

Проф. др Душица Ј. ПЕШИЋ*

Доц. др Дарко Н. ЗИГАР

Проф. др Милан Ђ. БЛАГОЈЕВИЋ

Факултет заштите на раду у Нишу, Универзитет у Нишу

ДОИ: 10.5937/bezbednost2202061P

УДК: 614.841-057.36: 519.876.5

Прегледни научни рад

Примљен: 18. 5. 2021. године

Ревизија: 31. 5. 2022. године

Датум прихватања: 30. 6. 2022. године

Безбедност ватрогасаца-спасилаца током тренинга у флешовер контејнеру – нумеричка студија¹

***Апстракт:** Гашење пожара је одговоран и ризичан посао који захтева знање, вештину и психичку стабилност ватрогасаца. То се посебно односи на локализацију и гашење пожара у затвореним просторима у којима је могућа појава пламених удара, као што су флешовер и бекдрафт. Пламени удари често проузрокују повређивање ватрогасаца. Да би се смањиле повреде ватрогасаца, у скорије време почело се са њиховим увежбавањем у флешовер контејнерима. Практичном обуком стиче се неопходно искуство које се примењује при интервенцијама гашења реалног пожара. Међутим, и приликом обуке, ватрогасци су изложени високим температурама пожара. Због тога су у раду, применом метода рачунарске динамике флуида, извршени моделовање и симулација појаве флешовера у контејнеру за обуку ватрогасаца. Користићењем софтверског пакета ФДС симулирано је седам сценарија пожара при различитим условима вентилације и метода загасивања пожара, с циљем да се испитају температуре у контејнеру које утичу на безбедност ватрогасаца током обуке. Резу-*

*dusica.pesic@znrfak.ni.ac.rs

¹ Рад је резултат истраживања за чију је реализацију средства обезбедило Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (уговор бр. 451-03-9/2021-14/200148).

лтати су показали да најприхватљивији сценарио за обуку ватрогасаца подразумева да су врата контејнера отворена све време током трајања обуке, а да се уједно врши повремено загасивање пожара воденим млазом уз повремено отварање кровног отвора контејнера.

Кључне речи: *флешовер контејнер, симулација пожара, температура, обука ватрогасаца.*

Увод

Ватрогасци-спасиоци свакодневно обављају врло захтевне и ризичне послове. Током интервенција локализације и гашења пожара они су изложени дејству високих температура, као и токсичним продуктима сагоревања (Bengtsson, 2001). Веома често се узрок великог броја смртно страдалих ватрогасаца везује за појаву такозваних пламених удара, до којих може доћи приликом интервенције гашења пожара у грађевинским објектима.

Пламени удари су појаве које настају приликом пожара у затвореним просторима са ограниченим условима вентилације (Pešić, Raos, 2017). Наиме, током пожара у затвореном простору може се постићи фаза у којој топлотно зрачење пламена, врући гасовити продукти сагоревања и загрејане површине конструктивних елемената грађевинске конструкције објекта проузрокују пиролизу свих присутних горивих материјала и њихово паљење. Овај изненадни и нагли прелаз пожара из фазе развоја у потпуно развијену фазу назива се флешовер (*flashover*) (Wu, Carvel, 2017). За разлику од флешовера, који подразумева пламени удар вентилисаног простора, у одређеним условима ограничена вентилација може резултирати још значајнијом концентрацијом смеше продуката непотпуног сагоревања и несагорелих продуката пиролизе. При продору великих количина свежег ваздуха, када се отворе врата просторије у циљу гашења пожара, може доћи до изненадног сагоревања образоване смеше. То изненадно сагоревање, које се креће попут таласа кроз простор према отвореним вратима, назива се пламени удар невентилисаног простора, односно бекдрафт (*backdraft*), и веома често резултира експлозијом (NFPA 921: 2021).

Због сталне потенцијалне опасности од настанка флешовера и угрожавања живота ватрогасаца, последњих деценија многи истраживачи су, користећи различите технике моделирања и си-

мулације, испитивали феномен флешовера код пожара у затвореном простору (Cortés et al., 2020). Користећи вештачке неуронске мреже, Ли и сарадници (Lee et al., 2006) и Јун и сарадници (Yun et al., 2018) истраживали су настанак флешовера на основу геометрије просторије захваћене пожаром. Технике рачунарске динамике флуида (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) омогућавају прецизно предвиђање динамике пожара у затвореном простору праћених флешовером (Certeno et al., 2020; Yuen et al., 2021).

У циљу адекватног реаговања и заштите ватрогасаца у случају појаве флешовера приликом интервенције гашења пожара у грађевинским објектима, у пракси се спроводи њихова обука у специјалним контејнерима (DIN 14097-1: 2018). Контејнер се састоји из ложишног и посматрачког дела, који су међусобно спојени. Простор за посматрање и увежбавање ватрогасаца поседује врата, као и отвор на крову, преко којих се врши вентилација контејнера. У посматрачком делу на таваници контејнера налази се и заштитна преграда која спречава да пламени језичци и врели продукти пожара продру у део где се налазе ватрогасци током обуке. Тиме се обезбеђују услови да температура у висини рамена погнутих ватрогасаца износи око 150°C у тренутку када је постигнут флешовер (NFPA 1403: 2018).

