



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ФАКУЛТЕТ ЗАШТИТЕ НА РАДУ У НИШУ



Дамир Е. Малковевић

**Нови приступ предвиђању динамике
пожара у затвореном простору
у зависности од услова вентилације
и геометрије**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању
(*"Сл. гласник РС", бр. 76/2005, 100/2007 - аутентично тумачење, 97/2008, 44/2010,
93/2012, 89/2013 и 99/2014*).

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности (члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, *"Сл. гласник РС", бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012*).

Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе, осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.

Ниш, 2025.



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ФАКУЛТЕТ ЗАШТИТЕ НА РАДУ У НИШУ



Damir E. Malkočević

**A new approach to predicting fire
dynamics in enclosed spaces based on
ventilation condition and geometry**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Др Милан Ђ. Благојевић, редовни професор Универзитет у Нишу, Факултет заштите на раду у Нишу
Наслов:	Нови приступ предвиђању динамике пожара у затвореном простору у зависности од услова вентилације и геометрије
Резиме:	Пожари у затвореним просторима представљају један од најсложенијих безбедносних изазова грађевинског инжењерства и заштите од пожара, због комплексне интеракције физичко-хемијских процеса који утичу на брзину њиховог развоја. Динамика пожара унутар грађевинских објеката условљена је синергетским деловањем више параметара, међу којима кључну улогу имају карактеристике вентилационих отвора и геометрија простора. Традиционални приступи предвиђању развоја пожара базирани на емпиријским моделима и стандардним пожарним кривама, не пружају прецизну репрезентацију стварних услова у затвореним просторима те могу довести до нетачних процена ризика, што има директан утицај на безбедност корисника, ефикасност противпожарних система и структурну стабилност грађевинских конструкција током пожара. У циљу превазилажења наведених ограничења, у дисертацији је представљен иновативан модел за предвиђање динамике пожара у затвореним просторима, базиран на напредним нумеричким методима за симулацију. Истраживање је ослоњено на алгоритме и софтверске алате засноване на методи рачунарске динамике флуида, при чему је за анализу коришћен програмски пакет Fire Dynamics Simulator (FDS). Основни циљ истраживања је дефинисање новог модела развоја пожара при реалним условима за прецизније предвиђање развоја фаза пожара у затвореном простору са различитим вентилационим и геометријским карактеристикама. Специфични циљеви истраживања обухватају анализу утицаја природне вентилације на фазе развоја пожара, испитивање ефеката просторне геометрије на динамику сагоревања, квантификацију одступања криве брзине ослобађања топлоте у односу на стандардне референтне пожарне криве, као и валидацију предложеног модела кроз упоредну анализу са експерименталним резултатима добијеним у лабораторијским и реалним условима.
Научна област:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Научна дисциплина:	Заштита од пожара
Кључне речи:	Нумеричка симулација, пожар у затвореном простору, вентилациони фактор, геометрија простора, пожарна крива
УДК:	614.84 Пожари. Противпожарна заштита. Ватрогаство
CERIF класификација:	T200 Термички инжењеринг, примењена термодинамика
Тип лиценце креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD Milan Đ. Blagojević, full professor University of Niš, Faculty of Occupational Safety in Niš
----------------------	---

Title:	A new approach to predicting fire dynamics in enclosed spaces based on ventilation conditions and geometry
--------	--

Abstract:	Fires in enclosed spaces represent one of the most complex safety challenges in the field of civil engineering and fire protection due to the intricate interaction of physicochemical processes that influence their development rate. The dynamics of fire within buildings are governed by the synergistic effects of multiple parameters, with ventilation opening characteristics and spatial geometry playing a crucial role. Traditional approaches to predicting fire development predominantly rely on empirical models and standardized fire curves, which fail to accurately represent real conditions in enclosed spaces. These limitations can lead to inaccurate risk assessments, directly impacting occupant safety, the effectiveness of fire protection systems, and the structural stability of buildings during fires. This dissertation presents an innovative model for predicting fire dynamics in enclosed spaces based on advanced numerical simulation methods to address these limitations. Specifically, the research relies on algorithms and software tools based on Computational Fluid Dynamics (CFD), utilizing the Fire Dynamics Simulator (FDS) software package, for analysis. The primary objective of this research is to define a new fire development model under realistic conditions, enabling more precise predictions of fire development phases in enclosed spaces with varying ventilation and geometric characteristics. In this context, the specific research goals include analyzing the impact of natural ventilation on fire development phases, examining the effects of spatial geometry on combustion dynamics, quantifying deviations in heat release rate curves compared to standard reference fire curves, and validating the proposed model through comparative analysis with experimental results obtained under both laboratory and real-world conditions.
-----------	--

Scientific Field:	Environmental and Occupational Safety Engineering
Scientific Discipline:	Fire Protection

Key Words:	Numerical simulation, enclosures fire, ventilation factor, spatial geometry, fire curve
------------	---

UDC:	618.84 Fire. Fire protection
------	------------------------------

CERIF Classification:	T200 Thermal engineering, applied thermodynamics
-----------------------	--

Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND
--------------------------------	-------------

ЗАХВАЛНОСТ АУТОРА

Желео бих да изразим своју најдубљу захвалност свом ментору, проф. др Милану Ђ. Благојевићу, чија су стручност, несебична подршка и посвећеност били кључни за успешно спровођење овог истраживања и израду дисертације. Његово вођство, конструктивни савети и мотивација представљали су непроцењиву подршку у свим фазама овог рада.

Искрену захвалност дугујем и члановима Комисије за одбрану дисертације за њихове проницљиве коментаре, стручне сугестије и време које су посветили анализи и евалуацији мог истраживања. Њихови савети и смернице значајно су допринели унапређењу квалитета овог рада.

Посебно бих желео да изразим неизмерну захвалност својој породици – кћеркама Надји и Нејри, као и супрузи Џенани, чија су љубав, стрпљење и безрезервна подршка били неизоставан ослонац током овог пута. Њихова вера у мене представљала је снажан мотив у превазилажењу изазова и достизању овог важног животног циља.

На крају, упућујем захвалност својим колегама и пријатељима за континуирану подршку, разумевање и инспиративне разговоре који су ми помогли да успешно приведем овај рад крају.

Садржај

1. Уводна разматрања	1
1.1 Предмет истраживања	2
1.2 Циљеви истраживања	2
1.3 Ограничења истраживања	3
1.4 Методологија истраживања	3
1.5 Структура истраживања	5
1.5.1 Методологија анализе података	6
1.6 Основне величине и основни термини коришћени у раду	10
1.7 Нумерички експеримент	11
1.7.1 Тачност нумеричког експеримента	13
1.7.2 Верификација и валидација нумеричког модела	14
2. Пожар у затвореном простору	17
2.1 Крива ослобађања топлоте (HRR крива)	20
2.2 Вентилација затвореног простора током пожара	24
2.3 Геометрија затвореног простора и HRR	29
3. Криве развоја пожара	33
3.1 Пожарни експерименти у пуном обиму (енгл. Full – scale test)	42
3.2 Пожарни експерименти у малом обиму (енгл. Small – scale test)	42
3.3 Тачност експерименталног тестирања	45
4. Модел за предвиђање развоја пожара нумеричком симулацијом	46
4.1 Зонски модел	48
4.2 Вишезонски модел	50
4.3 Рачунарска (нумеричка) динамика флуида	52
4.3.1 Основне једначине и нумеричке технике у CFD	53
4.3.2 Директна нумеричка симулација (DNS)	56
4.3.3 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)	57
4.3.4 Large Eddy Simulation (LES)	58
4.4 Програмски пакет за симулацију пожара Fire Dynamic Simulator	60
4.4.1 Историјски развој програмског пакета FDS	63
5. Нумерички експерименти	73
5.1 ISO 9705:2016 модел	74
5.2 ISO 668:2020 HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m модели	88
5.2.1 ISO 668:2020 HC 6 m модел	90
5.2.2 ISO 668:2020 HC 9 m модел	98

5.2.3 ISO 668:2020 HC 12 m модел	103
6. Утицај промене унутрашње геометрије простора и фактора вентилације на развој HRR криве	110
6.1 Ефекти промене унутрашње геометрије простора и фактора вентилације	110
6.2 Ефекти промене фактора вентилације и унутрашње геометрије модела током пожара	116
7. Компаративна анализа добијених резултата	123
7.1 ISO 9705 модел	125
7.1.1 Пожар контролисан вентилацијом	125
7.2 ISO 668:2020 HC 6 m модел	131
7.2.1 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор ВФ = 0.53	131
7.2.2 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор ВФ = 1	132
7.2.3 Пожар дефинисан за све услове вентилације	134
7.3 ISO 668:2020 HC 9 m модел	136
7.3.1 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор ВФ = 0.53	136
7.3.2 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор ВФ = 1	137
7.3.3 Пожар дефинисан за све услове вентилације	139
7.3.4 Закључци на основу компаративне анализе	140
7.4 ISO 668:2020 HC 12 m модел	141
7.4.1 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор ВФ = 0.53	141
7.4.2 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор ВФ = 1	142
7.4.3 Пожар дефинисан за све услове вентилације	143
7.4.4 Закључци на основу компаративне анализе	145
7.5 Нове пожарне криве дефинисане на основу перформанси - PBFC	146
7.5.1 Нова пожарна крива за модел ISO 9705	146
7.5.2 Нова пожарна крива за модел ISO 668:2020 HC 6 m	147
7.5.3 Нова пожарна крива за модел ISO 668:2020 HC 9 m	149
7.5.4 Нова пожарна крива за модел ISO 688:2020 HC 12 m	150
7.5.5 Нова пожарна крива за све моделе ISO 688:2020 HC 6 m, 9 m и 12 m	152
8. Закључна разматрања	153
Литература	162
Списак слика	169
Списак табела	174
Биографија аутора	176

1. Уводна разматрања

Феномен сагоревања и сâм процес сагоревања били су предмет изучавања многих истраживача и научника током историје, и објашњавани су у складу са степеном развоја науке и научних сазнања која су била у то време доступна. Веома рано се дошло до сазнања да су за сагоревање неопходна три елемента која чине добро познати „пожарни троугао“, али је и уочено да постоји ланчана реакција која одржава процес сагоревања док су та три елемента доступна. *Michael Faraday* је на примеру горења свеће описао ту ланчану реакцију коју обухвата фазе топљења воска, упијање отопљеног воска у фитиљ и издвајање пара воска који мешањем с кисеоником у ваздуху производи сагоревање које као резултат даје светлост и топлоту. Овај процес описао је на следећи начин: „*Не постоји закон по којем је било који део универзума управљан, а да се не примењује и не дотиче у феноменима сагоревања свеће.*“¹

Зато се данас говори о „пожарном тетраедру“ који поред основних елемената „пожарног троугла“ садржи и ланчану реакцију, елемент који укључује интерактиван хемијско-физички процес. Интеракције између пламена, гориве материје и околине могу бити изразито нелинеарне, а квантитативна процена укључених процеса често је комплексна. Обухвата најмање три научне дисциплине као што су хемија, механика флуида и физика. Хемија појашњава процес оксидације молекула испарљиве гориве материје са кисеоником из ваздуха. Такви детаљи укључују, на пример, природу и количину хемијских материја које се производе. Сагоревање је пре свега егзотермна оксидацијска реакција која осигурава потребну топлоту за одржавање ланчане реакције. Овај хемијски процес често укључује временске скале од наносекунде до микросекунди које су значајно краће од:

- (a) Турбулентних мешања и тзв. „време боравка у пламену“ (енгл. residence time) које представља време које честица горива проведе у пламену, и може се проценити као однос ширине линије пожара и брзине ширења пожара. Трајање овог времена је реда величине од милисекунде до секунде;²
- (b) Специфичног времена преноса топлоте према и унутар гориве материје које траје од секунде до минута.

¹ Faraday M., The chemical history of a candle, Chicago Review Pr, First edition, October (1988)

² енгл. „Residence time is the time that a fuel particle spends in the flame. It can be evaluated as the ratio between the fire front width and the fire rate of spread.“

Зато *Drysdale*, наглашава следећу чињеницу: „Пожар је пре свега манифестација хемијске реакције, начин изгарања може зависити више о физичког стања и расподеле горива и његове околине, него од његове хемијске природе.“³

Физика пружа разумевање процеса преноса топлоте. Топлота која се доводи до гориве материје може да трансформише гориво из чврстог или течног стања у запаљиву гасну фазу, опскрбљујући потребну латентну топлоту пиролизе (прим. чврсту материју), односно испаравања (прим. течну материју) за овај ендотермни процес.

Механика флуида пружа алат за квантификацију количине ваздуха, а тиме и кисеоника, који доводи до испаравања течне гориве материје, односно деградације чврсте гориве материје.

1.1 Предмет истраживања

Сценарији развоја пожара који се користе за прорачун отпорности грађевинских конструкција на дејство пожара базирани су на традиционалним методима који подразумевају анализу и екстраполацију постојећих експерименталних података о количини ослобођене топлоте и других параметара пожара под контролисаним условима. Такође, традиционални тестови подразумевају и добру циркулацију гасова и релативно хомогену расподелу температуре у простору у коме се одиграва пожар. Ови услови разликују се од услова који су присутни код реалних пожара, што оправдава истраживање које ће бити усмерено на анализу развоја пожара у (полу)затвореном простору у реалним условима и на формирање одговарајућег модела који прецизније описују утицај вентилације и геометрије простора на развој пожара.

1.2 Циљеви истраживања

Како су хипотезе истраживања дате у пријави докторске дисертације, овде ће укратко бити наведени циљеви истраживања, чијом реализацијом би био пружен допринос у објашњавању процеса сагоревања у затвореном простору у условима промене услова вентилације и променљиве геометрије простора. У исто време редослед наведених циљева представља и редослед којим су описана истраживања у овом раду:

1. Дефинисање параметара пожара у затвореном простору на начин да репрезентује реалне услове под којима се пожар одвија.
2. Дефинисање утицаја промене услова вентилације на поједине фазе пожара.
3. Дефинисање утицаја промене геометрије простора на поједине фазе пожара.

³ Drysdale D., An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Ed. Wiley, (2011)

4. Дефинисање одступања криве развоја пожара при промени степена вентилације за различите геометрије простора у односу на стандардну пожарну криву.
5. Дефинисање нове криве развоја пожара која би била примењива за развој пожара под различитим условима вентилације и променљиве геометрије простора у којем се пожар одвија.

1.3 Ограничења истраживања

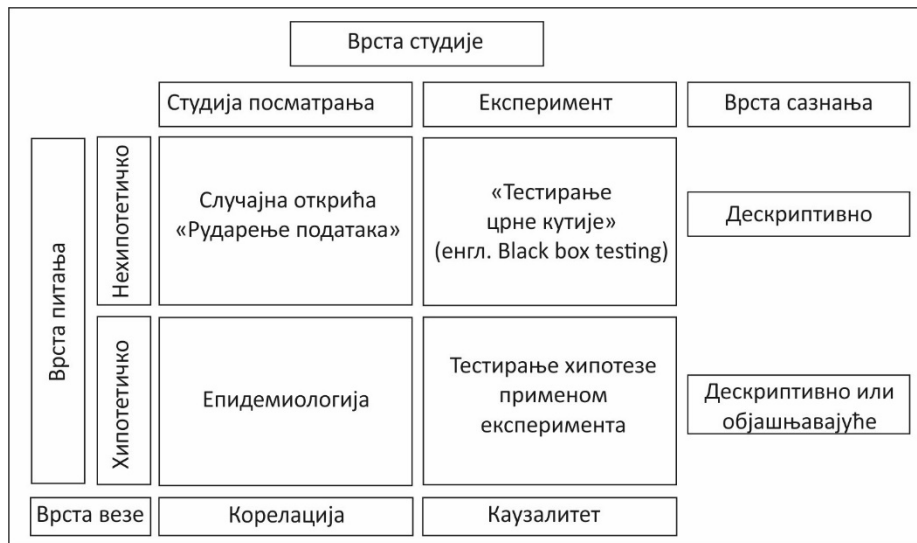
Свако истраживање, па и ово које је описано у раду, подлеже одређеним ограничењима која се постављају тако да не утичу на крајњи резултат. Нумеричке симулације/моделу пожара који су приказани у раду нуде поједностављене, али ефикасне методе за предвиђања динамике пожара у затвореном простору у зависности од природне вентилације и геометрије простора. Иако су ови модели превасходно пројектовани за једноставније геометрије простора, они поседују флексибилност која омогућава проширење на разне друге сценарије, укључујући пожаре у грађевинским објектима и подземним просторима. Важно је напоменути да се кроз истраживање у овом раду не разматра проблематика која је повезана с ширењем пожара између просторија и објеката. Осим тога, важно је напоменути да се ово истраживање не бави другим аспектима динамике пожара као што су генерисање дима, концентрације продуката сагоревања и томе слично.

1.4 Методологија истраживања

Модел који можда најбоље објашњава повезаност између истраживачких питања и врста студија у истраживању представио је Andersson.⁴ Постављена истраживачка питања и врста спроведеног истраживања су различити аспекти истраживања; различите врсте питања доводе до различитих облика разумевања, а различите врсте студија пружају увид у различите односе. Студије могу бити студије посматрања или експерименталне студије, а повезана истраживачка питања могу бити хипотетичка или не, слика 1.1.

У студији посматрања (лева страна слике 1.1), систем се проучава без утицаја или манипулације проматрача. Ова се посматрања могу спровести са или без претходно постављене хипотезе. Када је реч о истраживању експерименталне природе (десна страна слике 1.1), врста питања условиће различите приступе експерименталном истраживању, као што је тзв. „тестирање црне кутије“ или тестирању хипотезе применом експеримента.

⁴ Andersson, Ö., *Experiment!* Wiley, Chichester, UK, doi: 10.1002/9781118311059, (2012)

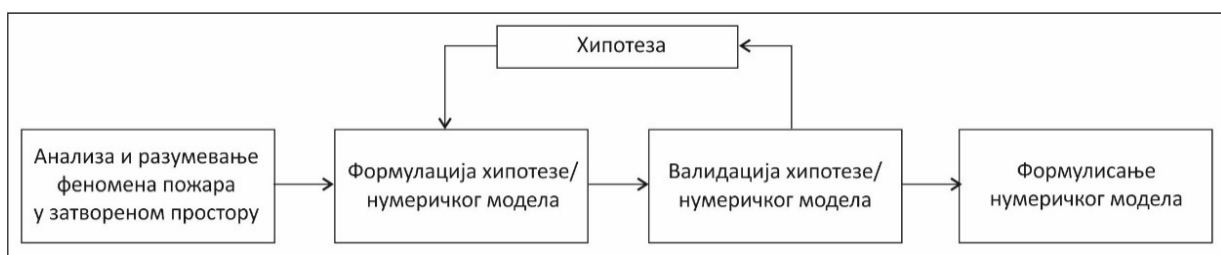


Слика 1.1 *Различите врсте студија и питања резултирајуће различите врсте знања и односа, репродуцирано према Anderssonu Ö*

Тестирање црне кутије се више бави тиме како систем делује, него како систем функционише и нема претпоставки о томе како ће систем реаговати у експерименту. При томе, тестирање црне кутије има као резултат *дескриптивно знање*.

Тестирање хипотезе експериментом се спроводи када је хипотеза формулисана, а експеримент осмишљен како би пружио подршку хипотези. Експеримент који је осмишљен на поставки хипотезе може као резултат да пружи *објашњавајуће знање*.

Претходна слика само илуструје концепт, а постоји, наравно, континуирани спектар између различитих врста истраживања уместо јасне границе која је приказана.⁵ Ова констатација је наведена због тога што постоје истраживања која није могуће сместити у ову матрицу, *као што је случај с истраживањем које је описано у овом раду*, која укључују преглед и квалитативну анализу претходних студија и нумеричке симулације/моделе, као „замену“ за традиционалне експерименте. Методологија истраживања која је примењена у раду заснива се општим принципима методологије научно-истраживачког рада који су илустровани на слици 1.2.



Слика 1.2 *Принципи научне методологије рада*

⁵ Johansson N., Fire Dynamics in Multi-Room Compartment Fires, Doctoral Thesis, Lund University, (2015)

Пошто је истраживање у раду усмерено на проблематику реалних услова пожара у затвореним просторима применом нових нумеричких методологија у предвиђању развоја HRR криве (енгл. Heat Release Rate), општи принципи су преформулисани у складу с природом истраживања на следећи начин:

1. Анализа (практичних и нумеричких експеримената) и објашњавање феномена пожара у затвореним просторијама. Објашњавање овог феномена постигнуто је проучавањем литературе из теорије динамике пожара, природне вентилације и HRR криве.
2. Формулација хипотезе/нумеричког модела за објашњење реалног пожара у затвореним просторима, утицаја природне вентилације и геометрије простора на његову динамику.
3. Валидација хипотезе/нумеричког модела серијом нумеричких експеримената. Проучавање утицаја промене природне вентилације на развој HRR криве.
4. Формулисање нумеричког модела и анализа на темељу поновљене верификације резултата.

Осигуравање веродостојности резултата истраживања кључно је без обзира на природу студије или питање које се истражује. Термини „валидност“ и „поузданост“ често се користе како би се проценила поузданост резултата истраживања. Валидност се односи на то, да ли је постављено питање тачно адресирано, док се поузданост односи на доследност и стабилност резултата током времена (Robson, C. 2011).⁶

Такође, важно је објаснити зашто су валидност и поузданост кључни у истраживању. Валидност осигурава да студија мери оно што је била сврха мерења, чиме се осигурава да су закључци који се извлаче из истраживања тачни и значајни. С друге стране, поузданост осигурава да су налази студије доследни и могу се реплицирати под сличним условима, што јача поверење у резултате. Заједно, валидност и поузданост пружају оквир за процену исправности и веродостојности резултата истраживања, чиме се побољшава веродостојност истраживања у целини.

1.5 Структура истраживања

За нова сазнања о различитим природним процесима, обично је потребно спровести експерименте који укључују изолацију процеса или система који се истражује. Ипак, унутар подручја науке постоји низ алтернативних метода за прикупљање података. Ове методе нуде различите приступе прикупљању информација, и свака је прилагођена различитим контекстима истраживања и циљевима.

⁶ Robson, C., Real world research, 3rd Ed. Wiley, Chichester, UK. (2011)

У табели 1.1 наведен је преглед главних метода које су коришћене за прикупљање података у овом истраживању. Методе обухватају различите технике, што указује на флексибилност и прилагодљивост овог научног истраживања у дефинисању реалних услова пожара у затвореним просторима.

Табела 1.1 *Преглед метода за прикупљања података које су примењене у истраживању*

Методе прикупљања података
Теоријске основе сагоревања у затвореном простору
Преглед стручних радова
Преглед експеримената у затвореном простору
Преглед база података калориметријских мерења
Преглед резултата истрага пожарних инцидената у затвореном простору
Преглед нумеричких експеримената
Нумерички експерименти

Редослед навођења метода у табели у исто време представља и редослед којим су наведене методе примењиване током истраживања које је описано у раду.

Употребљена су два приступа током прикупљања и прегледа података, приступи су међусобно различити, али служе сврси истраживања. Један приступ укључује темељиту анализу различитих научних публикација како би се истражила употреба нумеричких експеримената у претходним студијама. Други приступ укључује преглед теоријских међусобних веза и односа који су добијени експериментима између протока масе ваздуха на вентилационим отворима, геометрије простора и HRR криве како би се боље разумела корелација између тих варијабли. При томе, уобичајени изазов који је био повезан с прегледом и анализом претходних истраживања јесте присутност потенцијалне пристрасности у изворном материјалу.

Извршено је пажљиво разматрање и критичка евалуација приликом синтетизовања података из постојеће литературе како би се осигурала валидност и релевантност донесених закључака. Битно је било признати могућа ограничења или несклад у прегледаним подацима и транспарентно адресирати како би ти фактори могли да утичу на интерпретацију резултата. Одржавање објективности и ригорозности током процеса прегледа научних и стручних радова и резултата експеримената, било је неопходно да би добијени резултати истраживања били веродостојни и поуздани.

1.5.1 Методологија анализе података

У истраживању су коришћене различите технике за анализу података које су наведене у табели 1.2.

Табела 1.2 *Методe за анализу података које су коришћене у раду*

Методe анализе података
Дескриптивна статистика
Корелациона анализа
Регресиона анализа
Квалитативна анализа

Дескриптивна статистика има за сврху сажимање скупа података у једну или више појединачних нумеричких вредности које обухватају различите карактеристике података. Међу главним аспектима повезаним с дескриптивном статистиком су мере средишње тенденције и мере варијабилности.

Мере средишње тенденције имају за циљ да „ухвате“ појединачну репрезентативну вредност за скуп података. Типично, то се постиже израчунавањем аритметичке средине, која се често назива просек. Ова јединствена квантитативна вредност пружа увид у општи тренд или типичну вредност унутар скупа података. Осим тога, мере варијабилности допуњују мере средишње тенденције указујући на опсег расипања или размештаја података око средишње вредности. Честе мере варијабилности укључују распон, варијансу и стандардну девијацију, при чему свака пружа јединствене закључке о расподели података.

Коришћењем мера средишње тенденције и мера варијабилности, дескриптивна статистика пружа свеобухватан преглед скупа података, олакшавајући дубље разумевање његових карактеристика и информирање о даљњим анализама и интерпретацијама.

Дескриптивна статистика кориштена је у истраживању за анализу различитих параметара, укључујући температуру, геометријски вентилациони параметар и HRR криве. Израчунаване су аритметичка средина и стандардна девијација за ове варијабле, што је помогло у квантификавању несигурности експеримената и модела. Коришћењем ових мера, може се проценити репродуктивност различитих експерименталних сценарија и оценити тачност предвиђања модела.

Корелациона анализа служи као мера за процену односа између две или више варијабли. Током анализе корелације, проучава се смер (тј. да ли се једна варијабла повећава или смањује у односу на то како се мења друга варијабла) и јачина (тј. у којој мери једна варијабла утиче на другу) односа између варијабли. Овај однос је квантификован корелационим коефицијентом, при чему вредност 1 указује на савршено подударање између варијабли.

Ова анализа омогућава да се разумеју како промене у једној варијабли одговарају променама у другој, пружајући увиде у потенцијалне узрочне односе или асоцијације. Квантификовањем степена и смера корелације, могу се боље разумети динамика између варијабли и доносити интерпретације о њиховој узајамној зависности. Међутим, важно је напоменути да корелација не нужно имплицира узрочност, и да други фактори могу утицати на опажене односе између варијабли.

Анализа корелације се користила у раду како би се успоставила веза између фактора вентилације и HRR криве у затвореном простору, користећи емпиријске податке добивене из нумеричких експеримената. Овај аналитички приступ је имао за циљ да се открију потенцијалне везе између варијабли у светлу утицаја природне вентилације на развој HRR криве.

Регресиона анализа користи се за детаљну анализу података с циљем проналажења математичких модела који разјашњавају односе између једне или више независних варијабли и овисне варијабле. Најједноставнији облик регресије је линеарна, која укључује две варијабле.

Међутим, када се суочавамо с нелинеарним корелацијама међу скупом независних варијабли и зависном варијаблом, анализа постаје сложенија, и често захтева трансформације варијабли. Метода најмањих квадрата је чест приступ за прилагођавање линије регресије скупу података. Ова метода дефинише линију регресије на начин да се сума квадрата остатака (тј. разлика између података и регресијске линије) минимизира.

Ипак, самостално добивање једначине регресије није довољно без приказа мере расипања око линије. Ово расипање могуће је квантификовати помоћу коефицијента детерминације који се означава P^2 . Овај метрички податак пружа увид у то колико добро варијабилност у подацима објашњава модел. Виша вредност P^2 указује на боље прилагођавање модела подацима, и сугерише да се већи удео варијабилности у зависној варијабли може приписати независним варијаблама укљученим у модел регресије.

Анализа регресије примењена је у истраживању како би се пронашао однос између фактора вентилације и HRR у затвореном простору на темељу емпиријских података који су добијени из нумеричких експеримената.

Квалитативна анализа, на први поглед, није потребна у оваквој врсти истраживања јер претходно поменуте методе за анализу података углавном показују квантитативне карактеристике. Традиционално, квалитативно и квантитативно истраживање перципирани су као различите истраживачке парадигме. Међутим,

савремени истраживачки приступи често интегришу и квалитативне и квантитативне приступе, што има за резултат вишекритеријумски приступ проблему.

Студије случаја представљају пример примене квалитативне анализе, јер се често ослањају на субјективна мишљења и вербално изражавање резултата. Комбиновањем квалитативних и квантитативних метода може се проширити дубина и ширина истраживања, пружајући свеобухватне увиде у комплексне феномене. Ова интеграција омогућава холистичко разумевање које надилази ограничења појединачних истраживачких приступа, чиме се подстиче снажно и нијансирано научно истраживање.

Квалитативно истраживање при коришћењу нумеричких експеримената у науци о пожарима укључује субјективну евалуацију и поређења између традиционалних експеримената и спроведених нумеричких симулација. Овакав субјективни приступ може представљати изазове везане за веродостојност резултата, будући да знање и искуство истраживача утиче на анализу и закључке које он доноси. Ипак, спровођење квалитативног истраживања је кључно у студији, јер захтева пажљиву процену различитих аспеката нумеричких експеримената и традиционалних метода.

Иако су квантитативне методе доминантне, квалитативни елементи су у одређеној мери присутни у свим квантитативним методама. Квалитативно истраживање омогућује дубље продирање у нијансе нумеричких експеримената, пружајући увиде који допуњују квантитативне анализе. Коришћењем субјективног закључивања и компаративних процена, могу се идентификовати предности и ограничења која су инхерентна за оба приступа, чиме се олакшава целовито разумевање динамике пожара и методологије нумеричких симулација.

Квалитативно размишљање може да се користи приликом поређења и предвиђања модела с експерименталним подацима. Често се такво поређење визуално изводи, при чему се подударност између два скупа података (нпр. две HRR криве) субјективно процењује. Квалитативно графичке анализе примењују се тамо где се предвиђања модела врши на основу поређења с експерименталним резултатима без квантификације сагласности. Овакав приступ омогућава брзу визуалну процену подударности између модела и експерименталних података, и пружа прелиминарни увид у валидност модела.

Иако квалитативни приступ не пружа нумеричку меру сагласности, може бити користан у препознавању грубих дискрепанција или недостатака у моделирању. Важно је напоменути да квалитативне анализе не замењују квантитативне методе валидације, већ их надопуњују пружајући холистички увид у перформансе модела. Интеграција обе

врсте анализа омогућује темељиту евалуацију модела и повећава поузданост интерпретација резултата истраживања.

1.6 Основне величине и основни термини коришћени у раду

У тексту који следи наведене су основне величине и терминологија која ће бити коришћена за објашњавање поступака и резултата истраживања у овом раду.

- *Брзина сагоревања или ниво губитка масе*

Маса чврстог или течног горива која испарава и сагорева, изражава се као проток масе по јединици времена, обично у kg/s или g/s , и означава се као $\dot{m}$. Такође се може изразити као флуks масе или ниво сагоревања масе по јединици површине, обично у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$, и означава се као $\dot{m}''$. Треба направити разлику између брзине сагоревања и нивоа губитка масе (испоручено гориво), јер можда неће сво испоручено гориво да сагори. За горива која сагоревају са неограниченом количином ваздуха, ови појмови су синоними.

- *Ефикасност сагоревања*

Однос између ефективне топлоте сагоревања и потпуне топлоте сагоревања назива се ефикасност сагоревања и означава се као χ .

- *Топлотна снага, брзина ослобађања топлоте/ниво ослобађања енергије (HRR)*

Током горења ослобађа се одређена количину енергије по јединици времена, обично изражена у kW ($= \text{kJ/s}$) у ознаци $\dot{Q}$. Код већине материјала, ниво ослобађања енергије мења се током времена. Ово се често назива и брзина ослобађања топлоте - HRR (енгл. Heat Release Rate). Термини топлотна снага и ниво ослобађања енергије су међутим прикладнији, јер је топлота, строго говорећи, енергија пренесена због температурне разлике. Али због опште употребе израза, ови термини ће се у раду користити као синоними. Ниво ослобађања енергије садржи два дела: конвективни део $\dot{Q}_c$, и део топлотног зрачења $\dot{Q}_r$. Део топлотног зрачења зависи од количине чађи у пламену и може варирати од приближно 0.1 за горива која производе мало чађи, као што су алкохоли, до 0.4 за горива која производе много чађи.

- *Топлота сагоревања*

Топлота сагоревања је мерило енергије ослобођене када јединица масе материјала сагори, обично се изражава у kJ/kg или kJ/g . Важно је направити разлику између потпуне топлоте сагоревања, означене као ΔH_c , и ефективне топлоте сагоревања, означене као ΔH_{eff} . Прва је мерило енергије ослобођене када је сагоревање потпуно, не остављајући никакав заостали гориви материјал и ослобађајући сву хемијску енергију материјала.

Ефективна топлота сагоревања је прикладнија за пожаре, где остаје одређени остатак и сагоревање није нужно потпуно. Она се понекад назива и хемијска топлота сагоревања.

- *Топлота гасификације*

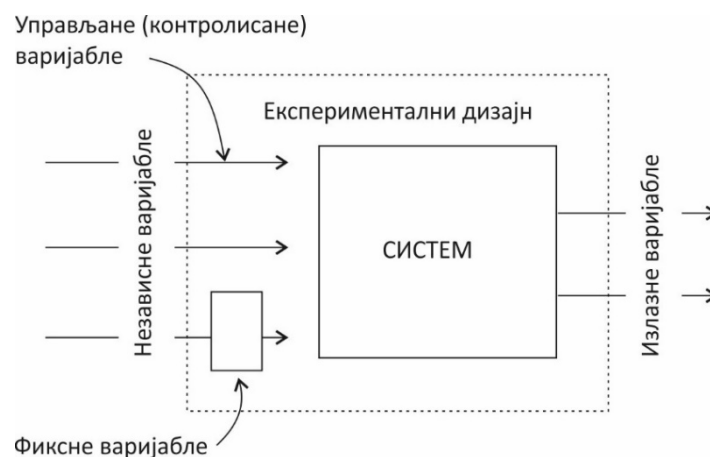
Топлота гасификације је мерило количине енергије потребне за гасификацију одређене јединице масе горива. Обично се изражава у kJ/kg и означава се као ΔH_g .

1.7 Нумерички експеримент

Експеримент се дефинише као операција или поступак изведен под контролисаним условима са циљем откривања непознатог ефекта или закона, ради тестирања или утврђивања хипотезе или као илустрација познатог закона.⁷

Уместо традиционалних експеримената у великом и малом обиму ради истраживања одређених феномена пожара, алтернативни приступ представља употреба нумеричког модела. Сви нумерички експерименти укључују поједностављење реалности, али ипак могу послужити у разумевању одређених аспеката реалности.

Нумерички експерименти се спроводе како би се доказала узрочност, јер за разлику од студија посматрања, у експерименту је могуће манипулисати различитим независним варијаблама (у овом истраживању то је геометрија вентилационог отвора) што ће резултирати променом стања система (пожар у затвореном простору у овом истраживању). Промена стања система се мери и анализира како би се генерисале информације које су релевантне за хипотезе истраживања. То значи да ће нумерички експеримент укључивати неколико симулација, при чему ће се једна или више независних варијабли мењати између симулација, слика 1.3.



Слика 1.3 Илустрација експерименталног дизајна; инспирисано радом Höst, Regnell и Runeson (2006).⁸

⁷ An Encyclopedia Britannica, Merriam Webster Dictionary, <https://www.merriam-webster.com/>

⁸ Höst, M., Regnell, B. and Runeson, P., Att genomföra examensarbete, Studentlitteratur, Lund, Sweden. (2006).

Дефиниција нумеричких експеримената у науци о пожарима може се формулисати на следећи начин: „*Нумерички експеримент спроводи се када се нумерички модел користи у систематичном експерименталном приступу.*”⁹

Нумерички експерименти у смислу претходне дефиниције примењивани су у различитим студијама о пожарима током последњих деценија, али овај приступ и данас има одређену стигму као истраживачка метода у поређењу с традиционалним експериментима. Међутим, како се нумерички модели пожара континуирано развијају, нумерички експерименти постају важна истраживачка метода у науци о пожарима.

Важно је напоменути да нумерички експерименти нуде низ предности у односу на традиционалне експерименте, попут економске исплативости, скалабилности и могућности истраживања сценарија који би били непрактични или несигурни за понављање у традиционалним експерименталним условима. Осим тога, нумерички експерименти омогућавају истраживачима флексибилност у манипулисању варијаблама и прецизно праћење промена које се дешавају у систему током времена.

Свакако да постоје и недостаци у коришћењу нумеричких експеримената. Нумерички модел служи као поједностављена репрезентација инхерентне комплексности у физичкој стварности, и због тога је потребно да се нумерички експерименти изводе с опрезом, будући да поједностављивања у моделу могу да резултирају изостанком кључних информација. Резултати нумеричких експеримената зависе о одлукама које доноси истраживач, што је својеврсни изазов. Пропусти при избору параметара, улазних података или претпоставки моделирања могу угрозити тачност и поузданост резултата. Нумерички модели често укључују претпоставке и апроксимације које можда неће у потпуности обухватити сложеност понашања пожара у реалним условима. Таква поједностављивања могу да уведу неизвесности и ограничења у могућности предвиђања модела, што потенцијално може утицати на тачност и поузданост резултата који се добијају из нумеричких експеримената.

Континуирани напори за валидацију и проверу у поређењу с подацима из стварног света од виталне су важности како би се превенирале грешке, ојачало поверење у добијене резултате и повећала веродостојност нумеричких експеримената у истраживању пожара. Како се технологија и методологија нумеричких модела континуирано побољшава, очекује се да ће нумерички експерименти постати још

⁹ Johansson, N., Numerical experiments and compartment fires, Fire Science Reviews, 3 (1), doi: 10.1186/s40038-014-0002-2, (2014)

снажнији алат у истраживању пожара и пружити значајан допринос разумевању пожарних феномена и развоју сигурнијих стратегија заштите од пожара.

1.7.1 Тачност нумеричког експеримента

Грешка у нумеричким моделима није дефинисана на исти начин као у експериментима. Грешка у експериментима се дефинише као насумична или систематска разлика од "праве вредности". Ова дефиниција није могућа за употребу у нумеричким моделима јер "права вредност" није позната¹⁰. У експериментима се грешка и несигурност повезују заједно, али у нумеричким симулацијама грешка и несигурност се раздвајају. Организација AIAA - *American Institute of Aeronautics and Astronautics*¹¹, дефинише несигурности и грешке у рачунарским симулацијама на следећи начин:

- Несигурност: „Потенцијални недостатак у било којој фази или активности процеса моделирања који произлази из недостатка знања.“
- Грешка: „Препознатљив недостатак у било којој фази или активности моделирања и симулације који није последица недостатка знања.“

Разлика између ове две дефиниције огледа се у односу према знању. Несигурност се јавља када постоји могућност недостатка знања, што значи да одређени недостаци могу или не морају бити присутни. У науци о пожарима, несигурности модела манифестирају се као претпоставке и апроксимације, како физичке тако и математичке, које се користе за приказивање стварног света у различитим врстама модела. Овај облик несигурности представља изазов у квантификовању, посебно како се сложеност модела повећава.¹²

Претпоставке и поједностављења потребна за извођење израчуна доприносе несигурности у излазним вредностима, а није лако утврдити како ће појединачне претпоставке и поједностављења утицати на ту несигурност. Ниво несигурности зависи од ситуације. Ресурси, претпоставке и одлуке корисника додатно повећавају несигурност у прорачунима, на пример при процени HRR, што наравно утиче на несигурност излазних вредности.

¹⁰ Van Hees P., Validation and Verification of Fire Models for Fire Safety Engineering. *Procedia Engineering* 62:154–168. doi: 10.1016/j.proengl.2013.08.052, (2013)

¹¹ AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations. AIAA G-077-1998, Reston, VA, USA, (1998)

¹² Najafi D, Jolgar F, Dreisbach J., Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 1: Main report. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA, (2007)

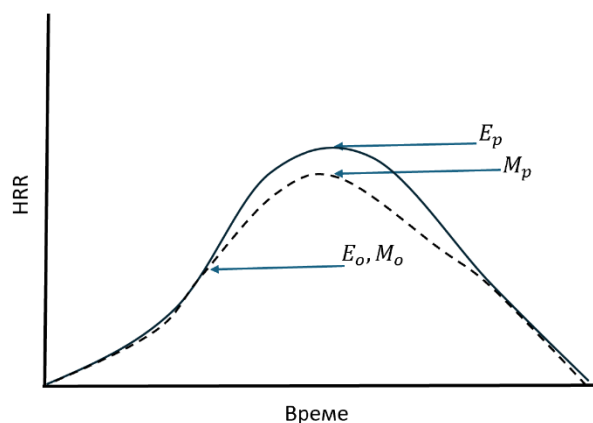
1.7.2 Верификација и валидација нумеричког модела

Верификација је процес у којем се проверава имплементација модела и има два аспекта:

- Верификација кода
- Верификација прорачуна

У процесу оцене верификације не користе се експерименти, уместо тога испитује се програмирање, итеративна доследност, конвергенција итд.

У валидацији, експерименти су кључни јер је то процес којим се одређује тачност модела у односу на стварни свет. То се постиже идентификовањем и квантификовањем погрешака и несигурности поређењем експерименталних података и података из симулација. Током процеса валидације важно је имати у виду да експериментални подаци садрже погрешке и несигурности које треба узети у обзир приликом поређења. То отежава поређење између резултата мерења и модела, и најједноставнији метод је поређење максималних вредности, слика 1.4.



Слика 1.4 HRR – Разлика између мерења (пуна линија) и предикције модела (испрекидана линија) може бити у зависности о времену. У приказаном случају, разлике се мењају с временом (Слика је инспирисана радом Hamins A. i McGrattan K.)

Америчко удружење за испитивање материјала и тестирање ASTM American Society for Testing and Materials, у свом приручнику *Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models* дефинише кораке у процесу евалуације одређеног модела на начин који описан у даљем тексту.¹³

Релативна разлика између предикција модела и експерименталних мерења, ε , израчунава се једначином:

¹³ ASTM Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models, ASTM E1355 - 12 doi: 10.1520/E1355-12, (2012)

$$\varepsilon = \frac{\Delta M - \Delta E}{\Delta E} = \frac{(M_p - M_o) - (E_p - E_o)}{(E_p - E_o)} \quad (1.1)$$

У претходној једначини ΔM представља разлику између максималне вредности предикције модела и основне вредности, док је ΔE разлика између максималне вредности експерименталног мерења и основне вредности.

На стотине предикција модела и мерења су упоређивана као део евалуације FDS (енгл. Fire Dynamic Simulator) модела од стране америчке комисије NRC U.S. Nuclear Regulatory Commission у серији извештаја под називом *Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications (Volume 2 and Volume 3 – 7)*¹⁴. За већину поређења модела и мерења која су спроведа током студије, релативна разлика износила је између 0.01 и 0.2.

