomenutih faktora dobijen je karakteristični prečnik požara koji je izražen jednačinom [7]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (2)$$

gde je: $\dot{Q}$ - oslobođena toplota tokom požara, c_p - specifična toplota obrazovanog dima, ρ_{∞} - gustina okružujućeg vazduha, T_{∞} - temperatura vazduha, g - ubrzanje zemljine teže. Veličina numeričke mreže se određuje na osnovu bezdimenzionog izraza $D^*/\delta x$ gde je δx nominalna veličina mreže. U principu da bi se dobili pouzdani rezultati simulacija veličina mreže ne treba da bude veća od $0,1D^*$. Za količinu oslobođene toplote tokom požara koja se koristi u simulacijama usvojena je uniformna mreža od 0,3 m u tri pravca (x, y i z pravcu). Ukupan broj ćelija mreže iznosi 1.259.712 (108 x 108 x 108).

vi. Granični uslovi

Pošto su spoljašnje granice računarskog domena, izuzev nivoa tla, setovane kao otvorene, gasoviti produkti požara mogu slobodno da izlaze iz računarskog domena. Pri simulacijama je usvojen jednostavni granični uslov: u slučaju priliva vazduha u računarski domen, parametri požara usvajaju odgovarajuće spoljašnje vrednosti na spoljašnjim granicama i u blizini granice domena uzimaju odgovarajuće vrednosti iz ćelija mreže koje su uz granice računarskog domena. Na spoljašnjim granicama domena usvojena je konstantna vrednost atmosferskog pritiska. Za setovanje početne brzine na zidovima zgrada uličnih kanjona korišćen je granični uslov tangencijalne brzine. Teorijski, na inertnim čvrstim površinama brzina strujanja je nula, ali se brzo povećava kroz granični sloj (debljine nekoliko milimetara) dostižući brzinu slobodnog strujanja produkata požara. Za mnoge numeričke studije, usvojene ćelije mreže su prevelike da bi se rešio ovaj granični sloj. Da bi se ovo prevazišlo, faktor graničnog uslova brzine, poznat kao faktor "klizanja" je korišćen da bi se brzina strujanja na zidovima objekta predstavila kao deo njihovih vrednosti u susednoj ćeliji mreže. Uslov "poluklizanja" je korišćen jer finija numerička mreža zahteva duže računarsko vreme.

vii. Ostali detalji

U FDS-u se početni vremenski korak automatski setuje pomoću veličine ćelije mreže podeljene sa karakterističnom brzinom strujanja. Podrazumevana vrednost početne veličine vremenskog koraka je

$$\frac{5(\delta x \delta y \delta z)^{1/3}}{(gH)^{1/2}}, \quad (3)$$

gde su x , y i z - prostorne dimenzije najmanje ćelije mreže, H - visina računskog domena, g - ubrzanje usled gravitacije.

Pošto je požar snažan izvor uzgona i u tom slučaju strujanje konvekcijom je mnogo dominantnije od difuznog transporta, vremenski korak je ograničen uslovom *Courant-Friedrichs-Lewy* (CFL) datog izrazom:

$$\Delta t \cdot \max \left(\frac{|u_{ijk}|}{\delta x}, \frac{|v_{ijk}|}{\delta y}, \frac{|w_{ijk}|}{\delta z} \right) < 1, \quad (4)$$

gde su u , v i w komponente brzine strujanja fluida u najmanjoj ćeliji mreže.

Tokom proračuna, vremenski korak varira i ograničen je brzinama konvektivnog i difuzijskog strujanja kako bi se osiguralo da je CFL uslov zadovoljen u zadatom vremenskom koraku. Zbog toga je u ovom istraživanju za opravdanost računске konvergencije korišćen CFL uslov. Brzi pad vrednosti vremenskog koraka dogodio se nakon isparavanja benzina i početka požara. Lokalni CFL brojevi tokom iteracija bili su u opsegu između 0,55 i 0,64, što je manje od maksimalno dozvoljene vrednosti za CFL kriterijum.

5. Zaključak

Simulacije požara su izvođene za vremenski interval od 600 sekundi. Razlog izbora ovakvog vremena simulacija je pretpostavka da će se nakon tog vremena započeti sa gašenjem požara, bilo od strane učesnika u saobraćaju ili vatrogasno-spasilačke jedinice.