У условима најсличнијим ситуацијама одигравања реалних пожара, у контејнеру се врши симулирање пожара и појаве флешовера при различитим условима вентилације. Ватрогасци прате развој пожара, уче како да препознају предзнаке ове врсте пламеног удара, упознају се са мерама за његово спречавање и увежбавају одговарајуће технике гашења пожара. Такође, ватрогасци увежбавају кретање и сналажење у простору захваћеном пожаром, стичу неопходно искуство и развијају тимски рад. Циљ тренинга је да овако стечена теоријска и практична знања ватрогасци могу да примене приликом интервенција гашења реалних пожара.

С обзиром на чињеницу да су ватрогасци и током обуке изложени утицају екстремних услова који владају у контејнеру, Вили и сарадници (Willi et al., 2016) испитивали су просечне и максималне топлотне флуксе, као и амбијенталне температуре у непосредном окружењу ватрогасца. Љубичић Чалушић и сарадници (Ljubičić Čalušić et al., 2012) испитивали су утицај температуре у контејнеру на здравље ватрогасаца. Резултати истраживања су показали да је, без обзира што је током обуке температура на повр-

шини заштитних одеља ватрогасаца достизала вредност од 160°C, дошло углавном до благог пораста телесне температуре ватрогасаца од 1,1°C и физиолошки очекиваног одговора кардиоваскуларног система на утицај високих температура. Наиме, дошло је до повећања њиховог пулса од 30 откуцаја у минути. Изложеност ватрогасаца чврстим честицама (ПМ) и високим температурама у контејнеру истраживали су Андерсен и сарадници (Andersen et al., 2017). Они су дошли до закључка да апарати за дисање ефикасно штите ватрогасце од ПМ честица. С друге стране, дошло је до смањења микроваскуларне функције услед физичке исцрпљености и повећане телесне температуре.

Како би се избегле негативне последице по здравље ватрогасаца током обуке у флешовер контејнеру, Ангел и сарадници (Anghel et al., 2015) пошли су од идеје да примене 3Д динамички сценарио пожара заснован на виртуелној стварности, као иновативан начин обуке са минималним ризицима по ватрогасце укључене у гашење пожара. Користећи резултате нумеричких симулација, аутори су успели да реконструишу услове којима су ватрогасци изложени током практичне обуке у контејнеру. Као наставак започетих истраживања, и имајући у виду да не постоје слична истраживања ове проблематике, у раду је извршено нумеричко моделовање тренинга ватрогасаца, како би се симулацијом пожара, уз више различитих сценарија, који подразумевају различите услове вентилисаности контејнера, као и кроз ефекат гашења пожара воденим млазом, одредио најповољнији начин тренинга ватрогасаца у флешовер контејнеру.

Нумерички метод

Упоредо са развојем информационе технологије дошло је до развоја великог броја рачунарских метода које се примењују у инжењерству заштите од пожара. Пошто су технике рачунарске динамике флуида брзе и поуздане, оне се последњих деценија често користе за моделирање динамике и параметара пожара.

За симулацију параметара пожара и анализу безбедности ватрогасаца приликом обуке у флешовер контејнеру, у раду је коришћен ЦФД софтверски пакет ФДС (*Fire Dynamics Simulator – FDS*). Хидродинамички модел ФДС-а нумерички решава Навје–Стоксове (*Navier-Stokes*) једначине које су применљиве за термички

вођена струјања, као што су једначина о одржању масе, једначина о одржању момената, једначина транспорта сензибилне енталпије и једначина стања гасне смеше. Преко одвојених временских корака ФДС прорачунава параметре гасовитих продуката образованих при пожару у оквиру појединачних ћелија нумеричке мреже. Типичне излазне величине јесу количина ослобађања топлоте, температура, брзина струјања, концентрација компонената гасне смеше (CO_2 , CO , N_2 , водена пара), концентрација дима итд. (McGrattan et al., 2013).

Поставка нумеричког модела

ФДС захтева одговарајуће улазне параметре као што су: геометрија објекта, термичке особине заступљених грађевинских материјала, врсте и особине присутних запаљивих материјала, локација жаришта пожара, количина ослобођене топлоте, величина рачунарске мреже, као и гранични услови (Pesic et al., 2016).

Због тога је, најпре, у складу са одредбама стандарда ДИН 14097 (DIN 14097-1: 2018), у програму „Пиросим“ (*Pyrosim*), који је графички интерфејс софтверског пакета ФДС, креиран 3Д модел флешовер контејнера (McGrattan et al., 2020).



Слика 1. Изглед флешовер контејнера у програму „Пиросим“

Метални контејнер се састоји из два дела: мањег ложишног дела димензија $2,4 \times 2,8 \times 2,4$ m који је издигнут 1 m од земље и већег посматрачког дела димензија $2,4 \times 6,0 \times 2,4$ m. Контејнер поседује кровни отвор за одимљавање димензија $0,2 \times 0,2$ m и врата димензија $0,3 \times 2,2$ m (за симулирање делимично отворених контејнерских врата). Уз таваницу контејнера постављена је вертикална преграда висине 0,6 m за спречавање продора врелих продуката пожара у посматрачки простор (слика 1).

У ложишном делу контејнера постављено је жариште пожара димензија $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ m од запаљених дрвених дасака са количином ослобађања топлоте од 3.125 kW/m^2 . У простору ложишта и посматрачком делу контејнера, постављени су сензори за мерење температуре на међусобном вертикалном растојању од 0,3 m.