Релативна разлика се упоређује с експерименталном несигурношћу U , која укључује несигурност улазних података и несигурност експерименталног мерења. Ова процена помаже да се утврди да ли је одступање између предикција модела и експерименталних мерења унутар прихватљивих граница несигурности. Наведени однос се израчунава као:

$$\varepsilon/U \quad (1.2)$$

Притом, ако је однос $\varepsilon/U \leq 1$, сматра се да су предикције модела унутар граница експерименталне несигурности, што одражава висок ниво сагласности између модела и експерименталних података.

У истраживању које је описано у раду примењена је NRC методологија релативне разлике између нумеричког модела и експерименталних мерења. Релативна разлика је израчуната за сваки појединачни нумерички модел на основу резултата експерименталних истраживања у идентичним условима еквивалентног односа за HRR криве. На основу резултата релативне разлике HRR криве и поређења са експерименталном несигурношћу, вршена је процена да ли нумерички модел испуњава NRC захтеве за тачност и поузданост предвиђања у нумеричкој симулацији.

Такође, у раду је примењена методологија заснована на истраживању *Tilley N.* и сар.¹⁵, у циљу проучавања утицаја значајног броја различитих параметара (нпр.

¹⁴ Hamins A, McGrattan K., Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 2: Experimental Uncertainty. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA, 2007.

¹⁵ Tilley N, Rauwoens P, Merci B., Verification of the accuracy of CFD simulations in small-scale tunnel and atrium fire configurations. Fire Safety Journal 46:186–193., doi: 10.1016/J.Firesaf.2011.01.007, 2011.

геометрија отвора, геометрија простора, вентилациони фактор и динамика промене вентилационог фактора) као и промене истих. Резултати корелација и регресионе анализе нумеричких експеримента коришћени су у раду за поређење са резултатима традиционалних експеримената за оцену спољашње валидности модела.

Термин нумерички експеримент уско је повезан с програмским пакетом *Fire Dynamic Simulator - FDS*. Овај програмски пакет за симулацију пожара који је коришћен у истраживању биће детаљније описан у даљем тексту, али се овде помиње јер су термин нумерички експеримент међу првима употребили *Chow W.* и *Zou K.*, када су применом FDS извели емпиријску корелацију масеног протока ваздуха кроз врата.¹⁶ *Chow W.* и *Zou K.* су прво упоредили компјутерски модел са постојећим експерименталним подацима и затим користили FDS за одређивање вредности константе у познатом изразу за масени проток кроз отвор, који је првобитно формулисао *Kawagoe*.

Студија аутора *Tilley N.* и сар. истраживала је да ли се FDS може користити у нумеричким експериментима проучавањем сагласности са експерименталним подацима из два различита пожарна теста малог обима (на пример, тунел и атријум). *Tilley* је описао да је главна предност нумеричких експеримената могућност проучавања утицаја значајног броја различитих параметара и промене истих. Закључци истраживања били су да FDS модел омогућава добре процене са експериментима малог обима и да се истраживање утицаја промене параметара уз помоћ нумеричких експеримената може извести унутар сличне конфигурације као и експерименти малог обима.

Као практичан пример употребе FDS, шведска индустрија нуклеарних електрана (NBSG - *Nationella Brandsäkerhetsgruppen*), имала је потребу да развије методу за процену ризика од пожара. Због недостатка ресурса у лабораторијском простору и времену, било је непрактично развити такву методу помоћу емпиријских података из традиционалних експеримената. Уместо тога, употребљен је FDS за прикупљање емпиријских података при анализи вишеструке регресије. Резултати корелација из ове регресионе анализе упоређени су са резултатима традиционалних експеримената у пуном обиму како би се проценила спољашња валидност.¹⁷

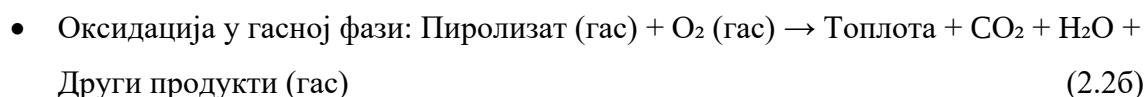
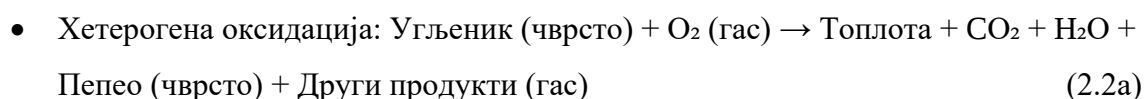
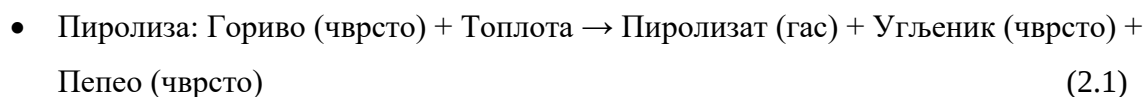
¹⁶ Chow WK, Zou GW., Correlation equations on fire-induced air flow rates through doorway derived by large eddy simulation. *Building and Environment* 40:897–906. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.09.010, (2005)

¹⁷ Johansson, N., Numerical experiments - a research method in fire science. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, (2013)

2. Пожар у затвореном простору

Језгро сваког процеса сагоревања представља егзотермна реакција која резултира ослобађањем топлоте и стварањем гасовитих и чврстих производа. Да ли ће доминирати тињање или режим пламена зависи од физичко-хемијских особина материје и агрегатног стања материје која се оксидује: ако се оксидација одвија у чврстој фази, доминантно је тињање; ако се оксидација одвија у гасовитој фази, доминира пламени режим.¹⁸

Сагоревање чврстог горива уопштено обухвата елементарне хемијске реакције, али у свом најједноставнијем облику, може бити апроксимирано као два збирна хемијска процеса: пиролиза¹⁹ (једначина 2.1), након чега следи оксидација (једначина 2.2а или 2.2б).



Пиролиза резултира гасовитим и чврстим производима, а од тих производа пиролизат и угљеник су подложни даљој оксидацији. Оксидација угљеника (једначина 2.2а) је хетерогена реакција (која укључује чврсте и гасовите врсте) и одвија се на угљенику произведеном пиролизом, што доводи до жарећег сагоревања. Оксидација пиролизата (једначина 2.2б) одвија се у гасној фази, што је хомогена реакција (која укључује само гасовите врсте) и доводи до пламеног сагоревања. На микро нивоу, сагоревање се одвија на површини поре чврстог горива, док се на макро нивоу представља као феномен који утиче на цели слој горива. Процес сагоревања у условима тињања захтева довод топлоте и зависи од преноса топлоте и кинетике горива, при чему брзина довода кисеоника игра секундарну улогу. Карактеристична температура, брзина ширења и интензитет сагоревања у тињању су ниски у поређењу са сагоревањем пламена. Температуре за тињање крећу се у распону од 450 °C до 700 °C.²⁰ Када је

¹⁸ У овом контексту, оксидација је реакција неког агенса са кисеоником из ваздуха, и она је егзотермна реакција.

¹⁹ Пиролиза у овом контексту представља хемијску декомпозицију чврстог материјала искључиво загревањем. Пиролиза не укључује оксидационе реакције и она је ендотермна реакција. Обухвата иреверзибилну и симултану промену хемијског састава и физичког стања.

²⁰ G. Rein, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19, Society of Fire Protection Engineers, 2016.

топлота ослобођена оксидацијом довољно висока да избалансира топлоту потребну за ендотермне процесе (губици топлоте, пиролиза, сушење и предгревање горива), условљава пропагацију и реакција може постати самоодржива, односно, долази до паљења (и тек тада ће брзина довода кисеоника играти значајну улогу).

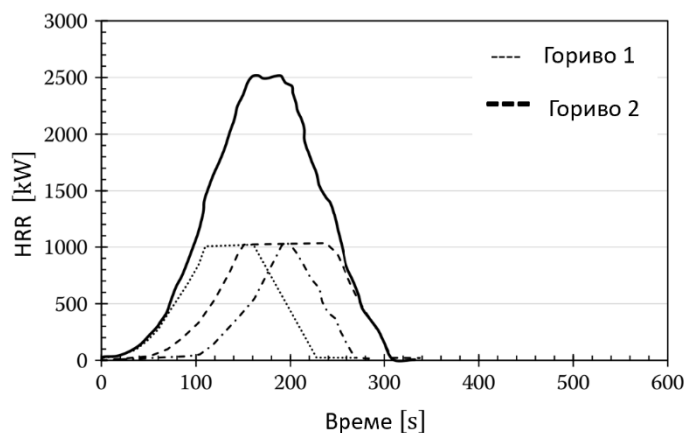
Када је паљење постигнуто, пламен може да се шири кроз области у којима је присутна запаљива мешавина, трошећи реактанте. Брзина пиролизе у тренутку када пламен постане присутан одредиће да ли пламен може да настави да пропагира или ће сагоревање престати након што се мешавина у гасној фази потроши. Повратне информације од пламена ће побољшати пиролизу, али обично ће релативно велика топлотна инерција чврстог горива резултирати спорим одзивом, па ће бити неопходно да брзина пиролизе буде довољна чак и у одсуству повратне топлотне енергије пламена. Ако брзина пиролизе није довољна, пламен ће се угасити, а континуирана пиролиза ће поново довести до формирања запаљиве мешавине и накнадног паљења.

Повратна топлотна енергија пламена која се доводи до гориве материје трансформише гориво из чврстог или течног стања у запаљиву гасну фазу, опскрбљујући потребну латентну топлоту пиролизе (за чврсту гориву материју), односно испаравања (за течну гориву материју) за овај ендотермни процес, и обележава се L_v .

Ширење пламена на површини као сукцесивни фронт паљења преко запаљивог објекта, односно, брзина ширења и њена одрживост контролисани су равнотежом између грејања пламена и пораста површинске температуре. У сценаријима када пламен узрокује паљење неискоришћене запаљиве површине која је већа од површине која гори пре него што дође до локалног гашења, ширење ће се убрзати. На овом принципу, релативна конфигурација пламена у односу на запаљиву површину је кључна за динамику и ширење пламена по површини сагоревања.

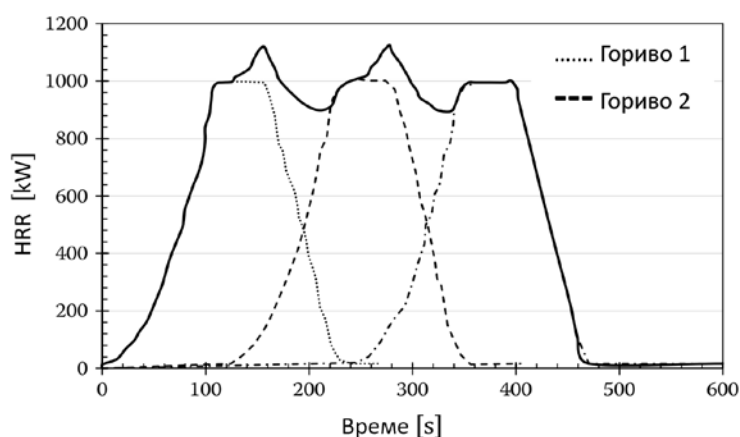
Мера енергије ослобођене када јединица масе материје сагори, назива се топлота сагоревања и изражена је у kJ/kg или kJ/g . Важно је разликовати потпуну топлоту сагоревања, означену као ΔH_c , и ефективну топлоту сагоревања, означену као ΔH_{eff} . Прва је мерило енергије ослобођене када је сагоревање потпуно, не остављајући заосталу гориву материју и ослобађајући сву хемијску енергију материјала. Ефективна топлота сагоревања је прикладнија за пожаре, где остаје одређени остатак и сагоревање није потпуно. Маса гориве материје која сагорева, изражава се као проток масе по јединици времена, обично у kg/s или g/s , и означава се $\dot{m}$.

Ако пожар има брзу фазу раста, произвешће се висока али уска крива, као што је приказано на слици 2.3.



Слика 2.3 Брза фаза раста, карактеристичан уски профил HRR

Насупрот томе, ако има спору фазу раста, произвешће се релативно равна али широка крива, као што је приказано на слици 2.4 (почетни извор пожара и објекти су идентични као на слици 2.3).²²

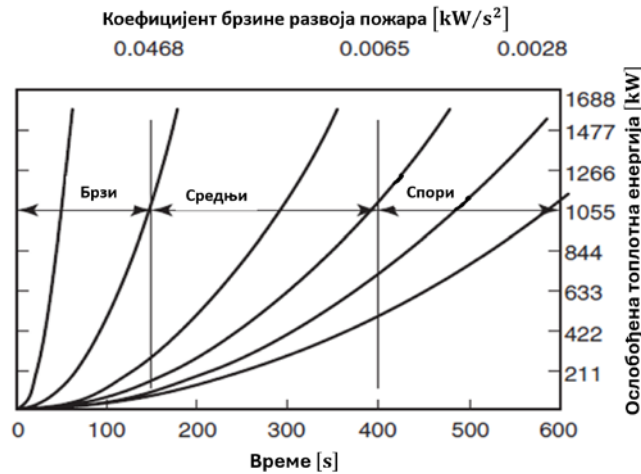


Слика 2.4 Спора фаза раста, карактеристичан широк профил HRR

Паљење је фаза у којој се гориво, кисеоник и топлота комбинују како би започео процес сагоревања. Током ове фазе, време паљења може трајати неколико секунди, сати, или чак дана због чињенице да је брзина ширења занемарљива. Сагоревање се може самостално угасити или прећи у следећу фазу. Класификација брзине развоја пожара на основу стандарда NFPA 72 *National Fire Alarm and Signaling Code*, приказана је на слици 2.5 и у табели 2.1.²³

²² Hurley, Morgan J., Rosenbaum, Eric R., Performance-Based Fire Safety Design, 2018.

²³ NFPA 72, National Fire Alarm and Signaling Code, 2022.



Слика 2.5 Класификација пожара на основу брзине развоја, NFPA 72, National Fire Alarm and Signaling Code, edition 2022.

Табела 2.1 Класификација развоја пожара; извор: NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code, Табела B.2.3.2.3.6

Развој пожара	Време развоја пожара t_{cr} [s]	Коефицијент брзине развоја пожара α [kW/s ²]
Спори	$t_{cr} \geq 400$ s	$\alpha \leq 0.0066$ kW/s ²
Средњи	$150 \leq t_{cr} < 400$ s	$0.0066 < \alpha \leq 0.0469$ kW/s ²
Брзи	$t_{cr} < 150$ s	$\alpha > 0.0469$ kW/s ²

Прорачуни који се користе у пракси за фазу након паљења, фазу раста, могу се извести помоћу једначине потенције:

$$\dot{Q} = \alpha t^p \quad (2.3)$$

где су:

$\dot{Q}$ - HRR [kW],

α - коефицијент брзине развоја пожара [kW/s^p],

t - време [s],

p - експонент раста [-],

из чега следи да је:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{t_{cr}^p} \quad (2.4)$$

HRR у затвореном простору генерише симетричне обрасце струјања флуида и у неким случајевима, повећава брзину сагоревања због повратне рефлексије топлотног зрачења са површина просторије и димног слоја, што у одређеним случајевима доводи до повећања HRR. Да би се превазишли ови утицаји, стандардне методологије тестирања

за мерење HRR користе принцип отворене конфигурације простора, што омогућава неограничен проток ваздуха до зоне сагоревања.²⁴

На основу тога директна употреба калориметријских података за прорачуне HRR у затвореном простору је прихватљива само у условима ако геометријски параметар отвора има такву вредност да је доступност ваздуха (кисеоника) у концентracијама иста као на отвореном простору, што се не дешава у пракси.²⁵

У истраживању које је описано у раду, циљ је био да се анализира утицај природне вентилације и геометрије простора на све фазе пожара, узимајући у обзир специфичне услове затвореног простора. Очекивање је да ће геометрија простора и геометријски параметри отвора (вентилација) играти кључну улогу у различитим фазама пожара, али са различитим интензитетом. У фази паљења, геометрија простора и довољан приступ кисеонику неће утицати на развој HRR криве, док би у каснијим фазама могле допринети разлици у максималним вредностима HRR у односу на калориметријске тестове, продужење сагоревања, ниже максималне температуре у простору, или чак спречити потпуни прелазак у фазу пуног развоја пожара.

Геометријски параметри отвора (вентилација) и њихова локација утицаће на смањење разлике температуре између излазне топлотне струје (продукти сагоревања) и улазне ваздушне струје (хладне струје), повећавање турбуленцију унутар простора и време кретања до локације сагоревања, што директно утиче на концентрацију кисеоника у зони сагоревања и на повећање флукутације и смањење у HRR-у.

Геометрија простора је значајан фактор, јер облик, висина плафона и величина простора могу утицати на динамику пожара. Мање геометрије просторије са неправилним обликом повећавају турбулентно кретање улазно – излазних струја и унутрашњу хетерогеност простора, чиме се смањује ефикасност вентилације и потенцијално смањује: HRR, температуру у простору током сагоревања, умањује могућност *flashover*-а²⁶ и *backdraft*-а²⁷ и убрзава прелазак у фазу стишавања. С друге

²⁴ Krasny, J., Babrauskas, V., Parker, W., Fire Behaviours of Upholstered Furniture and Mattresses; NoYes Publications: Norwich, UK, 2001.

²⁵ Jessie, H., Distribution Curves for Interior Furnishings on CO₂, CO, HCN, Soot and Heat of Combustion; Department of Civil and Natural Resources Engineering, Christchurch, New Zealand, 2011.

²⁶ енгл. Flashover – Дефиниција ISO 24678-6:2016: „Брзи прелаз у стање потпуне укључености површине у пожар запаљивог материјала унутар затвореног простора.“

²⁷ енгл. Backdraft – Дефиниција ISO 13943:2017: „Нагло сагоревање гасова услед изненадног увођења ваздуха у затворени простор са недостатком кисеоника који садржи вруће производе непотпуног сагоревања.“

стране, веће или отвореније просторије могу омогућити бољи проток ваздуха, максималне вредности HRR и изазвати брже ширење пожара.

2.2 Вентилација затвореног простора током пожара

Може се рећи да се геометријски параметар отвора односи на способност објекта да омогући ваздуху да улази и излази, што може бити природно кроз отворе, прозоре и врата, или механички кроз системе за вентилацију. Механичка вентилација није укључена у истраживање јер је истраживање фокусирано на природну вентилацију као примарни начин омогућавања приступа кисеонику у затвореним просторима. Проучавање само природне вентилације омогућава детаљнију анализу, фокусирајући се на ефекте који зависе искључиво од геометрије простора и отвора, као и доступности кисеоника из природних извора. Такође, природна вентилација се чешће јавља у реалним сценаријима пожара, где су присутни прозори, врата и други отвори, док механички системи нису увек поуздани или присутни у свим зградама, нарочито током пожара када могу отказати или се аутоматски искључују на бази логичке детекције пожара и спречавања његовог ширења.

Разлог за искључивање механичке вентилације лежи и у чињеници да она доноси низ додатних варијабли за разумевање основних механизма природног кретања ваздуха. Механички системи могу значајно утицати на дистрибуцију ваздуха, проток кисеоника и брзину сагоревања, чиме би резултати истраживања постали сложенији и теже применљиви у реалним сценаријима где механичка вентилација није доступна.

До 1950-их година, преовладавало је мишљење да су хазарди и интензитет пожара у затвореним просторима контролисани првенствено количином гориве материје. Фазе пожара тада још нису биле прецизно дефинисане. Сходно томе, преовладала је претпоставка да су карактеристике пожара директно условљене пожарним оптерећењем у простору, која је примењивана на различите просторе приликом пројектовања пожарне безбедности.²⁸

Прорачун максималног протока ваздуха први пут је представљен од стране *Kunio Kawagoe*, јапанског пионира у истраживању феномена пожара. *Kawagoe* је 1958. године резимирао резултате десетогодишњег истраживања пожара у затвореним просторима. У студији је коришћена претпоставка стехиометријског сагоревања дрвета и хомогена

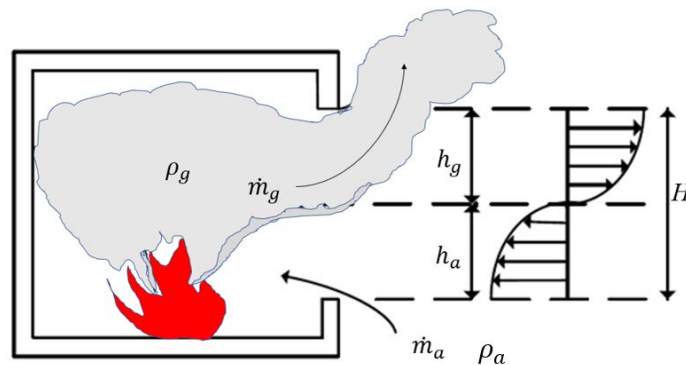
²⁸ Z. Wang, T. Zhang, X. Huang Numerical Modeling of Compartment Fire: Ventilation Characteristics and Limits of Kawagoe's Law, Fire Technology. doi:10.1007/s10694-022-01218-1, 2022.

температура простора коришћењем *Bernulijеве* једначине и принципа очувања масе. На основу студије описана је развијена фаза пожара у затвореним просторима, која је накнадно потврђена и низом емпиријских тестирања.²⁹

Кретање флуида у затвореном простору услед пожара примарно је последица сагоревања, при чему конвекција игра кључну улогу у генерисању узгона. Током сагоревања долази до стварања топлоте, што изазива локално загревање ваздуха и смањење његове густине. Као резултат, топлији ваздух се подиже према горе, стварајући узгон, који је последица разлике у густини између топлих и хладних слојева флуида. Ова разлика генерише градијент притиска у простору, који даље узрокује кретање ваздушних маса према областима нижег притиска. Узгон ствара снагу која „гура“ ток флуида, омогућавајући ваздуху да циркулише у простору. Овај ток флуида се даље убрзава у присуству отвора, кроз које ваздух може улазити и излазити, што додатно утиче на динамику вентилације. Кинетичка енергија флуида, генерисана узгоном и градијентом притиска, води до развоја сложених струјања која утичу на ширење топлоте и димних гасова у простору.

Разматрајући затворени простор с отвором, како је приказано на слици 2.6, разлика у притиску Δp повезана је с узгоном:

$$\Delta p = (\rho_a - \rho_g) g H \quad [Pa] \quad (2.5)$$



Слика 2.6 Кретање флуида кроз отвор затвореног простора

Разлика притиска условљава брзину кретања флуида (токова):

$$V = \sqrt{\frac{2 (\rho_a - \rho_g) g H}{\rho_g}} \quad (2.6)$$

где су:

ρ_a - густина ваздуха (хладна струја) [kg/m^3],

²⁹ Kawagoe K., Fire Behavior in Rooms, Report 27. Tokyo, Japan, 1958.

ρ_g - густина дима (топла струја) [kg/m³],

g - гравитационо убрзање: 9.81 [m/s²],

H - висина отвора [m],

V - брзина [m/s],

Тачан проток масе на отвору затвореног простора $\dot{m}_a$ зависи од разлике у температури и величине отвора. Студија *Kawagoe* показала је корелацију између брзине масеног дотока ваздуха и брзине сагоревања гориве материје у развијеној фази пожара. То јест, губитак масе сагоревања $\dot{m}_F$ дрвета и маса дотока ваздуха $\dot{m}_a$ у корелацији су с карактеристикама геометријских параметара отвора, како је и сумирано једначинама:

$$\dot{m}_F = C_F A_o \sqrt{H_o} = 0.09 A_o \sqrt{H_o} \quad (2.7)$$

$$\dot{m}_a = C_a A_o \sqrt{H_o} = 0.5 A_o \sqrt{H_o} \quad (2.8)$$

где су:

C_F – константа коефицијента сагоревања

C_a – константа коефицијента дотока ваздуха

A_o – површина отвора [m²],

H_o – висина отвора [m],

$\dot{m}_F$ – губитак масе горива [kg/s],

$\dot{m}_a$ – маса дотока ваздуха [kg/s],

Пошто су коефицијенти сагоревања и дотока ваздуха константе, очигледно је да је пожар у затвореном простору условљен геометријским параметром отвора који се назива *вентилациони фактор* (ВФ):

$$A_o \sqrt{H_o} \quad (2.9)$$

Ова корелација потврђена је низом експеримената, у којима су се користиле запремине простора од 0.032 m³ до 125 m³ и са различитим отворима при чему је могућност грешке 30%. Резултати експеримената показују да константа коефицијента сагоревања C_F , (вредност 0.09 у једначини 2.7), варира од 5.0 до 6.0, док константа коефицијента дотока ваздуха C_a (вредност 0.5 у једначини 2.8.), варира од 0.4 до 0.61, у оквирима неизвесности *Kawagoe*овог експеримента од 30%.^{30 31 32}

³⁰ Rockett JA., Fire Induced Gas Flow in an Enclosure. Combustion Science and Technology 12:165–75, 1976.

³¹ Simms DL, Hird D, Wraight HG., The temperature and duration of fires: Part I: Some experiments with models with restricted ventilation, Fire Safety Science; 412:1, 1960.

³² Thomas PH., Studies of fires in buildings using models, Research 13:87, 1960.

Потребно је нагласити да је за време експеримената коефицијент сагоревања употребом једначине 2.7, $C_F = 5.5$, мерен и проверен само за дрво, које се користило у *Kawagoe*вим оригиналним експериментима, и тај коефицијент се мења у зависности од гориве материје. Једначина 2.8, која описује доток ваздуха у затворени простор, нашла је широку примену у анализи пожарних сценарија. Експерименти и теоретске анализе сугеришу да је *Kawagoe*ов принцип примењив у развијеној фази пожара, где је простор испуњен топлим гасовима и димом са температуром изнад 800 K.

Претпостављајући константну топлоту оксидације од 13.1 MJ/kg за већину гориве материје и потпуно сагоревање дотока кисеоника (принцип калориметрије кисеоника), може се предвидети максимални HRR пожара унутра затвореног простора приказан једначином:

$$\dot{Q} = 1500 A_o \sqrt{H_o} \quad (2.10)$$

Једначине 2.7 до 2.10, не само да су поставиле темељ за даља истраживања динамике пожара у затвореним просторима, него су помогле при стандардизацији тестова за отпорност структурних елемената у условима пожара.³³ У протеклом времену, *Kawagoe*ов принцип је верификован и додатно усклађиван у експериментима и теоријским истраживањима од стране многих истраживача.

*Kawagoe*ов закон, претпоставља да је улазни проток масе једнак излазном протоку масе у затвореном пожарном простору, док се маса произведена унутар простора занемарује. Ако се не занемари генерисање запаљивих гасова унутар простора, потребно је урадити корекције једначине 2.8, као што су и предложили *Karlson B.*³⁴ и *Delichatsios MA.*³⁵:

$$\dot{m}_a = \frac{2.1 A_o \sqrt{H_o}}{(1.6 (1 + \dot{m}_F / \dot{m}_a)^{2/3} + 1)^{3/2}} \quad (2.11)$$

$$\dot{m}_a = 0.5 A_o \sqrt{H_o} - 0.53 \dot{m}_F \quad (2.12)$$

Због немогућности да се добије тачно мерење улазног профила протока ваздуха у затвореном простору током експеримента, у већини студија вредност улазног протока узима се на основу губитка масе гориве материје.³⁶ Такође, поједини истраживачи

³³ Drysdale D., An Introduction to Fire Dynamics. 3rd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2011.

³⁴ Karlsson B, Quintiere J., Enclosure Fire Dynamics, 1999.

³⁵ Delichatsios MA, Silcock GWH, Liu X, Delichatsios M, Lee YP., Mass pyrolysis rates and excess pyrolysis in fully developed enclosure fires. Fire Safety Journal 39:1–21, 2004.

³⁶ Thomas P, Heselden A, Law M.. Fully-developed Compartment Fires: Two Kinds of Behaviour, Fire Research Station, 1967.

користе профил температуре при одређивању прилива ваздуха у зону пожара затвореног простора, приступ који омогућава разумну доследност у складу са једначином 2.8.³⁷ На основу максималног HRR унутар затвореног простора, Lee и сар. (2007) су контролисали проток масе горива у затвореном простору и утврдили да се HRR, измерен на основу калориметрије кисеоника, добро слаже са једначином 2.10.³⁸ У складу са једначинама од 2.7 до 2.12, валидност вентилационог фактора је потврђена теоријски, а концепт вентилационог фактора и вентилационо – контролисаних пожара широко прихваћен.

Степен проветравања - еквивалентни однос ϕ , представља фундаментални концепт при истраживању динамике сагоревања. Он квантификује размеру стварне смесе горива и ваздуха према стехиометријској смеси горива и ваздуха потребној за потпуно сагоревање. Израчунава се на следећи начин:

$$\phi = \frac{\dot{m}_{\text{гориво}} / \dot{m}_{O_2}}{(\dot{m}_{\text{гориво}} / \dot{m}_{O_2})_{\text{стехиометријски}}} \quad (2.13)$$

Стехиометријска размера горива према ваздуху је идеална размера при којој се сва горива потпуно потроше уз доступни кисеоник, резултирајући потпуним сагоревањем без преосталог вишка горива или кисеоника. Еквивалентни однос $\phi = 1$ означава стехиометријске услове, где је тачно довољно кисеоника присутно да сагори сва маса гориве материје. Вредности $\phi > 1$ указују на горивом богату смесу, што значи да постоји вишак горива у односу на доступни кисеоник. Обрнуто, вредности $\phi < 1$ указују на горивом осиромашену смесу, што имплицира недовољно горива у односу на доступни кисеоник.

Пошто се у овом истраживању проучава укупни процес сагоревања, ϕ се дефинише као *еквивалентни однос* за укупни процес сагоревања. То се обично назива глобалним еквивалентним односом. Укратко, еквивалентни однос пружа квантитативну меру колико је смеша сагоревања близу стехиометријских услова и утиче на делотворност и карактеристике процеса сагоревања.

Стехиометријски лимит у условима природне вентилације $\dot{Q}_{VL,nat}$ (у [kW]), за максимални ниво HRR у условима природне вентилације може се израчунати као:

$$\dot{Q}_{VL,nat} = 1500 \frac{kW}{m^{5/2}} A_o \sqrt{H_o} \quad (2.14)$$

³⁷ Asimakopoulou EK, Chotzoglou K, Kolaitis DI, Founti MA., Characteristics of Externally Venting Flames and Their Effect on the Façade: A Detailed Experimental Study, Fire Technology 52:2043–69, 2016.

³⁸ Lee YP, Delichatsios MA, Silcock GWH., Heat fluxes and flame heights in façades from fires in enclosures of varying geometry, Proceedings of the Combustion Institute 31 II:2521–8., 2007.

Укупна вентилација простора рачуна се као збир појединачних отвора:

$$A_o\sqrt{H_o} = \sum_{i=1}^n A_{oi}\sqrt{H_{oi}} \quad (2.15)$$

где је:

n – број отвора [–].

Walton W. и Thomas P. развили су модел који описује широк спектар услова струјања флуида, а његова тачност је потврђена експерименталним подацима. Валидација модела је показала да предвиђени резултати одступају од стварних података за највише $\pm 20\%$.³⁹

$$\frac{\dot{m}}{A_o\sqrt{H_o}} = 0.52 \frac{kg/s}{m^{5/2}} e^{-C_y} \left[1 + 0.6 \left(1 + (C_y)^2 \right) \left(1 - e^{-\frac{3H_w}{H}} \right)^2 \right] \quad (2.16)$$

при чему је:

$$y = \left(\frac{W_o}{H_o} \right)^{2/3} \left(\frac{T_a}{T - T_a} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

где је:

W_o – површина отвора [m^2];

H_w – висина од пода до отвора [m];

T_a – почетна температура [K];

T – температура пожара [K];

C – коефицијент локације пожара (0.55 центар; 0.85 близина зида; 1 угао).

Вишеструки отвори (врата и прозори), отвори на плафону, или отвори на поду отежавају квантитативне анализе процеса. За сложеније конфигурације отвора, прорачуни могу да буду ограничени. Такве ситуације се могу адекватно анализирати само нумеричким симулацијама струјања флуида за генерисање података у тако сложеним процесима.

2.3 Геометрија затвореног простора и HRR

Средња вредност HRR унутар затвореног простора обично се одређује коришћењем фактора $A_o\sqrt{H_o}$, који првенствено узима у обзир облик и димензије отвора. Међутим, и сама величина простора има значајну улогу у развоју HRR. Moinuddin и Thomas спровели су експериментална истраживања усмерена на пожаре у дубоким затвореним просторима. На основу експеримената закључили су да се при истој ширини отвора, трајање пожара удвостручује ако се висина отвора смањи на половину величине.

³⁹ Walton W., Thomas P., Estimating temperatures in compartment fires, SFPE Handbook of Fire Protection, 4th edition, NFPA, Quincy, MA, 2008.

Њихово истраживање показало је да се брзина сагоревања смањила за приближно 50%, када је висина отвора смањена на половину, док је ширина простора остала непромењена. Као одговор на ове резултате, *Moinuddin K.* и *Thomas I.R.* предложили су модел за предвиђање HRR заснован на геометријским параметрима простора, при чему су сви параметри третирани с једнаким значајем.⁴⁰

Критеријуми за класификацију простора према њиховим геометријским карактеристикама дефинишу се кроз односе између димензија простора: дубина (D), висина (H) и ширина (W). „Дубоки“ простори су они у којима је однос дубине према висини и ширини задовољен са $D/H \geq 2$ и $D/W \geq 2$, што означава да је простор знатно продужен у дубину у односу на остале димензије. „Квадратни“ простори, с друге стране, карактеришу се симетричним односима димензија, где $D/W = 1$, док је $D/H \geq 2$, што имплицира да је простор висок, али сличне ширине и дубине. На основи анализе различитих серија експерименталних резултата, развили су модел назван *VU модел*, који се може користити за прорачун средње вредности HRR-а на основу геометрије простора, једначина 2.18.

$$HRR_{avg} = 1.161 * W^{0.726} * D^{-0.516} * H^{0.766} * w_o^{0.521} * H_o^{1.071} \quad (2.18)$$

где је:

W – ширина просторије [m],

D – дужина (дубина) просторије [m],

H – висина просторије [m],

w_o – ширина отвора [m],

H_o – висина отвора [m],

HRR_{avg} – HRR средња вредност, [kW],

У поређењу са експерименталним резултатима CIB (фр. *Conseil International du Batiment*), добијеним у осам лабораторија у неколико земаља, закључено је да је VU модел идеалан за примену у дубоким просторима ($D/H \geq 2$ и $D/W \geq 2$). Овај модел је показао тачна предвиђања у просторима са великим продужетком у дубину, јер адекватно моделира узгон и динамику струјања флуида у таквим условима. Такође, показало се да VU модел може релативно добро функционисати и у просторима са квадратним основама

⁴⁰ Moinuddin, K, and Thomas, I.R., An experimental study of fire development in deep enclosures and a new HRR–time–position model for a deep enclosure based on ventilation factor, *Fire and Materials*, 33:157–185. doi: 10.1002/fam.986, 2009.

($D/H \geq 2$ и $D/W = 1$), где се динамика струјања и вентилације разликује због симетричности простора.

Резултати VU модела упоређени су са резултатима модела CIB и модела SFPE (енгл. *Society of Fire Protection Engineers*), уз коришћење експерименталних података добијених у просторима са различитим величинама отвора. Резултати указују да за дубоке просторе, где је $D/H \geq 2$ и $D/W \geq 2$, VU модел показује добре перформансе, док у дубоким, али квадратним просторима где је $D/H \geq 2$ и $D/W < 2$, треба користити CIB модел или метода SFPE.⁴¹

Емпиријски модели које су развили *Kawagoe*, *Walton W.* и *Thomas P.* користе се за израчунавање HRR само на основу геометрије вентилационог отвора, док је VU модел разматрао не само геометрију отвора већ и утицај геометрије простора.

У истраживању које су спровели *Thomas* и *Bennetts* за потребе класификације, „дубоки простор“ дефинисан је као простор чија дубина (D) значајно премашује ширину (W), обично са односом $D/W > 2$, док је „квадратни простор“ простор у којем су димензије дубине и ширине приближно једнаке ($D \approx W$). Истраживање је упоређивало ове две категорије простора, с различитим отворима, који су класификовани као „потпуно отворени“ када је ширина отвора једнака ширини простора ($w_o = W$), и „делимично отворени“ када је ширина отвора мања од ширине простора ($w_o < W$).⁴²

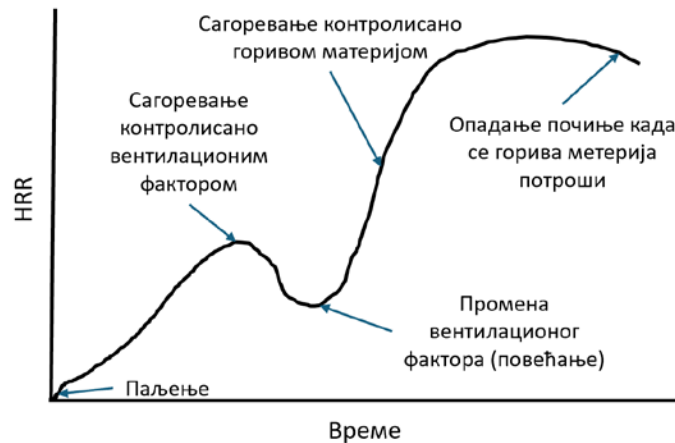
Кључни налази истраживања показују значајне разлике у динамици пожара између ових простора. У дубоким просторима, забележен је значајно мањи просечан ниво губитка масе током пожара у поређењу са широким просторима, чак и при истим геометријама отвора. Наиме, у дубоким просторима, просечни ниво губитка масе је између 0.35 и 0.56 пута мања него у широким просторима, што је директно утицало на продужење трајања пожара. Ова разлика је резултат различитих режима вентилације и протока ваздуха у зависности од облика простора. У дубоким просторима, проток свежег ваздуха до зоне сагоревања је отежан, што ограничава брзину сагоревања и узрокује ниже HRR вредности, док у широким просторима ваздух лакше допире до зоне сагоревања, што резултира интензивнијим сагоревањем. Ови налази сугеришу да геометрија простора, у комбинацији с отворима, игра кључну улогу у обликовању динамике пожара,

⁴¹ Thomas PH, Heselden AJM., Fully developed fires in single compartments. A cooperative research programme of the conseil internationale du batiment, CIB Report No. 20, Fire Research Note 923, U.K., 1972.

⁴² Thomas, I.R, Bennetts, I.D., Fires in Enclosures with Single Ventilation Openings - Comparison of Long and Wide Enclosures, Fire Safety Science-Proceedings of the Sixth International Symposium, pp. 941-952, 1999.

те да простори са различитим односима димензија захтевају различите приступе у моделовању и контроли пожара.

У реалним условима пожара, вентилација је често подложна динамичним променама због различитих фактора као што су отварање врата током евакуације или пуцање стаклених прозора као последица пожара. Ова динамика вентилације и њен утицај на HRR показују комплексност пожара у стварним ситуацијама, слика 2.7.



Слика 2.7 Идеализована HRR крива: промене током времена, HRR крива контролисана вентилацијом

За пожар који је контролисан вентилацијом, активација система за управљање димом ће имати већи утицај на понашање сагоревања јер се брзина протока ваздушне масе у просторији мења; стога претходно наведене једначине се не могу применити директно у таквим условима. Последице ових разлика су изван обима овог рада.

Укупно гледано, веза између HRR и вентилације представља сложену интеракцију фактора који укључују геометрију простора, доступност кисеоника, особине гориве материје, ефикасност сагоревања и механизме термичке повратне спреге. Разумевање и моделовање ових веза кључно је за оптимизацију процеса сагоревања у нумеричким експериментима, што омогућава тачније предвиђање развоја пожара у реалним условима.

3. Криве развоја пожара

Систематски приступ тестирању отпорности на пожар почео је да се развија током индустријске револуције са појавом стандардизованих протокола тестирања. Велики пожар у Лондону 1666. године послужио је као катализатор за развој раних прописа о безбедности од пожара и метода тестирања у Европи, постављајући основу за модерне стандарде тестирања пожара.

Температурно – временска крива је остала углавном непромењена од првобитног дефинисања 1916. године, што наглашава важност разумевања историјског развоја овог концепта. Иако је у неким случајевима немогуће избећи субјективност у интерпретацијама, у раду су приказани искључиво подаци поткрепљени релевантном литературом.

Babrauskas и *Williamson* су у часопису *Fire Technology* (1978) изложили детаљан историјски преглед развоја стандардних метода испитивања отпорности на пожар, под насловом Историјска основа тестирања отпорности на пожар.^{42 43} Студија *Babrauskasa* и *Williamsona* обухватила је испитивања која су спроведена између 1880. и 1918. године, а која су документовала напредак у развоју стандардизованих метода испитивања ватроотпорности подова, зидова, стубова и врата. У овим радовима који су цитирани у релевантним стандардима, анализиран је низ експерименталних тестова који су допринели формирању стандардне температурно – временске криве.

Ira Woolson је опште признат као кључна личност која је заслужна за серију експеримената који су поставили основу за стандардну пожарну криву температура – време, која је у литератури позната и као *Колумбијска* крива. Иако се *Woolson* често наводи у већини радова, детаљна анализа показује да су температуре за тестирање од 1090 °C које је *Woolson* првобитно дефинисао заправо предложене 1896. године од стране *Gusa Henninga*, главног инжењера одсека за зграде у Њујорку.⁴⁴ Температура од 1090 °C постигнуте су ложењем пећи на дрва која се налазила испод оптерећене подне конструкције, при чему је загревање било планирано да траје више од пет сати.

Године 1902. развијен је нови критеријум тестирања у сарадњи *Ira Woolsona* и *Rudolpha Millera*, с дефинисаном просечном температуром гасне фазе од 927 °C током 4

⁴² Babrauskas V, Williamson RB., The historical basis of fire resistance testing — part I. *Fire Technology* 14:184–194, (1978)

⁴³ Babrauskas V, Williamson RB., The historical basis of fire resistance testing — part II. *Fire Technology* 14:304–316, (1978)

⁴⁴ Constable S., Comparative standard fireproof floor tests of the New York Building Department. *Eng Rec* 337–340; 359–363; 382–387; 402–440, (1897)

сата.⁴⁵ Пожарни тестови које је *Woolson* изводио често су били критиковани, тестови тада нису били национално стандардизовани нити су били широко прихваћени ван Њујорка. Такође, тестови су били и предмет *Mazet*ове истраге из 1899. године, која је указивала на потенцијалну корупцију. Детаље о наводној корупцији и *Mazet*овим саслушањима изнела је *Wermiel* (2007), где указује да су испитивања у вези са *Mazet*овим случајем довела главног испитивача до закључка да су сви бетонски подови опасни, што је резултирало препоруком комитета за формирање нове комисије за грађевински код са задатком да ревидира градски кодекс. Као мали пример онога што је виђено као корупција, сваки тест је морао да ангажује ноћног чувара како би се спречила манипулација узорцима током испитивања.⁴⁶

После критика серије експерименталних тестова зграда у Њујорку, разне агенције за грађевинске материјале лобирале су за промене. Промене су покренуте од стране *Ira Woolsona* у стандарду *ASTM Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*, када је и предложен нови стандард за тестирање пожара 1916. године. Методологија тестирања тада је обухватила и тестирање стубова (бетон, челик и дрво). Не постоји јавно доступна, нити дигитализована документација, која експлицитно дефинише порекло стандардне пожарне криве температура – време која је објављена у раду *Fire tests of building columns* и која се још увек користи за процену отпорности на пожар.⁴⁷

Gales J. поставља хипотезу да је стандардна пожарна крива температура – време развијена на основу субјективне логике како би се повезале претходно прихваћене криве загревања у времену и температуре, конкретно *Henning* (1896)⁴⁸ и *Woolson-Miller* стандард како би се осигурало да претходни тестови могу бити прихваћени под новом предложеном кривом загревања. Ова хипотеза захтева даљу проверу, али се ипак слаже са тренутно доступном дигитализованом литературом из тог периода.⁴⁹

Током 20. века дошло је до значајног помака у методологијама и технологији тестирања пожара. Организације као што су *UL Underwriters Laboratories* и Сједињеним

⁴⁵ Woolson I, Miller R., Fire tests of floors in the United States. In: International Association for testing materials 6th congress, New York, 1912.