Softverski paket *Fire Dynamics Simulator* je korišćen za numeričko modelovanje požara automobila unutar urbanih uličnih kanjona različitih konfiguracija. Numeričke simulacije su izvršene za tri scenarija, za dva slučaja:

Na osnovu analize dobijenih rezultata numeričkih simulacija došlo se je do sledećih zaključaka:

- Pri požaru automobila bez duvanja vetra na krovu kanjona, obrazuje se oblak dima unutar kanjona koji se podiže osno-simetrično naviše velikom brzinom. Zbog jakog termičkog efekta, svež vazduh iz okolne sredine difundira u struju produkata požara. Sa povećanjem visine iznad kolovoza kanjona, poluprečnik konvektivne struje produkata se povećava usled njenog hlađenja od strane svežeg ambijentalnog vazduha. Svi produkti požara se ventiliraju iz uličnih kanjona pomoću sopstvenog termičkog uzgona.
- Bez požara automobila unutar ulice a pri duvanju vetra sa krova uzvodne zgrade kanjona, unutar kanjona se obrazuju vrtlozi koji uslovljavaju recirkulaciju vazduha. Sa povećanjem brzine strujanja vetra, povećava se i brzina recirkulacijskog toka unutar kanjona. Zbog konfiguracije, najjače recirkulaciono strujanje vazduha se javlja unutar stepenasto rastućeg kanjona jer se obrazuju veliki vrtlozi koji pokrivaju ceo kanjon, tako da uslovljavaju i kretanje eventualno prisutnih zagađivača vazduha.
- Disperzija produkata požara pod uticajem vetra zavisi od njegove brzine i konfiguracije uličnih kanjona, odnosno:
 - Pri malim brzinama vetra, postoji isti režim disperzije produkata požara kod svih uličnih kanjona. Usled jakog termičkog efekta, brzina kretanja struje produkata požara je veća od brzine vetra tako da ne postoji kontakt između produkata i zidova zgrada sa obe strane uličnih kanjona. U ovom režimu, svi zagađivači požara se ventiliraju preko vrha ulica;
 - Sa povećanjem brzine vetra na krovu kanjona, struja produkata požara se povija usled inercione sile vetra i vraća u kanjone. Pri tome treba razlikovati dva režima kretanja produkata: režim kada se produkti požara vraćaju u ulicu dodirujući samo zgradu na vetrovitoj strani ulice i režim kada produkti dostižu nivo kolovoza ulice i „penju“ se duž zgrade na zavetrenoj strani kanjona.
 - Konfiguracija uličnih kanjona utiče na disperziju produkata požara i stepen zagađenja vazduha. Zbog razlike u visinama zgrada, pod dejstvom vetra najveće zagađenje se javlja u stepenasto rastućim kanjonima zbog pojačane recirkulacije uslovljene obrazovanim vrtlozima unutar kanjona.
- Koncentracije produkata požara na nivou pešaka zavise od količine prisutnog vazduha oko žarišta požara. U zavisnosti od količine vazduha javlja se veći ili manji stepen zagađenja kanjona. Naime, obrazovani vrtlozi unutar kanjona pod dejstvom vetra značajno utiču na mešanje svežeg vazduha i produkata požara i samim tim na preraspodelu koncentracija zagađujućih materija unutar ulice.

Sumirajući rezultate svih scenarija može se zaključiti da postoje dva mehanizma koja uslovljavaju ponašanje zagađivača požara unutar i izvan uličnih kanjona. Naime, disperzija produkata požara je kontrolisana njegovom uzgonom i intenzitetom strujanja ambijentalnog vetra na krovu uličnih kanjona. Bez vetra i pri postojanju vetra malih brzina, disperzija zagađivača požara je uslovljena termičkim uzgonom požara. S druge strane, za slučajeve većih brzina vetra, disperzije zagađivača požara su kontrolisane intenzitetom duvanja vetra.