Рачунарски домен је, у циљу добијања поузданих резултата, подељен у четири нумеричке мреже са оптималним димензијама елементарних запремина („ћелија“) које чине мрежу од $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ m. Укупан број ћелија нумеричке мреже током симулација износио је 110.592 ћелија.

Како би се у контејнеру створили безбедни услови за обуку ватрогасаца, усвојено је седам сценарија одигравања пожара при различитим условима његове вентилисаности:

- врата и кровни отвор контејнера су отворени;
- врата и кровни отвор контејнера су затворени;
- врата контејнера су отворена, кровни отвор затворен;
- врата контејнера су затворена, кровни отвор отворен;
- кровни отвор се отвара у 80. секунди, врата контејнера се отварају у 115. секунди симулације;
- активира се млаз воде при температури од 150°C у потпуно затвореном контејнеру;
- активира се млаз воде при температури од 150°C уз делимично отворена врата контејнера све време током симулације и уз отварање кровног отвора у 60. секунди симулације.

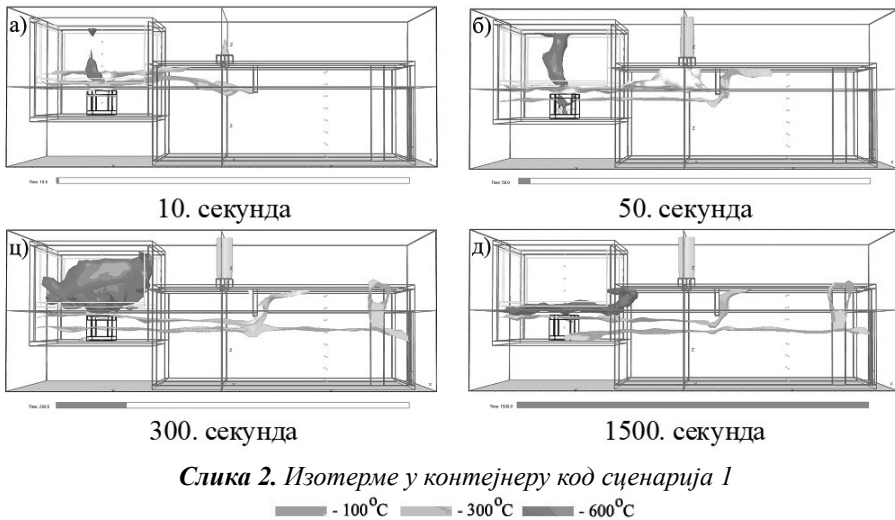
Резултати и дискусија

У циљу избора најповољнијег сценарија за практичну обуку ватрогасаца у флешовер контејнеру симулиране су и анализиране добијене вредности температура у контејнеру, као и температуре у висини глава ватрогасаца у посматрачком делу контејнера током пожара.

Изотерме у флешовер контејнеру

Сценарио 1: врата и кровни отвор контејнера отворени

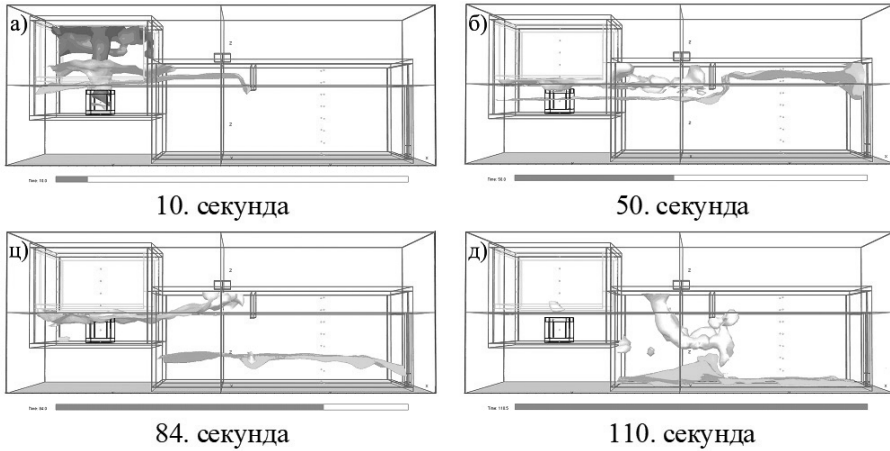
С обзиром да је у овом сценарију претпостављено да су отвори контејнера отворени, услед сталног прилива свежег ваздуха кроз врата контејнера, у ложишном делу се након паљења одвијало интензивно сагоревање дрвених дасака тако да је у 50. секунди симулације изнад зоне сагоревања достигнута температура од 600°C . Истовремено, образовани продукти сагоревања загрејани до температуре од 300°C кретали су се према посматрачком делу контејнера и преко кровног отвора излазили у спољашњу средину (слика 2б).



На основу анализе резултата симулације такође се може уочити да је у ложишном делу контејнера у 300. секунди достигнута температура од 600°C што је проузроковало настанак флешовера (слика 2ц). Након појаве флешовера пожар је достигао стационарну развијену фазу праћену ослобађањем максималне количине топлоте која је утицала на раст температуре у посматрачком делу контејнера. На крају симулације, с обзиром на то да је масено пожарно оптерећење (дрво) сагорело, у ложишном делу је темпе-

ратура опала (слика 2д). Истовремено, због добре проветрености контејнера, температура у посматрачком делу контејнера износила је око 100°C (слика 2ц и 2д).