⁴⁶ Wermiel SE John A. Roebbling's Sons Co and Early concrete floors in New York city, 1890s–1910. In: Green T (ed) John A. Roebbling: a bicentennial celebration of his birth 1806–2006 American Society of Civil Engineers, Reston, pp 137–150, 2007.

⁴⁷ Ingberg S., Fire tests of building columns, NFPA Q 253–260, 1916.

⁴⁸ Constable S., Comparative standard fireproof floor tests of the New York Building Department. Eng Rec 337–340; 359–363; 382–387; 402–440, 1897.

⁴⁹ J. Gales, B. Chorlton, C. Jeanneret, The Historical Narrative of the Standard Temperature – Time Heating Curve for Structures, Fire Technology, doi:10.1007/s10694-020-01040-7, 2020.

Америчким Државама и BRE - *Building Research Establishment* у Великој Британији биле су пионири у напорима да стандардизују процедуре тестирања пожара за грађевинске материјале и конструкције. Ови напори довели су до формулисања националних стандарда као што су: ASTM E119 *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* у Сједињеним Америчким Државама и BS 476 *British Standard: Fire Tests on Building Materials and Structures* у Великој Британији, и који су били претеча за међународне стандарде попут ISO 834 *Fire-Resistance Tests — Elements of Building Construction*.

Стандард ISO 834 представљен је 1975. године, као међународни стандард за дефинисање отпорности грађевинских елемената на пожар. Стандард BS ISO 834 - 2: 2019 *Fire Resistance Tests — Elements of Building Construction — Part 2: Requirements and Recommendations for Measuring Furnace Exposure on Test Samples*,⁵⁰ детаљно описује процедуре за оцену отпорности структурних елемената, укључујући зидове, подове, и плафоне, при стандардизованим условима пожара. Такође, стандард дефинише параметре пожарне изложености (температурно – временску пожарну криву) и критеријум оцене интегритета, изолације и носивости грађевинских елемената.

Стандард EN 1991 – 1 – 2: 2024, Eurocode 1: *Actions on structures – Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire*,⁵¹ узима у обзир различите типове горива и услове вентилације у поједностављеном облику. Стандард садржи свеобухватне смернице за процену реакције на пожар, интегришући најновија истраживања и сигурносне протоколе. Предвиђено је да се овај стандард користи заједно са другим EN стандардима, посебно онима који се баве проучавањем отпорности материјала на пожар као што су EN 1992, *European Standard for the Design of Concrete Structures (Eurocode 2)* и EN 1996, *Design of Masonry Structures - General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures (Eurocode 6)*. Пожарне криве које су приказане као номиналне криве температуре у односу на време, дате су једначинама 3.1, 3.2 и 3.3 које следе у даљем тексту. У свим једначинама променљиве имају следећа значења: t [мин] – време, T_t [°C] – температура простора у времену t и T_0 [°C] – температура на почетку пожара (обично се узима као собна температура, тј. 20 °C).

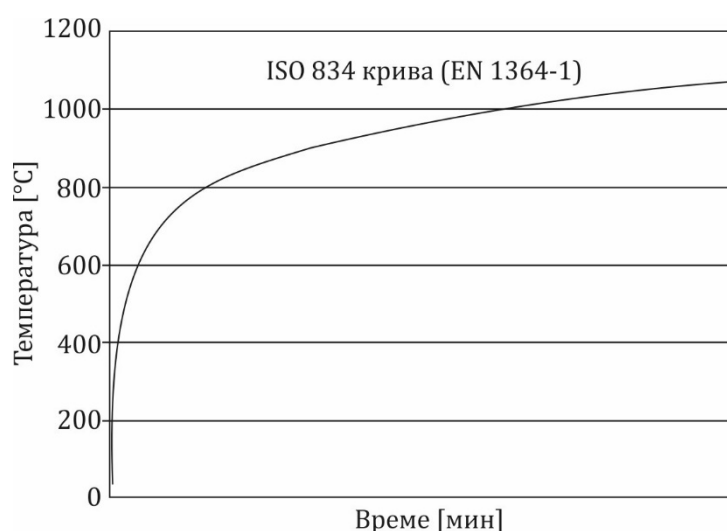
⁵⁰ BS ISO 834-2: 2019 Fire Resistance Tests — Elements of Building Construction — Part 2: Requirements and Recommendations for Measuring Furnace Exposure on Test Samples, © The British Standards Institution, 2024.

⁵¹ EN 1991-1-2024 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: Action on structure exposed to fire, CEN European Committee for Standardization, 2024.

1. Стандардни однос између времена и температуре према ISO 834 (за приказ потпуно развијеног пожара у простору) дефинисан је следећом једначином:

$$T_t = \begin{cases} T_0 + 504 t^{0.141} & t < 10 \text{ мин.} \\ T_0 + 345 \log(8t + 1) & t \geq 10 \text{ мин.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Употреба овог модела зависи од сврхе прорачуна и треба се користити када нема додатних информација о пожару. Главне карактеристике овог модела су: претпоставља се да је пожар активан у целом простору (чак и ако је простор огroman), независно од стварне величине тог простора; пожар никада не слаби, чак ни након што су сви запаљиви материјали исцрпљени и не зависи од пожарног оптерећења у простору нити од услова вентилације. Крива представља непрекидно повећање температуре у времену без узимања у обзир фазе стишавања пожара (хлађења), и представљена је на слици 3.1.



Слика 3.1 Стандардна температурно – временска крива (ISO 834)

У реалним условима пожара фаза стишавања (хлађење) је фактор који директно утиче на чврстоћу конструкције. На пример, *Hertz K.* је спровео експериментално истраживање за потпуно развијени пожар и тестирао чврстоћу бетонског стуба. Утврдио је да се носивост стуба смањује за половину током фазе пламена и другу половину током фазе стишавања (хлађења).⁵²

2. Спољна температурно - временска крива (за спољне зидове, који могу бити изложени пожару са различитих делова фасаде):

$$T = T_0 + 660 (1 - 0.686 e^{-0.32 t} - 0.313 e^{-3.8 t}) \quad (3.2)$$

Овај модел се примењује на спољним површинама преградних зидова који су изложени диму који долази из пожара који се развија унутар простора, а који је

⁵² Hertz, K., Assessment of performance-based requirements for structural design, Fire Saf. Sci. 315–325. doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-315., 2005.

унутрашњи у односу на зидове. Такав пожар карактеришу мање повишене температуре и стога се не треба користити за структурне елементе који су спољашњи у односу на простор, али могу бити изложени вишим температурама (нпр. кроз отворе).

3. Температурно – временска крива за угљоводонике (за представљање пожара угљоводоника или пожара течних горива):

$$T = T_0 + 1080 (1 - 0.325 e^{-0.167 t} - 0.675 e^{-2.5 t}) \quad (3.3)$$

Овај модел је применљив на ризике од пожара које су узроковане сагоревањем угљоводоника и карактерише се значајно повишеним температурама.

Стандард је дефинисао и израчунавање топлотног флуksа на површинама конструкцијских компоненти следећим једначинама:

$$a) \dot{h}_{\text{зрачење}} = F_c * \varepsilon_{\text{површина}} * \varepsilon_{\text{пожар}} * \sigma (T_{\text{зрачење}}^4 - T_{\text{површина}}^4) \quad (3.4)$$

$$b) \dot{h}_{\text{конвекција}} = \alpha_c (T_g - T_p) \quad (3.5)$$

$$c) \dot{h}_{\text{укупна}} = \dot{h}_{\text{конвекција}} + \dot{h}_{\text{зрачење}} \quad (3.6)$$

где је:

$\dot{h}$ – топлотни флуks [W/m²]

F_c – фактор конфигурације

$\varepsilon_{\text{површина}} ; \varepsilon_{\text{пожар}}$ – емисивност од површине; емисивност пожара

$T_g ; T_p$ – температура гаса; температура површине [°C]

α_c - предефинисана вредност коефицијента конвективног преноса топлоте, и то:

за стандардну температурно – временска криву - 25 W/m²K и

за криву пожара угљоводоника - 50 W/m²K.

Треба напоменути да ће наведене предефинисане вредности вероватно утицати да се добију погрешни резултати израчунавања јер се конвективни коефицијент преноса топлоте мења са дужином елемента и брзином топлотног струјања флуида, па његова вредност зависи од величине компоненте у конструкцији и интензитета пожара. За танке конструкцијске елементе попут носача или отвора у решеткастим носачима од челичних плоча, конвективни коефицијент преноса топлоте може бити значајно већи од предефинисаних вредности.⁵³ Топлотни флуks је поједностављен претпоставком да је емисивност од пожара износи 1 (један), односно, површина је изложена укупној енергији топлотног зрачења, а температура гаса је уврштена као температура зрачења

⁵³ A. Jowsey, J. Torero, B. Lane, Heat Transfer to the Structure during the Fire, Dalmarnock Fire Tests Exp. Model., School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, 2007.

претпостављајући топлотну равнотежу поља зрачења у гасној фази, и сугерише да нема размене зрачења између продуката сагоревања (дима) и гаса што је теоријски погрешно јер не узима у обзир основе размене топлотног зрачења.

Стандард ISO 834 нуди уобичајену и глобално примењену методологију у дефинисању отпорности на пожар, а његова предност лежи у једноставности и погодности за поновљивост. Међутим, током времена, истраживачи и инжењери у области безбедности од пожара постављали су питања о применљивости стандардног теста пећи са температурно – временском кривом у реалним условима пожара, као једине методе за процену отпорности грађевинских елемената на пожар. Питања су углавном проистекла из нереалне природе стандардне температурно – временске криве као симулације пожара и могућих ограничења овог начина тестирања.⁵⁴ На пример, не узимање у обзир фазе стишавања (хлађења) показало је да може имати негативне последице за одређене грађевинске конфигурације, као што су спојеви,⁵⁵ или за елементе пасивне заштите од пожара попут гипсаних плоча.⁵⁶

Lucherini A. и сарадници тврде да неуниформни пожари могу довести до различитих и тежих структурних одговора. У случају примене интумесценних боја на челичне конструкције, спорији режими загревања се показују као штетнији, јер боја се не активира увек.⁵⁷ Новија истраживања *Lange D.* и сарадника постављају питања о примени стандардног оквира тестирања отпорности на пожар када су у питању гориве компоненте као елементи у грађевинарству, због запаљиве особине, које додаје додатни извор топлоте у пећи и узрокује промене у реалној количини горива потребној за контролу температурно – временске криве.^{58 ; 59} Резултати наведених истраживања су довели до расправа о томе како се отпорност на пожар дрвених и бетонских структурних елемената може упоређивати користећи исту методологију и стандард, када су основни термички улази (гранични услови) различити између запаљивих и незапаљивих материјала.

⁵⁴ Drysdale D, An introduction to fire dynamics, Wiley, Hoboken, 2011.

⁵⁵ Gillie M, Usmani A, Rotter J, A structural analysis of the first cardington test. J Constr Steel Res 57:581–601, 2001.

⁵⁶ Chorlton B, Forrest B, Gales J, Weckman B., Performance of type X gypsum board on timber to non standard fire exposure. Fire Mater., 2020.

⁵⁷ Lucherini A, Giuliani L, Jomaas G., Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions, Fire Saf J 95:42–50, 2018.

⁵⁸ Lange D, Sjostrom J, Schmid J, A comparISON of the conditions in a fire resistance furnace when testing combustible and non-combustible construction, Fire Technol. 56:1621–1654, 2020.

⁵⁹ Węgrzynski W, Turkowski P, Roszkowski P., The discrepancies in energy balance in furnace testing, a bug or a feature?, Fire Mater. 44:311–322, 2019.

Температурно – временска крива није се значајно мењала од свог концептуалног дефинисања 1916. године, па је важно поставити питање да ли су оснивачи предвидели наведену савремену парадигму граничних услова при стандардизацији.

Температурно – временска крива користи се такође и за опис параметарског пожара. Параметарски пожар пружа једноставан начин да се узму у обзир најважнији физички феномени који могу утицати на развој пожара. Као и номинални пожар, састоји се од временско - температурних односа, али ови односи укључују параметре за које се сматра да представљају специфичне аспекте реалних услова. У готово сваком параметарском пожару који се може пронаћи у литератури, параметри који се узимају у обзир, на овај или онај начин, су:

- Геометрија простора,
- Пожарно оптерећење унутар простора,
- Отвори у зидовима и/или на крову,
- Тип и природа различитих грађевинских елемената који формирају границе простора.

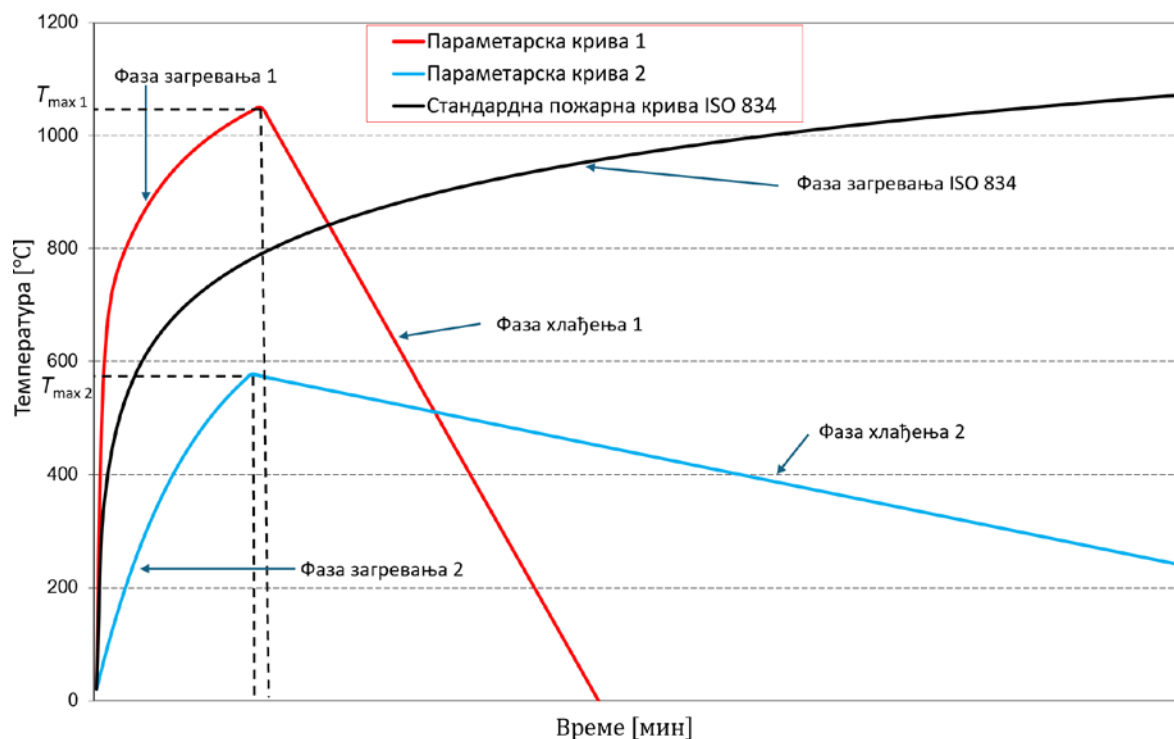
Параметарски пожар заснива се на хипотези да је температура у простору уједначена, што ограничава примену на пожар након фазе *flashover*-а у просторима умерених димензија.⁶⁰ Ипак, он представља значајан корак напред у погледу узимања у обзир реалне природе пожара у поређењу са номиналним пожарима, док задржава једноставност кроз неке аналитичке изразе. Параметарске криве пожара додатно узимају у обзир фазу стишавања пожара, што омогућава смањење температуре након што је пожарно оптерећење исцрпљено. Параметарски пожар (основни модел пожара) је валидан за пожарне просторе до 500 m² површине пода, са максималном висином од 4 m и без отвора на крову. Треба напоменути да *Stern-Gottfried* на основу експерименталних тестирања указује да претпоставка о уједначеној температури није потпуно тачна.⁶¹

Параметарска крива пожара састоји се од фазе загревања, која је представљена експоненцијалном кривом која траје до максималне вредности температуре $T_{\max}$, након чега следи фаза хлађења са линеарним падом до преостале вредности температуре (обично собне температуре). Максимална температура $T_{\max}$, и трајање пожара $t_{\max}$, два су главна фактора који утичу на понашање конструкције за време трајања пожара. Због тога

⁶⁰ O.Vassart, B.Zhao, L.G.Cajot, F.Robert, U.Meyer, A.Frangi, Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.

⁶¹ Stern-Gottfried, J., et al., Experimental Review of the Homogeneous Temperature Assumption in Post-Flashover Compartment Fires, Fire Safety Journal, 45, 4, pp. 249-26, 2010.

су они усвојени као кључни параметри у формулама за пројектовање параметарских пожара. Параметарске криве пожара у складу са стандардом BS EN1991-1-2 у поређењу са ISO 834 стандардном кривом приказане су сликом 3.2.



Слика 3.2 Илустрација параметарских кривих у односу на ISO 834 стандардну криву

Одређени модели, као на пример модел који је предложио *Barnett C.R.*, описују развој пожара у затвореном простору са математичког становишта, користећи константу која дефинише облик криве. BDF крива коју је предложио *Barnett*, користи три фактора за однос температуре и времена: максималну температуру гаса, време у којем се та температура јавља и константу која дефинише облик криве.⁶² Основна једначина која производи BDF криву је:

$$T = T_m e^{-z} + T_a \quad (3.7)$$

где је:

T - температура,

T_a – амбијентална температура,

T_m – максимална вредност температуре генерисана изнад T_a ,

$z = (\log t - \log t_m)^2 / sc$

⁶² Barnett, C. R., Replacing International Temperature-Time Curves with BDF Curve, Fire Safety Journal, 42 4, pp. 321-327, 2007.

при чему су:

t [min] - време паљења, а

t_m [min] - време у којем се дешава T_m , и

sc – бездимензиони број који дефинише облик криве.

Може се закључити да је потребно применити одговарајућу аналитичку функцију која карактерише температуре током пожара са минималним бројем параметара. Та функција треба да садржи параметар који се добија на основу односа између пожарног оптерећења и вентилације, а овај параметар би требало да буде представљен фактором који дефинише облик криве температура – време.

Надоградња на овом принципу предложена је и од стране *Благојевић М. и Пешић Д.* коришћењем два фактора која се односе на максималну температуру и време које је протекло до достизања те температуре, док трећи фактор одређује облик криве.⁶³ За апроксимацију фаза пожара предложена је функција:

$$y = a \left[\frac{x}{b} e^{(1-x/b)} \right]^c \quad (3.8)$$

где је:

y [°C] - температура,

x [мин] – време,

a [°C] – максимална температура у фази стабилног сагоревања, која зависи од типа горива и вентилације,

b [мин] – тренутак достизања максималне температуре,

c – корекциони параметар (бездимензиони) који зависи од других услова (геометрија простора, услови везани за запаљење, ширење пламена итд.).

Параметар c који дефинише тип горива и вентилацију, у суштини представља брзину пораста дате функције.

Основа оба приступа је да су два параметра одређена максималном температуром и временом потребним за достизање те температуре, док трећи параметар дефинише облик криве температура – време. Очигледна сличност присутна је у фази раста и фази потпуно развијеног пожара, док у фази стишавања пожара постоји значајна разлика између кривих. Ова разлика је узрокована подешавањем параметра c , који представља корекциони параметар за услове специфичне за сваки простор.

⁶³ Благојевић М., Пешић Д., A New Curve for Temperature-Time Relationship, Thermal Science, Vol. 15, No. 2, pp. 339-352, 2011.

3.1 Пожарни експерименти у пуном обиму (енгл. Full – scale test)

У протеклих шест деценија извршено је много експеримената с пожарима у затвореним просторима, а резултати многих од њих су документовани у разним истраживачким извештајима и радовима у водећим научним часописима. Експерименти с пожарима у пуном обиму у основи имају проблем са контролом окружења. Студија *Johanssona N.* и сар. закључила је да брзина и смер ветра имају велик утицај на резултате експеримената, а те варијабле нису могле бити контролисане у експерименту.⁶⁴

Из експеримената се мало може закључити о односу између мерних варијабли и независних варијабли, стога се може тврдити да унутрашња валидност није била задовољавајућа.

Студија репродуктивности четири различита сценарија вентилације, коју су у више просторија реализовали *Svensson S.* и сар. показала је да су резултати у великој мери зависили од експерименталне поставке, па је спољна валидност била слаба.⁶⁵ Није било могуће разликовати које варијабле узрокују варијацију између појединачних тестова, и у том смислу, унутрашња валидност не може се сматрати задовољавајућом.

Многе публикације о експериментима у пуном обиму не пружају задовољавајући опис експерименталне несигурности, или су превише комплексне како би се проценила несигурност на темељу инжењерског приступа.⁶⁶

Неки објављени радови сматрају се илустрацијом проблема контроле важних варијабли приликом спровођења традиционалних експеримената с пожарима у пуном обиму. Ти проблеми и високи трошкови разлог су зашто постоји само неколико изузетака и добро документованих експеримената.

Алтернатива овим експериментима је примена експеримената у малом обиму где је могуће постићи већи степен контроле над експериментом.

3.2 Пожарни експерименти у малом обиму (енгл. Small – scale test)

Турбуленција и феномени сагоревања инхерентни су експериментима малих димензија, стога експерименти са пожаром у ограниченом простору могу ефикасно приказати динамику пожара у затвореним окружењима. Коришћењем умањених верзија

⁶⁴ Johansson N, Wahlqvist J, van Hees P Detection of a Typical Arson Fire Scenario - ComparISON Between Experiments and Simulations, Journal of Fire Protection Engineering 22:23-44., 2012.

⁶⁵ Svensson S, Patric Van H., and Johansson N., A Study of Reproducibility of a Full-scale Multi-Room Compartment Fire Experiment, Fire Technology 51(3):645 – 665, 2015.

⁶⁶ Hamins A, McGrattan K., Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 2: Experimental Uncertainty, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA. 2007.

простора омогућава се извођење експеримената који би у пуној величини били непрактични, скупи или опасни.

За репрезентативно умањење простора током истраживања користи се *скаларна методологија*, што подразумева употребу модела смањене скале за симулацију и проучавање понашања пожара у контролисаним условима. Законитости скалирања темеље се на принципу сличности, који осигурава да се мали модел и прототип у стварној величини понашају на исти начин под сличним условима. То укључује осигуравање да кључни бездимензиони параметри, као што су *Reynolds*ов број и *Froude*ов број, остану исти на различитим скалама. Три основне врсте сличности у скаларној методологији су:

- Геометријска сличност: Осигурава да модел смањене скале има исти облик и пропорционалне димензије као објект у пуној величини.
- Кинематичка сличност: Осигурава да су обрасци протока и кретање дима и пламена у моделу слични онима у сценарију у пуној величини.
- Динамичка сличност: Осигурава да су силе, као што су узгон и инерција, и размене енергије, као што је пренос топлоте, сличне у моделу и у сценарију у пуној величини.

Фактори скалирања за различите физичке количине изводе се из геометријског фактора скалирања (λ), који представља однос између димензије у моделу и одговарајуће димензије у пуној величини (прототип).

$$\lambda = \frac{L_{\text{модел}}}{L_{\text{прототип}}} \quad (3.9)$$

Из λ могу се извести други фактори скалирања, као што су на пример:

- Фактор скалирања површине (λ^2):

$$A_{\text{модел}} = A_{\text{прототип}} * \lambda^2 \quad (3.10)$$

- Фактор скалирања запремине (λ^3):

$$V_{\text{модел}} = V_{\text{прототип}} * \lambda^3 \quad (3.11)$$

- Фактор скалирање HRR ($\lambda^{5/2}$):

$$Q_{\text{модел}} = Q_{\text{прототип}} * \lambda^{5/2} \quad (3.12)$$

- Фактор скалирања времена ($\lambda^{1/2}$):

$$t_{\text{модел}} = t_{\text{прототип}} * \lambda^{1/2} \quad (3.13)$$

Димензиона анализа представља основу скаларне методологије. Она подразумева идентификацију кључних физичких величина и њихових димензија (попут дужине, времена и температуре) које утичу на понашање пожара. Те величине користе се за

формирање бездимензионих група које омогућавају сличност између модела смањене скале и реалних услова у пуној величини. Међутим, број бездимензионих група је превелик да би омогућио потпуно скалирање, на пример, пренос топлоте путем зрачења, конвекције и кондукције кроз материјале не могу се очувати истовремено.⁶⁷ То значи да неки параметри морају бити жртвовани, као на пример, зрачење приликом проучавања кретања дима из мањих пожара или конвекција приликом проучавања великих пожара. Стога је, приликом примене скалирања, неопходно бити свестан доминантних бездимензионих група и како ефекти непоштовања неких параметара утичу на резултате и да ли је то прихватљиво.

Иако није могуће истовремено сачувати све термине, скалирање има неколико предности. Пожар се понаша као у реалном окружењу, тј. долази до сагоревања, стварања чађи и продуката сагоревања. За неке специфичне феномене пожара, попут проучавања температуре слојева дима, најважније варијабле могу бити очуване и у таквим случајевима скалирање постаје веома моћан алат у истраживању.

Скалиране законитости као математички алати омогућују повезивање понашања система различитих величина. Применом скалираних законитости се врши екстраполација резултата из експеримената у малом обиму како би се предвидело понашање пожара у стварним размјерима.⁶⁸ Постоји неколико примера када је скалирање коришћено приликом истраживању пожара у истраживачке сврхе. На пример, скалирање је коришћено у истрагама пожара у Kings Crossu⁶⁹ и пожара у диско клубу у Geteborgu.⁷⁰ Такође, примена скалирања се показала као корисно оруђе у проучавању динамике пожара у тунелима. Унутрашња валидност експеримента малог обима се сматра високом, због високог степена контроле експеримента.

⁶⁷ Quintiere JG., Scaling applications in fire research. *Fire Safety Journal* 15:3–29. doi: 10.1016/0379-7112(89)90045-3. 1989.

⁶⁸ Quintiere JG., The Use of Scale Modelling in Fire Safety Design & Investigation. In: 9th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Method, the Society of Fire Protection Engineers, Hong Kong, China, 2012.

⁶⁹ Moodie K, Jagger SF., The King's Cross fire: Results and analysis from the scale model tests, *Fire Safety Journal* 18:83–103., doi: 10.1016/0379-7112(92)90049-I, 1992.

⁷⁰ Ingason H, Wickström U, van Hees P., The Gothenburg Discotheque Fire Investigation. In: 9th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering, Interscience Communications, Edinburgh, Scotland 2:965–976, 2001.

3.3 Тачност експерименталног тестирања

Топлотна снага HRR генерално се сматра најважнијом варијаблом у моделирању пожара, стога је, наравно, од велике важности имати добру процену експерименталне несигурности приликом мерења HRR. Несигурност мерења ослобађања топлоте ће варирати како са величином ослобођене топлоте, тако и са експерименталним условима.

Брзине ослобађања топлоте у пожарним експериментима обично се процењују помоћу кисеоничке калориметрије.⁷¹ Кисеоничка калориметрија укључује неколико независних мерења са различитом опремом, попут анализатора кисеоника, анализатора угљен-диоксида и двосмерних сонди. Свако од ових мерења повезано је са одређеним степеном несигурности који ће се акумулирати у укупној несигурности. Главни извори несигурности су мерења концентрације кисеоника, мерења протока масе и фактор сагоревања.

Алтернатива кисеоничној калориметрији је коришћење губитка масе горива или протока масе за процену брзине ослобађања топлоте. Мерења протока масе обично имају ниску несигурност, али је потребно узети у обзир и топлоту сагоревања и ефикасност сагоревања како би се израчунала брзина ослобађања топлоте у затвореном простору.

У студији *Haminsa A, McGrattana K.* и сар. за потребе NRC U.S. *Nuclear Regulatory Commission* регулаторне комисије за нуклеарну енергију, користила се брзина губитка масе за процену брзине ослобађања топлоте, а несигурност је процењена на 15% и 25%.⁷²

⁷¹ Axelsson J, Andersson P, Lönnemark A, et al. Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the room/corner test and the SBI, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden. 2001.

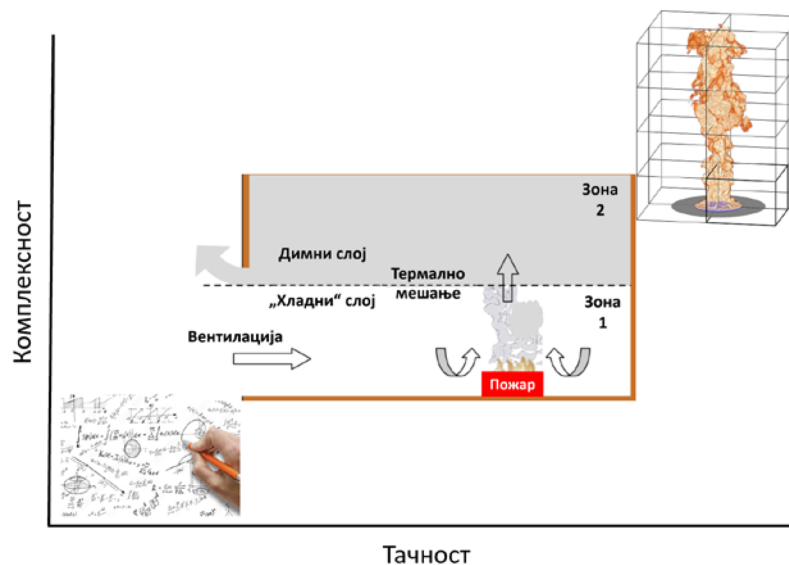
⁷² A. Hamins, A. Maranghides, R. Johnsson, M. Donnelly, J. Yang, G. Mulholland, RL. Anleitner, Report of Experimental Results for the International Fire Model Benchmarking and Validation Exercise # 3“, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001, 2006.

4. Модели за предвиђање развоја пожара нумеричком симулацијом

У даљем тексту биће речи о моделима и приступима који се примењују за истраживање развоја пожара са циљем предвиђања параметара који прате тај развој. Истраживање пожара у затвореним просторима захтева коришћење више техника моделирања како би се описали комплексни феномени динамике пожара. Модели пожара могу бити *пробабилистички* или *детерминистички*.

Пробабилистички модели не користе директно физичке и хемијске принципе по којима се одвија пожар, већ дају статистичке предикције о прелазу из једне фазе развоја пожара у другу. Наиме, ови модели користе вероватноће преласка пожара из једне фазе у другу које су временски зависне, при чему су апроксимације засноване на експерименталним подацима и статистикама пожарних инцидената.

Детерминистички модели примењени у инжењерингу безбедности од пожара, у зависности од врсте проблема који се треба решити, могу укључивати ручне прорачуне, модел зоне и рачунарску динамику флуида. Однос тачности и сложености детерминистичких модела илустрован је на слици 4.1.



Слика 4.1 *Детерминистички модел: ручни прорачуни, зонски модел и рачунарска динамика флуида*

Ручни прорачуни представљају основни приступ анализи инжењерских проблема, коришћењем једноставних математичких формула и апроксимација. Предност ручних прорачуна је њихова једноставност и брзина примене. Они омогућавају брзе процене које су корисне у раним фазама пројектовања или када су потребне брзе одлуке, те могу помоћи у одређивању потребе за провођењем детаљнијих прорачуна коришћењем других

модела. Основни недостатак ручних прорачуна је ограничена тачност због бројних претпоставки и поједностављења. Као резултат тога, њихова примена може бити непоуздана за сложеније сценарије где су потребне детаљне и прецизне анализе.

Модел зоне користи се за симулације динамике пожара унутар дефинисане зоне (засебне просторије). Овај модел пружа добру равнотежу између сложености и тачности. Предност модела зоне је његова способност да релативно брзо пружи довољно тачне резултате за многе инжењерске апликације, без потребе за сложеним и временски захтевним рачунарским ресурсима. Модел зоне је ограничен у својој тачности када се користи за сложеније или сценарије већих размера, јер не узима у обзир детаљније локалне ефекте и варијације унутар просторије.

Нумеричка (рачунарска) динамика флуида (енгл. Computer Fluid Dynamic - CFD) представља најнапреднији и најдетаљнији приступ међу детерминистичким моделима, те користи нумеричке методе за решавање једначина струјања флуида. Предност CFD је његова висока тачност и способност симулирања сложених феномена с великом прецизношћу тако да CFD може пружити детаљне информације о динамици флуида, преносу топлоте и масе те интеракцијама између различитих компоненти система. Међутим, тачност CFD је уско повезана с високом ценом коришћења рачунарских ресурса. Симулације на основу CFD су често врло сложене за постављање и захтевају значајно време за извођење, што их чини мање практичнима за брзе процене или једноставније проблеме.

Коришћење модела зоне и CFD при пројектовању безбедности од пожара није једноставно нити лако, без обзира на релативно једноставан кориснички интерфејс нумеричког програма. Корисник мора имати виши ниво разумевања динамике пожара у затвореним просторима како би пружио одговарајуће улазне вредности и проценио валидност и тачност резултата.

Сprovedено је неколико такозваних *Round Robin* студија,⁷³ где се од стручњака у пољу истраживања безбедности од пожара захтевало коришћење нумеричких модела да би симулирали експерименталне услове и сценарио пожара у затвореним просторима.

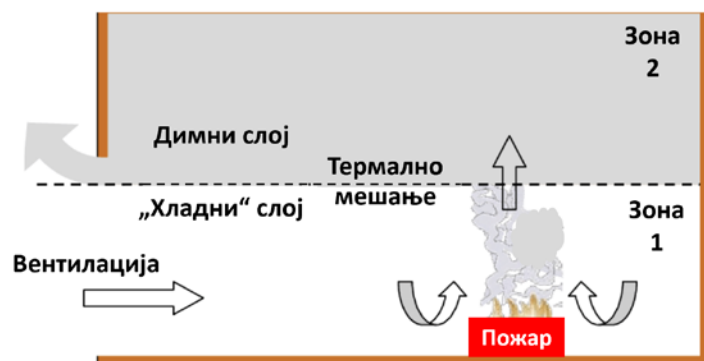
⁷³ Round Robin студија, такође позната као Round Robin тестирање, је метода која се често користи у подручјима као што су софтверско инжењерство. Осигурава доследност и поузданост резултата између различитих лабораторија или услова тестирања. Главни циљеви Round Robin студије су идентификовање варијабилности резултата тестирања и побољшање поузданости и стандардизације метода тестирања.

Такве студије су показале да може постојати знатна разлика у резултатима зависно од постављених претпоставки које корисник доноси о различитим улазним подацима.⁷⁴

4.1 Зонски модел

Нумерички модел пожара и преноса дима под називом *Consolidated Fire and Smoke Transport - CFAST* први је пут јавно објављен у јуну 1990. године, након деценија развоја онога што се данас назива моделима зоне. Слово „С“ у називу CFAST, са значењем „консолидовани“ (али и комбиновани), имплицира да је сврха овог модела била да се у један програмски пакет обједине међународне студије и напредак нумеричких модела тог времена. До 1992. године развијено је неколико различитих зона модела пожара, укупно 31. Анкета која је спроведена 2003. године од стране инжењерске фирме *Combustion Science and Engineering* на њиховој web страници наводи попис од 25 различитих врста модела за моделирање пожара и зона дима. Али, од свих њих у примени су преостала два, и сада активна и примењива у студијама: CFAST i ARGOS модели.⁷⁵

Зонски модел дели подручје на две различите зоне гаса у затвореном простору: са горњом запремином и доњом запремином које произлазе из термалне стратификације због силе узгона. Подручје сагоревања је извор енергије и масе и манифестује се као узлазни стуб масе из доње зоне према горњој зони кроз процес назван увлачење - вртложење (енгл. entrainment). Битна карактеристика зонског модела је масени проток увлачења при сагоревању. Ово омогућује главни механизам струјања између доњег и горњег стратификованог слоја гаса, слика 4.2.



Слика 4.2 Зонски модел

Значајан број истраживања је спроведен са циљем проучавања наведеног процеса вртложења током сагоревања првенствено течних горивих материја у затвореним

⁷⁴ Johansson, N., Anderson, J., McNamee, R., and Pelo, C.: A Round Robin of Fire Modelling for Performance-Based Design, Fire and Materials, 2020.

⁷⁵ Combustion Science & Engineering Inc., www.firemodelsurvey.com, 2022.

просторима (посуди). Нажалост, како идеални теоријски модели узгона – стуба дима (енгл. plume) тако и корелације темељене на подацима варирају у широком опсегу, не постоји сагласност међу зонским моделима у пракси нити оптимални модел вртложења сагоревања течних горива.

Због тога, чак ни идеалан однос вртложења код симетричних пожара течних горива у посуди не може бити адекватно представљен у оквиру зонских модела, будући да је димни стуб услед узгона у ограђеном простору подложен несиметричним струјањима ваздуха која могу довести до његовог савијања и утицати на степен вртложења. Такође, промена вентилације може утицати на промену нивоа вртложења.⁷⁶ Приликом моделирања сагоревања у затвореним просторима недостају одређене карактеристике пожара, на пример струјни ток флуида у ходницима и у вертикалним отворима. Струјни токови флуида у ходницима су важни при анализи транспорта дима дуж дугих ходника.⁷⁷ Тренутно зонско моделирање симулира формирање тренутног димног слоја који се спушта, али стварни процес производи пролазно струјање флуида уз дужину плафона. Кретање флуида кроз вертикалне отворе укључују интеракцију флуидног тока са зидовима, ефекте условљене разликом притиска и турбулентно мешање, слика 4.3.⁷⁸



Слика 4.3 Проток флуида дуж ходника и вертикалних отвора

Зонски модели су развијени с циљем обраде сагоревања у појединачном затвореном простору или серији повезаних затворених простора чије су величине репрезентативне за стамбене просторије, канцеларије или мале индустријске јединице.

⁷⁶ McCaffrey, N.J. and Rockett, J.A., Static Pressure Measurements of Enclosure Fires, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 82, 1977.

⁷⁷ Karlsson, Björn; Quintiere, James G., Enclosure Fire Dynamics, Second Edition, CRC Press, 2022.

⁷⁸ Quintiere, J.G. and Wade, C.A., Compartment Fire Modeling, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed., Society of Fire Protection Engineers, Springer-Verlag, New York, 2016.

Симулације модела показују добру усклађеност с експериментима спроведеним за предвиђање температуре и висине слоја дима у таквим затвореним просторима.⁷⁹

Зонско моделирање није прикладно за одређене геометрије, попут ширења дима у затвореним просторима с великим односом дужине према ширини или затвореним просторима где је однос хоризонтале према вертикали врло велик или врло мали. Као пример, у стандарду ISO/TS 13447 *Fire safety engineering - Guidance for use of fire zone models* препоручује се опрез при примени зонског модела у затвореним просторима у којима однос дужине према ширини или висине према ширини прелази вредност 5 (пет).⁸⁰ Стога, зонски модели нису прикладни за моделирање пожара у дугим ходницима или високим отворима.

Током времена дошло је до смањења употребе зонског моделирања, а као разлог се може навести да више није подручје активног истраживања, а и смањено тржиште економски није одрживо. Развој зонског модела је лакши део, тежи део је верификација и валидација, документација, контрола верзија софтвера, осигурање квалитета софтвера, другим речима одржавање.

CFAST је оно што је првобитно било и замишљено, једноставан зонски модел, са могућношћу моделирања пожара затворених простора и релативно једноставан за постављање почетних услова и покретање.

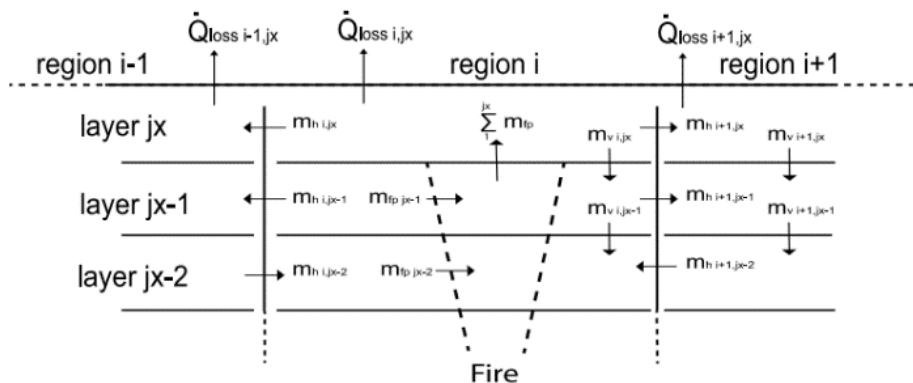
4.2 Вишезонски модел

Вишеслојни зонски модел енгл. *Multi-Layer Zone Model – MLZ* развијен је како би се предвиделе вертикалне варијације температуре и концентрације продуката сагоревања у затвореном простору, поделом затвореног простора на већи број хоризонталних слојева уместо само два слоја као код конвенционалног зонског модела. Општи концепт MLZ-а илустрован је на слици 4.4, а детаљан опис је презентован у публикацијама од стране Suzuki, K., Harada, K., & Tanaka, T.⁸¹

⁷⁹ McGrattan, K.B., Peacock, R.D., and Overholt, K.J., Modelling Validity Validation of Fire Models Applied to Nuclear Power Plant Safety, Fire Technology, Vol. 52, No. 1, 2016.

⁸⁰ ISO, Fire Safety Engineering, Guidance for Use of Fire Zone Models ISO/TS 13447, 2013.

⁸¹ Suzuki, K., Harada, K., & Tanaka, T., A multilayer Zone-model for predicting fire behavior in a single room, Gaithersburg, Maryland, USA: International Association for Fire Safety Science, 2003.

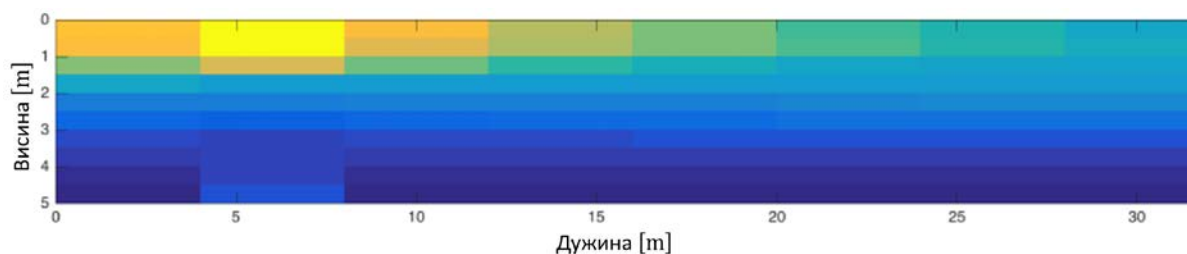


Слика 4.4 Општи концепт MLZ модела, преузето из публикације Suzuki и сар., 2004.