LITERATURA

- [1] Assimakopoulos, V.D., Apsimon, H.M., Moussiopoulos, N.A. (2003) *A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different twodimensional street canyon configurations*, Atmospheric Environment 37(29):4037–4049.
- [2] Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., Hensen, J. (2011) *Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview*, Journal of Building Performance Simulation 4:157–184
- [3] Galatioto, F., Bell, M.C. (2013) *Exploring the processes governing road side pollutant concentrations in urban street canyon*, Environmental Science and Pollution Research 20(7):4750–4765.
- [4] Zhang, X.C., Hu, L.H., Tang, F. (2013) *Large Eddy Simulation of fire smoke recirculation in urban street canyons of different aspect ratio*, Procedia Engineering 62:1007–1014.
- [5] Zhang, X.C., Zhang, Z.J., Su G.K., Tao, H.W., Xu, W.H., Hu, L.H. (2019) *Buoyant wind-driven pollutant dispersion and recirculation behaviour in wedge-shaped roof urban street canyons*, Environmental Science and Pollution Research 26:8289–8302.
- [6] Marucci, D., Carpentieri, M. (2019) *Effect of local and upwind stratification on flow and dispersion inside and above a bi-dimensional street canyon*, Building and Environment 156:74–88.
- [7] McGrattan, K., McDermott, R., Weinschenk, C., Overholt, K., Hostikka, S., Floyd, J. (2013) *Fire Dynamics Simulator (Version6) technical reference guide, volume1: Mathematical model*, NIST Special Publication, Gaithersburg.
- [8] Murena, F., Mele, B. (2014) *Effect of short-time variations of wind velocity on mass transfer rate between street canyons and the atmospheric boundary layer*, Atmospheric Pollution Research 5:484–490.
- [9] NFPA72:2009 *National Fire Alarm and Signaling Code*. National Fire Protection Association, Quincy.
- [10] Park, S.J., Kim, J.J., Kim, M.J., Park, R.J., Cheong, H.B. (2015) *Characteristics of flow and reactive pollutant dispersion in urban street canyons*, Atmospheric Environment 108:20–31.
- [11] Pesic, D.J., Blagojevic, M.D., Glisovic, S.M. (2011) *The model of air pollution generated by fire chemical accident in an urban street canyon*, Transportation Research Part D: Transport and Environment 16(4):321–326.
- [12] Pesic, D.J., Blagojevic, M.D., Zivkovic, N.V. (2014) *Simulation of wind-driven dispersion of fire pollutants in a street canyon using FDS*. Environmental Science and Pollution Research. 21(2), 1270–1284.
- [13] Hu, L.H., Huo, R., Yang, D. (2009) *Large Eddy Simulation of fire-induced buoyancy driven plume dispersion in an urban street canyon under perpendicular wind flow*, Journal of Hazardous Materials 166(1):394–406.
- [14] Hu, L.H., Zhang, X.C., Zhu, W., Ning, Z., Tang, F. (2015) *A global relation of fire smoke re-circulation behaviour in urban street canyons*, Journal of Civil Engineering and Management 21:459–469.

- [15] Huang, M.H., Huang, Y., Cao, J.J., Tao, W.Q. (2021) *Study on mitigation of automobile exhaust pollution in an urban street canyon: Emission reduction and air cleaning street lamps*, Building and Environment 193 (2021) 107651.
- [16] Xia, J.Y., Hussaini, M.Y., Leung, D.Y.C. (2005) *Numerical simulation of street canyon flows with simple building geometries*, Journal of Environmental Engineering 131(7):1099–1105.
- [17] Xie, X., Wang, J., Huang, Z. (2009) *Traffic emission transportation in street canyons*, Journal of Hydrodynamics 21(1):108–117.
- [18] Wang, Q.L., Zhou, T.T., Liu, Q., He, P.X., Tao, C.F., Shi, Q. (2019) *Numerical study of critical re-entrainment velocity of fire smoke within the street canyons with different building height ratios*, Environmental Science and Pollution Research 26:23319–23327.
- [19] Wang, Z.L., Lua, K.H., Feng, L., Tao, Y., Wang, J., Ding, Y.M., Shia, C.L. (2020) *Simulation on smoke re-circulation transition in an urban street canyon for different fire source locations with cross wind*, Safety Science 127 (2020) 104716.

T R A V N I K