Сценарио 2: врата и кровни отвор контејнера затворени



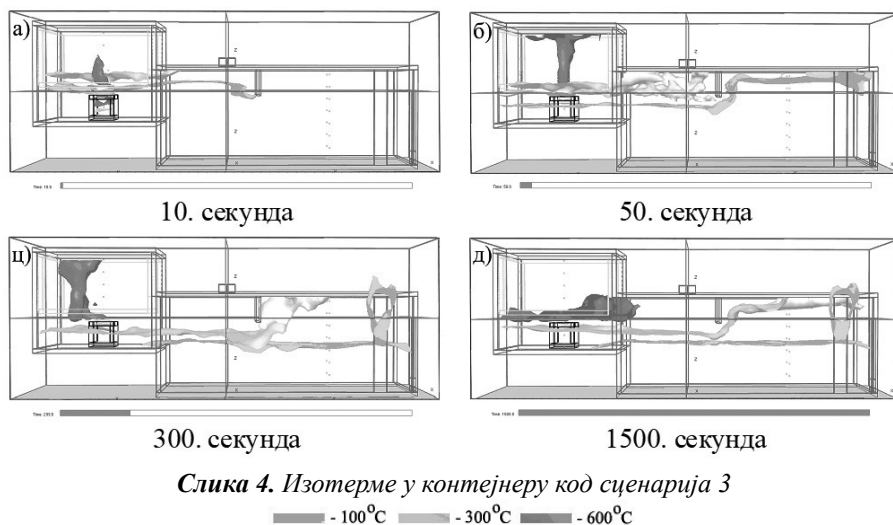
Слика 3. Изотерме у контејнеру код сценарија 2
■ - 100°C ■ - 300°C ■ - 600°C

У условима потпуне херметичности контејнера, када су врата и кровни отвор за време симулације затворени, у кратком периоду пожар је достигао развијену фазу (слика 3а). Међутим, без обзира на достигнуту развијену фазу пожара, код овог сценарија није дошло до настанка флешовера. Наиме, због недостатка кисеоника у контејнеру пожар је веома брзо почео да се стишава (слика 3б). Истовремено, услед снижене концентрације кисеоника дошло је до непотпуног сагоревања дрвета уз образовање великих количина запаљивих продуката пироллизе дрвета који су загрејани до високих температура. Због тога се у посматрачком делу контејнера јављају температуре од око 300°C (слика 3д).

Сценарио 3: врата отворена, кровни отвор затворен

С обзиром да је у овом сценарију претпостављено да су врата контејнера отворена, што је проузроковало добру вентилисаност

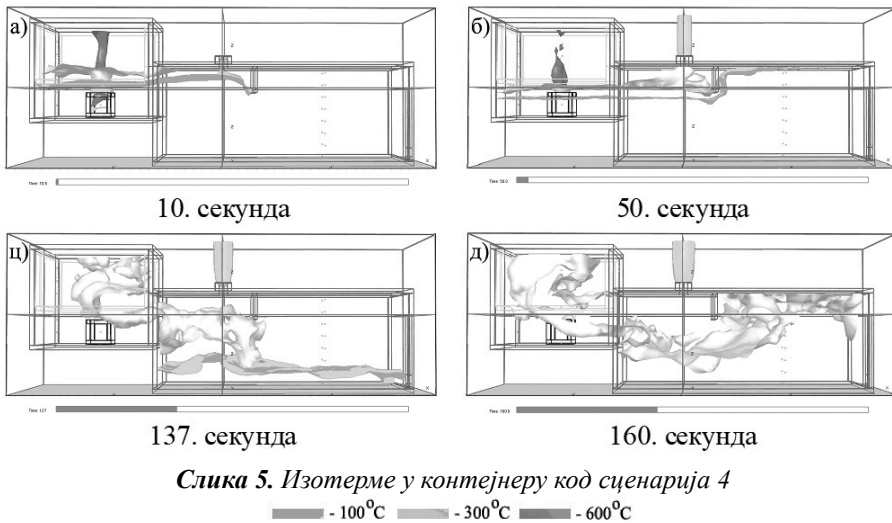
контејнера, као и код сценарија 1, услед сталног прилива свежег ваздуха у ложишном делу је дошло до интензивног сагоревања дрвених дасака, што је проузроковало настанак флешовера у 300. секунди симулације (слика 4ц). Након тога пожар је достигао развијену фазу. Међутим, насупротив сценарију 1, код кога су се производи пожара кретали несметано кроз отворени кровни отвор, у овом сценарију они су испунили горње делове посматрачког простора и преко отворених врата напуштали контејнер. Због тога је и температура у горњем делу посматрачког дела контејнера износила око 300°C , док су у његовом доњем делу вредности температура, због добре проветрености посматрачког дела контејнера, биле ниже (слика 4д).



Сценарио 4: врата затворена, кровни отвор отворен

За разлику од сценарија 3, код кога су врата контејнера отворена, с обзиром на мале димензије кровног отвора, код сценарија 4 контејнер није добро вентилисан. У оваквим условима до 50. секунде симулације у ложишном делу се одвијало сагоревање дрвета, јер је у самом контејнеру постојала довољна количина кисеоника неопходна за одвијање процеса сагоревања уз појаву пламе-

на (слика 5б). Међутим, до појаве флешовера није дошло. Наиме, недостатак кисеоника у контејнеру проузроковао је тињање дрвета. Тињање дрвета је проузроковало образовање великих количина продуката непотпуног сагоревања (угљен-моноксида) и запаљивих продуката његове пиролизе. Незнатне количине продуката пожара су преко кровног отвора отишле у спољашњу средину. С обзиром на то да су загрејани продукти пожара испунили цео контејнер, температура у посматрачком делу контејнера код овог сценарија достигла је вредност од 300°C (слика 5д).