Као и код зонског модела, MLZ модел користи једначине за очување масе и енергије, али примењује овај метод на границе између сваког вертикалног слоја, док истовремено допушта да се вртложење уздиже кроз слојеве све до додира са плафоном. MLZ модел претпоставља да су температура и концентрација продуката сагоревања хомогени у сваком одвојеном слоју, што ефективно значи да је то у суштини дводимензионални модел затвореног простора.

MLZ модел током времена је модификован тако да се запремина може хоризонтално поделити на неколико ћелија како би се израчунале хоризонталне варијације у температури гаса и концентрацији продуката сагоревања у два смера. Иако су извршене модификације, то је и даље 2Д модел и може имати примену у дугим уским затвореним просторима као што су тунели или ходници.

Нови приступ зонском моделирању је у фази развоја и тестирања, назван вишезонски модел енгл. *Multi-Zone Model* - MZ. MZ модел се заснива на истим начелима као и MLZ модел, али је главна разлика у томе што MZ модел затворени простор дели на више ћелија у три димензије. За визуализацију података потребно је користити MATLAB, будући да не постоји опција за визуализацију података из MZ модела, слика 4.5.⁸²



Слика 4.5 Илустрација MZ модела, представља затворени простор као апроксимацију тунела, визуализација помоћу MATLAB, преузето из публикације Nils J., Enrico R., Rugiada S., Michele F. 2021.

⁸² Nils J., Enrico R., Rugiada S., Michele F., The use of multi-zone modelling for tunnel fire risk analysis, Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden, Report 3242, Lund, 2021.

Иако оба модела деле исте основне принципе и делови MZ модела се темеље на публикацијама о MLZ моделу, непознато је да ли постоје друге сличности између ова два модела с обзиром да код за MLZ модел није објављен. MZ модел се може сматрати побољшаном верзијом MLZ модела. Циљ MZ модела да се просторија подели на више зона на сличан начин као код CFD модела, и да се на тај начин омогући симулација сагоревања у великим затвореним просторима без потребе за коришћењем великих рачунарских ресурса.

Евалуацијска студија концепта MZ спроведена је поређењем података из MZ модела пожара с претходно објављеним експерименталним подацима и подацима из симулација с FDS.⁸³ Резултати који су добијени евалуацијом показују да MZ модел пожара предвиђа температуре гаса унутар 5% резултата FDS и унутар 10% експерименталних података у два добро прозрачена велика затворена простора.

Главна предност MZ модела је што се симулације сценарија сличне онима које су коришћене у евалуацији изводе у року од 1 - 2 минута. То је отприлике 0.1% времена које је потребно за извођење сличне симулације коришћењем FDS.

4.3 Рачунарска (нумеричка) динамика флуида

Моделирање пожара у затвореним просторима у данашње време, темељи се на временски зависним, тродимензионалним решењима основних закона очувања који су превладавајући за проблеме динамике флуида и преноса топлоте (енгл. *fire envelope*) па је истраживање које је описано у раду засновано на детерминистичким поставкама модела у затвореним просторима. Због тога су у даљем тексту детаљније описане карактеристике овог приступа.

Нумеричка динамика флуида (енгл. *Computer Fluid Dynamic - CFD*) је грана науке која нумерички моделира кретање флуида, пренос топлоте и сродне појаве помоћу нумеричких симулација. Њена примена у науци је веома важна за широк распон индустријске и неиндустријске примене. Ради се о нумеричким алгоритмима који узимају у обзир све раније познате једначине и доносе одлуку о томе које скупове физичких претпоставки и повезаних једначина треба користити да би се дошло до оптималног решења одређеног проблема. Методологија CFD се може поделити у три фазе: предпроцесирање, нумеричко решавање и симулацију, и постпроцесирање тј. прикупљање и приказ резултата.

⁸³ N. Johansson., Multi Zone models bringing the gap between zone models and CFD models, SFPE Europe, Q3 – Issue 19, 2020.

Предпроцесирање је први корак рада и састоји се од дефинисања модела проблема који се решава, при чему је важно дефинисати почетне услове и циљеве моделирања, и дефинисати домене односно нумеричку мрежу која ће бити кориштена. Други корак је избор нумеричког решења, при чему се доминантно користе две методе, то су методе коначне разлике и методе коначне запремине. У оба случаја, CFD апроксимира просторни домен решетку/мрежу и нумеричко решење помера напред у дискретним временским корацима.

У зависности од услова протока флуида, различити приступи дискретизацији и корацима у времену могу бити преферирани на темељу специфичне примене. На пример, за стационарне токове, имплицитне методе и већи временски кораци могу бити ефикаснији. Имплицитне методе решавају систем једначина у сваком временском кораку и омогућавају веће временске кораке, могу бити ефикасније због своје стабилности и способности решавања у већим временским интервалима. Са друге стране, за нестационарне или турбулентне токове експлицитне методе са финијом временском резолуцијом често су неопходне да би се прецизно ухватиле пролазне појаве. Експлицитне методе омогућавају решење за следећи временски корак директно из тренутног временског корака и често захтевају финију временску резолуцију, и неопходне су за тачни приказ пролазних појава јер боље решавају брзе промене у протоку. Поред тога, методе просторне дискретизације, као што су методе коначних запремина, коначних елемената или коначних разлика, бирају се на основу геометрије, граничних услова и жељене тачности симулације. Ови избори обезбеђују стабилност, конвергенцију и веродостојност нумеричког решења у односу на физички проблем који се моделује.

4.3.1 Основне једначине и нумеричке технике у CFD

Упоредо с развојем CFD дошло је и до развоја модела поља (енгл. field model) који се могу користити у решавању бројних захтева и проблема у области безбедности од пожара. Заснивају се на концептуалном оквиру усредњене *Reynolds*-ове форме *Navier – Stokes*-ових једначина (RANS) у детаљном “ $k - \varepsilon$ ” моделу турбуленције. Двоједначински “ $k - \varepsilon$ ” модел турбуленције је развијен као апроксимација за временско осредњавање било ког параметра турбулентне струје (брзине, компоненте брзине, притиска, температуре, густине, ...) заступљеног у основним једначинама. Једначине очувања масе, количине кретања и енергије које чине основу сваког CFD модела наведене су у тексту који следи.

- Конзервација масе:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * \rho u = 0 \quad (4.1)$$

где су:

ρ – густина

t – време

$u (u, v, w)$ – вектор брзине

Овом једначином се у суштини констатује да маса не може бити ни створена ни уништена. Другим речима, промена густине, ρ , у датој тачки у пољу протока једнака је нето масеном флукусу, ρu , преко границе мале контролне запремине која окружује ту тачку. За симулације пожара, обично је потребно експлицитно узети у обзир различите појединачне гасовите компоненте, на пример, гориво и кисеоник. Једначина очувања масе често се пише као скуп транспортних једначина за масене фракције појединачних гасовитих компоненти, Y_α :

$$\frac{\partial (\rho Y_\alpha)}{\partial t} + \nabla * (\rho Y_\alpha u) = \nabla * (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (4.2)$$

где су:

Y_α – масена фракција, α , врсте

D_α – коефицијент дифузије

$\dot{m}_\alpha'''$ - брзина сагоревања по јединици запремине врсте, α , по хемијској реакцији

$\dot{m}_{b,\alpha}'''$ - брзина сагоревања врсте, α , испаравањем честица

Сабирањем свих једначина добија се оригинална једначина очувања масе.⁸⁴

- Конзервација момента количине кретања:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla * (\rho u u) + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \tau_{ij} \quad (4.3)$$

где су:

f_b – вектор спољне силе

τ_{ij} – тензор вискозног напона

p – притисак

g – гравитациони вектор

⁸⁴ Kevin McGrattan and Stewart Miles, Modeling Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD), pg. 1034 – 1066, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition, Springer New York Heidelberg Dordrecht London # Society of Fire Protection Engineers, 2016.

Једначина момента количине кретања је овде написана у компактној нотацији да би се нагласило да је она суштински Други Њутнов закон, или једноставно, да сила представља производ масе и убрзања. Силе које покрећу флуид састоје се од градијента притиска, ∇p , трења (у облику тензора вискозног напона, τ_{ij}) и термина спољашњих сила, f_b , као што је узгон.

- Конзервација енергије:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} = \nabla * (\rho h u) = \frac{D_p}{D_t} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \dot{q}'' + \varepsilon \quad (4.4)$$

где су:

h - осетљивост енталпије

$\dot{q}'''$ – брзина ослобађања топлоте по јединици запремине из хемијске реакције

ε – брзина дисипације

$\dot{q}_b'''$ - енергија пренешена на испарене капљице

$\dot{q}''$ - кондуктивни и радијативни топлотни флукс

Као и код једначине очувања масе, осетљива енталпија, h , у датој тачки се мења према нето флуксу енергије преко границе мале контролне запремине која окружује ту тачку. Међутим, сада постоје додатне изворне променљиве на десној страни једначине који се односе на притисак, брзину ослобађања топлоте сагоревања, зрачење и кондукцију, као и дисипацију кинетичке енергије. За примене у пожарима, доприноси променљивих за притисак и дисипацију су занемарљиви, осим у ситуацијама где је простор сагоревања потпуно затворен и притисак се значајно повећава.

Једначине 4.1 - 4.4 чине скуп парцијалних диференцијалних једначина за густину (или масене фракције компоненти), брзину, притисак и осетљиву енталпију флуида. Конзервацију момента кретања дефинишу три једначине за три компоненте брзине: u , v , и w , што чини пет једначина за шест непознатих. Да би се систем затворио, потребна је једначина стања која повезује притисак, p , и осетљиву енталпију, h .

- Функција специфичне топлоте и температуре флуида:

$$h = \int_{T_o}^T c_p dT \quad (4.5)$$

где су:

c_p – специфична топлота

T – температура

За већину примена у пожарима, довољно је претпоставити да се гасовита смеша продуката сагоревања понаша као идеалан гас, односно:

$$p = \frac{\rho R T}{M} \quad (4.6)$$

где су:

R - универзална гасна константа

M - просечна молекулска тежина смеше гасова.

Једначине очувања описују транспорт масе, количине кретања и енергије путем конвекције и дифузије (материјална дифузивност, вискозност, топлотна проводљивост). У пожарима, конвекција је примарни начин транспорта топлоте и продуката сагоревања, али дифузивни процеси играју значајну улогу у пламену пожара и у граничним слојевима близу чврстих површина. Прорачуни великих конвективних транспорта и малих дифузивних процеса у истој симулацији захтева превише рачунарских ресурса, чак и за рачунаре тренутне генерације. Као последица тога, већина практичних симулација пожара користи моделе за описивање под-мрежних, или „неухватљивих“ феномена. Најважнији од ових модела су модели турбуленције.

Нумеричке технике за апроксимацију једначина категоризоване су према њиховој просторној и временској тачности:

- директна нумеричка симулација (DNS),
- *Reynolds - averaged Navier - Stokes* (RANS) и
- симулације великих вртлога (LES).

DNS представља директно нумеричко решење основних једначина, док RANS и LES користе моделе неразрешених под-мрежних процеса дисипације. RANS их усредњује преко релативно великих просторно-временских скала од оних које су карактеристичне за задату нумеричку мрежу или фундаменталну фреквенцију пожара, док LES покушава да израчуна што више „разрешивих“ дужинских и временских скала (тј. „великих вртлога“) колико год је то могуће.

4.3.2 Директна нумеричка симулација (DNS)

DNS значи да се основне једначине решавају нумерички без икаквих модификација, што имплицира да су све релевантне временске и просторне скале директно разрешене без употребе модела за представљање дифузионих чланова, као што су вискозност, топлотна проводљивост и материјална дифузивност. Пошто ова техника захтева веома фину просторну и временску резолуцију (мање од 1 mm и 1 ms, респективно), ограничена је на мале ламинарне пламенове и понекад мале турбулентне

млазове. DNS још увек није практичан за симулације пожара, због чега неће бити коришћен у истраживању које је приказано у овом раду.

4.3.3 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)

Полазна тачка у *Reynolds*овом усредњавању је декомпозиција компоненти брзине, енталпије и масених удела врста на временски просечну компоненту (означену цртом изнад) и флукутирајућу компоненту (означену апострофом):

$$\Phi(x, t) = \bar{\Phi}(x, t) + \Phi'(x, t) \quad (4.7)$$

За пролазне токове временски просечна компонента и даље је функција времена, представљајући еволуцију поља просечног тока. У типичним симулацијама пожара, временска скала повезана са временски просечном компонентом је реда величине неколико секунди, док је она за флукутирајућу компоненту реда величине милисекунди. Заменом декомпонованих примитивних варијабли у једначине очувања (једначине 4.1, 4.3 и 4.4) и применом истог процеса временског усредњавања на систем једначина добија се скуп једначина који је по облику сличан оригиналним једначинама, при чему једначина очувања масе остаје непромењена:

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla * (\rho\bar{u}\bar{u}) = -\nabla \Pi + f_b + \nabla \bar{\tau} - \nabla \rho\bar{u}'\bar{u}' \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{h})}{\partial t} = \nabla * (\rho\bar{h}\bar{u}) = \frac{D_p}{D_t} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \bar{q}'' + \bar{\varepsilon} - \nabla \rho\bar{u}'\bar{h}' \quad (4.9)$$

*Reynolds*ов процес усредњавања уводи додатне чланове на десној страни једначина и повећава број непознатих. Тако систем једначина више није затворен. Додатни чланови се називају *Reynolds*ови напони и турбулентни скаларни флуks, респективно. Скалар h , представља енталпију, а сличне једначине се могу извести за остале скаларе (нпр. масене уделе гасовитих врста).

Већина комерцијалних CFD модела за пожаре који користе RANS приступ примењује модел турбуленције са вртложном вискозношћу како би затворила скуп једначина. Основна идеја је да се неразрешене турбулентне флукутације могу моделирати са дифузионим терминима који ефикасно представљају дисипацију турбулентне енергије:

$$-\rho\bar{u}_i'\bar{u}_j' = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (4.10)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ako } i = j \\ 0 & \text{ako } i \neq j \end{cases}$$

$$-\overline{\rho u'_i h'} = \lambda_t \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \quad (4.11)$$

Овде је, μ_t , турбулентна (вртложна) вискозност, k , турбулентна кинетичка енергија, δ_{ij} , *Stefan-Boltzmann* константа, а λ_t турбулентна дифузивност, која је повезана са вртложном вискозношћу изражена формулом:

$$\lambda_t = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \quad (4.12)$$

где је, σ_t , познат као турбулентни *Schmidtov* број, зависно од тога да ли је скаларна величина енергија или променљива врста. Обично му се додељује константна вредност у зависности од посматране скаларне величине.

За симулације пожара, често се користи модел вртложне вискозности са две једначине. Овај модел омогућава да се турбуленција опише брзином и дужинском скалом која варира у свакој ћелији мреже у рачунарском домену. Модел са две једначине који се користи у већини RANS апликација у инжењерингу безбедности од пожара је $k - \varepsilon$ модел. Овде се решавају две додатне транспортне једначине: једна за турбулентну кинетичку енергију k , и једна за њен степен дисипације ε . Ове величине формирају турбулентну вискозност у једначини 4.10:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.13)$$

Фактор C_μ је емпиријска константа. Двоједначински, $k - \varepsilon$, модел је најчешће коришћена RANS техника у апликацијама заштите од пожара.

4.3.4 Large Eddy Simulation (LES)

Примена LES модела је врло слична RANS моделу, иако постоје суптилне разлике у тумачењу декомпозиције примитивних варијабли. RANS наглашава временско усредњавање, док LES наглашава просторно усредњавање, или филтрирање. Кључна разлика између поменутих техника лежи у величини дифузионог коефицијента, тј. "вртложне" вискозности. Вртложна вискозност мора бити довољно мала да не би поништила мале, али разрешиве вртлоге, али и довољно велика да обезбеди нумеричку стабилност и узме у обзир дисипацију енергије на подмрежним скалама.

Основна идеја је да највећи вртлози садрже највише енергије и директно се симулирају, док се мањи вртлози, који су мање енергетски и више изотропни, моделирају. *Navier – Stokes* једначине, које описују кретање флуида, филтрирају се како би се

одвојили велики и мали вртлози. Овај процес укључује просторно филтрирање, које се може математички представити као:

$$\bar{\varphi}(x, t) = \int_V G(x - x'; \nabla) \varphi(x', t) dx' \quad (4.14)$$

где су:

$\bar{\varphi}$ - филтрирана варијабла,

φ - оригинална варијабла,

x - позиција у простору,

V - запремина интеграције,

G - функција филтера која зависи од удаљености x' и x и

∇ - карактеристичне дужине филтера.

Филтер функција G дефинише просторно осредњавање и одређује разлику између великих (резолвираних) и малих (под-мрежних) скала вртлога.

Једначине које описују транспорт масе, кретање и транспорт енергије код пожаром индукованих струјања морају се поједноставити да би се могле ефикасно користити за решавање жељених сценарија пожара. Поједностављене једначине које су урадили *Rehm* и *Baum*, једначине за сагоревање са „ниским вредношћу *Mach*овог броја“, описују споро кретање гаса кога покрећу ослобођена топлота егзотермних реакција и силе узгона.

Претходно наведене *Navier - Stokes* једначине (4.1 – 4.4) описују и дају информације о упоредивости брзина протицања флуида (за пожар 10 ÷ 20 m/s) са брзинама звучних таласа (за миран ваздух, 300 m/s). Једначине са ниским вредношћу *Mach*овог броја се решавају нумерички, дељењем физичког простора у коме се симулира пожар на велики број правоугаоних ћелија. У оквиру сваке ћелије, вредност брзине, температуре итд. се сматрају уједначеним и мењају се само са временом. Прецизност симулирања динамике пожара зависи од броја ћелија које се могу обухватити симулацијом. Овај број је условно ограничен расположивим могућностима рачунара. Данашње меморије рачунара ограничавају број оваквих ћелија на највише неколико милиона. То значи да распон од највеће до најмање дужине вртлога (динамички распон симулације), који може да се решава рачунарским путем износи 100 ÷ 200. Распони дужине корака који су потребни за симулацију свих релевантних процеса пожара износе око $10^4 \div 10^5$, јер се процеси сагоревања дешавају у дужинским распонима од mm или мање, док су дужине корака повезане са пожарима који се дешавају у кући до пожара у великим стамбеним објектима.

Како су нумерички експерименти у оквиру истраживања проблематике овог рада урађени коришћењем програмског пакета Fire Dynamic Simulator (FDS) који је заснован на LES моделу, у даљем тексту је укратко описан историјски развој овог програмског пакета, главне карактеристике и параметри који су коришћени за симулацију.

4.4 Програмски пакет за симулацију пожара Fire Dynamic Simulator

Fire Dynamics Simulator (FDS) је програмски пакет за симулацију пожара који је развијен у Националном институту за стандарде и технологију САД (*National Institute for Standards and Technology – NIST*) који користи LES модел за анализу протока малих брзина (engl. low-speed flows) и посебно је намењен за симулацију протока продуката сагоревања током пожара. FDS симулира сценарије пожара користећи рачунарску динамику флуида оптимизирану за термалне токове малих брзина. Овакав приступ је врло флексибилан и може бити примењен на широк опсег типова пожара, од пожара у кући до пожара на резервоарима нафте. Такође, примењив је за моделирање процеса које не укључују пожар, као што је вентилација у грађевинским објектима.

FDS је блиско интегрисан у графички кориснички интерфејс PyroSim, који омогућава директан преглед поставки модела и припрему исправног формата FDS улазног фајла. PyroSim омогућава „увоз“ CAD фајлова за креирање и управљање комплексним моделима, алате за детаљно цртање 2Д и 3Д геометрије, интегрисано паралелно процесирање, флексибилан систем јединица (метричке и англосаксонске јединице), алате за управљање вишеструким мрежама, системе за грејање, вентилацију и климатизацију (HVAC) интегрисане у CFD симулацију, импорт постојећих FDS модела, интегрисано постпроцесирање. Укратко, PyroSim помаже у изради поузданих модела пожара.

FDS модели могу се користити за предикцију образовања продуката пожара, процену кретања дима и анализу температурних поља током развоја пожара. Резултати ових симулација се користе у циљу обезбеђења сигурности пре изградње грађевина, процену могућности повећања сигурности постојећих грађевина, реконструкцију пожара у циљу експертизе, као и за тренинг ватрогасаца-спасилаца.

Најзахтевнији поступци при употреби FDS модела су: дефинисање рачунарског домена грађевинског објекта, локација иницијалног пожара, величина нумеричке мреже и дефинисање граничних услова. Аналитичари обично кажу да је важно направити баланс између времена које је потребно за решавање и тачности решења. Тако на пример, умањење величине мреже за фактор 2 има за последицу, апроксимативно, повећање

времена рачунања за фактор 16 (фактор 8 због броја ћелија и фактор 2 због смањене величине корака). У решавању одређених проблема, величина мреже се мора изабрати адекватно како би се добили тачни резултати.

Све FDS калкулације се изводе унутар прорачунске мреже. Сваки објект у симулацији (нпр. препреке и отвори за вентилацију) мора бити позициониран у односу на мрежу. Када локација објекта не одговара прецизно структури мреже, објект се аутоматски репозиционира током симулације. Такође, сваки објект који излази изван граница физичког домена је „одсечен“ на граници домена. Објекте је могуће позиционирати и изван домена, али они неће бити укључени у прорачун нити приказани на резултатима. Како би се постигла оптимална тачност симулације, важно је користити ћелије мреже које су апроксимативно исте величине у све три димензије.

FDS користи *Poisson*ов прорачун базиран на брзој *Fourier*овој трансформацији (FFT). Споредни ефекат овог приступа је ограниченост оптималних димензија мреже на форму $2^u 3^v 5^w$, где су u , v и w цели бројеви. Примери добрих димензија мреже су $64 = 2^6$, $72 = 2^3 \times 3^2$ и $108 = 2^2 \times 3^3$. Такође, примарни бројеви ћелија на оси могу узроковати нежељене резултате, на што PyroSim упозорава правовремено корисника.

Како би се симулирале површине материја које проводе топлоту или горива, потребно је специфицирати њихове термичке карактеристике и пиролизу. PyroSim омогућава две категорије материјала: чврсти материјали и течна горива. Да би се симулирао пожар чврстих горива, неопходно је укључити у прорачун и једначину пиролизе. Приликом дефинисања карактеристика пиролизе задаје се температура самозапаљења и додају реакције које ће одредити начин сагоревања материјала. Такође, пиролизу је могуће моделирати и специфицирањем HRR криве за одређену површину.

Површине се користе за дефинисање карактеристика чврстих објеката и вентилационих отвора у FDS моделу. Стандардна вредност се додељује при иницијализацији свих чврстих објеката и вентилационих отвора и она је фиксна при одређеној температури околине која је такође задата, а могуће је додатно дефинисати извор пожара - *burner*, као и специфицирати топлоту сагоревања објекта, одредити проток на вентилационом отвору и слично.

PyroSim поседује алате који убрзавају креирање и организацију геометрије модела, коју је могуће креирати путем дијалога или путем алата за цртање у 2Д или 3Д. Генерално, постоје три типа геометрије у софтверском пакету PyroSim: препреке, рупе (то су у суштини негативне регије у препрекама) и вентилациони отвори (субрегије на

површини препреке које могу имати другачију површину од остатка препреке). Када симулација укључује пожар, потребно је дефинисати и хемијску реакцију сагоревања горива, што се у FDS ради не само дефинисањем горива и продуката сагоревања него и топлоте сагоревања. Према задатој топлоти сагоревања и у складу са HRR кривом, FDS обавља прорачун транспорта топлоте и продуката сагоревања.

Убрзавање решавања једначина могуће је коришћењем паралелног процесирања. Покретање симулације на више језгара истог рачунара паралелно, може донети значајно убрзање. Употребом кластера рачунара могу се решавати сложенији проблеми, али у том случају брзина размене информација унутар кластера представља ограничавајући фактор.

PyroSim опција Model Checks омогућава кориснику извођење листе провера на текућем моделу и генерисање извештаја са резултатима сваке провере. Опција Model Checks се може користити за идентификацију непожељних параметара модела пре покретања временски захтевних симулација. Тиме је могуће правовремено подесити параметре модела. Могуће је извршити и проверу модела површина како би се одредиле максималне вредности параметара *burner*, *supply* и *exhaust* параметара површине.

Сви аспекти подешавања FDS симулације могу се извести путем PyroSim корисничког интерфејса, укључујући постављање параметара симулације, извршавање *single* и *multithread* симулација, покретање *remote cluster simulacija* и извршавање симулација које су раније паузиране. Пре покретања симулације потребно је ускладити параметре симулације са проблемом који се моделира. Ово укључује параметре као што је време симулације, излазне величине, параметре окружења, конверзију угаоне геометрије у блокове и различите вредности симулатора.

Након што је модел креиран, могуће је кроз PyroSim извршити покретање симулације. Приказ резултата врши моћни постпроцесор којег је за FDS креирала фирма *Thunderhead Engineering*, омогућавајући кориснику преглед резултата симулације у 3Д.

Посебно погодна за затворене просторе са контролисаном горивом материјом је опција MFCM (енгл. Mixture Fraction Combustion Model), којом се подешава однос гориве материје и кисеоника на ниво без сагоревања.⁸⁵ Овај приступ омогућава модификовање модела симулације према реалним условима динамике пожара и вентилације у затвореном простору.

⁸⁵ Yusuke, S., Tsutomu, N., Yoshikazu, D., Kazunori, H. An Application Method of Free Burn HRR Data to Room Fire Scenarios, *Fire Saf. Sci.*, 11, 276–288, 2014.

4.4.1 Историјски развој програмског пакета FDS

Пошто је за истраживање коришћен програмски пакет Fire Dynamic Simulator, у даљем тексту дат је кратак осврт историјског развоја верзија овог пакета од прве верзије FDS 1 до FDS 5. Верзији FDS 6 посвећена је посебна глава пошто је ова верзија коришћена у истраживању.

Повећани интерес за коришћење нумеричких симулација за проблеме попут пројектовања авиона и ракета започео је 1960-их и 1970-их година. Ове симулације су укључивале брзине струјања флуида при којима су важни акустични таласи и као такве нису биле примењиве за сценарио пожара.

Реалистичнији приступ симулацијама пожара остварен је 1978. године од стране *Ronaldi G.* и *Howarda B.*, с поједностављењем *Navier-Stokes* једначина за струјање флуида ниских брзина, што је типично за сценарио пожара.⁸⁶ *Cox* и сар. (1989) користили су један од првих модела пожара на терену како би истражили пожар на станици *London Undergrounda King Cross*, трагичан инцидент са 31 жртвом, 18. новембра 1987. године.⁸⁷

У раним 1990-им годинама постојао је интерес за испитивање проблема ефикасности вентилације и застора за дим у складиштима, геометријских препрека за приказ робе која се чува на полицама, модела турбулентности, топографије, особина распршивача воде (енгл. *sprinkler*) и преноса топлоте. Нумеричка студија коју су објавили *Yeoh* и сар. (2003) показала је да укључивање модела сагоревања, чађи и топлотног зрачења побољшава предвиђања поља температуре у пожарима затвореног простора.⁸⁸

Значајна промена догодила се развојем алата названих *A Large Outdoor Fire Plume Trajectory* - *ALOFT* и *CFD*, који су декларисани као индустријски симулатори пожара.⁸⁹ Будући да су се током времена модели пожара на терену показали корисним за инжењерска решења у многим студијама, наведени алати постали су предмет великог интереса у истраживању динамике пожара.

FDS верзија 1 (FDS 1) јавно је објављена у фебруару 2000. године. Ова верзија је имала могућност извођења како директних нумеричких симулација *DNS*, тако и симулација великих вртлога *LES*, намењених за решавање практичних инжењерских проблема великих размера. Преглед техника FDS-а примењених у истраживању пожара

⁸⁶ Ronald G. R., Howard R. B., The Equations of Motion for Thermally Driven Buoyant Flows, Journal of research of the Notional Bureau of Standards Volume B3, No.3, May-June, 1978.

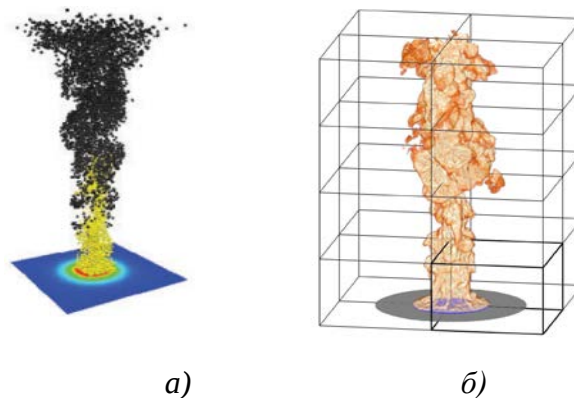
⁸⁷ Cox, G., Chitty R., Kumar, S., Fire modelling and the King's cross fire investigation, Fire Saf J, 15., 1989.

⁸⁸ Yeoh G. H., Yuen R. K. K., Chueng S. C. P., Kwok W. K., On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires, Build Environ, 38. 2003.

⁸⁹ Jason F., Jansen H., Evolution of the fire dynamics simulator, Fire Protection Engineering, Issue # 75, (2017).

указао је да би под-мрежне особине остварене од стране модела LES биле прикладан алат за узимање у обзир случајности у понашању пожара. Развијени су улазни параметри како би се лако специфицирали гранични услови попут отворених граница или улаза, излазних протока, величине, положаја и топлотне инерције препрека. Основе онога што се препознаје као FDS постојале су у једноставној мрежи с препрекама које су биле дефинисане као да су направљене од цигле.

Пожари су приказани као честице које емитују топлоту (жута боја) и затим постају инертне (црна боја), као што је приказано на слици 4.6.а. Приступ LES-у у симулацијама пожара значајно је побољшао моделирање структуре пламена, слика 4.6.б. За боље разумевање процеса који се одвија кроз визуализацију пожара, развијена је апликација *Smokeview*.⁹⁰



Слика 4.6 а) FDS 1: Модел сагоревања течности; б) FDS 6: Модел сагоревања течности (Извор: публикација *Thunderhead Engineering*, 2024.)

FDS верзија 2 (FDS 2) објављена је у децембру 2001. године с ажурирањима кроз 2002. годину. FDS 1 добро је функционисао у случајевима где су добро прозрачени пожари били мали у поређењу са запремином простора. Примена FDS-а на пожаре у затвореним просторима захтевала је приступ „унутар оквира” (енгл. *in the box*). За моделирање сагоревања у затвореном простору развијен је модел фракционе смеше (енгл. *mixture fraction*) сагоревања. Постао је модел који зависи од доступног кисеоника, запремине пламена за топлотно зрачење и продуктима сагоревања за топлотно зрачећи димни слој или за процену услова угрожености присутних особа. За моделирање топлотног зрачења, дискретни-ордината модел (DO) формулисан је и нумерички решен помоћу модела коначне запремине, *Finite-Volume Model* - FVM.

⁹⁰ McGrattan, K. and Forney, G., *Fire Dynamics Simulator: User's Manual* (NISTIR 6469), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2000.

Било која мрежна ћелија „гас“ или ћелија препреке „зид“ може зрачити топлоту преко целе кугле (емисија из гасне ћелије) или полукугле (емисија из зидне ћелије). Овај модел био је једноставан и робустан. Могао је предвидети зрачење из врућих слојева и решити заклањање које се догађа када је препрека између пожара и циља.

FDS верзије 3 и 4 (FDS 3 и FDS 4) настале су након терористичких напада 11. септембра 2001. у САД јер је лабораторија за истраживање зграда и пожара при NIST-у била задужена за истраживање урушавања зграда светског трговинског центра па је потреба за таквом врстом истраживања подстакла велики део развоја FDS у периоду од 2001. до 2005. године.⁹¹

Потреба за великим простором како би се моделирали вишеспратни торњеви светског трговинског центра подстакла је и развој могућности вишеструке мреже и употребу интерфејса за пренос порука *Message Passing Interface - MPI* како би се извеле симулације преко више рачунара. FDS је морао да има могућност моделирања више спратова велике зграде, укључујући учинке ширења пожара, ломљења прозора и сагоревања које је ограничено вентилацијом. Како би се побољшали резултати FDS-а за сагоревање ограничено вентилацијом, додат је једноставан модел гашења темељен на температури ћелије и масеном уделу кисеоника. FDS 4 је објављен у марту 2006. године.

FDS верзија 5 (FDS 5) настала је на иницијативу комисије *U.S. Nuclear Regulatory Commission* која је иницирала и уложила напоре у проверу и валидацију низа пожарних модела, укључујући FDS. Препознато је да је FDS постао много више од алата за истраживање и да једноставно пружање веза за преузимање садржаја извршних датотека и .zip датотеке изворног кода није најбољи начин за управљање развојем FDS-а.

Ово сазнање подстакло је дуготрајне напоре да се FDS пројекту наметну неке модерне праксе развоја софтвера. Током овог времена цели пројекат кратко је био на *online* локацији *SourceForge*, а затим дужи временски период на *GoogleCode*. *Online* присутност FDS укључивала је и форум за расправу где су корисници могли помоћи једни другима у раду с FDS, као и праћење проблема где су корисници могли пријавити проблеме с FDS. Повећана употреба FDS такође је открила ограничења модела сагоревања смеше различитих горивих материја, доступних граничних услова FDS-а приликом моделирања пожара у зградама и модела испаравања капљица.

⁹¹ K. McGrattan, R. McDermott, M. Vanella, S. Hostikka, and J. Floyd, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018- 1 (sixth edition), June 2022.

Модел мешавине фракција замењен је моделом дисипације вртлога (енгл. eddy dissipation) где су праћене три „скупљене групе“ (енгл. lumped) врсте (гориво, ваздух и продукти сагоревања). То је омогућило негорелим материјама да коегзистирају с ваздухом након гашења, што није било могуће с приступом мешавине фракција.⁹²

Између 2007. и 2010. године објављено је чак двадесет седам варијанти - подвезија FDS 5. Те подвезије омогућиле су различите позадинске притиске у различитим просторијама и контролне функције за отварање и затварање вентилационих отвора или уклањање препрека, чиме је створена могућност моделирања пожара у затвореним просторима.

FDS верзија 6 (FDS 6) објављена је у јануару 2017, а пошто је у истраживању коришћена последња верзија из 2024. године Fire Dynamics Simulator 6.9.1. као и PyroSim верзија 2024.1. у посебном тексту који следи наведени су главни параметри који су коришћени у симулацијама које су приказане у раду.

4.4.2 FDS верзија 6

Као што је већ поменуто, коришћење FDS може да буде веома захтевно у смислу времена које је потребно за израчунавање и расположивости ресурса рачунарске опреме која се користи. Два кључна параметра која утичу на то су величина мрежне ћелије, односно *резолюција нумеричке мреже* и карактеристични пречник пожара, односно *критеријум пречника сагоревања*. У том смислу, спроведено је неколико студија о повезаности између величине мрежне ћелије и карактеристичног пречника пожара како би се уштедело време које је потребно за прорачун. Са поменутих параметрима повезан је и *критеријум вентилационог отвора*, као и могућност *проширења домена симулације на околину* о чему ће бити речи у тексту који следи.

FDS користи апроксимације друге тачности и просторних деривација *Navier-Stokes* једначина, што значи да је грешка дискретизације пропорционална квадрату временског корака или величине ћелије.⁹³ Као што је већ напоменуто, смањење величине ћелије за фактор 2 теоријски ће повећати временски прорачун 16 пута, али ће се грешка дискретизације смањити 4 пута.

⁹² Malkočević D., Past, present and future for enclosure fire field model, Working and Living Environmental Protection Vol. 5, No 1, Facta Universitatis, 2022.

⁹³ McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., & Vanella, M. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, 2019.

Мера колико добро је пожар репрезентован дата је недимензионалним изразом, односом карактеристичног пречника сагоревања D^* и оптималне величине мрежне ћелије δ_x , такозвани *индекс резолуције*:

$$D^* / \delta_x \quad (4.15)$$

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (4.16)$$

где су:

D^* - карактеристични пречник сагоревања [m]

$\dot{Q}$ – HRR [kW]

ρ_∞ - густина ваздуха [kg/m³],

c_p – специфични топлотни капацитет ваздуха [kJ/kgK],

T_∞ - температура [K]

g – гравитациона константа [9.81 m/s²]

δ_x – оптимална величина ћелије [m]

Поставља се питање шта је „права“ вредност индекса резолуције? Ова вредност није прецизно дефинисана, али је током валидације FDS утврђено да су оптималне вредности индекса резолуције 0.05 m, 0.10 m и 0.20 m.

Често се резолуција нумеричке мреже бира као компромис између онога што би требало да она буде и онога што можемо приуштити у смислу компјутерских ресурса. Уобичајено се спроводе студије осетљивости мреже, што значи да се нумеричко извршење понавља на низу континуирано рафинираних мрежа све док се резултати на свим тачкама у простору не мењају, или мењају унутар прихватљивог ограничења. Корисник мора бити опрезан како би осигурао да фино подешена мрежа постигне оптималну равнотежу између компјутерске тачности и ефикасности нумеричког извршавања. Захтеви мрежне резолуције варирају од случаја до случаја. На пример, величина ћелије од 0.10 m може бити адекватна, за процену ширења дима и топлоте у просторији у којој се дешава сагоревање и ван ње, али можда није примерена за проучавање врло малог, тињајућег извора сагоревања.

За дефинисање оптималне величине ћелије могу се користити препоруке NIST-а, као и резултати истраживања *Fredrika Nystedta* и *Håkana Frantzicha*.⁹⁴ Методологија

⁹⁴ Fredrik Nystedt, Håkan Frantzich, Quality manual for fire engineering analysis at Swedish nuclear engineering facilities, Luleå University of Technology, 2011.

оптимизације мрежне резолуције састоји се од неколико корака. У првом кораку одређује се вредност пречника сагоревања на основу претходно наведене једначине 4.16. Вредност карактеристичног пречника сагоревања дели се са оптималном, δ_x величином ћелије мреже, D^*/δ_x (једначина 4.15), чиме се добија вредност индекса резолуције мрежне ћелије. Други корак је одређивање односа, D^* и висине простора H . За вредности мање од 0.5 величина ћелије може бити већа од 0.15 m.⁹⁵

$$D^* / H \quad (4.17)$$

Nystedt и *Frantzich*, за вредност резолуционог индекса препоручују између 0.10 и 0.20 за симулације где су потребни прецизнији подаци. Такође, *McGrattan* и сар.⁹⁶, препоручују да величина ћелије од 10% карактеристичног пречника сагоревања пружа адекватну резолуцију:

$$\frac{D^*}{\delta_x} \geq 10 \quad (4.18)$$

Zhao и сар. предложили су два алтернативна начина за претходно дефинисање оптималне величине мрежне ћелије током симулација пожара у затвореном простору.⁹⁷ Предлог се заснива на конвергенцији мреже у смислу „грешке“ у масеном балансу, заснованој на постпроцесирању излазних података, користећи два односа дужина.

Први однос узима у обзир однос фактора вентилације према величини ћелије мреже:

$$l_1^* = \frac{l_1}{\delta x} = \frac{(A_o \sqrt{H_o})^{2/5}}{\delta x} \quad (4.19)$$

Други однос узима у обзир однос хидрауличног дијаметра отвора према величини ћелије мреже:

$$l_2^* = \frac{D_h}{\delta x} = \frac{\left\{ \frac{2W H_o}{(W + H_o)} \right\}}{\delta x} \quad (4.20)$$

где су:

l_1 – однос дужинске разmere базиране на геометрији отвора [-]

l_1^* - однос дужинске разmere базиране на геометрији отвора и величини мреже за симулацију [-]

⁹⁵ Erik Edin, Mattias Ström, Comparing a full-scale test with FDS, FireFOAM, McCaffrey & Eurocode, Luleå University of Technology, 2019.

⁹⁶ McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Fire Dynamics Simulator, Sixth Edition, User Guide, National Institute of Standards and Technology Special Publication 1019, 2015.

⁹⁷ Zhao G., Beji T., Merci B., Application of FDS to Under-Ventilated Enclosure Fires with External Flaming, Fire Technology, 2015.

l_2^* - однос дужинске размере базиране на хидрауличком дијаметру и величини решетке у симулацији [-]

A_o – површина отвора [m^2],

H_o – висина отвора [m],

W – ширина отвора [m],

D_h – хидраулични дијаметар отвора [m],

Овај приступ узима у обзир геометријске карактеристике отвора кроз који се врши вентилација у просторији и упоређује ту величину с величином ћелије у решетки која се користи за симулацију. Према овом приступу, правилно прилагођена величина ћелије требала би омогућити адекватно моделирање струјања ваздуха кроз отворе и осигурати прецизне резултате симулације пожара у затвореном простору.

Слично као у једначинама за карактеристични пречник сагоревања, *Zhao* и сар. предложили су критеријуме за l_1^* и l_2^* од 0.10. Потребно је рећи да су за спроведене анализе коришћени само случајеви $l_1^* \geq 10$ и $l_2^* \geq 10$, а одступање у масеном балансу између експерименталних и нумеричких вредности је износило испод 4 %.

Када је реч о *проширењу домена*, истраживање које су провели *He Y.* и сар. показује да прилагођавање проширења домена изван вентилационих отвора, за пожаре унутар просторије, утиче на резултате унутар саме просторије, било да је реч о сценарију пожара контролисаног горивом материјом или вентилационим фактором.⁹⁸ Стога постаје неопходно да се прошире нумерички домени како би се побољшала прецизност симулација пожара у просторијама, чиме је омогућено укључивање интеракција између спољашњих струјања у близини вентилационих отвора и унутрашњих струјања флуида.

Проширење домена у различитим координатним смеровима дало је различит обим утицаја на резултате симулације. Након истраживања које су провели *Zhang* и сар. о проширењу мреже у вертикалној оси, резултати симулације показали су се мање осетљивима на проширење домена дуж Z координате, под условом да је нумерички домен у смеру X координате адекватно проширен.⁹⁹ Проширење мреже дуж Y координате открило је да су контуре количина на средишњој равнини готово независне од проширења домена у Y смеру, без обзира на проширења у друга два координатна смера. Укратко,

⁹⁸ He Y., Jamieson C., Jeary A., Wang J., Effect of Computation Domain on Simulation of Small Compartment Fires, Fire Safety Science, Proceedings of the Ninth International Symposium pg. 1365-1376, 2008.

⁹⁹ Zhang X., Yang M., Wang J., He Y., Effects of Computational Domain on Numerical Simulation of Building Fires, Journal of Fire Protection Engineering pg. 225-251, 2010.

проширење домена је ефикасније у правцу који је нормалан на вертикални отвор, док је утицај проширења домена у друга два смера ограничен.