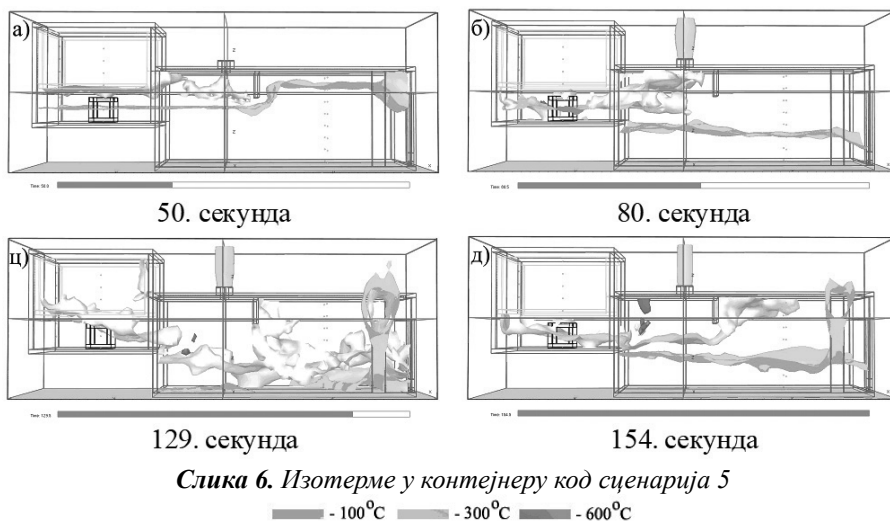


Сценарио 5: кровни отвор се отвара у 80. секунди, а врата контејнера у 115. секунди симулације

На почетку симулације сценарија 5, због потпуне херметичности контејнера пожар се развијао умереном брзином. Као последица непотпуног сагоревања дрвених дасака, у ложишном и посматрачком делу контејнера гомилали су се продукти пиролизе и угљен-моноксид, који су загрејани до температуре од 100°C (слика 6а). Након отварања кровног отвора нагомилани продукти пожара су великом брзином кренули кроз отвор у спољашњу средину. Истовремено је због дотока свежег ваздуха пожар интензивирао.

ран, тако да је температура у ложишном делу контејнера порасла на 300°C. Међутим, температура у посматрачком делу остала је непромењена (слика 6б).

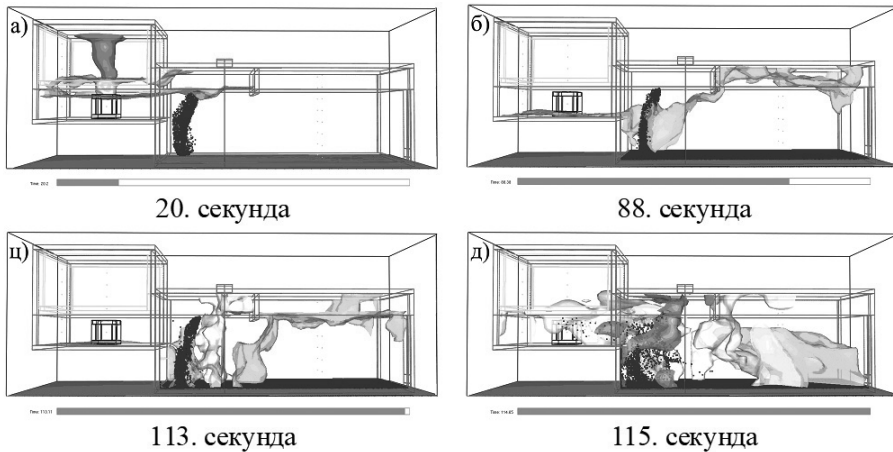
Веома је важно напоменути да је, након отварања врата контејнера у 115. секунди симулације, дошло до промене услова размене масе гасовитих фракција. Наиме, услед наглог прилива велике количине свежег ваздуха кроз врата контејнера створени су услови за интензивно сагоревање дрвета и самим тим за образовање великих количина продуката. Продукти пожара су због створеног натпритиска у контејнеру кренули великом брзином да струје ка отвореним вратима и да испуњавају посматрачки део контејнера, тако да је у том простору температура достигла вредност од око 300°C (слика 6ц). С обзиром на чињеницу да је у посматрачком делу дошло до дифузије спољашњег ваздуха у струју продуката, што је условило смањење њихове температуре, веома брзо се у нивоу глава присутних ватрогасаца температура спустила на 100°C (слика 6д).



Сценарио 6: примена воденог млаза у потпуно затвореном контејнеру

Сходно реалним условима тренинга ватрогасаца у флешовер контејнеру у циљу спречавања паљења несагорелих гасовитих

продуката пиролизе дрвета, у овом сценарију је симулирано повремено загасивање пожара. Загасивање је вршено помоћу континуалног млаза воде из ватрогасног црева постављеног у посматрачком делу контејнера близу његовог ложишног дела.