Као битно, поставља се питање колико треба проширити домен. Стога, слично као у истраживању о зависности од мреже, *Zhang* и сар. спровели су анализу зависности од домена како би одредили прикладан рачунарски домен за различите сценарије. Уобичајена пракса је да се моделира спољни простор, али није потпуно јасно колико је тачно спољног простора потребно како би се унутар просторије добили репрезентативни резултати.

He Y. и сар. спровели су детаљну параметарску студију и предложили корелацију између хидрауличног дијаметра отвора за вентилацију D_h и фактора ефективног проширења домена η , што је важно за разумевање оптималне величине нумеричког домена.

$$\text{ефективно проширење} = \eta D_h \quad (4.21)$$

где је:

$$\eta = \begin{cases} 0.5 & \text{за пожаре контролисане горивом материјом} \\ 1 & \text{за пожаре контролисане вентилационим фактором} \end{cases}$$

У нумеричким експериментима попут примера анализираних у овом истраживању, нумерички домен треба да буде на одговарајући начин проширен изван физички ограничених зидова када постоје вентилациони отвори, како би се осигурала нумеричка тачност без непотребног смањивања нумеричке ефикасности. Уопштено, проширени домен узима у обзир интеракцију струјања у подручју близу вентилационих отвора на одговарајући начин и представља прикладнији приступ симулацијама реалних пожара у затвореним просторијама него код коришћења непроширених домена.

За потребе пројектовања и процене у инжењерству безбедности од пожара, ефективно проширење домена може бити повезано с HRR и хидрауличним дијаметром вентилационог отвора. Ова корелација је испитана у истраживању *He Y.* и сар. Њихова препорука је да се нумерички домен за симулацију пожара у затвореним просторима контролисаних горивом материјом прошири изван вентилационих отвора просторије за $1/2$ хидрауличног дијаметра највећег вентилационог отвора, како би се очувала валидност и минимизирала нетачност резултата симулације.

За симулације пожара који су контролисани вентилационим фактором, препоручује се проширење од једног хидрауличног дијаметра, као што је такође препоручено и у истраживању *Zhang* и сарадника. Током симулација с мањим

проширењем од предложеног, пламен пожара имао је мање нагињање према назад у просторију,¹⁰⁰ односно нагиб осе пламена био је израженији у резултату с проширеним нумеричким доменом.

У овом раду примењене су препоруке NIST-a и истраживања *Nystedt* и *Frantzich* за одређивање индекса резолуције. Моделирање спољашњег простора за све нумеричке експерименте засновано је на конзервативном приступу за вентилационо контролисана сагоревања, користећи критеријум једног хидрауличног пречника највећег геометријског отвора, у складу са препорукама истраживања *Zhanga* и сарадника.

Два основна начина симулације пожара употребом FDS-a су: симулирани раст пожара и одређена величина пожара. У приступу одређене величине пожара - величина пожара се одређује унапред, обично као специфицирана вредност за burner са HRR по јединици површине (HRRPUA), а може се мењати с временом употребом тзв. „gapr“ функције одређених параметара сагоревања (H_c). Све остале површине се специфицирају као незапаљиве.

У овом приступу, када је величина пожара одређена према HRR, FDS израчунава ниво образовања „волатила“ испарљивих супстанци (масени губитак горива) и дељењем предодређује величине пожара са топлотом сагоревања горива (H_c). „Створено“ гориво у FDS затим делује као пумпа која пумпа испарљиве супстанце с дефинисаном количином у простор. Мешање, реакција између кисеоника и испарљивих супстанци се моделује FDS моделом сагоревања и поново се израчунава HRR. Другим речима, предодређени HRR се прилагођава на основу доступности кисеоника а резултујући транспорт топлоте и продуката сагоревања такође се симулира.

Циљ је прво, да се провери може ли модел сагоревања да репродукује предодређени HRR који је добијен из експеримента уз исту доступност кисеоника, а затим уз разумну репродукцију HRR криве и током времена. Након завршетка симулације, врши се анализа излазних података HRR и користи за поређење с експерименталним резултатима или вредностима калориметријских тестирања.

У раду, избор HRR кривих је извршен на основу објављених истраживања експерименталних тестова сагоревања намештаја и калориметријских података. Након моделирања геометрије простора са вентилационим фактором који омогућава

¹⁰⁰ Ова појава у англосаксонској литературе назива се „Coanda effect“ и представља тенденцију пожарног стуба да „пријања“ уз површину, уместо да следи равну линију у свом изворном смеру. Може се изразити и као тенденција пожарног стуба да буде привучен према оближњој површини.

еквивалентне услове као у експерименталним тестовима, одређена је локација *burner*-а, моделовање и дефинисање временских корака сагоревања помоћу *ramp* функције.

Одабрани материјал за *burner* је Polyethylene G 27, који је стандардизовани материјал у PyroSim бази података, што осигурава доследност и поузданост резултата симулације. Коришћење стандардизованих материјала помаже у валидацији и поређењу резултата између различитих симулација и истраживања. Полиетилен је уобичајени термопластични полимер са добро документованим особинама у условима сагоревања. Често се користи у симулацијама јер је његово понашање у условима пожара добро истражено и може се поуздано моделовати.

На основу добијених резултата симулације, извршена је анализа и поређење излазних података HRR (нумерички и графички) са експерименталним подацима. Помоћу релативне разлике између нумеричке и експерименталне HRR криве, процењено је да ли нумерички модел задовољава NRC стандарде тачности и поузданости предвиђања у симулацији. Нумерички експеримент је валидиран на основу унапред одређеног HRRa.

Након валидације нумеричког модела, у циљу истраживања утицаја различитих параметара, као што су геометрија отвора, геометрија простора, вентилациони фактор и динамика промене вентилационог фактора на развој HRR, извршене су промене у наведеним параметрима. Резултати корелација и регресионе анализе нумеричких експеримената коришћени су за поређење са експерименталним резултатима ради процене спољашње валидности.

5. Нумерички експерименти

У овом поглављу приказани су резултати нумеричких симулација које су обављене током истраживања. Све симулације и прорачуни урађени су на рачунару следећих карактеристика:

- Процесор: 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz
- RAM: 32.0 GB
- Графичка карта: NVIDIA GeForce RTX 3050 8 GB

У истраживању је спроведена свеобухватна анализа експерименталних података и верификованих резултата нумеричких експеримената како би се истражио утицај природне вентилације и геометрије простора на развој HRR криве у условима реалних пожара. Истраживање је ограничено на једноставне конфигурације затворених простора, а у складу с тим бирани су и примењени модели.

Нумерички експерименти који су приказани у раду темеље се на модификацијама параметара природне вентилације, укључујући геометрију и локацију отвора. Поред тога, експерименти укључују и промене геометрије простора. Разматране су варијације са и без унутрашњих промена геометрије простора, попут додавања преградног зида, као и динамичке промене фактора вентилације током извршавања симулације. Посебна пажња посвећена је анализи динамичке промене услова вентилације, што је омогућило детаљну процену утицаја варијабилних фактора на HRR криву током времена. Иако студија пружа увид у основне параметре који утичу на HRR криву у једноставним затвореним просторима са једноставном конфигурацијом, она пружа могућност за проширење на сложеније геометрије простора, као и за различите примене, чиме се омогућава оптимизација природних система за вентилацију.

Током истраживања спроведена су 62 нумеричка експеримента коришћењем следећих шест модела за симулацију:

- ISO 9705:2016 *Fire tests – Full scale room test for surface products* модел (8 нумеричких симулација за различите димензије отвора и различите вентилационе факторе – ВФ).
- ISO 668:2020 HC 6 m, *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings*, HC (енгл. Housing Containers)¹⁰¹, модификовани модел транспортног контејнера за становање дужине 6 m. Експериментима је обухваћено 12 нумеричких симулација за

¹⁰¹ ISO 668:2020; Series 1, Container shipping. Classification, dimensions and calculations

различите димензије и локације отвора и за различите вредности вентилационог фактора.

- ISO 668:2020 HC 9 m, *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings*, модификовани модел транспортног контејнера за становање дужине 9 m. Експерименти обухватају 12 нумеричких симулација за различите димензије и локације отвора, као и за различите вредности вентилационог фактора.
- ISO 668:2020 HC 12 m, *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings*, модификовани модел транспортног контејнера за становање дужине 12 m. И за овај модел урађено је 12 нумеричких симулација за различите димензије и локације отвора и за различите вредности вентилационог фактора.
- ISO 668:2020 HC 9 m, *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings* модел. Експерименти обухватају 10 нумеричких симулација са променом унутрашње геометрије модела помоћу преградног зида, различитих димензија и локација отвора, као и вентилационог фактора.
- ISO 668:2020 HC 9 m, *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings model*. Експерименти укључују 8 нумеричких симулација, са променом унутрашње геометрије модела помоћу преградног зида, различитих димензија и локација отвора, уз динамичку промену вентилационог фактора током трајања експеримента.

После спроведених нумеричких експеримената у тексту је дата анализа, а затим и дискусија добијених резултата за сваки од наведених модела.

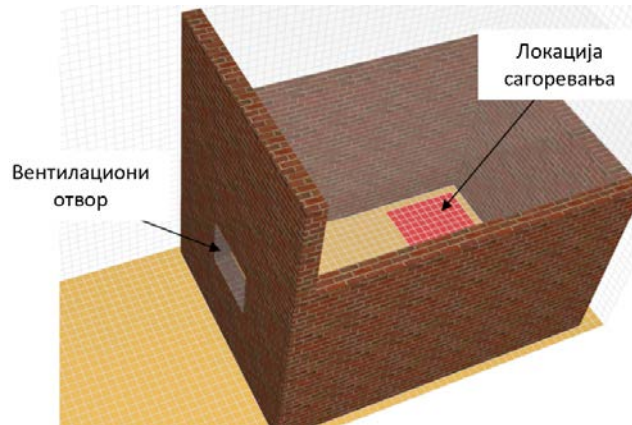
5.1 ISO 9705:2016 модел

Стандард ISO 9705:2016 подразумева следеће унутрашње димензије модела: ширину просторије од 2.4 m, дужину 3.6 m и висину 2.4 m. Модел садржи један вентилациони отвор чија висина од пода износи 1.2 m за сценарије SC_1 до SC_7, док је за сценарио SC_8 на нивоу пода. Димензије (ширина и висина) овог отвора за 8 сценарија који су означени са SC_1 до SC_8 наведене су у табели 5.1.

Табела 5.1 Геометријске димензије отвора за сценарије нумеричких експеримената модела ISO 9705:2016 од SC_1 до SC_8.

ISO 9705:2016	W [m]	H [m]
SC_1	0.4	0.4
SC_2	0.4	0.6
SC_3	0.6	0.6
SC_4	0.8	0.6
SC_5	0.8	0.8
SC_6	1	0.8
SC_7	1	1
SC_8	0.8	2

Локација почетног пожара је у углу просторије на растојању од 2.5 m насупрот вентилационог отвора, са површином од 1 m². Поставка нумеричког експеримента, односно модел у складу са стандардом ISO 9705:2016 приказан је на слици 5.1.



Слика 5.1 Модел у складу са стандардом ISO 9705:2016.

Таваница и под просторије су од бетона, зидови су од пуне цигле и просторија је моделирана у складу са стандардима Eurocode 2 *Design of Concrete Structures* i EN 206 *European Standard for concrete technology*.¹⁰²

- Спецификација бетона:
 - Дебљина: 0.2 m,
 - Густина: $\rho = 2280 \text{ [kg/m}^3\text{]}$,
 - Специфична топлота: $c = 1.04 \text{ [kJ/(kgK)]}$,
 - Топлотна проводљивост: $\lambda = 1.8 \text{ [W/(mK)]}$.
- Спецификација цигле:
 - Дебљина: 0.2 m
 - Густина: $\rho = 750 \text{ [kg/m}^3\text{]}$,
 - Специфична топлота: $c = 1.04 \text{ [kJ/(kgK)]}$,
 - Топлотна проводљивост: $\lambda = 0.1 \text{ [W/(mK)]}$.

Избор HRR криве извршен је на основу објављених истраживања, експерименталних тестирања горења намештаја и калориметријских података који су преузети од стране RISE *Fire DataBase* која садржи јавно доступне податке добијене

¹⁰² CEN - European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

експериментима коришћењем различитих метода, као и резултате пројекта CBUF *Furniture full-scale calorimeter*.¹⁰³

Развој пожара који је коришћен у нумеричким експериментима у складу са стандардом ISO 9705:2016 заснива се на подацима који су објављени у EC Report EUR 16477 EN за CBUF *1:02 three seat sofa*, калориметријски експеримент CBUF - *Fire Safety of Upholstered Furniture*, 16477 EN. Састав материјала је следећи:

1. Fabric: FR treated cotton; Interliner: FR polyester fibre,
2. CMHR foam/seat FR polyester interior back.

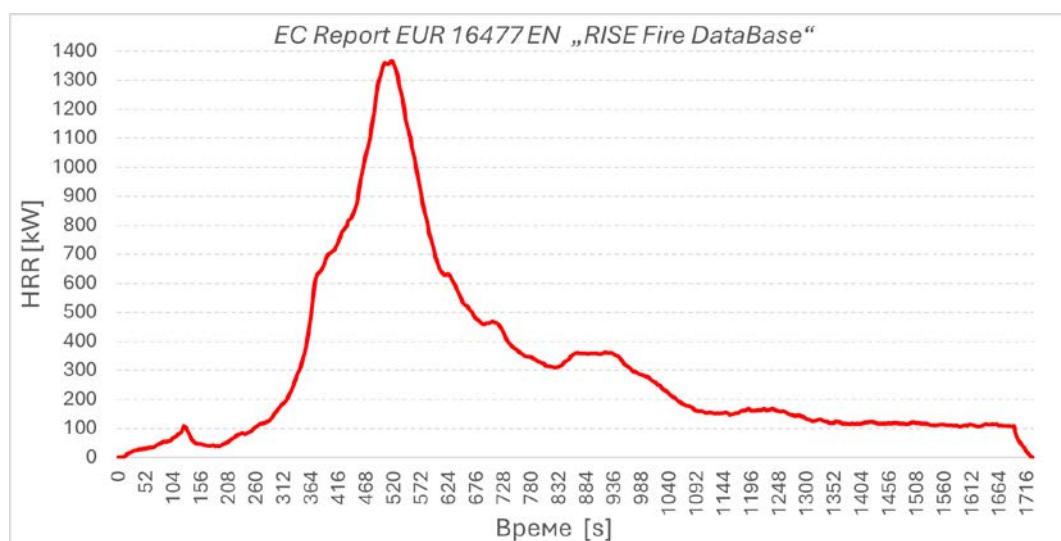
Основни параметри који су коришћени за симулацију су следећи:

- почетна температура 20 °C (293.15 K),
- притисак је изједначен са атмосферским притиском од 101 kPa и
- почетак сагоревања је у 0 s симулације.

Параметри сагоревања су следећи:

- $HRR_{max} = 1366 \text{ kW}$,
- $HRR_{укупно} = 520 \text{ MJ}$,
- почетна маса софе је 39.6 kg,
- изгубљена маса током сагоревања износи 33.72 kg,
- просечна топлота сагоревања $\Delta H_c = 15.45 \text{ MJ/kg}$,
- трајање фазе потпуно развијеног пожара износи 24 s (од 500 s до 524 s), док укупно трајање сагоревања износи $t = 1716 \text{ s}$.

Графички приказ HRR криве EC Report EUR 16477 EN дат је на слици 5.2.



Слика 5.2 HRR крива - експеримент EC Report EUR 16477 EN, RISE Fire DataBase

¹⁰³ <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/tjanster/rise-fire-database>

Величина ћелије за симулацију одређена је на основу оптимизације потрошње рачунарских ресурса за нумерички експеримент на моделу ISO 9705:2016, при чему је у првом кораку дефинисан пречник сагоревања D^* :

$$D^* = \left(\frac{1366}{1.2 * 1.0 * 293.15 * \sqrt{9.81}} \right)^{2/5} = 1.098 \quad (4.16)$$

На основу тога одређена је вредност односа пречника сагоревања D^* и висине простора која износи $H = 2.4 \text{ m}$:

$$D^* / H = 1.098 / 2.4 = 0.457 \quad (4.17)$$

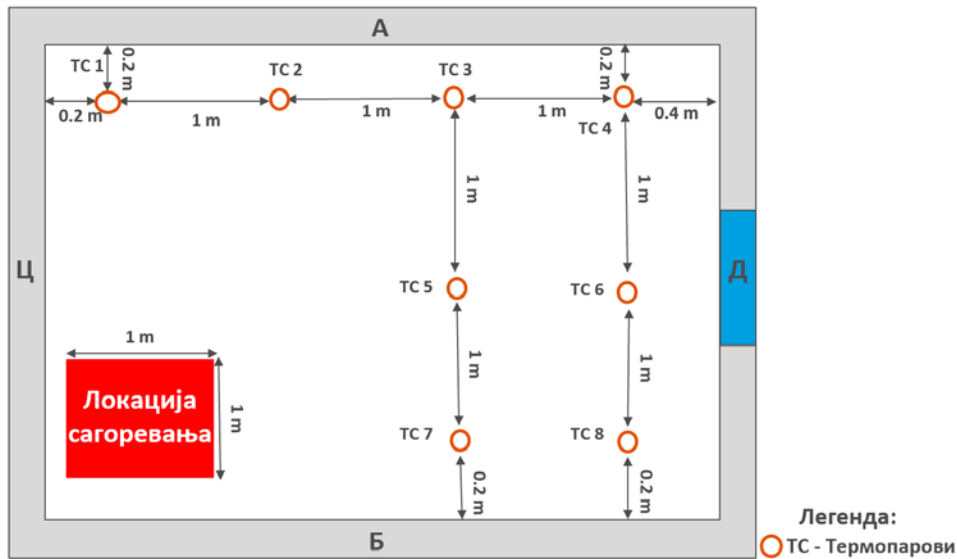
Као завршни корак у процесу одређивања оптималне величине ћелије мреже, узима се у обзир однос између пречника пожара и оптималне величине ћелије:

$$\frac{D^*}{\delta_x} = \frac{1.098}{0.1} = 10.98 \quad (4.18)$$

На овај начин, за оптималну величину мрежне ћелије која ће се користити у симулацији добија се ћелија димензија $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$.

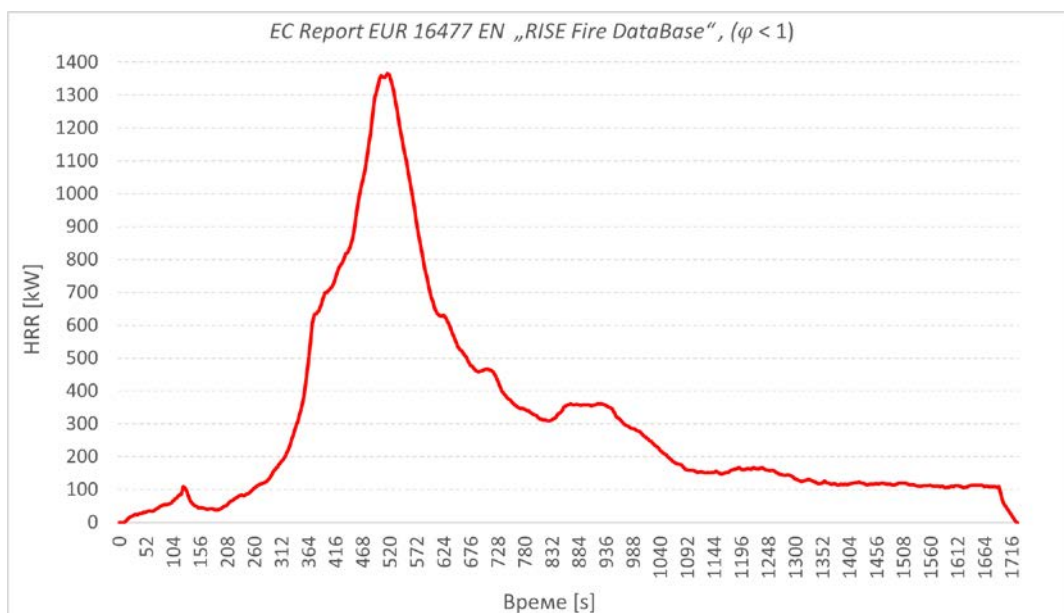
Постављање мреже за симулацију извршено је применом корисничког интерфејса програмског пакета Pyrosim, при чему је описаним поступком дефинисана величина ћелије која омогућава генерисање мреже која је прикладна за симулацију. Нумерички домен симулације проширен је за 2.4 m вертикално од вентилационог отвора, и за 0.2 m од зидова и таванице. Ово проширење омогућава прецизнију анализу утицаја околног простора на динамику вентилације и дистрибуцију дима и топлоте. Тако проширен домен за симулацију осигурава да гранични услови не утичу негативно на тачност резултата, чиме се омогућава детаљнија процена интеракција између геометријских карактеристика простора и вентилационих параметара.

Модел ISO 9705:2016 садржи осам термопарова који су у одређеном распореду постављени у простору, при чему сваки термопар садржи по три температурна сензора, на висинама од пода 0.5 m , 1.5 m и 2.4 m . Сензори су постављени и на вентилационом отвору на растојањима 0.1 m од доње ивице и од горње ивице и на средини отвора у зависности од димензија отвора, слика 5.3.

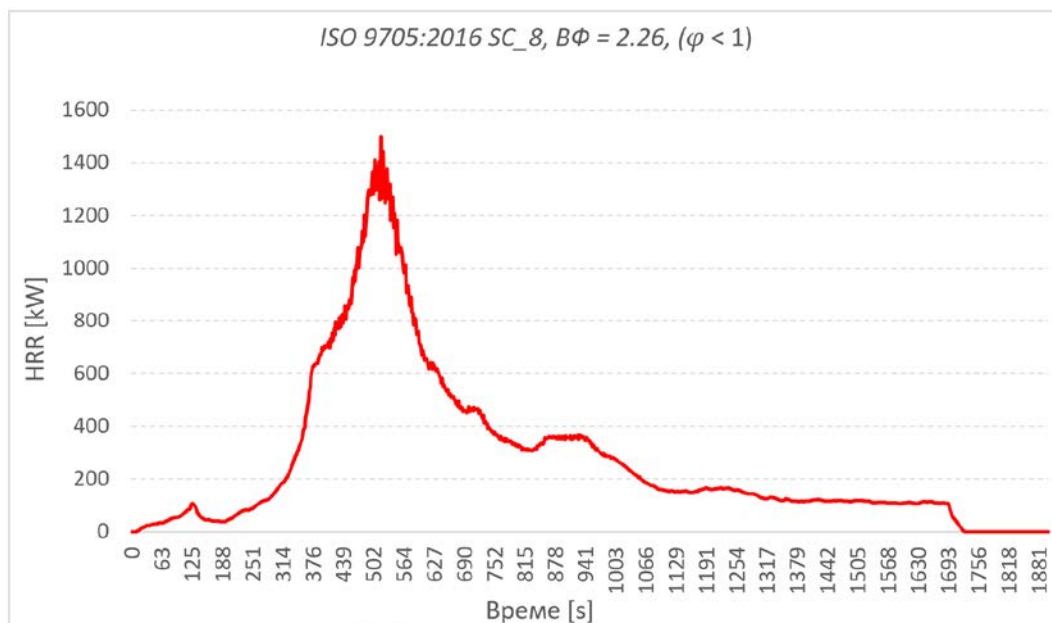


Слика 5.3 Нумерички експеримент ISO 9705:2016: А, Б и Ц - зидови модела, Д - вентилациони отвор на зиду, локација термопарова и локација пожара

Релативна разлика између предвиђања која даје модел и експерименталних мерења израчуната је према једначини 1.1. Верификација добијених резултата за сценарио SC_8 према нумеричком моделу ISO 9705:2016 у условима сагоревања које је контролисано горивим материјалом, дакле при еквивалентном односу $\varphi < 1$, извршена је у односу на експериментална мерења (EC Report EUR 16477 EN) при идентичним условима и једнаком еквивалентном односу. Карактеристике сценарија SC_8 укључују ширину вентилационог отвора $W = 0.8 \text{ m}$ и висину $H = 2 \text{ m}$, што даје $B\Phi = 2.26$. Релативна разлика између нумеричког експеримента модела и практичног експеримента износи $\varepsilon = 0.003$, што је графички приказано на слици 5.4 а) и б), респективно.



Слика 5.4 а) HRR крива експеримент - EC Report EUR 16477 EN, $\varphi < 1$



Слика 5.4 б) FDS нумерички експеримент ISO 9705:2016 SC_8, $\varphi < 1$.

На основу резултата може се закључити да је релативна разлика између нумеричког експеримента и практичног експеримента у складу с критеријумима које је поставила NRC - *US Nuclear Regulatory Commission*. Нумерички модел испуњава строге захтеве за тачност и поузданост предвиђања у симулацијама сагоревања. Ови резултати потврђују да се нумерички модел може користити као веродостојан алат за процену и предикцију понашања криве ослобађања топлоте при одигравању реалног пожара.

Еквивалентни однос нумеричких резултата модела у складу са стандардом ISO 9705:2016 у сценаријима SC_1 – SC_8 у односу на експериментална мерења која су наведена у EC Report EUR 16477 EN, приказан је у табели 5.2.

Табела 5.2 Еквивалентни однос нумеричких резултата модела према ISO 9705:2016 и вентилационог фактора $B\Phi$, у сценаријима SC_1 – SC_8

ISO 9705:2016	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	Еквивалентни однос
SC_1	0.4	0.4	0.10	$\varphi > 1$
SC_2	0.4	0.6	0.18	$\varphi > 1$
SC_3	0.6	0.6	0.28	$\varphi > 1$
SC_4	0.8	0.6	0.37	$\varphi > 1$
SC_5	0.8	0.8	0.57	$\varphi > 1$
SC_6	1	0.8	0.75	$\varphi \geq 1$
SC_7	1	1	1	$\varphi < 1$
SC_8	0.8	2	2.26	$\varphi < 1$

Анализа добијених резултата

Анализа односа између унутрашње геометрије простора и вентилационог отвора у контексту еквивалентних односа током сагоревања у сценаријима SC_1 – SC_8 према нумеричком моделу ISO 9705:2016 показује следеће:

- За сценарије SC_1 – SC_5, однос φ је већи од 1 ($\varphi > 1$).
- У сценарију SC_6, однос φ је већи или једнак 1 ($\varphi \geq 1$).
- У сценаријима SC_7 – SC_8, однос φ је мањи од 1 ($\varphi < 1$).

Вредности које су добијене за трајање HRR за сценарије SC_1 – SC_8, приказани су детаљније у табели 5.3.

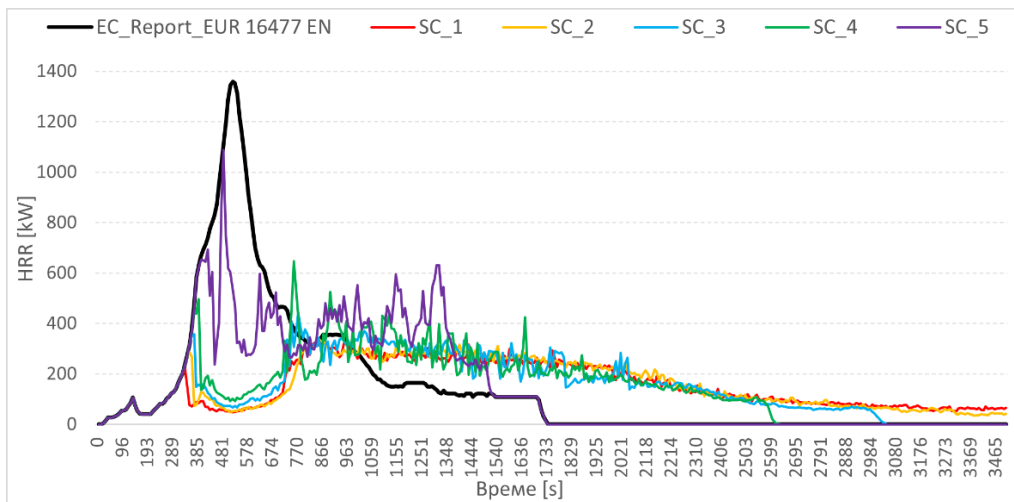
Табела 5.3 ISO 9705:2016 SC_1 – SC_8, нумерички резултати, ВФ, трајање HRR и HRR_{max}

ISO 9705:2016	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	Трајање HRR [s]	HRR_{max} [kW]
SC_1	0.4	0.4	0.10	>3500 s	759.53
SC_2	0.4	0.6	0.18	>3500 s	755.63
SC_3	0.6	0.6	0.28	3062 s	805.91
SC_4	0.8	0.6	0.37	2642 s	925.90
SC_5	0.8	0.8	0.57	1732 s	1133.67
SC_6	1	0.8	0.75	1732 s	1233.11
SC_7	1	1	1	1732 s	1446.91
SC_8	0.8	2	2.26	1732 s	1498.14

Анализа добијених вредности за трајање HRR показује следеће:

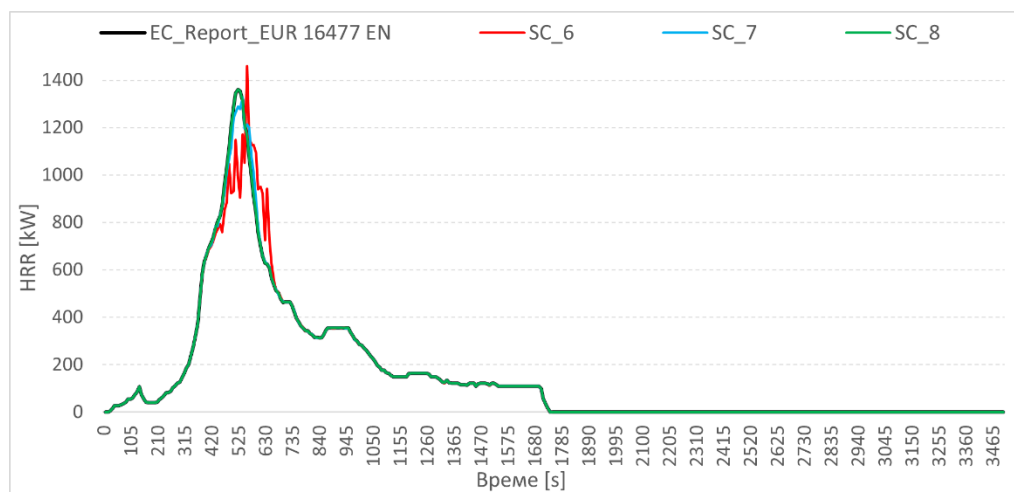
- У сценаријима SC_1 – SC_5, $\varphi > 1$, предвиђа се максимална вредност HRR која је испод вредности EC Report EUR 16477 која износи $EN HRR_{max} = 1366 \text{ kW}$, као и дужије трајање сагоревања од 1716 s:
 1. ISO 9705:2016 SC_1: 759.53 kW - мање за 44.4 %, трајање > 3500 s.
 2. ISO 9705:2016 SC_2: 755.63 kW - мање за 44.68 %, трајање > 3500 s.
 3. ISO 9705:2016 SC_3: 805.91 kW - мање за 41 %, трајање 3062 s.
 4. ISO 9705:2016 SC_4: 925.9 kW - мање за 32.22 %, трајање 2642 s.
 5. ISO 9705:2016 SC_5: 1133 kW - мање за 17.06 %, трајање 1732 s.
- Сценарио SC_6, $\varphi \geq 1$, и ISO 9705:2016 SC_7 – SC_8, $\varphi < 1$, предвиђа незнатно различите максималне вредности HRR у односу на вредности EC Report EUR 16477 EN од 1366 kW и трајање сагоревања од 1716 s:
 1. ISO 9705:2016 SC_6: 1233.11 kW мање за 9.73 %, трајање 1732 s.
 2. ISO 9705:2016 SC_7: 1446.91 kW повећање за 5.52 %, трајање 1732 s.
 3. ISO 9705:2016 SC_8: 1498.14 kW повећање за 9.67 %, трајање 1732 s.

- У сценаријима SC_1 – SC_5 сагоревање је контролисано вентилационим фактором, тј. $\varphi > 1$. Развој HRR криве није у складу с експериментима EC Report EUR 16477 EN, слика 5.5.



Слика 5.5 EC report EUR 16477 EN - HRR крива и HRR криве за $\varphi > 1$ за сценарија SC_1 – SC_5

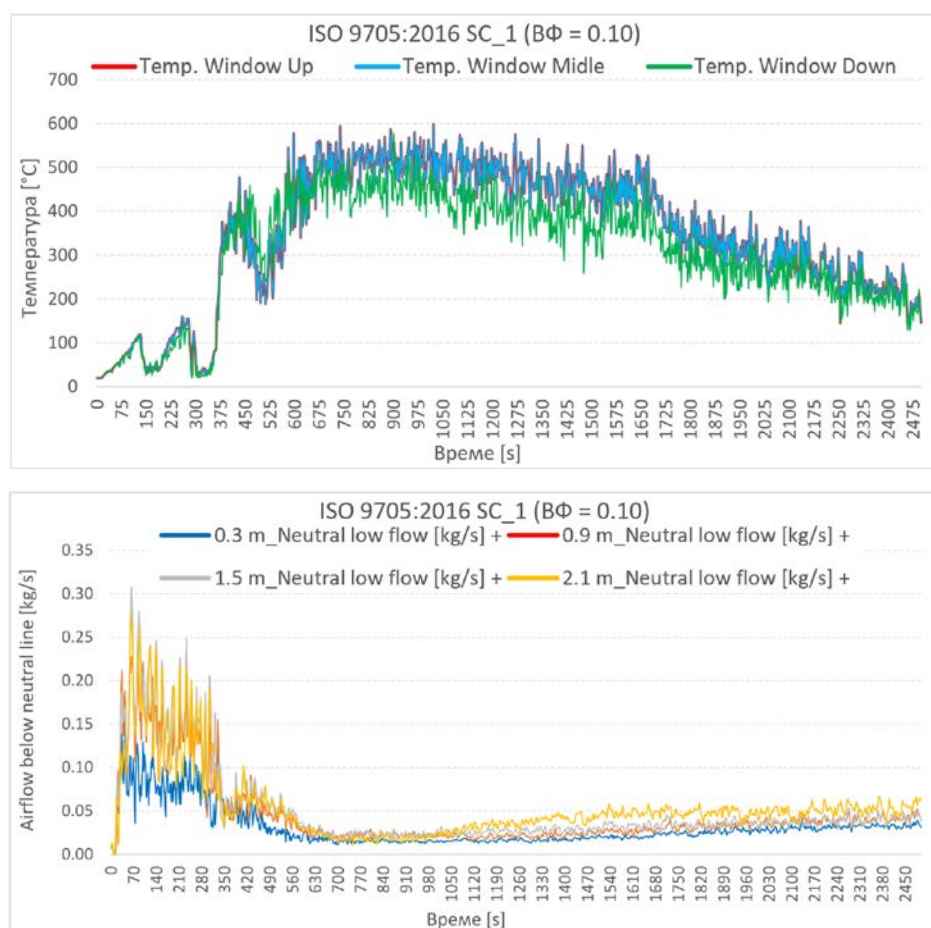
- У сценаријима SC_1 – SC_5, максималне вредности HRR су испод вредности EC Report EUR 16477 EN од 1366 kW, HRR крива у условима еквивалентног односа, $\varphi > 1$, не поклапа се с развојем HRR криве EC Report EUR 16477 EN, а сагоревање траје дуже. Локација сагоревања и запремина простора не убрзавају HRR.
- Код сценарија SC_6 у условима еквивалентног односа, $\varphi \geq 1$, и код сценарија SC_7 – SC_8, за $\varphi < 1$, вентилациони фактор и запремина простора су такви да је концентрација кисеоника у просторији довољна за слободно сагоревање, што је приказано графиком на слици 5.6.



Слика 5.6 EC report EUR 16477 EN HRR крива, HRR крива за сценарио SC_6 за $\varphi \geq 1$, и HRR криве за сценарија SC_7 – SC_8 за $\varphi < 1$.

Нумерички експеримент за сценарио SC_1 изведен је уз вентилациони фактор од 0.10 и $\phi > 1$. Термопарови су били постављени на три локације вентилационог отвора: на 0.1 m од дна отвора, у средини отвора на удаљености од 0.2 m, и 0.1 m од врха отвора. Мерења масеног протока улазне ваздушне струје од вентилационог отвора до зоне сагоревања обављена су на четири локације, на удаљеностима од вентилационог отвора од 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m и 2.1 m испод неутралне равни. Резултати добијени овим нумеричким експериментом показали су следеће:

- Температура у зони вентилационог отвора остаје уједначена, у распону од приближно 400 °C до 550 °C у периоду од 550 до 1700 s, слика 5.7 горе, и
- Долази до значајног смањења масеног протока улазне ваздушне струје према зони сагоревања до локације сагоревања, што је приказано слици 5.7 доле.

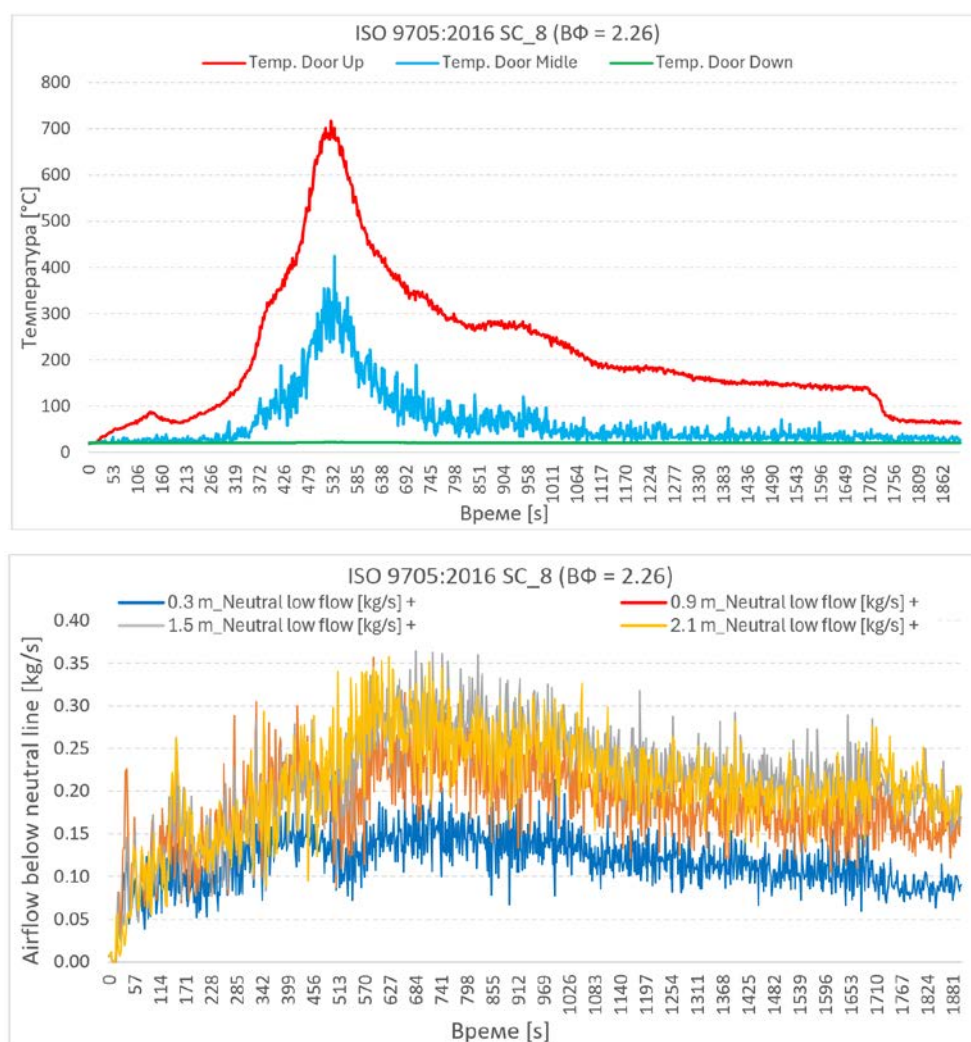


Слика 5.7 Слика горе: Температура на вентилационом отвору, мерена од дна на 0.1 m, на средини 0.2 m и 0.1 m од врха отвора. Слика доле - масени проток улазне ваздушне струје испод неутралне равни до зоне сагоревања, четири зоне мерења од отвора: растојања 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m и 2.1 m.

Нумерички експеримент за сценарио SC_8 спроведен је уз вентилациони фактор од 2.26 и $\phi < 1$. Термопарови су били постављени на три локације вентилационог отвора:

0.1 m од дна отвора (ниво пода), у средини отвора на удаљености од 1 m и 0.1 m од врха отвора. Мерења масеног протока улазне ваздушне струје од вентилационог отвора до зоне сагоревања обављена су на четири локације, на удаљеностима од вентилационог отвора од 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m и 2.1 m, испод неутралне равни. Резултати добијени овим нумеричким експериментом показали су следеће:

- Температура у зони вентилационог отвора значајно се разликује у зависности од висине, на 0.10 m од дна максимална температура не остаје уједначена 21 °C, на средини отвора максимална температура је 425 °C у 536 s и од врха отвора 0.10 m максимална температура је 710 °C у 532 s, што је приказано на слици 5.8 горе, и
- Не долази до значајног смањења масеног протока улазне ваздушне струје према зони сагоревања до локације сагоревања, што је приказано на слици 5.8 доле.

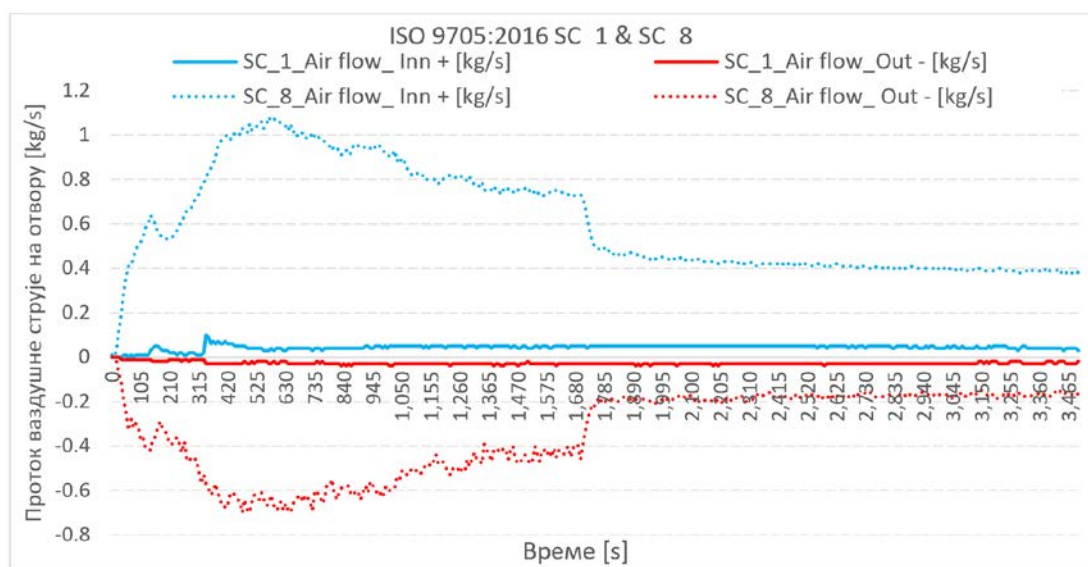


Слика 5.8 Слика горе - Температура на вентилационом отвору, мерена од дна на 0.1 m, средина отвора на 1 m и 0.1 m од врха отвора. Слика доле - масени проток улазне струје ваздуха испод неутралне равни до зоне сагоревања, четири зоне мерења од отвора: 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m и 2.1 m.

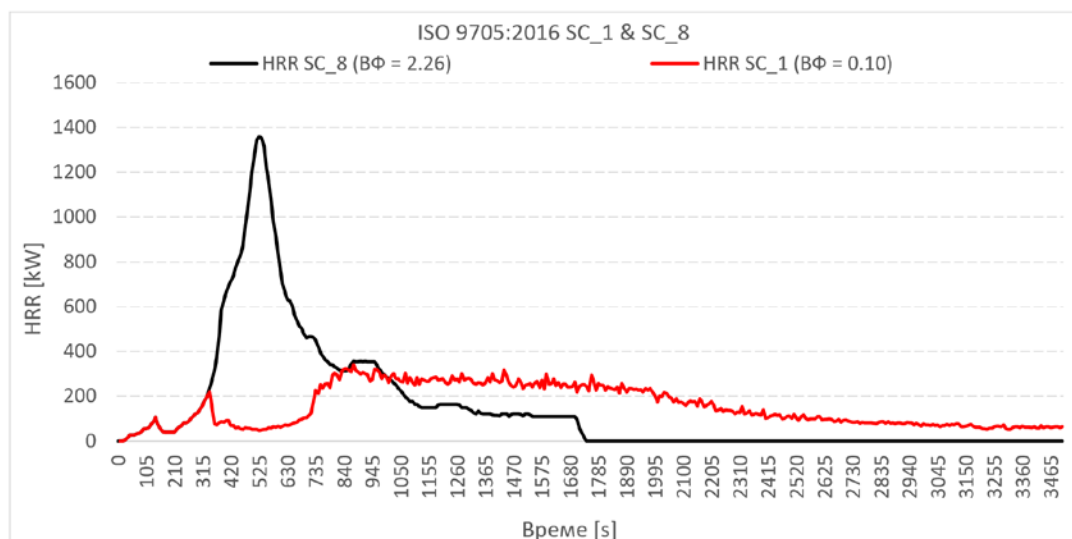
На основу графика за сценарија SC_1 и SC_8 који су приказани на сликама 5.7 и 5.8 може се закључити следеће:

- Смањење вентилационог фактора утиче на смањење разлике температуре на геометријском отвору. Топлота излазне струје флуида узрокује конвективни пренос топлоте према хладнијој улазној ваздушној струји. Услед смањене разлике у температури, ток улазне струје се задржава „ближе“ неутралној равни, повећавајући термичко мешање и смањујући масени проток ваздуха према доњим деловима просторије, односно локацији сагоревања.
- Термичко мешање повећава и концентрацију продуката сагоревања у улазној струји. Описани ефекти се повећавају са смањењем вентилационог фактора, што резултира разликом у развоју нумерички добијене HRR криве у односу на HRR криву експерименталних мерења у EC report EUR 16477 EN.

У циљу визуализације, на сликама 5.9 и 5.10 приказане су разлике ваздушног масеног протока и развоја HRR криве између сценарија SC_1 где је сагоревање контролисано вентилацијом, и сценарија SC_8 где је сагоревање контролисано горивом материјом.

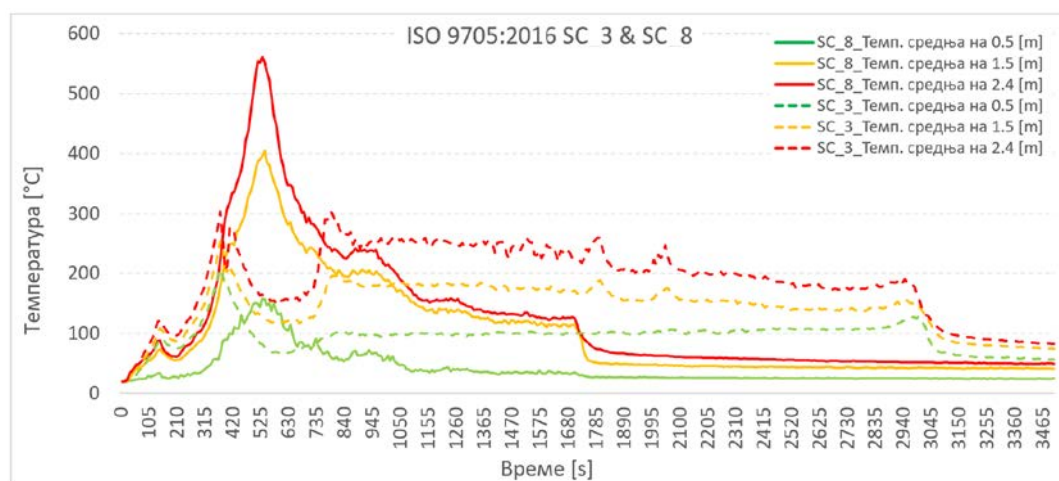


Слика 5.9 Сценарио SC_1, масени проток улазне и излазне ваздушне струје на вентилационом отвору, вентилациони фактор, $B\Phi = 0.10$. Сценарио SC_8, масени проток улазне и излазне ваздушне струје на вентилационом отвору, вентилациони фактор, $B\Phi = 2.26$



Слика 5.10 Сценарио SC_1, HRR крива у условима $B\Phi = 0.10$, $\varphi > 1$. Сценарио SC_8, HRR крива у условима $B\Phi = 2.26$, $\varphi < 1$.

На слици 5.11 и у табели 5.4 приказан је утицај вентилационог фактора на разлику хоризонталне дистрибуције средње температуре нумеричких модела у условима еквивалентног односа, $\varphi > 1$ за сценарио SC_3, и $\varphi < 1$ за сценарио SC_8.



Слика 5.11 Хоризонтална дистрибуција средње температурне вредности нумеричких модела ($\varphi > 1$) и ISO 9705:2016 SC_8 ($\varphi < 1$)

Табела 5.4 Сценарија SC_1 – SC_8, резултати хоризонталне дистрибуција средње максималне температуре по висини

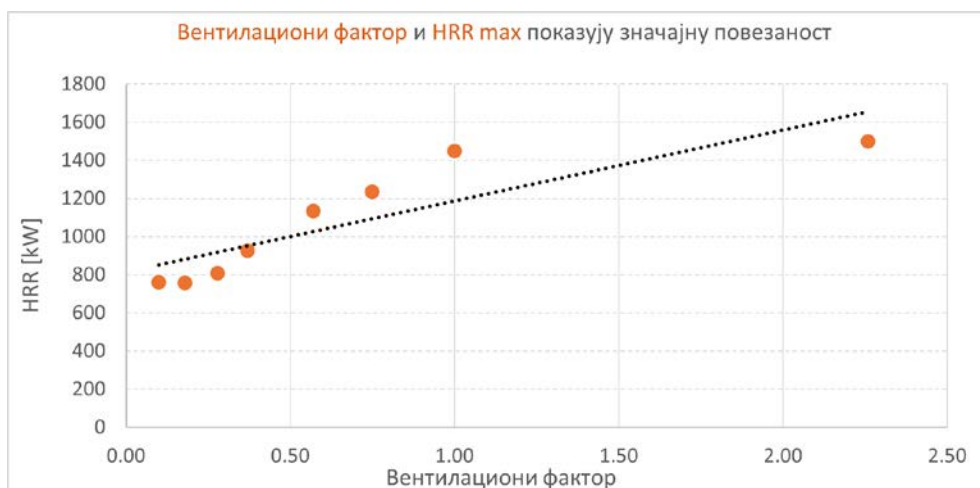
ISO 9705:2016	$A_o\sqrt{H_o}$	Еквивалентни однос	Средња темп. 0.5 m [°C]	Средња темп. 1.5 m [°C]	Средња темп. 2.4 m [°C]
SC_1	0.10	$\varphi > 1$	178	206	234
SC_2	0.18	$\varphi > 1$	190	222	263
SC_3	0.28	$\varphi > 1$	207	253	303
SC_4	0.37	$\varphi > 1$	222	300	493
SC_5	0.57	$\varphi > 1$	303	457	592
SC_6	0.75	$\varphi < 1$	440	560	591
SC_7	1	$\varphi < 1$	306	537	614
SC_8	2.26	$\varphi < 1$	156	396	551

На основу приказаних вредности може се приметити следеће:

- Максималне хоризонталне средње температуре за модел сценарио SC_3, $B\Phi = 0.28$, ($\varphi > 1$), на висинама 0.5 m, 1.5 m и 2.4 m износе: на 0.5 m = 207 °C, на 1.5 m = 254 °C и на 2.4 m = 303 °C. Максималне хоризонталне средње температуре за модел сценарио SC_8, $B\Phi = 2.26$, ($\varphi < 1$), на истим висинама имају вредности: на 0.5 m = 156 °C, на 1.5 m = 396 °C и на 2.4 m = 551 °C.
- Сценарио SC_8, $B\Phi = 2.26$, предвиђа вредност средње температуре већи у односу на ISO 9705:2016 SC_3, $B\Phi = 0.28$, на висини од 1.5 m за 56.52 % и на 2.4 m за 81.85 %.
- Сценарио SC_3 на висини од 0.5 m предвиђа вредност средње температуре већу у односу на ISO 9705:2016 SC_8, за 32.69 %. Геометрија и димензије отвора у нумеричком експерименту ISO 9705:2016 SC_8 омогућава масени ваздушни проток улазне струје од 0.25 kg/s у односу на SC_3 где износи 0.15 kg/s, што убрзава и хлађење на висини од 0.5 m.

Дискусија добијених резултата

Нумерички експерименти за еквивалентни однос $\varphi > 1$, предвиђају нижу средњу хоризонталну температуру при вредностима вентилационог фактора мањим од 0.37, на висинама 1.5 m и 2.4 m, а максималне средње температуре при вредностима вентилационим фактором изнад 0.37. Сценарији SC_1 – SC_8 за максималне вредности HRR, манифестују високу позитивну корелацију вентилационог фактора и HRR, тј. вредност од 0.865, што је приказано графиком на слици 5.12.



Слика 5.12 Корелациона анализа за сценарија SC 1 – SC_8 (вентилациони фактор – HRR)

Приказани резултати регресионе анализе за независну варијаблу (вентилациони фактор) и зависну варијаблу (HRR), показују статистички значајну повезаност с

вредности P , која описује вероватноћу да ли је хипотеза прихватљива или не, и која овде износи $P = 0.005$.¹⁰⁴ Ова чињеница **потврђује хипотезу** условљености развоја HRR кривих у сценаријима SC_1 – SC_8, на основу геометрије простора и вентилационог фактора.

Релативна разлика између резултата нумеричких симулација и података експерименталних мерења (EC Report EUR 16477 EN) износи $\varepsilon = 0.003$, што **потврђује тачност и поузданост** нумеричких модела за предвиђања понашања пожара у реалним условима према NRC критеријима.

Експерименти за сценарија SC_1 – SC_8 показали су **значајне разлике** у развоју HRR криве између сценарија где је сагоревање контролисано вентилацијом ($\varphi > 1$) и оних где је сагоревање контролисано горивим материјалом ($\varphi < 1$). Смањење вентилационог фактора резултира смањењем масеног протока улазне ваздушне струје према зони сагоревања, што је јасно приказано на слици 5.9. Сагоревање контролисано вентилацијом показало је ниже максималне вредности HRR криве, температуре и дуже трајање сагоревања. У свим случајевима, сагоревање контролисано вентилацијом резултирало је HRR кривама испод референтне вредности (EC Report EUR 16477 EN) експеримента од 1366 kW што се и види са слике 5.5.

Резултати корелационе анализе показали су **високу позитивну корелацију** између вентилационог фактора и HRR, са вредношћу коефицијента корелације од 0.865. Ова корелација указује на значајан утицај вентилационог фактора на динамику сагоревања и развој HRR криве. Даље, регресиона анализа потврдила је статистички значајну повезаност између вентилационог фактора (независна варијабла) и HRR (зависна варијабла), јер вредност P износи 0.005. Овај резултат потврђује хипотезу да **вентилациони фактор значајно утиче** на развој HRR криве. Резултати указују да се експериментални подаци који се користе за процену пожарног оптерећења **не могу директно применити** на сагоревање у затвореним просторима, где су вентилациони услови и просторна геометрија кључни фактори.

Сви претходно наведени закључци сугеришу потребу за прилагођавањем модела сагоревања специфичним условима затворених простора како би се осигурало прецизније предвиђање динамике пожара и предвидела ефикасна стратегија контроле пожара у затвореним просторима.

¹⁰⁴ P value, енгл. „probability of the hypothesis“: $P \geq 0.05$ not accepted hypothesis; $P \leq 0.05$ accepted hypothesis, sometimes referred to as significant, F value“.

5.2 ISO 668:2020 HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m модели

Нумерички експерименти у овом делу заснивају се на моделима ISO 668:2020 HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m. Унутрашње димензије модификованих контејнера за становање који су коришћени у нумеричким моделима су следеће:

1. ISO 668:2020 HC 6 m: ширина 3.8 m, дужина 6 m и висина 2.75 m.
2. ISO 668:2020 HC 9 m: ширина 3.8 m, дужина 9 m и висина 2.75 m.
3. ISO 668:2020 HC 12 m: ширина 3.8 m, дужина 12 m и висина 2.75 m.

Таваница, зидови и под су од бетона, и просторија је моделирана у складу са стандардима Eurocode 2 *Design of Concrete Structures* и EN 206 *European Standard for concrete technology*¹⁰⁵.

Спецификација бетона:

- Дебљина: 0.2 m,
- Густина: $\rho = 2280 \text{ [kg/m}^3\text{]}$,
- Специфична топлота: $c = 1.04 \text{ [kJ/(kgK)]}$,
- Топлотна проводљивост: $\lambda = 1.8 \text{ [W/(mK)]}$.

Заједничке поставке нумеричких експеримената укључују параметре као што су:

- Температура 20 °C (293.15 K),
- Атмосферски притисак 101 kPa,
- Почетак сагоревања у 10 s симулације,
- Површина сагоревања износи 1 m²,
- Постоји један вентилациони отвор (димензије отвора и локација у зависности од поставке нумеричког експеримента, на висини од пода 1.2 m),
- Термопарови унутар просторије садрже три температурна сензора, на висинама од пода 0.5 m, 1.5 m и 2.4 m.
- Термопарови на геометријском отвору постављени су на растојањима 0.1 m од доње ивице, 0.1 m од горње ивице и на средини отвора у зависности од димензија отвора.

Избор HRR криве обављен је на основу објављених истраживања, експерименталних тестирања и калориметријских мерења који су преузети из објављених података у Handbook of Fire Protection Engineering¹⁰⁶, за сагоревање Polyethylene_GM 27. Сагоревање

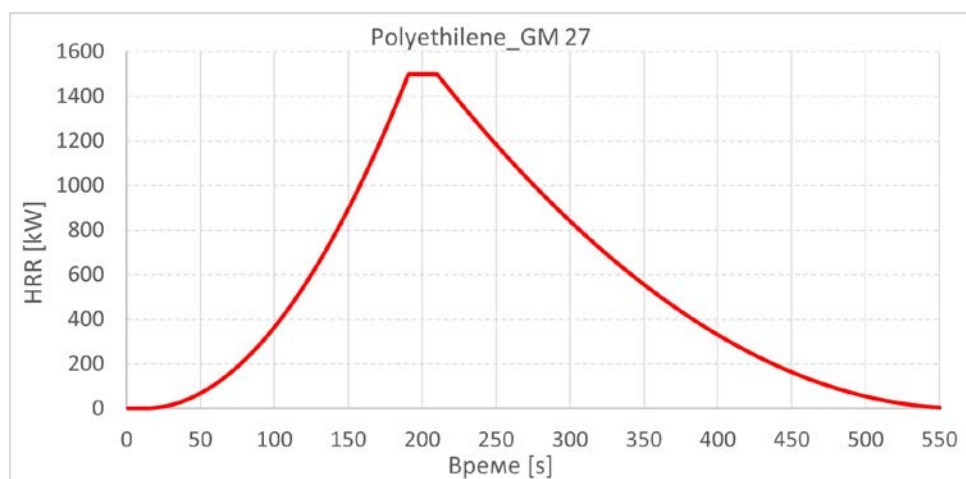
¹⁰⁵ CEN - European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

¹⁰⁶ Morgan J. Hurley, SFPE „Handbook of Fire Protection Engineering, “5th Edition, Tables A.38 and A.39, Springer New York, 2016.

Polyethylene GM_27 дефинисано је t - квадратном кривом која има следеће карактеристике:

- Фаза почетног развоја, $\alpha = 0.0469$,
- Фаза потпуно развијеног пожара, у трајању $t = 20$ s, (од 190 s до 210 s)
- Фаза стишавања пожара, $\alpha = 0.01172$,
- Укупно трајање сагоревања, $t = 550$ s,
- $HRR_{\max} = 1500$ kW,

Графички приказ HRR криве Polyethylene GM_27, приказан је на следећој слици 5.13.



Слика 5.13 HRR крива Polyethylene_GM 27, извор - Handbook of Fire Protection Engineering, 5 edition, табеле A.38 и A 39.

Величина ћелије одређена је према методологији за оптимизацију утрошка рачунарских ресурса нумеричких експеримената за моделе ISO 668:2020 HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m, тако што се најпре дефинише пречник сагоревања, D^* :

$$D^* = \left(\frac{1500}{1.2 * 1.0 * 293.15 * \sqrt{9.81}} \right)^{2/5} = 1.13 \quad (4.16)$$

На основу тога одређена је вредност односа пречника сагоревања, D^* , и висине простора $H = 2.75$ m:

$$D^* / H = 1.13 / 2.75 = 0.41 \quad (4.17)$$

Као задњи корак у одређивању оптималне величине ћелије мреже рачуна се однос пречника сагоревања и оптималне величине ћелије:

$$\frac{D^*}{\delta_x} = \frac{1.13}{0.1} = 11.3 \quad (4.18)$$

Наведеним поступком дефинисана је оптимална величина мрежне ћелије: 0.1 m x 0.1 m x 0.1 m. Постављање нумеричке мреже извршено је применом софтвера Pyrosim,

при чему је раније описаним поступком дефинисана величина ћелије која омогућава генерисање мреже прикладне за симулацију очекиваног понашања сагоревања и дима.

Проширење нумеричког домена укључује проширење простора за симулацију за 1 m у правцу који је нормалан на вертикални отвор, и за 0.2 m од зидова и таванице. Ово проширење омогућава прецизнију анализу утицаја околног простора на динамику вентилације и дистрибуцију дима и топлоте. Такође, проширење домена симулације осигурава да гранични услови не утичу негативно на тачност резултата, омогућавајући детаљнију процену интеракција између геометријских карактеристика простора и вентилационих параметара.

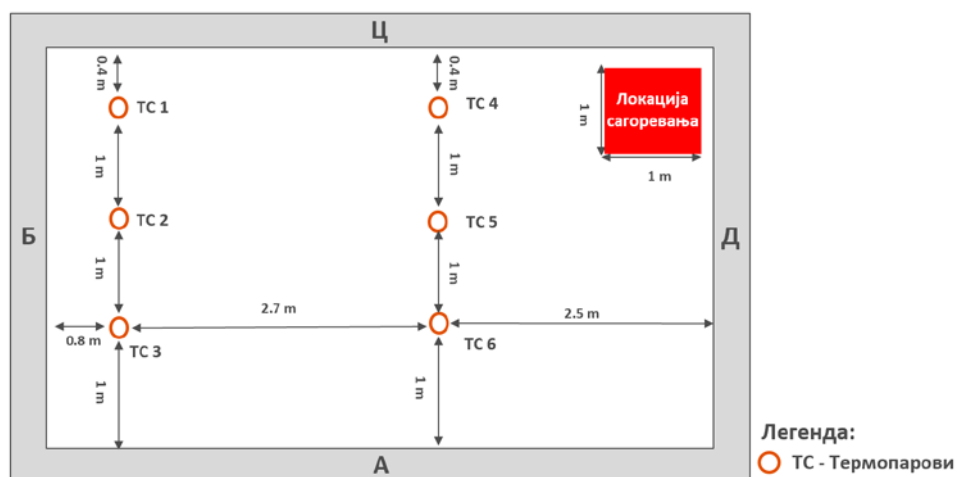
Релативна разлика између предвиђања коју дају модели ISO 668:2020 HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m, и експерименталних мерења израчуната је према једначини 1.1. Валидација је извршена коришћењем сценарија у условима еквивалентног односа $\varphi < 1$, и експерименталних мерења за Polyethylene_GM 27 при идентичним условима сагоревања, при чему релативна разлика износи:

1. ISO 668:2020 модела HC 6 m: $\varepsilon = 0.003$
2. ISO 668:2020 модела HC 9 m: $\varepsilon = 0.007$
3. ISO 668:2020 модела HC 12 m: $\varepsilon = 0.005$

На основу резултата, може се закључити да је релативна разлика између нумеричких експеримената и експерименталних мерења Polyethylene GM_27 у складу с критеријима које је поставила NRC. Ови резултати потврђују да се нумерички модел може користити као веродостојан алат за процену и предвиђање понашања у реалним условима пожара.

5.2.1 ISO 668:2020 HC 6 m модел

Модел ISO 668:2020 HC 6 m садржи шест термопарова који су постављени у простору, при чему сваки садржи три температурна сензора постављена на висинама од пода 0.5 m, 1.5 m и 2.4 m. Такође, на геометријском отвору су постављени сензори температуре на растојањима 0.1 m од доње ивице, 0.1 m од горње ивице и на средини отвора у зависности од димензија отвора, слика 5.14.



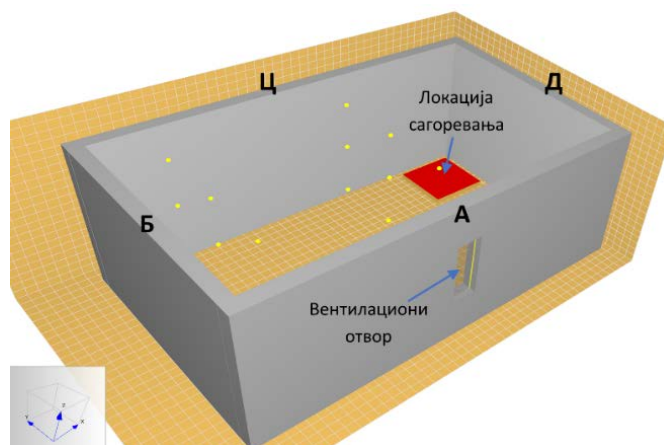
Слика 5.14 Нумерички експеримент ISO 668:2020 HC 6 m: локација термопарова, зидови модела (А, Б, Ц и Д) и локација пожара

Модел ISO 668:2020 HC 6 m садржи један вентилациони отвор чија локација, ширина и висина зависи од сценарија (у ознаци SC_x) и броја нумеричког експеримента (ознака Exp_x), табела 5.5. Висина вентилационог отвора од пода износи 1.2 m.

Табела 5.5 Димензије отвора и локације за сценарије SC_1 – SC_4

ISO 668:2020_HC 6 m	Exp_x	Отвор на страни модела	W [m]	H [m]
SC_1	1	А	0.4	1.2
	2	Б	0.4	1.2
	3	Д	0.4	1.2
SC_2	4	А	0.8	0.8
	5	Б	0.8	0.8
	6	Д	0.8	0.8
SC_3	7	А	1.2	0.8
	8	Б	1.2	0.8
	9	Д	1.2	0.8
SC_4	10	А	1	1
	11	Б	1	1
	12	Д	1	1

На слици 5.15 илустрована је поставка нумеричког експеримента за сценарио SC_1 и експеримент Exp_1, у складу са ISO 668:2020 HC 6 m.



Слика 5.15 Модел ISO 668:2020 HC 6 m, SC_1: Exp_1

Еквивалентни однос добијених резултата за ISO 668:2020 HC 6 m модел, за сценарије SC_1 – SC_4, у односу на експериментална мерења Polyethylene_GM 27, приказан је у табели 5.6. Однос између геометрије простора и вентилационог отвора условљава еквивалентни однос, $\phi > 1$, и у свим сценаријима SC_1 – SC_4, сагоревање је контролисано вентилацијом.

Табела 5.6 Еквивалентни однос резултата ISO 668:2020 HC 6 m модела и ВФ, за сценарија SC_1 – SC_4

ISO 668:2020_HC 6 m	Евр.	Отвор на страни модела	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	Екв. однос
SC_1	1	А	0.4	1.2	0.53	$\phi > 1$
	2	Б	0.4	1.2	0.53	$\phi > 1$
	3	Д	0.4	1.2	0.53	$\phi > 1$
SC_2	4	А	0.8	0.8	0.57	$\phi > 1$
	5	Б	0.8	0.8	0.57	$\phi > 1$
	6	Д	0.8	0.8	0.57	$\phi > 1$
SC_3	7	А	1.2	0.8	0.85	$\phi > 1$
	8	Б	1.2	0.8	0.85	$\phi > 1$
	9	Д	1.2	0.8	0.85	$\phi > 1$
SC_4	10	А	1	1	1	$\phi > 1$
	11	Б	1	1	1	$\phi > 1$
	12	Д	1	1	1	$\phi > 1$

Резултати нумеричких симулација, изведених према овом моделу за сценарије SC_1 – SC_4 детаљно представљени су у табели 5.7.

Табела 5.7 Сценарија SC_1 – SC_4, нумерички резултати, локација вентилационог отвора, ВФ и вредности HRR

ISO 668:2020_HC 6 m	Евр.	Отвор	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	HRR_{max}	$HRR_{средња}$ 190 – 210 s	Трајање HRR [s]
SC_1	1	А	0.4	1.2	0.53	1850	372	845
	2	Б	0.4	1.2	0.53	1188	405	1368
	3	Д	0.4	1.2	0.53	1835	502	871
SC_2	4	А	0.8	0.8	0.57	1092	408	1164
	5	Б	0.8	0.8	0.57	1158	262	1896
	6	Д	0.8	0.8	0.57	1488	762	888

SC_3	7	A	1.2	0.8	0.85	1354	981	975
	8	Б	1.2	0.8	0.85	1377	1209	1327
	9	Д	1.2	0.8	0.85	1449	973	915
SC_4	10	A	1	1	1	1478	1412	573
	11	Б	1	1	1	1405	1307	722
	12	Д	1	1	1	1883	616	846

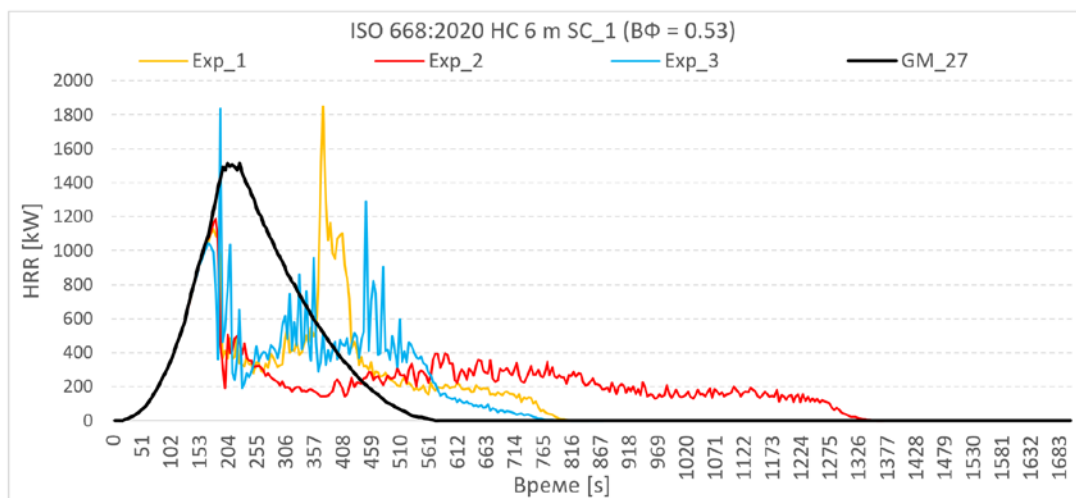
Анализа добијених резултата

На основу резултата нумеричких симулација које су урађене према моделу ISO 668:2020 HC 6 m могу се извести следећи закључци:

- Сценарија SC_1 – SC_4, $\phi > 1$, предвиђају средњу вредност $HRR_{\text{средња}}$ која је испод вредности Polyethylene_GM 27 - $HRR_{\text{средња}} = 1500 \text{ kW}$, као и дуже време сагоревања од 550 s:
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_1_Exp. 1: 372 kW - мање за 75.2 %, трајање 845 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_1_Exp. 2: 405 kW - мање за 73 %, трајање 1368 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_1_Exp. 3: 502 kW - мање за 66.53 %, трајање 871 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_2_Exp. 4: 408 kW - мање за 72.8 %, трајање 1164 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_2_Exp. 5: 262 kW - мање за 82.53 %, трајање 1896 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_2_Exp. 6: 762 kW - мање за 49.2 %, трајање 888 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_3_Exp. 7: 981 kW - мање за 34.6 %, трајање 975 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_3_Exp. 8: 1209 kW - мање за 19.4 %, трајање 1327 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_3_Exp. 9: 973 kW - мање за 35.13 %, трајање 915 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_4_Exp. 10: 1412 kW - мање за 5.87 %, трајање 973 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_4_Exp. 11: 1307 kW - мање за 12.87 %, трајање 722 s.
 - ISO 668:2020 HC 6 m SC_4_Exp. 12: 616 kW мање за 58.93 %, трајање 846 s.

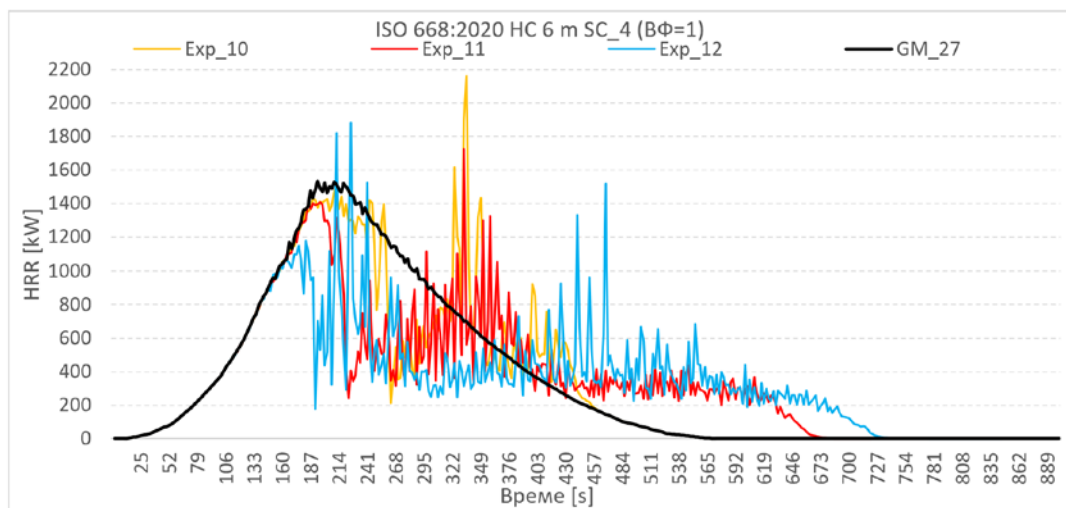
Локација вентилационог отвора на супротној страни од сагоревања (Б страна) узрокује дуже трајање сагоревања у поређењу са идентичним вентилационим отворима на странама А и Д, према нумеричким експериментима за сценарија SC_1 – SC_3. Геометрија и димензије отвора са вентилационим фактором мањим од 0.85 и удаљеност од локације сагоревања, повећавају термичко мешање улазно-излазне струје, што повећава концентрацију продуката сагоревања у улазној ваздушној струји. Ово смањује концентрацију кисеоника у улазној ваздушној струји пре него што дође до локације сагоревања, што резултира разликом у развоју нумеричке HRR криве у односу на HRR криву добијене експерименталним мерењима за Polyethylene_GM 27.

- Сагоревање у сценаријима SC_1 – SC_4 контролисано је вентилационим фактором, $\varphi > 1$. Развој HRR криве није у складу с експериментима за Polyethylene_GM 27, што је примером SC_1 и графички приказано на слици 5.16.



Слика 5.16 „Polyethylene_GM 27“ HRR крива, извор: „Fire Engineering Handbook, 5 edition“, подаци табела A.38 и A.39. Сценарио SC_1, HRR криве нумеричких експеримената 1, 2 и 3. у условима еквивалентног односа $\varphi > 1$

- Експерименти за сценарио SC_4 показују значајније флукуације HRR кривих, што је приказано на слици 5.17.



Слика 5.17 „Polyethylene_GM 27“, HRR крива, извор: „Fire Engineering Handbook, 5 edition“, подаци табеле A.38. Сценарио SC_4, HRR криве нумеричких експеримената 10, 11 и 12. у условима еквивалентног односа $\varphi > 1$

H.H. Saber и сар., на основу спроведених студија о утицају вентилације на динамику пожара у просторима за становање средње величине, дошли су до идентичних запажања, али нису изнели претпоставку о узроку описане флукуације¹⁰⁷.

На основу нумеричких експеримената и анализе температуре на вентилационим отворима, долази се до претпоставке да при почетним условима сагоревања температура ваздушног излазног струјања на средини отвора прати температуру ваздушног струјања на горњој излазној тачки, док је температура улазног ваздушног струјања значајно нижа.

Услед повећања количине продуката сагоревања и температуре простора долази до смањења масеног протока ваздуха ка локацији сагоревања, при чему однос запремине простора и вентилационог отвора условљава еквивалентни однос $\varphi > 1$, па је развој пожара условљен вентилацијом. Топлота излазне струје флуида узрокује конвективни пренос топлоте према хладнијој улазној ваздушној струји. Услед смањене разлике у температури, ток улазне струје се задржава ближе неутралној равни, повећавајући термичко мешање и смањујући масени проток ваздуха ка доњим деловима просторије, односно локацији сагоревања. Термичко мешање повећава и концентрацију продуката сагоревања у улазној ваздушној струји. Ова кретања узрокују промене масеног протока ваздуха ка локацији сагоревања у облику пулсирања, што производи флукуације HRR криве. Ова претпоставка захтева даље експериментално истраживање како би се потврдила и боље разумела флукуација HRR криве у односу на температуру ваздуха у улазно-излазној ваздушној струји.¹⁰⁸

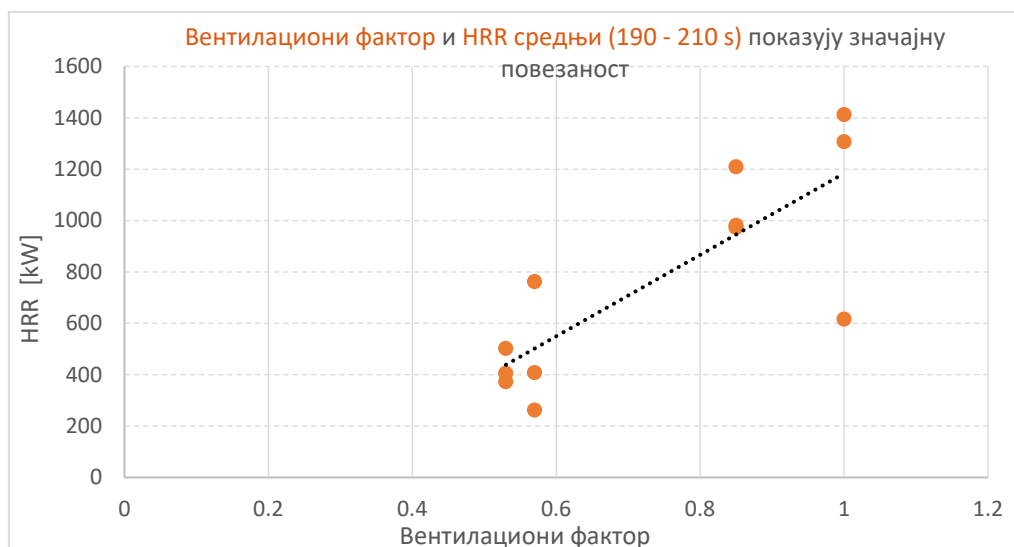
Утицај локације вентилационог отвора и вентилацијског фактора на разлику хоризонталне дистрибуције средње температуре нумеричких модела у условима еквивалентног односа, $\varphi > 1$ за сценарија SC_1 – SC_4, дат је у табели 5.8 и представљен је графиком на слици 5.18.

Табела 5.8 *Сценарија SC_1 – SC_4 нумеричка предикција хоризонталне дистрибуције средње максималне температуре у зависности од локације отвора и вентилационог фактора*

ISO 668:2020 HC 6 m	Ехр.	Отвор	$A_o\sqrt{H_o}$	Средња максимална темп. [°C]
SC_1	1	А	0.53	344
	2	Б	0.53	596
	3	Д	0.53	343

¹⁰⁷ H.H. Saber, A. Kashef, A. Bwalya, G. D. Loughheed and M.A. Sultan, A numerical study on the effect of ventilation on fire development in a medium-sized residential room. IRC-RR-241, Institute for Research in Construction, Canada, 2008.

¹⁰⁸ Malkočević D., Blagojević M., Enclosure Fire with Time-Dependent Changes in Ventilation Factor and Geometry—Field Model Parameters Analysis, doi:10.3390/app13084813, Appl. Sci., 2023.



Слика 5.19 Корелациона анализа за сценарија SC_1 – SC_4

Резултати регресионе анализе за независну варијаблу (вентилацијски фактор) и зависну варијаблу (HRR), показују статистички значајну повезаност са вредношћу P која описује вероватноћу да ли је хипотеза прихватљива или не, а која у овом случају износи $P = 0.001$. Ова чињеница потврђује хипотезу да је развој HRR кривих у сценаријима SC_1 – SC_4 условљен геометријом простора и вентилационим фактором.

Еквивалентни однос $\varphi > 1$ нумеричких експеримената дефинише сагоревање у свим вентилационо контролисаним сценаријима. Симулације указују на *продужено трајање сагоревања и ниже просечне вредности HRR-а у поређењу са експерименталним резултатима за Polyethylene_GM 27*. Позиција вентилационог отвора *значајно утиче* на трајање сагоревања и развој HRR криве. Отвори постављени на страни Б (супротно од локације сагоревања) резултирају дужим трајањем сагоревања, што се приписује повећаном термичком мешању и смањењу концентрације кисеоника у улазној ваздушној струји. Термичко мешање узрокује пулсирање масеног протока ваздуха ка пожару и флуктуације HRR криве. Хоризонтална дистрибуција средње максималне температуре у нумеричким моделима зависи од локације отвора и вентилационог фактора, при чему нумерички експерименти са вентилационим отвором на страни Б модела показују већу максималну температуру. Вентилациони фактор и вредности HRR-а манифестују високу позитивну корелацију (0.809), што потврђује зависност развоја HRR-а од геометрије простора и вентилационог фактора.

Табела 5.10 Еквивалентни однос резултата за сценарије SC_1 – SC_4

ISO 668:2020 HC 9 m	Евр.	Отвор на страни модела	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	Екв. однос
SC_1	1	А	0.4	1.2	0.53	$\varphi > 1$
	2	Б	0.4	1.2	0.53	$\varphi > 1$
	3	Д	0.4	1.2	0.53	$\varphi > 1$
SC_2	4	А	0.8	0.8	0.57	$\varphi > 1$
	5	Б	0.8	0.8	0.57	$\varphi > 1$
	6	Д	0.8	0.8	0.57	$\varphi > 1$
SC_3	7	А	1.2	0.8	0.85	$\varphi > 1$
	8	Б	1.2	0.8	0.85	$\varphi > 1$
	9	Д	1.2	0.8	0.85	$\varphi > 1$
SC_4	10	А	1	1	1	$\varphi > 1$
	11	Б	1	1	1	$\varphi > 1$
	12	Д	1	1	1	$\varphi > 1$

Однос између унутрашње геометрије простора и вентилационог отвора одређује еквивалентни однос $\varphi > 1$ модела, па је према томе у свим сценаријима сагоревање вентилационо контролисано. Резултати нумеричких симулација за сценарије SC_1 – SC_4 детаљно су представљени у табели 5.11.

Табела 5.11. Карактеристике вентилационог фактора и вредности HRR

ISO 668:2020 HC 9 m	Евр.	Отвор на страни модела	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	HRR_{max} [kW]	HRR_{mean} [kW] 190 – 210 s	Трајање HRR [s]
SC_1	1	А	0.4	1.2	0.53	2887	1227	866
	2	Б	0.4	1.2	0.53	1479	1418	875
	3	Д	0.4	1.2	0.53	3099	1185	801
SC_2	4	А	0.8	0.8	0.57	1578	1311	1014
	5	Б	0.8	0.8	0.57	1462	1400	1335
	6	Д	0.8	0.8	0.57	1853	1145	994
SC_3	7	А	1.2	0.8	0.85	1822	1249	753
	8	Б	1.2	0.8	0.85	1459	1436	1214
	9	Д	1.2	0.8	0.85	3241	1189	900
SC_4	10	А	1	1	1	1455	1388	717
	11	Б	1	1	1	1510	1459	738
	12	Д	1	1	1	1589	1408	762

Анализа добијених резултата

На основу резултата нумеричких симулација које су урађене према овом моделу може се закључити следеће:

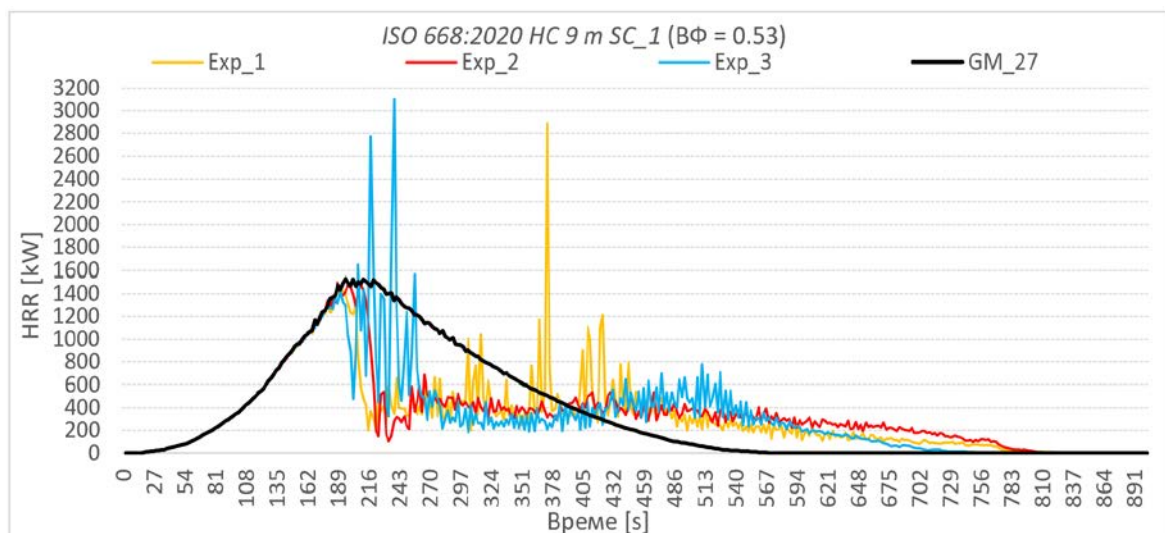
- У сценаријима SC_1 – SC_4, $\varphi > 1$ предвиђа се средња вредност HRR_{mean} која је испод вредности за Polyethylene_GM 27 $HRR_{mean} = 1500$ kW, као и дуже време сагоревања од 550 s:

- ISO 668:2020 HC 9 m SC_1_Евр. 1: 1227 kW, мање за 18.2 %, трајање 866 s.
- ISO 668:2020 HC 9 m SC_1_Евр. 2: 1418 kW, мање за 5.47 %, трајање 875 s.
- ISO 668:2020 HC 9 m SC_1_Евр. 3: 1185 kW, мање за 21 %, трајање 801 s.
- ISO 668:2020 HC 9 m SC_2_Евр. 4: 1311 kW, мање за 12.6 %, трајање 1014 s.