Слика 7. Изотерме у контејнеру код сценарија б

■ - 100°C ■ - 300°C ■ - 600°C

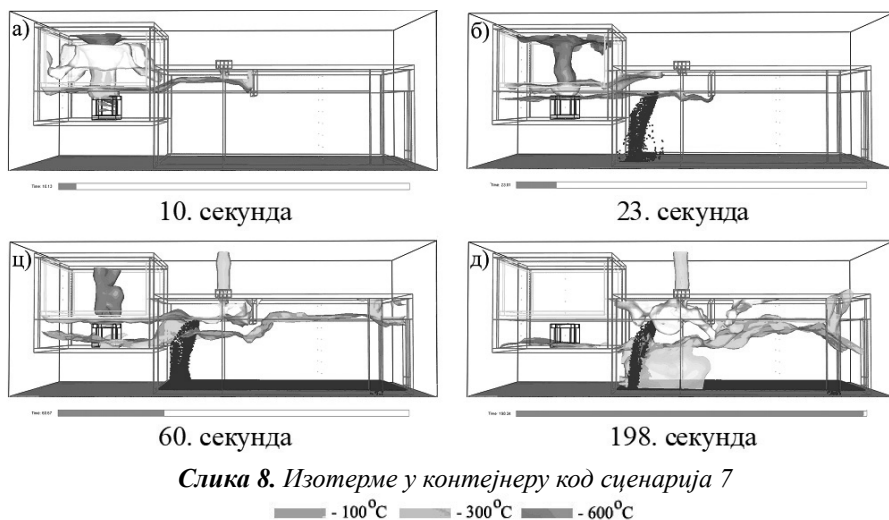
У условима када су кровни отвор и врата контејнера потпуно затворени, као и код сценарија 2, иако је пожар достигао развијену фазу, није дошло до флешовера (слика 7б). Млаз воде из ватрогасног црева најпре је хладио пламен и продукте пожара тако да је температура у посматрачком делу контејнера била испод 100°C (слика 7б и 7в). Међутим, након тога је фронт пламена веома брзо прешао из ложишног у посматрачки део контејнера (сл 7д). Велике количине водене паре загрејане до високих температура испуниле су део контејнера у коме се налазе ватрогасци.

Сценарио 7: примена воденог млаза у делимично отвореном контејнеру

За разлику од претходног сценарија, у случају делимично отворених врата контејнера све време током симулације веома брзо долази до флешовера у ложишном делу (слика 8б). До појаве флешовера у овом сценарију долази услед присуства довољне количине кисеоника за потпуно сагоревање дрвета. Када се у 60. Секунди

отвори и кровни отвор, нагомилани продукти пожара из ложишног дела контејнера несметано струје у спољашњу средину (слика 8ц).

Због тога, услед добре проветрености контејнера и употребе воденог млаза за загасивање пожара, температуре у посматрачком делу не прелазе 100°C (слика 8д). Тиме су створени услови да ватрогасци несметано више пута посматрају настанак флешовера, упознају се са индикаторима флешовера и науче како са мало воде, уз ефикасну тактику загасивања, могу спречити паљење несгорелих гасовитих продуката пиролизе дрвета и снизити температуру у простору захваћеном пожаром.



На основу анализе добијених вредности за површине са једнаком температуром у посматрачком делу контејнера, може се закључити да су најнеповољнији сценарији:

- у условима недовољне вентилисаности контејнера (сценарио 2), тј. када су сви отвори (врата и кровни отвор) затворени за време симулације, при чему долази до брзог преласка фронта пламена из дела ложишта у посматрачки део и његовог спуштања на дно контејнера, што је изузетно опасно по ватрогасце. У овом сценарију долази до великог задимљавања и образовања великих количина запаљивих продуката пиролизе дрвета, што доводи до потенцијалне опасности од појаве бекдрафта у случају изненадног отварања врата контејнера;

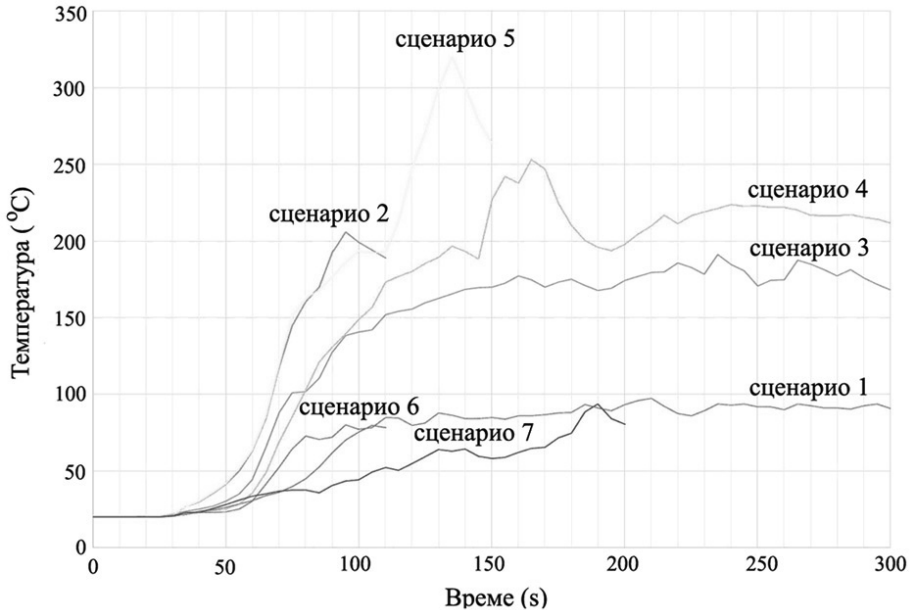
- када су врата контејнера све време симулације затворена, а кров отворен (сценарио 4). Контејнер и код овог сценарија није добро вентилисан и долази до нагомилавања запаљивих продуката пиролизе дрвета и преласка и спуштања пламена у посматрачки део контејнера. У овим условима такође може доћи до појаве бекдрафта у случају отварања врата контејнера;
- када се отворима контејнера рукује ручно (сценарио 5), односно када се кровни поклопац отвара у 80. секунди, а врата у 115. секунди. И код овог сценарија не постоји добра вентилисаност контејнера и због тога није препоручљив за обуку ватрогасаца;
- у случају примене воденог млаза у потпуно затвореном контејнеру (сценарио 6), где долази до брзог прелаза фронта пламена у посматрачки део услед продукције велике количине водене паре и пораста притиска унутар контејнера, што представља велику опасност од настанка опекотина ватрогасаца.