5. ISO 668:2020 HC 9 m SC_2_ Exp. 5: 1400 kW, мање за 6.67 %, трајање 1335 s.
6. ISO 668:2020 HC 9 m SC_2_ Exp. 6: 1145 kW, мање за 23.67 %, трајање 994 s.
7. ISO 668:2020 HC 9 m SC_3_ Exp. 7: 1249 kW, мање за 16.73 %, трајање 753 s.
8. ISO 668:2020 HC 9 m SC_3_ Exp. 8: 1436 kW, мање за 4.27 %, трајање 1214 s.
9. ISO 668:2020 HC 9 m SC_3_ Exp. 9: 1189 kW, мање за 20.73 %, трајање 900 s.
10. ISO 668:2020 HC 9 m SC_4_ Exp. 10: 1388 kW, мање за 7.47 %, трајање 717 s.
11. ISO 668:2020 HC 9 m SC_4_ Exp. 11: 1459 kW, мање за 2.73 %, трајање 738 s.
12. ISO 668:2020 HC 9 m SC_4_ Exp. 12: 1408 kW, мање за 6.13 %, трајање 762 s.

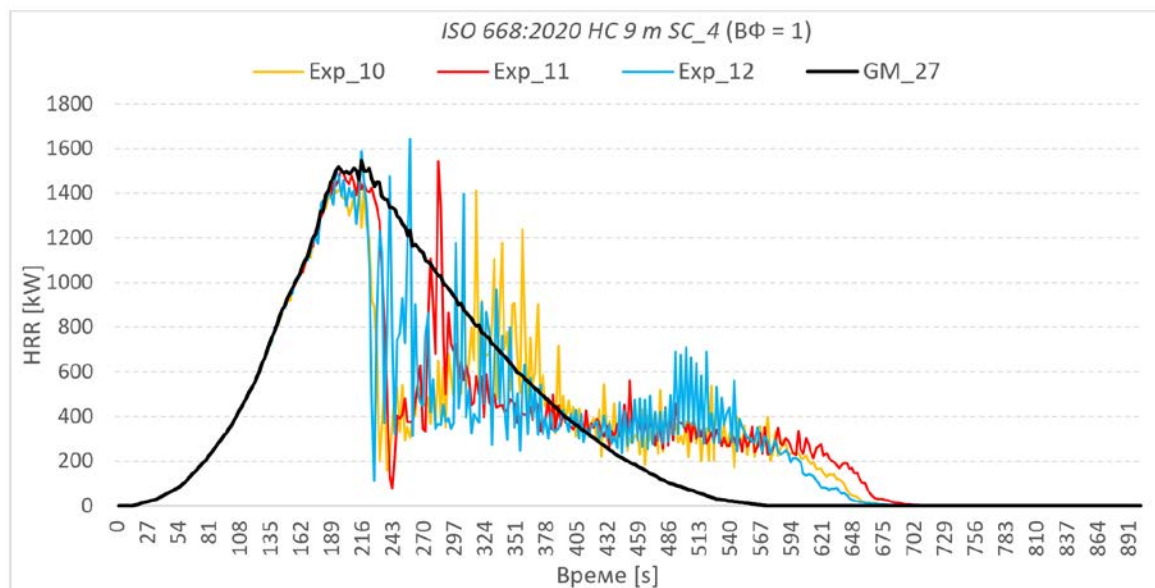
Локација вентилационог отвора на супротној страни од места сагоревања (Б страна) узрокује дуже трајање сагоревања у поређењу са идентичним вентилационим отворима на странама А и Д, према нумеричким експериментима ISO 668:2020 HC 9 m SC_1 – SC_3. Геометрија и димензије отвора са вентилационим фактором ≤ 0.85 , и удаљеност од локације сагоревања повећавају термичко мешање улазно-излазне струје, што повећава концентрацију продуката сагоревања у улазnoj ваздушној струји. Ово смањује концентрацију кисеоника у улазnoj ваздушној струји пре него што дође до локације сагоревања, што резултира разликом у развоју добијене HRR криве у односу на HRR криву експерименталних мерења за Polyethylene_GM 27.

- Код сценарија SC_1 – SC_4 сагоревање је контролисано вентилационим фактором, $\phi > 1$. Развој HRR крива *није у складу* с експериментима за Polyethylene_GM 27, што је и илустровано на примеру сценарија SC_1, слика 5.21.



Слика 5.21 „Polyethylene_GM 27“, HRR крива, „Fire Engineering Handbook, 5 edition“, подаци-табеле A.38 i A39. Сценарио SC_1, HRR криве нумеричких експеримената 1, 2 i 3. у условима еквивалентног односа $\phi > 1$

- Код сценарија SC_4, експеримент показује специфично значајне флукуације HRR, слика 5.22.

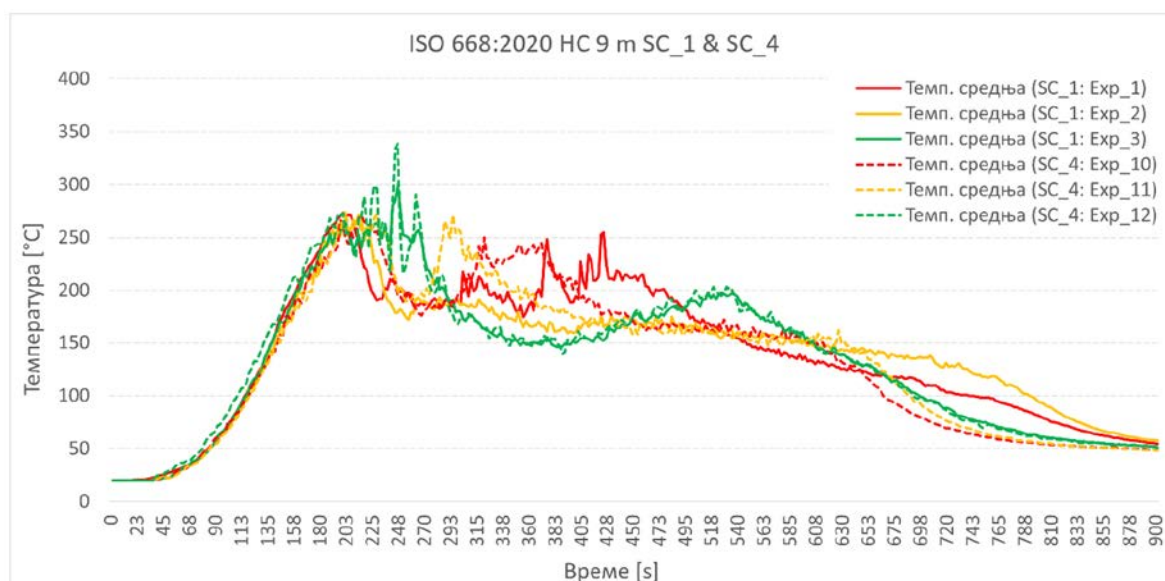


Слика 5.22 Polyethylene_GM 27 - HRR крива, извор: *Fire Engineering Handbook*, 5 edition, табеле A.38.; Сценарио SC_4, HRR криве нумеричких експеримената 10, 11 и 12. у условима еквивалентног односа $\varphi > 1$

На основу резултата нумеричких експеримената за сценарија SC_1 – SC_4, повећање количине продуката сагоревања и температуре доводи до смањења масеног протока улазне ваздушне струје ка сагоревању, што узрокује пулсирање ваздушне струје и флукуације HRR криве. Утицај локације вентилационог отвора и вентилационог фактора на разлику хоризонталне дистрибуције средње температуре нумеричких модела у условима еквивалентног односа, $\varphi > 1$ за ISO 668:2020 HC 9 m SC_1 – SC_4 представљен је табелом 5.12 и графиком на слици 5.23.

Табела 5.12 Сценарија SC_1 – SC_4 - нумеричка предикција хоризонталне дистрибуције средње максималне температуре у зависности од локације отвора и вентилационог фактора

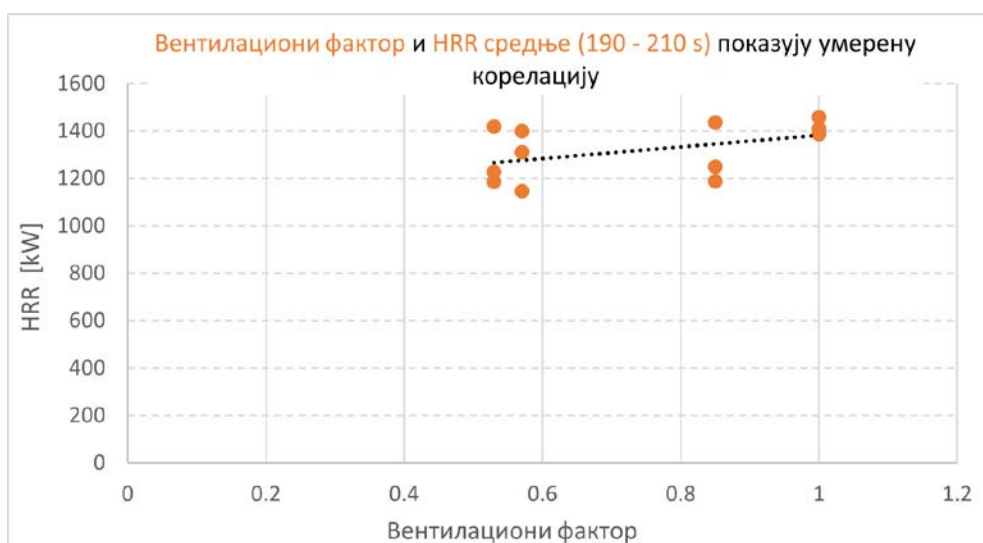
ISO 668:2020 HC 9 m	Експ.	Отвор на страни модела	$A_o\sqrt{H_o}$	Средња макс. темп. [°C]
SC_1	1	А	0.53	273
	2	Б	0.53	271
	3	Д	0.53	300
SC_2	4	А	0.57	271
	5	Б	0.57	273
	6	Д	0.57	272
SC_3	7	А	0.85	268
	8	Б	0.85	269
	9	Д	0.85	272
SC_4	10	А	1	271
	11	Б	1	274
	12	Д	1	339



Слика 5.23 Хоризонтална дистрибуција средње температуре у сценаријима SC_1 и SC_4

Дискусија добијених резултата

Експерименти у сценаријима SC_1 – SC_4 с еквивалентним односом $\phi > 1$, показују да промена локације вентилационог отвора *не узрокује* значајне разлике у средњој максималној температури. Модел предвиђа да однос димензија отвора, локације и запремине унутрашњег простора значајно утиче на уравнотежену хоризонталну дистрибуцију температуре. Сценарији SC_1 – SC_4, за средње вредности HRR, манифестују *умерену позитивну корелацију* вентилационог фактора и HRR са вредношћу од 0.441, слика 5.24.

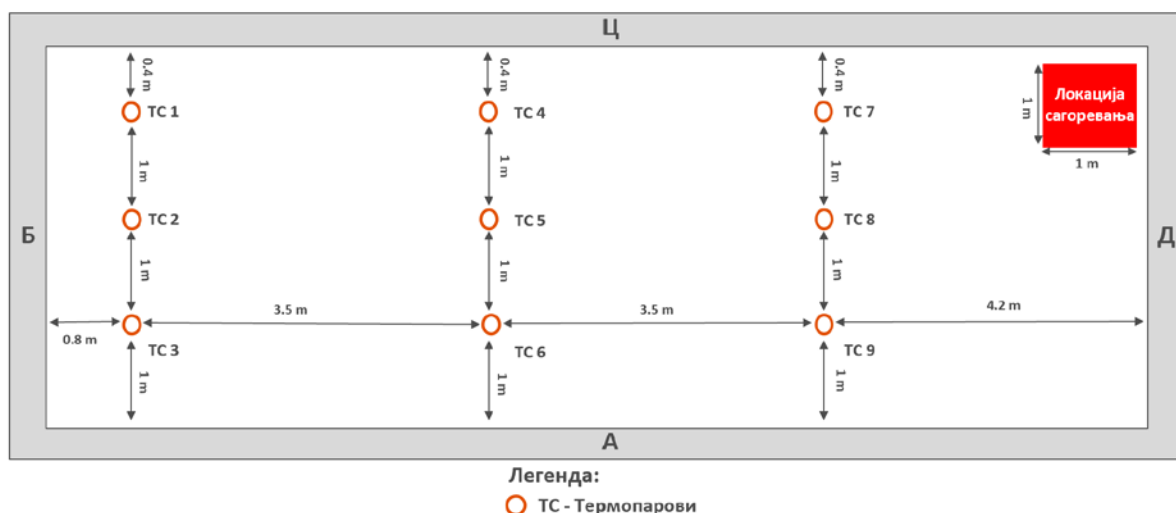


Слика 5.24 Корелациона анализа за сценарије SC_1 – SC_4

Локација отвора на супротној страни од сагоревања узрокује дуже трајање сагоревања у поређењу са отворима на осталим странама модела. Флуктуације HRR криве су израженије код сценарија са вентилационим фактором мањим од 0.85, што указује на повећано термичко мешање и смањење концентрације кисеоника у улазној ваздушној струји пре доласка до локације сагоревања. Нумерички модели ISO 668:2020 HC 9 m SC_1 – SC_4 за средње вредности HRR показују умерену позитивну корелацију између вентилационог фактора и HRR.

5.2.3 ISO 668:2020 HC 12 m модел

Модел ISO 668:2020 HC 12 m садржи девет термопарова (ТС) који су у одређеном распореду постављени у простору, сваки од њих садржи три температурна сензора, на висинама од пода 0.5 m, 1.5 m и 2.4 m. Такође, на вентилационом отвору су постављени сензори на растојањима 0.1 m од доње ивице и од горње ивице и на средини отвора у зависности од димензија отвора, слика 5.25.



Слика 5.25 Нумерички експеримент ISO 668:2020 HC 12 m: локација ТС, зидови модела (А, Б, Ц и Д) и локација сагоревања

Модел ISO 668:2020 HC 12 m садржи један вентилациони отвор чија локација, ширина и висина зависе од сценарија (SC_x) и броја нумеричког експеримента (Exp_x), табела 5.13. Висина вентилационог отвора од пода износи 1.2 m.

Табела 5.13 Димензије отвора и локације за сценарије нумеричких експеримената модела ISO 668:2020 HC 12 m

ISO 668:2020 HC 12 m	Exp.	Зид модела на коме је отвор	W [m]	H [m]
SC_1	1	А	0.4	1.2
	2	Б	0.4	1.2
	3	Д	0.4	1.2
SC_2	4	А	0.8	0.8
	5	Б	0.8	0.8
	6	Д	0.8	0.8

SC_3	7	A	1.2	0.8
	8	Б	1.2	0.8
	9	Д	1.2	0.8
SC_4	10	A	1	1
	11	Б	1	1
	12	Д	1	1

Еквивалентни однос нумеричких резултата, за сценарије SC_1 – SC_4 у свих 12 експеримената у односу на експериментална мерења за Polyethylene_GM 27, приказан је у табели 5.14.

Табела 5.14 Еквивалентни однос нумеричких резултата у сценаријима SC_1 – SC_4

ISO 668:2020 HC 12 m	Евр.	Зид модела на коме је отвор	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	Екв. однос
SC_1	1	A	0.4	1.2	0.53	$\varphi > 1$
	2	Б	0.4	1.2	0.53	$\varphi > 1$
	3	Д	0.4	1.2	0.53	$\varphi > 1$
SC_2	4	A	0.8	0.8	0.57	$\varphi > 1$
	5	Б	0.8	0.8	0.57	$\varphi > 1$
	6	Д	0.8	0.8	0.57	$\varphi > 1$
SC_3	7	A	1.2	0.8	0.85	$\varphi \geq 1$
	8	Б	1.2	0.8	0.85	$\varphi \geq 1$
	9	Д	1.2	0.8	0.85	$\varphi \geq 1$
SC_4	10	A	1	1	1	$\varphi \geq 1$
	11	Б	1	1	1	$\varphi \geq 1$
	12	Д	1	1	1	$\varphi \geq 1$

Однос између унутрашње геометрије простора и вентилационог отвора условљава еквивалентни однос $\varphi > 1$ у сценаријима SC_1 и SC_2, док је $\varphi \geq 1$ у сценаријима SC_3 и SC_4. Резултати нумеричких симулација, изведених према моделу ISO 668:2020 HC 12 m за сценарије SC_1 – SC_4 представљени су у табели 5.15.

Табела 5.15 Сценарија SC_1 – SC_4, нумерички резултати, локација вентилационог отвора, ВФ и вредности HRR

ISO 668:2020 HC 12 m	Евр.	Зид модела са отвором	W [m]	H [m]	$A_o\sqrt{H_o}$	HRR_{max} [kW]	HRR_{mean} [kW] 190 – 210 s	Трајање HRR [s]
SC_1	1	A	0.4	1.2	0.53	1514	1455	1113
	2	Б	0.4	1.2	0.53	1488	1470	1057
	3	Д	0.4	1.2	0.53	1522	1448	1188
SC_2	4	A	0.8	0.8	0.57	1506	1470	903
	5	Б	0.8	0.8	0.57	1504	1485	1320
	6	Д	0.8	0.8	0.57	1518	1474	1104
SC_3	7	A	1.2	0.8	0.85	1577	1476	659
	8	Б	1.2	0.8	0.85	2424	1484	573
	9	Д	1.2	0.8	0.85	1518	1484	702
SC_4	10	A	1	1	1	1500	1470	650
	11	Б	1	1	1	1511	1487	830
	12	Д	1	1	1	1548	1497	594

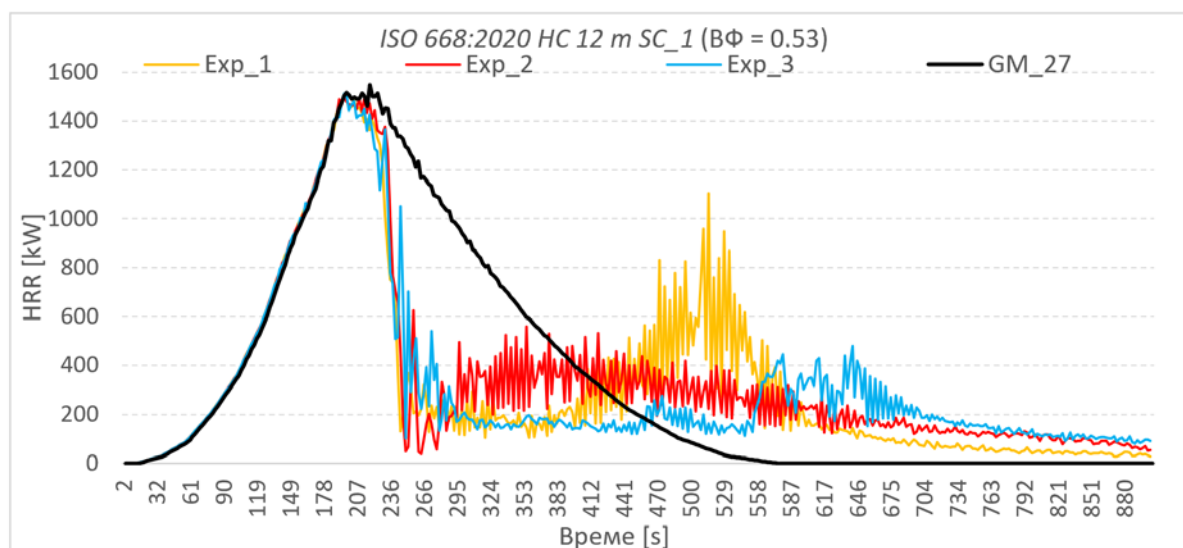
Анализа добијених резултата

На основу резултата нумеричких симулација које су урађене према моделу ISO 668:2020 HC 12 m за може се закључити следеће:

- За сценарије SC_1 – SC_2 за еквивалентни однос $\varphi > 1$, и за сценарије SC_3 – SC_4 за еквивалентни однос $\varphi \geq 1$, предвиђа се средња вредност HRR_{mean} која је од 0.2 % до 4 % мања од вредности за Polyethylene_GM 27 - $HRR_{mean} = 1500 \text{ kW}$, и дуже време сагоревања од 550 s:

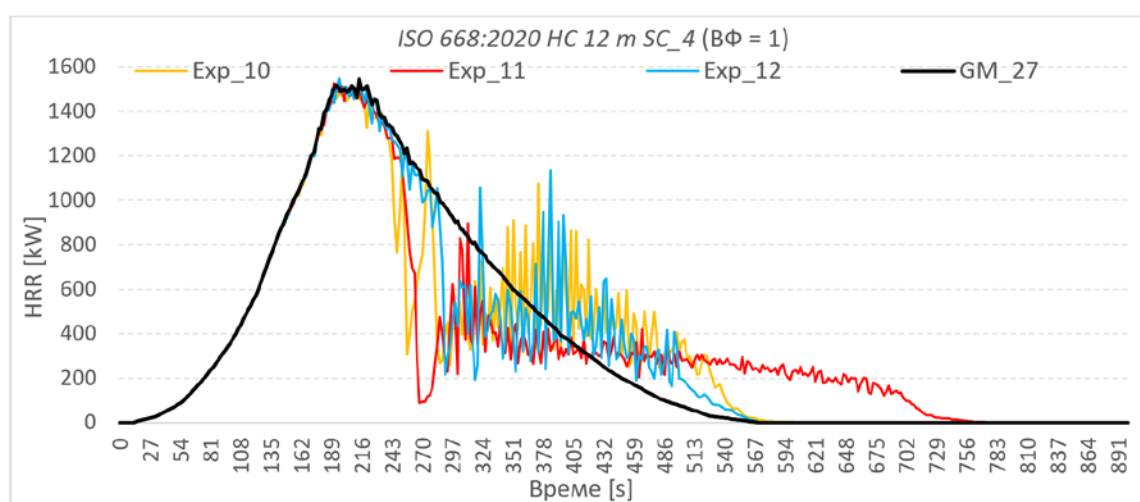
1. ISO 668:2020 HC 12 m SC_1_Exp. 1: 1455 kW, мање за 4 %, трајање 1113 s.
2. ISO 668:2020 HC 12 m SC_1_Exp. 2: 1470 kW, мање за 2 %, трајање 1057 s.
3. ISO 668:2020 HC 12 m SC_1_Exp. 3: 1448 kW, мање за 3.47 %, трајање 1188 s.
4. ISO 668:2020 HC 12 m SC_2_Exp. 4: 1470 kW, мање за 2 %, трајање 903 s.
5. ISO 668:2020 HC 12 m SC_2_Exp. 5: 1485 kW, мање за 1 %, трајање 1320 s.
6. ISO 668:2020 HC 12 m SC_2_Exp. 6: 1474 kW, мање за 1.73 %, трајање 1104 s.
7. ISO 668:2020 HC 12 m SC_3_Exp. 7: 1476 kW, мање за 1.6 %, трајање 659 s.
8. ISO 668:2020 HC 12 m SC_3_Exp. 8: 1484 kW, мање за 1.07 %, трајање 573 s.
9. ISO 668:2020 HC 12 m SC_3_Exp. 9: 1484 kW, мање за 1.07 %, трајање 702 s.
10. ISO 668:2020 HC 12 m SC_4_Exp. 10: 1470 kW, мање за 2 %, трајање 650 s.
11. ISO 668:2020 HC 12 m SC_4_Exp. 11: 1487 kW, мање за 0.87 %, трајање 830 s.
12. ISO 668:2020 HC 12 m SC_4_Exp. 12: 1497 kW, мање за 0.2 %, трајање 594 s.

У сценаријима SC_1 – SC_2 где је сагоревање контролисано вентилационим фактором $\varphi > 1$ у почетној фази развоја пожара, утврђено је да положај вентилационог отвора и унутрашња запремина простора *немају значајан утицај* на развој HRR криве. Ово се приписује довољној количини кисеоника присутној у простору, која омогућава неометан развој сагоревања. Након исцрпљења доступног кисеоника у затвореном простору, пожар прелази у фазу потпуне контроле вентилационим фактором. У овој фази, HRR крива не прати очекиване претпоставке засноване на експериментима за Polyethylene_GM 27. Графички приказ HRR за сценарио SC_1 на слици 5.26 демонстрира ову девијацију у фазама потпуно развијеног пожара и стишавања пожара.



Слика 5.26 *Polyethylene_GM 27 HRR крива, извор Fire Engineering Handbook, 5 edition, табеле A.38 и A.39. HRR криве за сценарио SC_1, нумерички експерименти 1, 2 и 3. за еквивалентни однос $\phi > 1$*

У сценаријима SC_3 – SC_4, вредност вентилационог фактора и запремине простора омогућава услове сагоревања делимично контролисане горивом материјом, тј. $\phi \geq 1$. Локација вентилационог отвора не утиче на разлику развоја HRR криве у фазама почетног развоја и потпуно развијеног пожара. Када се исцрпи кисеоник који је доступан у затвореном простору, сагоревање прелази у фазу која је потпуно контролисана вентилационим фактором. HRR крива *не прати* очекиване претпоставке у фази стишавања пожара засноване на експериментима за *Polyethylene_GM 27*. Графички приказ HRR за сценарио SC_4 на слици 5.27 демонстрира ову девијацију у фазама стишавања пожара.

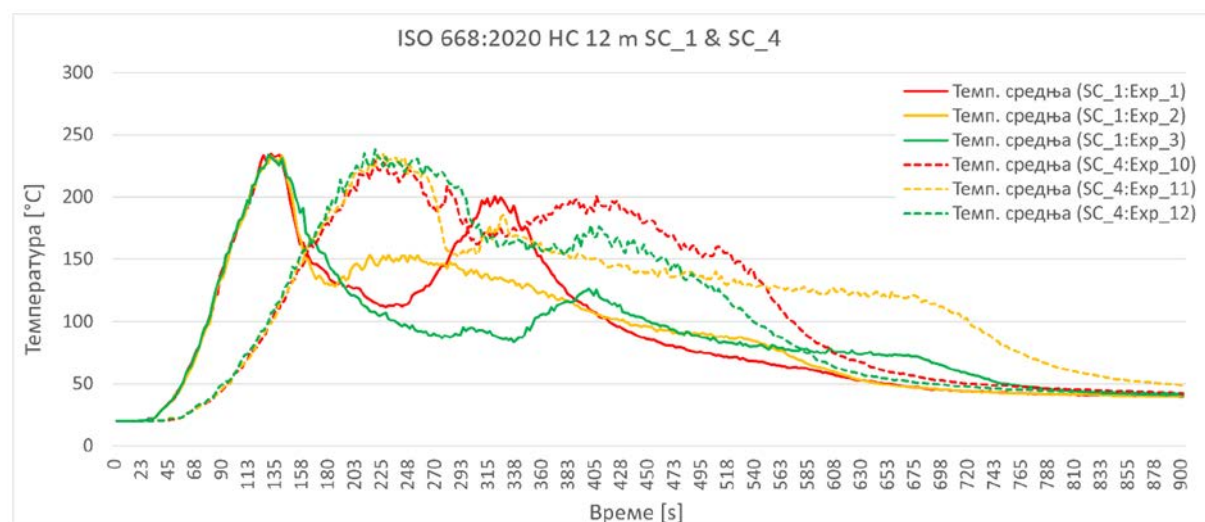


Слика 5.27 *Polyethylene_GM 27 HRR крива, извор Fire Engineering Handbook, 5 edition, табеле A.38 и A.39. HRR криве за сценарио SC_4, нумерички експерименти 10, 11 и 12. за еквивалентни однос $\phi \geq 1$*

Утицај локације вентилационог отвора и вентилационог фактора на разлику хоризонталне дистрибуције средње температуре нумеричких модела у условима еквивалентног односа, $\varphi > 1$ за сценарије SC_1 – SC_2, и за сценарије SC_3 – SC_4 у условима еквивалентног односа, $\varphi \geq 1$, приказан је у табели 5.16 и на слици 5.28.

Табела 5.16 Сценарија SC_1 – SC_4, нумеричка предикција хоризонталне дистрибуција средње максималне температуре у зависности од локације отвора и вентилационог фактора

ISO 668:2020 HC 12 m	Ехр.	Страна модела са отвором	$A_o\sqrt{H_o}$	Средња максимална темп. [°C]
SC_1	1	А	0.53	235
	2	Б	0.53	234
	3	Д	0.53	234
SC_2	4	А	0.57	228
	5	Б	0.57	230
	6	Д	0.57	235
SC_3	7	А	0.85	230
	8	Б	0.85	227
	9	Д	0.85	232
SC_4	10	А	1	229
	11	Б	1	235
	12	Д	1	238



Слика 5.28 Хоризонтална дистрибуција средње температуре за сценарио SC_1 и SC_4
Дискусија добијених резултата

Резултати експеримената за сценарија SC_1 – SC_4 показују да не постоје значајне разлике у средњој максималној температури. Међутим, постоји приметно временско одступање у постизању средње максималне температуре између сценарија SC_1 – SC_2 са еквивалентним односом $\varphi > 1$, и SC_3 – SC_4 са еквивалентним односом $\varphi \geq 1$, и то је најочљивије на примерима сценарија SC_1 и SC_4:

Сценарио SC_1, $\varphi > 1$:

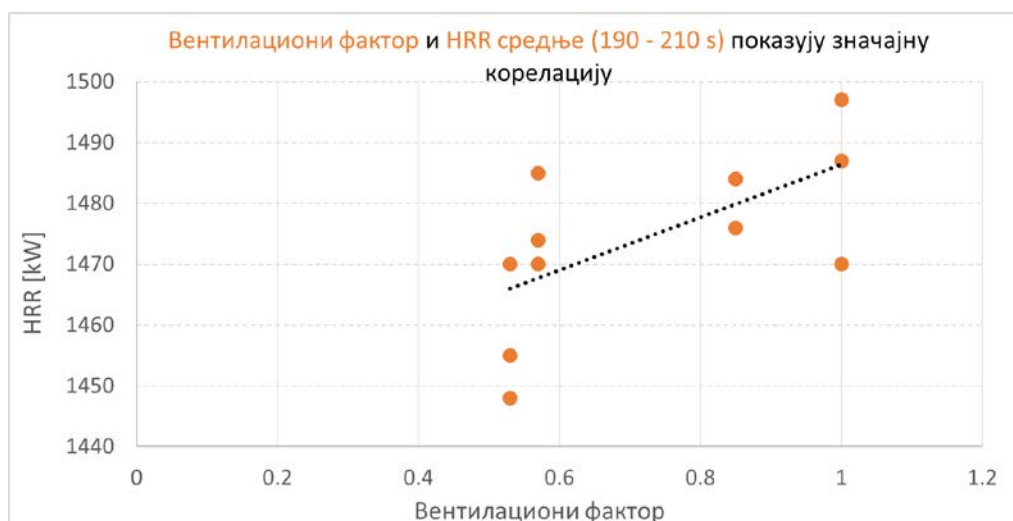
- ISO 668:2020 HC 12 m SC_1_Exp. 1: 235 °C у 133 s.
- ISO 668:2020 HC 12 m SC_1_Exp. 2: 234 °C у 128 s.
- ISO 668:2020 HC 12 m SC_1_Exp. 3: 234 °C у 137 s.

Сценарио SC_4, $\varphi \geq 1$:

- ISO 668:2020 HC 12 m SC_4_Exp. 10: 229 °C у 234 s.
- ISO 668:2020 HC 12 m SC_4_Exp. 11: 235 °C у 225 s.
- ISO 668:2020 HC 12 m SC_4_Exp. 12: 295 °C у 232 s.

Временско одступање од приближно 100 секунди између сценарија SC_1 и SC_4 у постизању средње максималне температуре може се објаснити развојем HRR криве, која је директно зависна од вентилационих фактора и геометрије простора.

У сценаријима SC_1 - SC_4, за средње вредности HRR, манифестује се висока позитивна корелација вентилационог фактора и HRR у вредности од 0.641, што је приказано на слици 5.29.



Слика 5.29 Корелациона анализа за сценарија SC_1 – SC_4

Резултати регресионе анализе за независну варијаблу (фактор вентилације) и зависну варијаблу (HRR), показују статистички значајну повезаност с вредношћу P која описује вероватноћу да ли је хипотеза прихватљива или не, и која овде износи $P = 0.024$. Ова чињеница потврђује хипотезу условљености развоја HRR кривих у сценаријима SC_1 – SC_4, у односу на геометрију простора и вентилациони фактор.

Локација вентилационог отвора има значајан утицај на трајање сагоревања и HRR криву. Отвори који се налазе на страни Б (супротно од извора сагоревања) доводе до

дужег трајања сагоревања због повећаног термичког мешања и смањене концентрације кисеоника у улазној ваздушној струји.

Хоризонтална дистрибуција средње максималне температуре варира у зависности од локације отвора и вентилационог фактора. Експерименти су показали да су веће максималне температуре забележене за сценарије у којима се вентилациони отвори налазе на страни Б модела. Такође, постоји приметно временско одступање у постизању средње максималне температуре између експеримената са еквивалентним односом $\varphi > 1$ и односом $\varphi \geq 1$.

HRR крива *не прати* очекиване претпоставке развоја у фазама потпуно развијеног пожара и стишавања пожара које су засноване на експериментима за Polyethylene_GM 27. Ове девијације су посебно уочене у фазама стишавања пожара, где су експерименти показали значајније девијације HRR криве. Анализа корелације између вентилационог фактора и вредности HRR показала је високу позитивну корелацију (0.641), што *потврђује зависност* развоја HRR од геометрије простора и вентилационог фактора.

6. Утицај промене унутрашње геометрије простора и фактора вентилације на развој HRR криве

Резултати нумеричких симулација који су приказани у претходном поглављу, показали су да локација вентилационог отвора и фактор вентилације имају значајан утицај на развој пожара у затвореном простору. То се пре свега односи на трајање појединих фаза развоја пожара и самим тим на трајање сагоревања. Последица тога јесте да постоје разлике, у већој или мањој мери, између добијене HRR криве за сваки од изведених нумеричких експеримената у односу на HRR криву експерименталних мерења за Polyethylene_GM 27. Те разлике се манифестују одступањима у појединим фазама развоја пожара, и другим речима, потврђена је зависност развоја пожара од геометрије простора и вентилационог фактора.

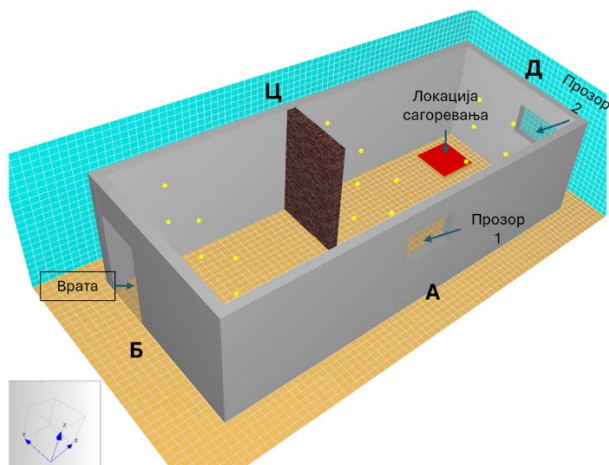
Да би се извели валидни закључци о одступањима HRR криве у односу на експериментална мерења и на тај начин дошло до елемената за дефинисање модификоване/нове криве развоја пожара, спроведени су експерименти који укључују нумеричке симулације које су биле усмерене на унутрашње промене геометрије простора и динамичку промену услова вентилације.

6.1 Ефекти промене унутрашње геометрије простора и фактора вентилације

У циљу утврђивања утицаја промене унутрашње геометрије простора на развој HRR криве, кориштен је модел ISO 668:2020 HC 9 m. Преградни зид који је постављен на страни Ц модела, удаљен је од улазних врата 3.6 m, са дужином зида од 1.6 m, висином 2.75 m и ширином 0.2 m. Зид је израђен од пуне цигле следећих карактеристика:

- Дебљина: 0.2 m
- Густина: $\rho = 750 \text{ [kgm}^{-3}\text{]}$,
- Специфична топлота: $c = 1.04 \text{ [kJ/(kgK)]}$,
- Топлотна проводљивост: $\lambda = 0.1 \text{ [W/(mK)]}$.

На слици 6.1 илустрована је поставка нумеричког експеримента, односно, приказан је 3Д модел према стандарду ISO 668:2020 HC 9 m. Локација преградног зида на страни Ц модела омогућава анализу утицаја прекида директне ваздушне струје од улазних врата до локације сагоревања и доношење закључка о томе на који начин оваква поставка има утицај на развој HRR криве.



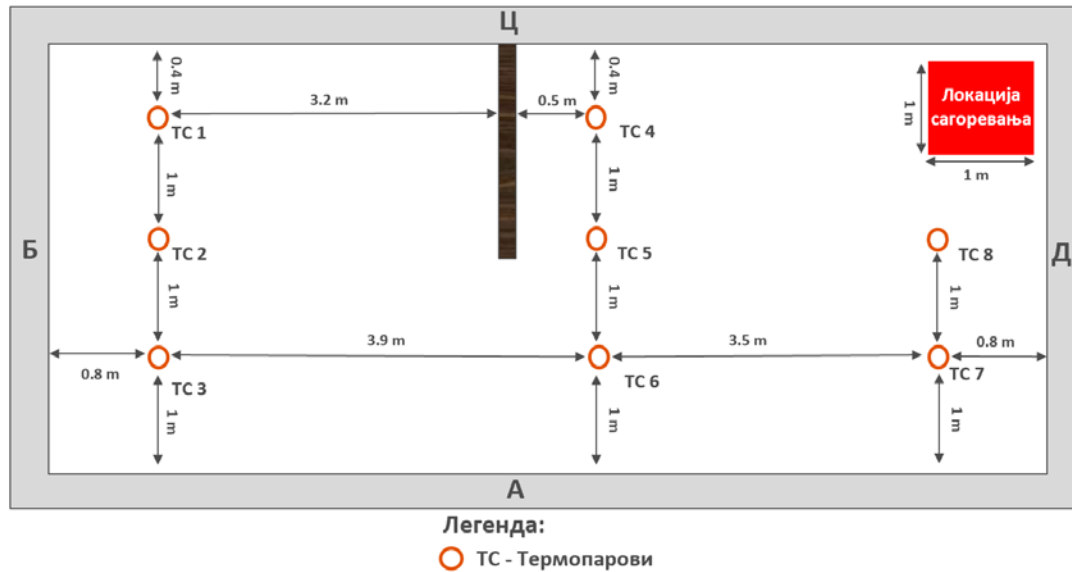
Слика 6.1 3Д модел ISO 668:2020 HC 9 m, локација вентилационих отвора, зидови модела (А, Б, Ц и Д), термопарови (ТС), преградни зид и локација сагоревања

Са слике се види да вентилационе отворе чине врата и два прозора, чија функција зависи од сценарија (отворен/затворен). Висина прозора од пода износи 1.2 m, врата су у нивоу пода. Формирано је десет сценарија означених са SC_1 – SC_10. Преградни зид постоји у сценаријима SC_2, SC_4, SC_6, SC_8 и SC_10, док сценарији SC_1, SC_3, SC_5, SC_7 и SC_9 не садрже преградни зид, табела 6.1.

Табела 6.1 Димензије отвора, број и локација отвора на основу сценарија, сценарији SC_1 – SC_10 са преградним зидом и без преградног зида модела ISO 668:2020 HC 9 m.

Сценарио	Зид	Број отвора и локација	W [m]			H [m]		
SC_1	Не	1; А	0.8			0.8		
SC_2	Да	1; А	0.8			0.8		
SC_3	Не	1; Д	1.2			0.8		
SC_4	Да	1; Д	1.2			0.8		
SC_5	Не	2; А и Д	1.2			0.8		
SC_6	Да	2; А и Д	1.2			0.8		
SC_7	Не	2; Б и Д	1.2	1		0.8	2	
SC_8	Да	2; Б и Д	1.2	1		0.8	2	
SC_9	Не	3; А, Б и Д	1.2	1.2	1	0.8	0.8	2
SC_10	Да	3; А, Б и Д	1.2	1.2	1	0.8	0.8	2

Модел ISO 668:2020 HC 9 m садржи осам термопарова (ТС), од којих сваки садржи три температурна сензора, на висинама од пода од 0.5 m, 1.5 m и 2.4 m. Такође, на вентилационим отворима су постављени температурни сензори на растојањима 0.1 m од доње ивице, 0.1 m од горње ивице и на средини отвора у зависности од геометрије отвора, слика 6.2.



Слика 6.2 Нумерички експеримент ISO 668:2020 HC 9 т: локација ТС, зидови модела (А, Б, Ц и Д), локација преградног зида и локација сагоревања

Еквивалентни однос нумеричких резултата за модел ISO 668:2020 HC 9 т, са и без преградног зида, у односу на експериментална мерења за Polyethylene_GM 27, приказан је у табели 6.2.

Табела 6.2 Еквивалентни однос нумеричких резултата ISO 668:2020 HC 9 т модела и ВФ, у сценаријима SC_1 – SC_10

Сценарио	Зид	Број отвора и локација	W [m]			H [m]			$A_o\sqrt{H_o}$	Еквивалентни однос
SC_1	Не	1; А	0.8			0.8			0.57	$\varphi > 1$
SC_2	Да	1; А	0.8			0.8			0.57	$\varphi > 1$
SC_3	Не	1; Д	1.2			0.8			0.85	$\varphi > 1$
SC_4	Да	1; Д	1.2			0.8			0.85	$\varphi > 1$
SC_5	Не	2; А и Д	1.2			0.8			1.7	$\varphi < 1$
SC_6	Да	2; А и Д	1.2			0.8			1.7	$\varphi < 1$
SC_7	Не	2; Б и Д	1.2	1		0.8	2		3.68	$\varphi < 1$
SC_8	Да	2; Б и Д	1.2	1		0.8	2		3.68	$\varphi < 1$
SC_9	Не	3; А, Б и Д	1.2	1.2	1	0.8	0.8	2	4.53	$\varphi < 1$
SC_10	Да	3; А, Б и Д	1.2	1.2	1	0.8	0.8	2	4.53	$\varphi < 1$

Однос између унутрашње геометрије простора и вентилационих отвора условљавају еквивалентни однос $\varphi > 1$, за сценарије SC_1 – SC_4, док је у сценаријима SC_5 – SC_10 еквивалентни однос $\varphi < 1$. Резултати нумеричких симулација за овај модел са и без преградног зида, за сценарије SC_1 – SC_10, представљени су у табели 6.3. Табела омогућава анализу различитих сценарија базираних на вредностима HRR криве.