На основу анализе изотерми у посматрачком делу контејнера издвајају се следећи повољни сценарији за обуку ватрогасаца:

- када су врата контејнера и кров за време симулације отворени;
- када су врата контејнера за време симулације отворена, а кров затворен;
- када се периодично примењује водени млаз при отвореним вратима контејнера све време током симулације, а кровни отвор се отвара у 60. секунди симулације.

Температуре у висини глава ватрогасаца

Да би се од поменутих повољних сценарија одабрао најадекватнији за примену у пракси, неопходно је анализирати и добијене резултате за температуре које су измерене сензорима у висини глава ватрогасаца у посматрачком делу контејнера током пожара (слика 9).



Слика 9. Температуре у висини глава ватрогасаца током пожара

Анализом података о температурама у висини глава ватрогасаца потврђује се чињеница да се сценарији који су претходно издвојени као неповољни не смеју примењивати за практичну обуку ватрогасаца.

На основу резултата приказаних на слици 9 уочава се да су при сценарију 1, код кога су сви отвори контејнера све време симулације отворени, температуре при дну контејнера ниже због превелике проветрености контејнера и споријег достизања флешовера, па је потребно више времена за реализацију потенцијалне обуке ватрогасаца. С друге стране, сценарио 3, код кога су врата све време симулације отворена, а кровни отвор затворен, није прихватљив из разлога јер температура у висини главе ватрогасаца прелази 150°C . Код сценарија 7, са употребом воденог млаза при отвореним вратима све време током симулације и уз отварање кровног отвора у 60. секунди, температура флешовера у ложишту контејнера постиже се брже. Такође се примећује и ефекат хлађења гасовитих продуката пожара (услед примене воденог млаза) и одржавање температуре у висини главе ватрогасаца у посматрачком делу контејнера на прихватљивом нивоу.

Закључак

Без обзира на велико искуство ватрогасаца приликом интервенција локализације и гашења пожара у затвореним просторима, веома често долази до непредвиђених околности, као што је појава флешовера. Како би ватрогасци адекватно реаговали у таквим ситуацијама, смишљени су посебни тренинзи за њихову обуку, који подразумевају употребу флешовер контејнера. Због тога што се овакав вид тренинга често показује као потенцијално опасан, у раду је коришћењем софтверског пакета ФДС развијен нумерички модел флешовер контејнера и симулирани су сценарији развоја пожара при различитим условима вентилисаности самог контејнера и уз сагледавање учинка гашења пожара воденим млазом. Анализирани су параметри пожара од којих зависи безбедност ватрогасаца током обуке. На основу резултата симулација изведени су следећи закључци:

- најнеповољнији сценарији су 2, 4, 5 и 6, који подразумевају услове недовољне вентилисаности контејнера;
- прихватљиви сценарији су 1 и 3, односно сценарио са отвореним отворима контејнера и сценарио са отвореним вратима и затвореном кровном отвору;
- најприхватљивији сценарио за практичну обуку ватрогасаца у флешовер контејнеру јесте сценарио 7, који подразумева да су врата контејнера отворена све време током симулације, уз повремено загасивање пожара воденим млазом и повремено отварање кровног отвора.

Нумеричке симулације су умногоме допринеле лакшем сагледавању опасних ситуација у којима се ватрогасци могу наћи у флешовер контејнеру. Истовремено, оне омогућавају брже доношење одлука које се тичу правовременог загасивања пожара у контејнеру, као и предузимања адекватнијих мера личне заштите ватрогасаца. С друге стране, стечена практична знања ватрогасци могу да примене приликом интервенција гашења реалних пожара.

Литература

1. Andersen, M.H.G., Saber, A.T., Pedersen, P.B., Loft, S., Hansen, Å.M., Koponen, I.K., Pedersen, J.E., Ebbenhøj, N., Nørskov, E.C., Clausen, P.A., Garde, A.H., Vogel, U., Møller, P. (2017). *Cardiovascular Health Effects Following Exposure of Human Volunteers during Fire Extinction Exercises*. Environmental Health 16: 96.
2. <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-017-0303-8>. доступан 28. 11. 2021.
3. Anghel, I., Pesic, D.J., Codescu, S., Popescu, D., Panaitescu, V., Lalu, O. (2015). *3D Fire Dynamic Scenario for Training Systems Based on Immersive Virtual Reality for Firefighters*. Applied Mechanics and Materials 809-810: 793.
4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.793>. доступан 29. 11. 2021.
5. Bengtsson, L.G. (2001). *Enclosure Fires*. Swedish Rescue Services Agency.
6. <https://rib.msb.se/filer/pdf/20782.pdf>. доступан 1. 5. 2021.
7. Centeno F.R., Beshir, M., Rush D. (2020) *Influence of Wind on the Onset of Flashover within Small-scale Compartments with Thermally-thin and Thermally-thick Boundaries*. Fire Safety Journal 117: 103211.
8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711220302885>. доступан 28. 11. 2021.
9. Cortés, D., Gil, D., Azorín, J., Vandecasteele, F., Verstockt, S. (2020) *A Review of Modelling and Simulation Methods for Flashover Prediction in Confined Space Fires*. Applied Science, 10(16): 5609.
10. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5609>. доступан 28. 11. 2021.
11. DIN 14097-1: 2018-05 *Feuerwehrwesen – Feuerwehrrübungsanlagen – Teil 1: Allgemeine bauliche Anforderungen*. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
12. Lee, E.W., Lee, Y., Lim, C., Tang, C. (2006). *Application of a Noisy Data Classification Technique to Determine the Occurrence of Flashover in Compartment Fires*. Advanced Engineering Informatics 20(2): 213.
13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034605000819>. доступан 28. 11. 2021.
14. Ljubičić Čalušić, A., Mladinić, M., Varnai Veda, M., Petrincec, B.,

- Macan, J., Kopjar, N., Lucić Vrdoljak, A., Željezić, D. (2012). *Biomarkers of Mild Hyperthermia Related to Flashover Training in Firefighters*. *Journal of Thermal Biology*, 37: 548.
15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030645651200109X>. доступан 27. 11. 2021.
16. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt K., (2013). *Fire Dynamics Simulator; Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
17. https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/2013/08/FDS_Technical_Reference_Guide.pdf. доступан 12. 5. 2021.
18. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. (2020). *Fire Dynamics Simulator; User's Guide*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
19. <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>. доступан 12. 5. 2021.
20. NFPA 921: 2021 *Guide for Fire and Explosion Investigations*. National Fire Protection Association: Quincy, MA.
21. NFPA 1403: 2018 *Standard on Live Fire Training Evolutions*. National Fire Protection Association, Quincy, MA.
22. Pesic, D.J., Zigar, D.N., Anghel, I., Glisovic, S.M. (2016). *Large Eddy Simulation of Wind Flow Impact on Fire-induced Indoor and Outdoor Air Pollution in an Idealized Street Canyon*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 155: 89.
23. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016761051630263X>. доступан 12. 5. 2021.
24. Pešić, D., Raos, M. (2017). *Požari i građevinske konstrukcije*. Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu u Nišu.
25. Willi, J.M., Horn, G.P., Madrzykowski, D. (2016). *Characterizing a Firefighter's Immediate Thermal Environment in Live-Fire Training Scenarios*. *Fire Technology*, 52: 1667.
26. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-015-0555-1>. доступан 27. 11. 2021.
27. Wu, C.L., Carvel, R. (2017). *An Experimental Study on Backdraught: the Dependence on Temperature*. *Fire Safety Journal*, 91: 320.
28. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711217300942>. доступан 24. 4. 2021.
29. Yuen, A.C.Y., De Cachinho Cordeiro, I.M., Chen, T.B.Y., Chen, Q., Lui, H., Yeoh, G.H. (2021) *Multiphase CFD modelling for enclosure*

- fires—A review on past studies and future perspectives. Experimental and Computational Multiphase Flow.*
30. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42757-021-0116-4>. доступан 28. 11. 2021.
31. Yun, K., Bustos, J. Lu, T. (2018) *Predicting Rapid Fire Growth (Flashover) Using Conditional Generative Adversarial Networks.* Electronic Imaging, 127: 1.
32. <https://www.ingentaconnect.com/contentone/ist/ei/2018/00002018/00000009/art00004>. доступан 28. 11. 2021.

Safety of Firefighters – Rescuers during Training in Flashover Container – a Numerical Study

Abstract: *Extinguishing of fire is a responsible and risky job that requires knowledge, skill and mental stability from the firefighter. These facts especially refer to the localization and extinguishing of enclosure fires where the occurrence of flaming attacks, such as flashover and backdraft are possible. In such conditions, lack of experience of firefighters often leads to fatal injuries. In order to reduce the injuries of firefighters during firefighting interventions, their training in flashover containers has recently begun. Practical training provides the necessary experience that is applied in real fire extinguishing interventions which implies that firefighters are exposed to high fire temperatures during training.*

Because of this, the paper focuses on modeling and simulation of flashover appearance in a container for firefighters' training, performed by using numerical fluid dynamics method. Using the Fire Dynamics Simulator software package, seven fire scenarios under different ventilation conditions and fire extinguishing methods were analyzed, with the aim of examining container temperatures that affect the safety of firefighters during the training. The obtained results indicate that the most acceptable scenario for firefighter training means that the container door is open for the entire duration of the training and, at the same time, it neccessary to periodically extinguish fire with a water jet, along with occasionally opening of the roof vent of the container.

Keywords: *flashover container, fire simulation, temperature, firefighter training.*