Табела 6.3 Модел ISO 668:2020 HC 9 m, сценарија SC_1 – SC_10 нумерички резултати, локација и број вентилационих отвора, преградни зид, ВФ и вредности HRR

Сценарио	Зид	Број отвора и локација	W [m]			H [m]			$A_o\sqrt{H_o}$	Трајање HRR [s]	HRR_{max} [kW]	HRR_{mean} (190 – 210 s) [kW]
SC_1	Не	1; А	0.8			0.8			0.57	1043	1431	1078
SC_2	Да	1; А	0.8			0.8			0.57	1113	1429	1190
SC_3	Не	1; Д	1.2			0.8			0.85	798	2037	1446
SC_4	Да	1; Д	1.2			0.8			0.85	639	1528	1477
SC_5	Не	2; А и Д	1.2			0.8			1.7	573	1522	1511
SC_6	Да	2; А и Д	1.2			0.8			1.7	573	1533	1485
SC_7	Не	2; Б и Д	1.2	1		0.8	2		3.68	573	1513	1496
SC_8	Да	2; Б и Д	1.2	1		0.8	2		3.68	573	1529	1505
SC_9	Не	3; А, Б и Д	1.2	1.2	1	0.8	0.8	2	4.53	573	1518	1500
SC_10	Да	3; А, Б и Д	1.2	1.2	1	0.8	0.8	2	4.53	573	1514	1498

Анализа добијених резултата

Анализом добијених резултата за модел ISO 668:2020 HC 9 m, са и без преградног зида, уочавају се следеће чињенице:

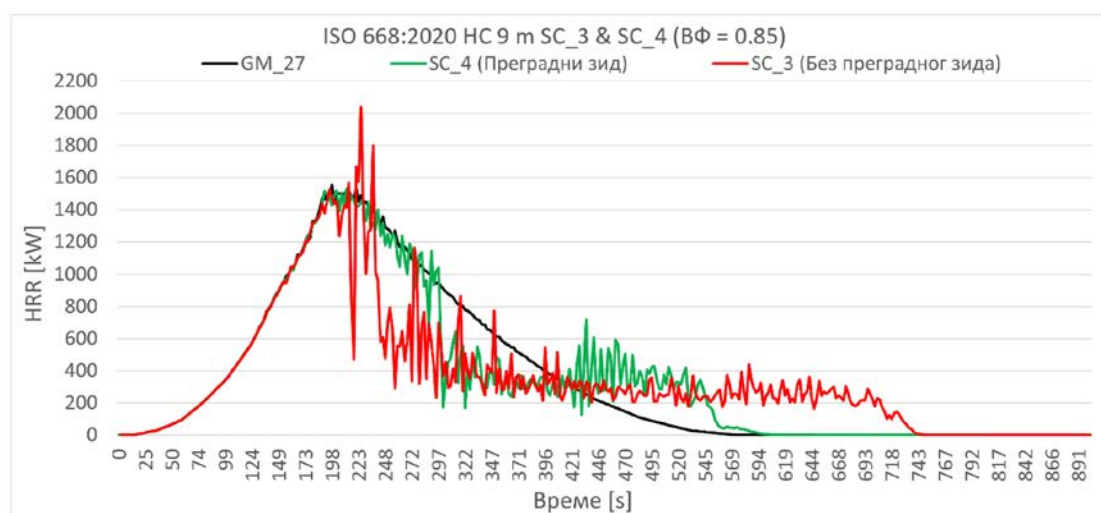
- Сценарија SC_1 – SC_4, $\phi > 1$, предвиђају средњу вредност HRR_{mean} која је испод вредности за Polyethylene_GM 27 која износи $HRR_{mean} = 1500$ kW, као и дуже време сагоревања од 550 s. Вредности HRR_{mean} за наведене сценарије су следеће:
 - SC_1 без преградног зида: 1078 kW, што је мање за 28.13 %, трајање 1043 s.
 - SC_2 са преградним зидом: 1190 kW што је мање за 20.67 %, трајање 1113 s.
 - SC_3 без преградног зида: 1446 kW што је мање за 3.6 %, трајање 798 s.
 - SC_4 са преградним зидом: 1477 kW што је мање за 1.53 %, трајање 639 s.
- Сценарија SC_1 – SC_4, $\phi > 1$, са и без преградног зида, су са једним геометријским отвором вентилационог фактора ≤ 0.85 . Резултати показују да се термално мешање између улазне и излазне струје повећава, што доводи до повећане концентрације продуката сагоревања у улазној ваздушној струји. Ово смањује концентрацију кисеоника у улазној ваздушној струји пре него што стигне до локације сагоревања. Као резултат, долази до разлика у развоју нумерички добијене HRR криве у поређењу са HRR која је добијена експерименталним мерењима за Polyethylene_GM 27, што има за последицу *дуже трајање сагоревања*.
- Сценарија SC_5 – SC_10, $\phi < 1$, предвиђају средњу вредност HRR_{mean} , која је у оквирима вредности за Polyethylene_GM 27, и трајање сагоревања које је за 4.18 % (573 s) дуже него за Polyethylene_GM 27 (550 s):
 - SC_5, без преградног зида: 1511 kW повећање за 0.73 %, трајање 573 s.
 - SC_6, са преградним зидом: 1485 kW што је мање за 1 %, трајање 573 s.

3. SC_7, без преградног зида: 1496 kW што је мање за 0.27 %, трајање 573 s.
4. SC_8, са преградним зидом: 1505 kW повећање за 0.33 %, трајање 573 s.
5. SC_9, без преградног зида: 1500 kW без разлике, трајање 573 s.
6. SC_10, са преградним зидом: 1498 kW што је мање за 0.13 %, трајање 573 s.

Дискусија добијених резултата

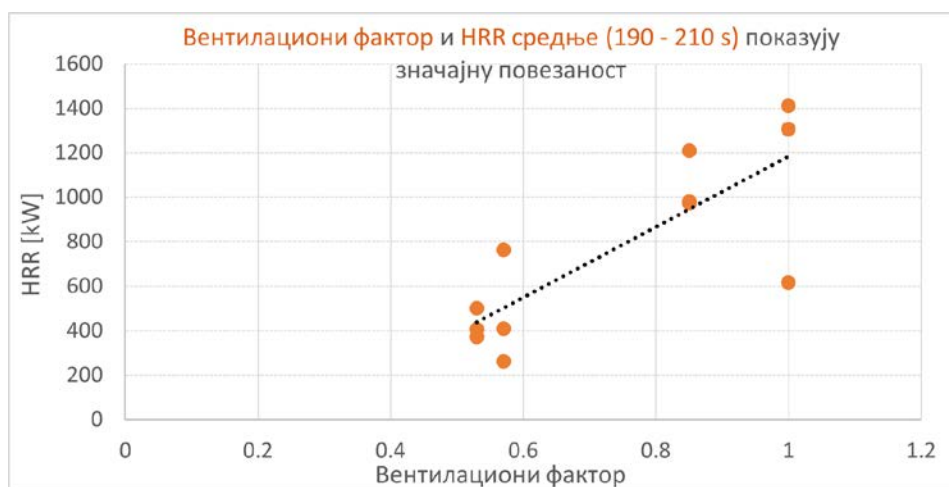
Сценарији SC_5 – SC_10, $\phi < 1$, са и без преградног зида, са више геометријских отвора вентилационог фактора изнад 0.85 омогућавају контролисано сагоревање горивом материјом у оквирима експерименталних услова тестирања за Polyethylene_GM 27. Нумеричка HRR крива је у корелацији са развојем експерименталне HRR криве, са разликом у трајању сагоревања које је дуже за 4.18 %.

Локација вентилационог отвора и присуство преградног зида значајно утичу на унутрашњу динамику струјања флуида. Експериментални резултати за сценарије SC_3 (без преградног зида) и SC_4 (са преградним зидом) при вентилационом фактору од 0.85, показују да преградни зид формира зону директног кретања улазне ваздушне струје према локацији сагоревања из вентилационог отвора на Д страни модела. Ова конфигурација смањује термално мешање између улазне и излазне струје, што резултира развојем нумеричке HRR криве која је у бољој корелацији са експерименталном HRR кривом за Polyethylene_GM 27. Корелација која је приказана на слици 6.3, пружа јасне доказе о утицају преградног зида на динамику струјања флуида и термалне процесе.



Слика 6.3 Polyethylene_GM 27 - HRR крива, извор: *Fire Engineering Handbook*, 5 edition, *tabele A.38 и A.39*. HRR криве и ISO 668:2020 HC 9 m, сценарија SC_3 без преградног зида и SC_4 са преградним зидом, нумерички експерименти у условима еквивалентног односа $\phi > 1$

Сценарији SC_1 – SC_10, са и без преградног зида, за средње вредности HRR манифестују високу позитивну корелацију вентилационог фактора и HRR у вредности од 0.73, слика 6.4.



Слика 6.4 Корелациона анализа, модел ISO 668:2020 HC 9 m, сценарија SC_1 – SC_10, са и без преградног зида

Резултати регресионе анализе за независну варијаблу (фактор вентилације) и зависну варијаблу (HRR), показују статистички значајну повезаност с вредношћу P која описује вероватноћу да ли је хипотеза прихватљива или не, а која овде износи $P = 0.016$. Ова чињеница потврђује хипотезу условљености развоја HRR кривих за модел ISO 668:2020 HC 9 m у сценаријима SC_1 – SC_10 са и без преградног зида, на основу геометрије простора и вентилационог фактора.

Присуство преградног зида смањује термално мешање између улазне и излазне струје ваздуха, што доводи до боље корелације нумеричких HRR кривих са експерименталним подацима. Преградни зид формира зону директног кретања улазне ваздушне струје ка локацији сагоревања. Нумерички експерименти са преградним зидом боље корелирају са експерименталним подацима за Polyethylene_GM 27, нарочито у сценаријима са једним вентилационим отвором и вредношћу вентилационог фактора изнад 0.85.

Сценарији са више вентилационих отвора ($\phi < 1$) омогућавају сагоревање контролисано горивом материјом и бољу корелацију нумеричких и експерименталних HRR кривих. Нумерички модели са еквивалентним односом $\phi > 1$ показују веће вредности HRR криве и дуже трајање сагоревања у односу на моделе са $\phi < 1$.

6.2 Ефекти промене фактора вентилације и унутрашње геометрије модела током пожара

У реалним условима пожара вентилациони фактори се мењају, на пример због отварања врата током евакуације, пуцања стакла прозора услед високих температура или због уласка ватрогасаца у зону пожара. Услови током пожара често доводе до промена вентилационих фактора и самим тим и до промене динамике развоја пожара.

За проверу утицаја промена фактора вентилације током пожара на развој HRR криве у реалним условима пожара, поново је коришћен модел ISO 668:2020 HC 9 m, са и без преградног зида, са идентичним димензијама и карактеристикама модела које су описане у претходном тексту и илустроване на слици 6.1. И у овом случају, локација преградног зида омогућава анализу утицаја прекида директне ваздушне струје од улазних врата до локације сагоревања на развој HRR.

Вентилациони отвори укључују врата и два прозора, чија функција варира зависно од сценарија SC_1 – SC_8 током симулације (отворено – затворено). Висина прозора 1 и прозора 2 од пода износи 1.2 m, ширина је $W = 1.2$ m, а висина $H = 0.8$ m, врата су у нивоу пода, ширине $W = 1$ m и висине $H = 2$ m, табела 6.4.

Табела 6.4 Димензије отвора, број отвора и локација за сценарије SC_1 – SC_8 са и без преградног зида.

Сценарио	Зид	Број отвора и локација на страни модела	W [m]			H [m]		
SC_1	Не	1; А	1.2			0.8		
SC_2	Да	1; А	1.2			0.8		
SC_3	Не	1; А	1.2			0.8		
SC_4	Да	1; А	1.2			0.8		
SC_5	Не	2; Д - Б	1.2	0.8		0.8	2	
SC_6	Да	2; Д - Б	1.2	0.8		0.8	2	
SC_7	Не	3; А - Д - Б	1.2	1.2	0.8	0.8	0.8	2
SC_8	Да	3; А - Д - Б	1.2	1.2	0.8	0.8	0.8	2

Димензије модела и распоред термопарова (ТС) су исти као и у претходним примерима, представљено сликом 6.2. Преградни зид постоји у сценаријима SC_2, SC_4, SC_6 и SC_8, док у симулацијама на основу сценарија SC_1, SC_3, SC_5 и SC_7 преградни зид није укључен. Услови и динамика промена природне вентилације дефинисани су на начин који је приказан у табели 6.5.

Табела 6.5 Вентилациони отвор, услови вентилације и ВФ током симулације за нумеричке експерименте модела ISO 668:2020 HC 9 т у сценаријима SC_1 – SC_8, са и без преградног зида

Сценарио	Вентилациони отвор – Преградни зид	Услови природне вентилације у времену симулације	Почетни услови симулације ВФ	Промена ВФ током симулације
SC_1	Прозор 1	Отворен – Прозор 2 и врата затворени	0.85	-----
SC_2	Прозор 1 – Преградни зид	Отворен – Прозор 2 и врата затворени	0.85	-----
SC_3	Прозор 1	Отворен у 100 s – Прозор 2 и врата затворени	0	0.85 и 100 s
SC_4	Прозор 1 – Преградни зид	Отворен у 100 s – Прозор и врата затворени	0	0.85 и 100 s
SC_5	Прозор 2 и врата	Отворен у 120 s; Врата отворена у 200 s. Прозор 1 затворен	0	0.85 и 120 s 3.68 и 200 s
SC_6	Прозор 2 врата – Преградни зид	Отворен у 120 s; Врата отворена у 200 s. Прозор 1 затворен	0	0.85 и 120 s 3.68 и 200 s
SC_7	Прозор 1; Прозор 2; Врата	Прозор 1 отворен, Прозор 2 отворен у 150 s, врата отворена у 400 s	0.85	1.70 и 150 s 4.53 и 400 s
SC_8	Прозор 1; Прозор 2; Врата – Преградни зид	Прозор 1 отворен, Прозор 2 отворен у 150 s, врата отворена у 400 s	0.85	1.70 и 150 s 4.53 и 400 s

Резултати нумеричких симулација за сценарије SC_1 – SC_8, са и без преградног зида, детаљно су представљени у табели 6.6.

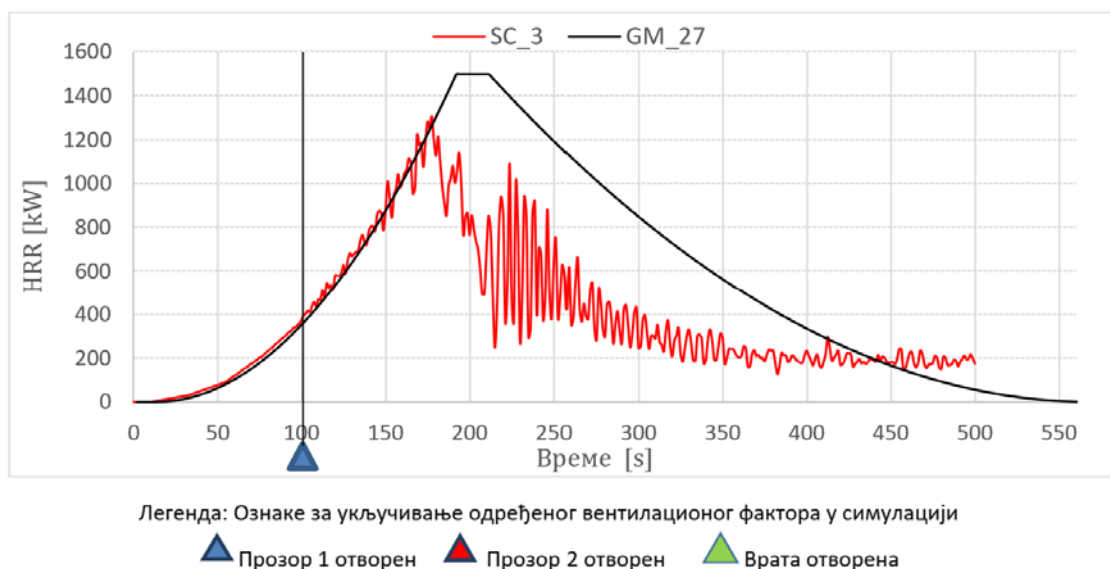
Табела 6.6 Сценарија SC_1 - SC_8 - нумерички резултати, локација и број вентилационих отвора, преградни зид, промена ВФ и вредности HRR

Сценарио	Зид	Број отвора и локација	Почетни услови симулације ВФ	Промена ВФ током симулације	Трајање HRR [s]	HRR_{max} [kW]	HRR_{mean} (190 – 210 s) [kW]
SC_1	Не	А	0.85	-----	595	1563	761
SC_2	Да	А	0.85	-----	705	1933	748
SC_3	Не	А	0	0.85 и 100 s	670	1306	792
SC_4	Да	А	0	0.85 и 100 s	630	1392	952
SC_5	Не	2 : Д – Б	0	0.85 и 120 s 3.68 и 200 s	541	3677	1046
SC_6	Да	2 : Д - Б	0	0.85 и 120 s 3.68 и 200 s	535	2889	964
SC_7	Не	3 : А – Д – Б	0.85	1.70 и 150 s 4.53 и 400 s	545	4176	1209
SC_8	Да	3 : А – Д - Б	0.85	1.70 и 150 s 4.53 и 400 s	542	3190	1249

Анализа и дискусија добијених резултата

Анализа резултата који су добијени нумеричком симулацијом заснованом на моделу ISO 668:2020 HC 9 m, са и без преградног зида, при чему су испитиване динамичке промене природне вентилације током времена показује следеће:

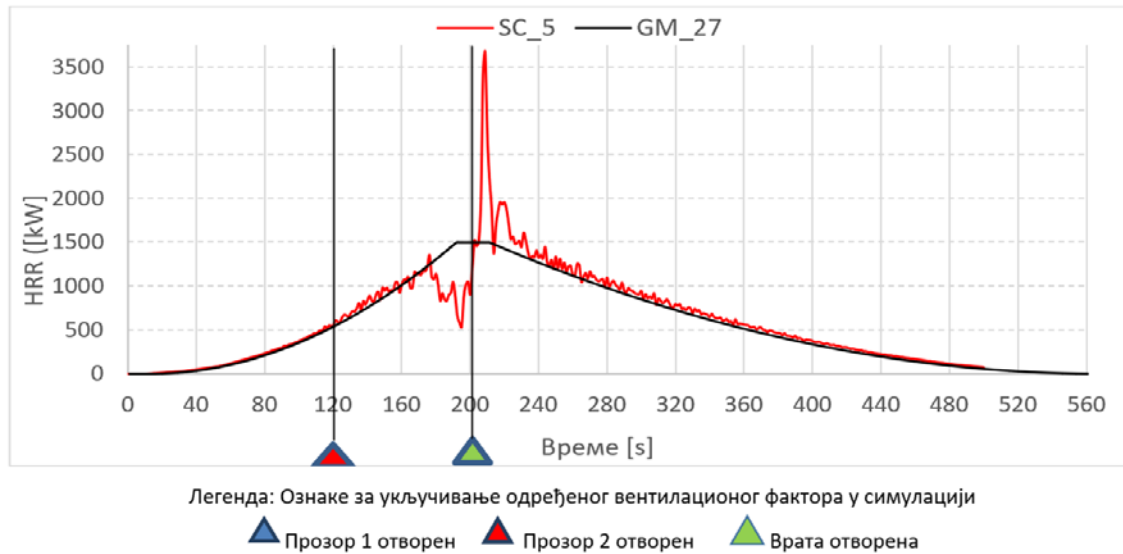
- У сценарију SC_3 видљива је промена вентилационог фактора при отварању прозора 1, са 0 на 0.85 у 100 s симулације, након чега долази до флукуација нумеричке HRR криве. Максимална вредност HRR износи 1306 kW, што је за 12.93 % мање у односу на експериментална мерења за Polyethylene_GM 27, слика 6.5.



Слика 6.5 Polyethylene_GM 27 - HRR крива. HRR крива за сценарио SC_3, у условима отварања прозора на А страни модела у 100 s.

Важно је напоменути да се флукуације HRR јављају у свим експериментима еквивалентног односа $\varphi > 1$.

- У сценаријима SC_1 – SC_8 прецизно се предвиђа повећање фактора вентилације током времена симулације, као и промене улазне и излазне струје флуида. Промена вентилације током времена и њен утицај на развој HRR криве у поређењу са експерименталном HRR кривом за Polyethylene_GM 27 илустрована је на примеру сценарија SC_5, слика 6.6.



Слика 6.6 *Polyethylene_GM 27* - HRR крива и HRR крива за сценарио *SC_5*, у условима отварања прозора на Д страни модела у 120 s и врата на Б страни модела у 200 s.

Почетни услови вентилације у симулацији су $B\Phi = 0$, без вентилационог отвора до 120 s. Вредност $B\Phi = 0.85$ остварује се у 120 s отварањем прозора 2, после чега долази до флукуација нумеричке HRR криве. У периоду симулације од 120 до 200 s, сагоревање је контролисано вентилацијом, еквивалентни однос је $\varphi > 1$, а предвиђени развој HRR криве није у складу са експерименталним тестовима за *Polyethylene_GM 27*. У том временском периоду максимална вредност $HRR = 1260$ kW, што је за 16 % мање у односу на *Polyethylene_GM 27*. Вентилациони услови симулације с фактором $B\Phi = 0.85$ трају до 200 s, када се симулира отварање врата што повећава вредност $B\Phi = 2.83$, при чему је укупни вентилациони фактор симулације $B\Phi = 3.68$ у 200 s.

Отварање врата на Б страни модела у 200 s узрокује улаз свеже ваздушне струје, праћено изгарањем акумулираних запаљивих гасова услед чега долази до раста HRR криве на максималну вредност од 3677 kW, што је више за 145.13 % од вредности HRR криве за *Polyethylene_GM 27*. Након сагоревања акумулираних запаљивих гасова, остварују се услови за сагоревање контролисано горивом материјом при еквивалентном односу $\varphi < 1$. Стварањем таквих услова симулације нумеричка HRR крива је у корелацији са вредностима HRR криве за *Polyethylene_GM 27*.

Сценарији *SC_7* и *SC_8* искоришћени су за анализу могућности нумеричког експеримента да предвиди услове настанка феномена *backdraft*. Сценарији *SC_7* и *SC_8* садрже идентичне геометријске отворе на истим локацијама и исту динамику промене вентилационог фактора током трајања симулације. Разлика између сценарија је у томе што је сценарио *SC_7* без преградног зида, док је сценарио *SC_8* са преградним зидом.

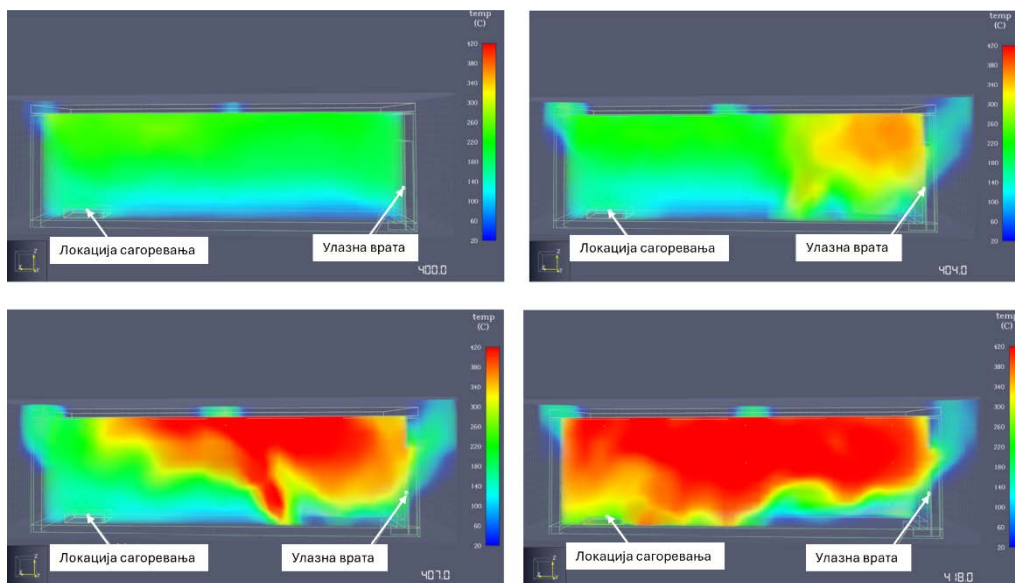
Фокус истраживања је био на променама вентилационог фактора током фазе стишавања пожара. Компаративна анализа резултата за вредност HRR у сценаријима SC_7 и SC_8 показује следеће:

- У сценарију SC_7 (без преградног зида), дошло је до повећања вентилационог фактора са 1.7 на 4.53 у 400 s у фази стишавања пожара. Нагло повећање вентилационог фактора узрокује повећање HRR са 477 kW у 400 s на 4176 kW у 411 s што представља промену од 775.47 %, слика 6.7.



Слика 6.7 Polyethylene_GM 27 - HRR крива и HRR крива ISO 668:2020 HC 9 t, сценарио SC_7 без преградног зида, у условима отварања прозора на А страни модела у 0 s, отварања прозора на Д страни модела у 150 s и отварање врата на Б страни модела у 400 s.

Пошто је конфигурација унутрашњости простора сценарија SC_7 таква да је то отворени простор без преградног зида, то омогућава једнаку дистрибуцију температуре. Еквивалентни однос $\phi > 1$, у условима симулације до 400 s, онемогућава потпуно сагоревање гориве материје, што узрокује акумулацију запаљивих гасова, стварајући презасићену „богату“ запаљиву смешу у затвореном простору. Промена вентилационог фактора и улаз свеже ваздушне струје кроз врата на Б страна модела покреће мешање запаљивих гасова са кисеоником и паљење, иницирајући *backdraft* у 404 s. На визуелном приказу нумеричког експеримента за сценарио SC_7, види се да паљење „обогаћене“ запаљиве смеше почиње на супротној страни од места сагоревања у 404 s, у близини врата, где је и дошло до повећања вентилационог фактора услед отварања врата у 400 s. Ширење таласа сагоревања у времену визуализовано је средњом температуром од 400 s до 418 s, слика 6.11.



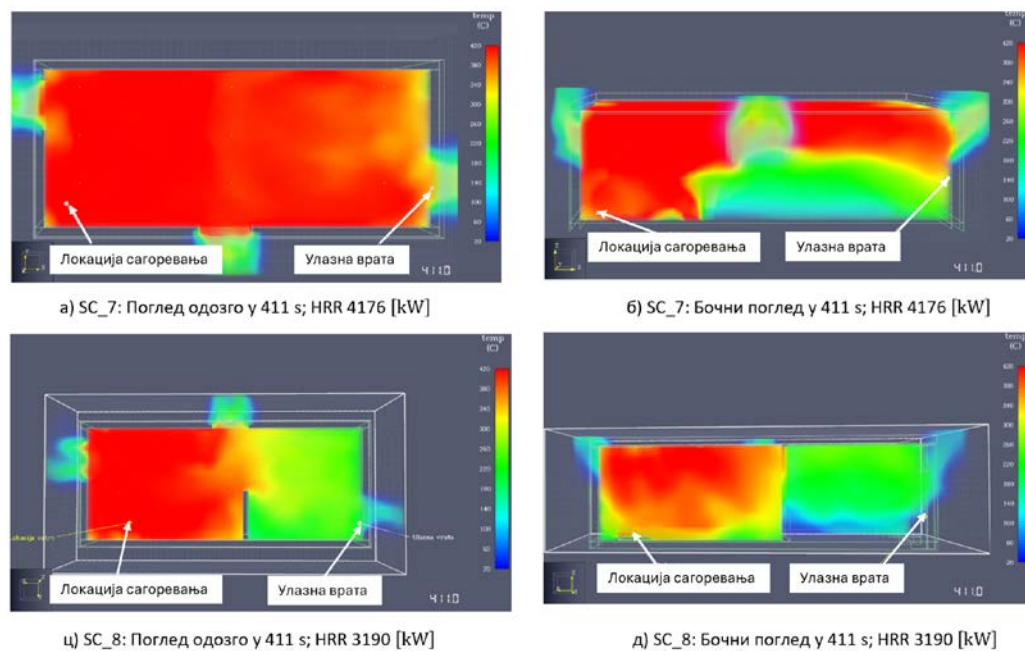
Слика 6.8 Сценарио SC_7, прогресија запаљења унутар простора од 400 s до 418 s, приказана средњом температуром простора

- У сценарију SC_8 (са преградним зидом), извршено је повећање вентилацијског фактора са 1.7 на 4.53 у 400 s, у фази стишавања пожара. Нагло повећање вентилационог фактора узрокује повећање HRR са 442 kW у 400 s на 3190 kW у 411 s, што представља промену од 621.72 %, слика 6.9.



Слика 6.9 Polyethylene_GM 27 - HRR kriva и HRR крива ISO 668:2020 HC 9 m, сценарио SC_8 са преградним зидом, у условима отварања прозора на А страни модела у 0 s, отварања прозора на Д страни модела у 150 s и отварања врата на Б страни модела у 400 s.

Сценарио SC_8 је са идентичним вентилационим параметром, али садржи преградни зид. У овом сценарију не долази до *backdraft*-а. Преградни зид утиче на унутрашњу динамику струјања флуида што повећава хетерогеност температуре у простору и апсорбује део топлотне енергије. Визуелни приказ утицаја промене унутрашње геометрије модела ISO 668:2020 HC 9 m за сценарије SC_7 и SC_8 у идентичним вентилационим условима и временским интервалима, илуструје разлике у дистрибуцији средње температуре у простору, слика 6.10.



Слика 6.10 Сценарија SC_7 и SC_8, временски тренутак симулације 411 s, средња температура простора и вредност HRR. Идентични услови вентилације, разлика у унутрашњој геометрији простора: SC_7 (а и б) без преградног зида. SC_8 (ц и д) са преградним зидом.

Очигледно је, да због постојања преградног зида у сценарију SC_8 не долази до настанка *backdraft*-а, другим речима, преградни зид пружа заштиту у случају уласка ватрогасаца-спасилаца у зону пожара.

7. Компаративна анализа добијених резултата

Резултати нумеричких експеримената који су приказани у претходним поглављима, као и основне анализе и дискусије, показали су оправданост оваквог типа истраживања. Да би се извели коначни закључци који треба да проистекну из овог истраживања потребно је урадити упоредну анализу кључних резултата који су добијени.

У тексту који следи извршена је компаративна анализа резултата који су добијени поређењем нумеричке пожарне криве ISO 834 и параметарске пожарне криве за моделе у складу са стандардима ISO 9705, ISO 668:2020 HC 6 m, ISO 668:2020 HC 9 m и ISO 668:2020 HC 12 m. Анализа је извршена применом методологије графичке компарације и квантитативне анализе. На крају анализе за сваки од наведених модела предложена је нова пожарна крива.

Будући да дефинисање нове пожарне криве прати принципе методологије која подразумева пројектовање које је засновано на перформансама (енгл. Performance-Based Design - PBD), резултирајућа пожарна крива се може и именовати као *пожарна крива пројектована на основу перформанси* (енгл. Performance-Based Fire Curve - PBFC).

SFPE-а дефинише PBD као „Инжењерски приступ пројектовању безбедности од пожара који се заснива на: (1) договореним циљевима и задацима у области безбедности од пожара, (2) детерминистичкој и/или анализи вероватноће сценарија пожара и (3) квантитативној процени алтернатива у пројектовању у односу на циљеве и задатке безбедности од пожара, уз коришћење прихваћених инжењерских алата, методологија и критеријума перформанси.“¹⁰³ Ова дефиниција идентификује три кључна елемента пројектовања које је засновано на перформансама:

1. Први елемент подразумева дефинисање нивоа пожарне безбедности који треба да буде постигнут у случају пожара. Ово укључује јасно дефинисане циљеве и стандарде безбедности које грађевински објект треба да испуни.
2. Други елемент обухвата идентификацију сценарија пожара, намене објекта (болница, школа ...) и у складу с тим карактеристика особа које у објекту бораве, као и особина грађевинског објекта за које су системи безбедности од пожара пројектовани да пруже заштиту. У терминологији PBD-а, ови пожари су познати као пројектовани сценарији пожара (енгл. design fire scenario), и представљају основу за планирање и пројектовање система безбедности од пожара.

¹⁰³ Hurley, Morgan J., Rosenbaum, Eric R., Performance-Based Fire Safety Design, Taylor and Francis Group, LLC, 2015.

3. Трећи елемент укључује спровођење инжењерске анализе како би се утврдило да ли предложене стратегије дизајна обезбеђују жељени ниво безбедности у случају пројектованих сценарија пожара. Овај корак подразумева употребу инжењерских алата, модела и метода за процену ефикасности предложених мера безбедности.

Наведени елементи чине основу за примену PBD-а, омогућавајући флексибилан и аналитички приступ пројектовању безбедности од пожара, прилагођен специфичним потребама и карактеристикама грађевинског објекта.¹⁰⁴

Оваква приступ у безбедности од пожара омогућава инжењерима специфична пројектна решења која боље одговарају реалним ризицима, чиме се постиже већа безбедност и ефикасност.¹⁰⁵ Тренутно је PBD интегрисан у различите међународне стандарде, укључујући:

- ISO 2394 *General principles on reliability for structures* – Општи принципи поузданости конструкција.
- EN 1990 *Eurocode – Basis of structural design* – Смернице које се фокусирају на сигурност и функционалност конструкција.
- NFPA 72 *National Fire and Signaling Code* – Смернице и захтеви за пројектовање, инсталацију, тестирање, инспекцију и одржавање система за детекцију пожара, сигнализацију и аларме.
- NFPA 101 *Life Safety Code* – Кодекс безбедности живота - стандард који дефинише минималне захтеве за безбедност људског живота од пожара унутар грађевинских објеката.
- ASCE 7 *Minimal design loads and associated criteria for buildings and other structures* - Стандард за дефинисање минималних оптерећења и пратећих критеријума на грађевинским објектима у САД-у.

У тексту који следи наведени су резултати компаративне анализе добијених резултата на моделима на којима су спроведене симулације. Приказане су анализе резултата који су добијени за пожар контролисан фактором вентилације, пожар контролисан горивом материјом, као и пожар за све услове вентилације. На крају сваке од анализа наведени су закључци.

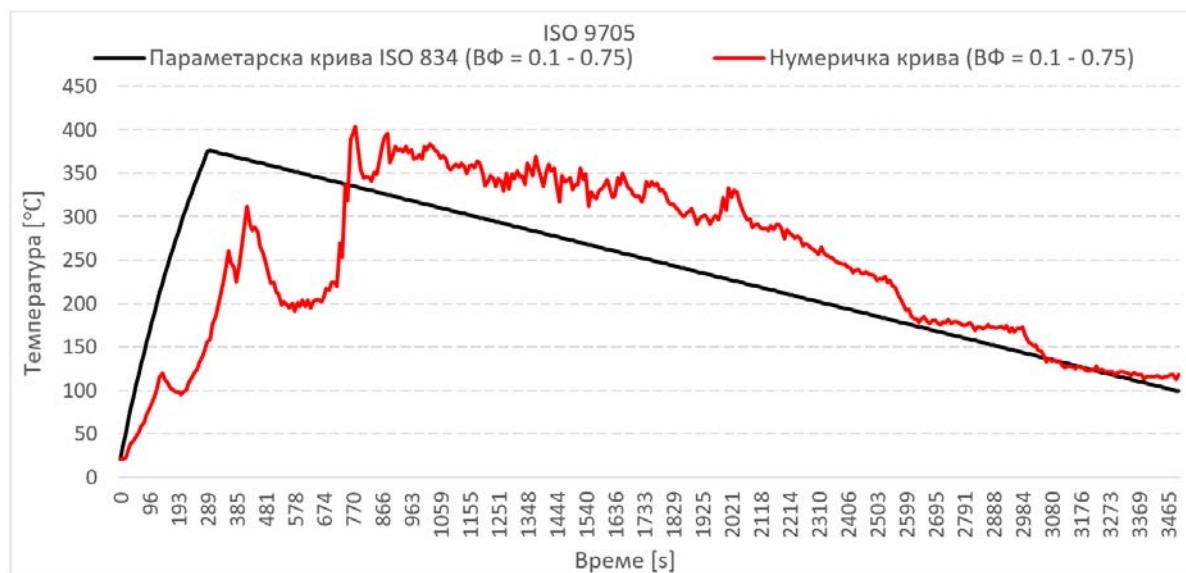
¹⁰⁴ Yong Wang, Y., Burgess, I., František, W., Martin G., *Performance-Based Fire Engineering of Structures* (p. F). Taylor and Francis, 2013.

¹⁰⁵ Hurley, Morgan J.; Rosenbaum, Eric R. *Performance-Based Fire Safety Design*, Taylor and Francis group LLC, 2015.

7.1 ISO 9705 модел

7.1.1 Пожар контролисан вентилацијом

Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, за вентилационе факторе, $ВФ = 0.1 - 0.75$ приказана је на слици 7.1.



Слика 7.1 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором за средњу вредност $ВФ = 0.1 - 0.75$

У почетној фази пожара, обе криве почињу са вредношћу од $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нумеричка крива је релативно блиска параметарској кривој. Динамички процеси пожара су у највећој мери условљени количином и особиним горивог материјала. Геометрија и димензије отвора не само да контролише доток свежег ваздуха, већ утиче и на одвођење продуката сагоревања и топлоте из простора, што има директан утицај на задржавање и расподелу температуре унутар затвореног простора.

Максималне вредности температуре параметарске и нумеричке криве су следеће:

- Параметарска крива: Максимална температура пожара од $376\text{ }^{\circ}\text{C}$ достиже се у 298 s.
- Нумеричка крива: Максимална температура пожара од $404\text{ }^{\circ}\text{C}$ достиже се у 779 s.

За нумеричку криву потребно је више времена да достигне свој максимум, при чему тај максимум премашује максималну температуру параметарске криве за 7.45%.

Током фазе развоја пожара, нумеричка крива предвиђа динамику пожара користећи експерименталне податке калориметријских мерења, запремину унутрашњег простора (односа дужине и ширине, 1:1) и концентрације кисеоника у простору. Повећање интензитета сагоревања и пад нивоа кисеоника утичу на модел тако што он уводи ограничења и симулира прелазак у услове где је пожар контролисан вентилацијом.

Параметарска крива описује стандардизовани ток развоја пожара који има експоненцијални раст, али при томе не узима у обзир утицај вентилације током пожара, што доводи до значајних разлика у резултатима.

Процентуална разлика у времену између нумеричке пожарне криве у односу на параметарску криву пожара, у условима где је развој пожара ограничен вентилацијом за средње вредности опсега ВФ = 0.1 – 0.75, приказана је на слици 7.2.



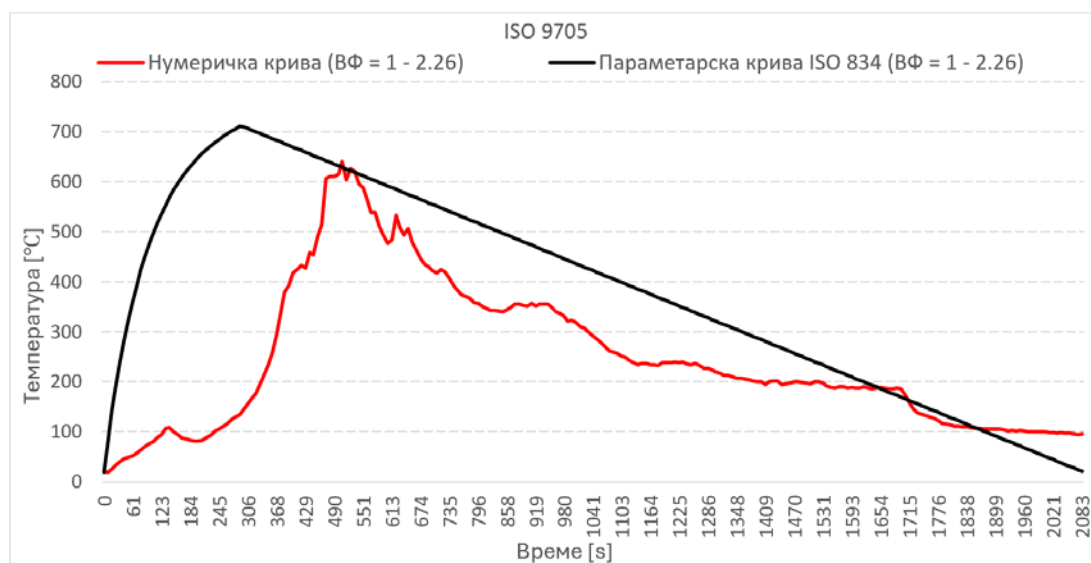
Слика 7.2 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором за средњу вредност, ВФ = 0.1 – 0.75

График који приказује процентуалне разлике у времену током трајања пожара указује на значајна одступања током фазе развоја пожара, при чему та одступања премашују 65%. Највеће разлике се јављају у временском интервалу између 250 s и 290 s, при чему је средња температурна разлика 220 °C.

Параметарска крива у фази стишавања пожара има значајно мање вредности од нумеричке криве, у временском интервалу од 744 s до 3080 s, при чему је процентуална разлика око 25%. У свим фазама пожара изражена је дивергенција криве.

7.1.2 Пожар контролисан горивом материјом

Средње вредности нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве ISO 834, где је развој пожара контролисан горивом материјом и фактором вентилације ВФ = 1 – 2.26, приказане су на слици 7.3.



Слика 7.3 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива (ISO 834), пожар контролисан горивом материјом за средњу вредност, $ВФ = 1 - 2.26$

У почетној фази пожара, обе криве почињу са вредношћу од 20 °C. Геометрија и димензије отвора омогућавају ефикасно и равномерно одвођење топлоте из простора, што доводи до разлике развоја између температурних крива пожара.

Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 709 °C достиже се у 298 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 628 °C достиже се у 508 s.

У фази развоја пожара, параметарска крива описује стандардизовани ток развоја пожара са експоненцијалним растом. Нумеричка крива моделује стабилизацију развоја пожара и експоненцијални раст око 210 s, што указује да је динамика пожара ограничена само количином и карактеристикама гориве материје.

Параметарска крива и у фази стишавања има линеаран пад, док је фаза стишавања нумеричке криве мање предвидива, са уоченим флукуацијама након максимума.

Процентуална разлика нумеричке пожарне криве и параметарске криве при условима где је развој пожара контролисан горивом материјом за средњу вредност, $ВФ = 1 - 2.26$, приказана је на слици 7.4.



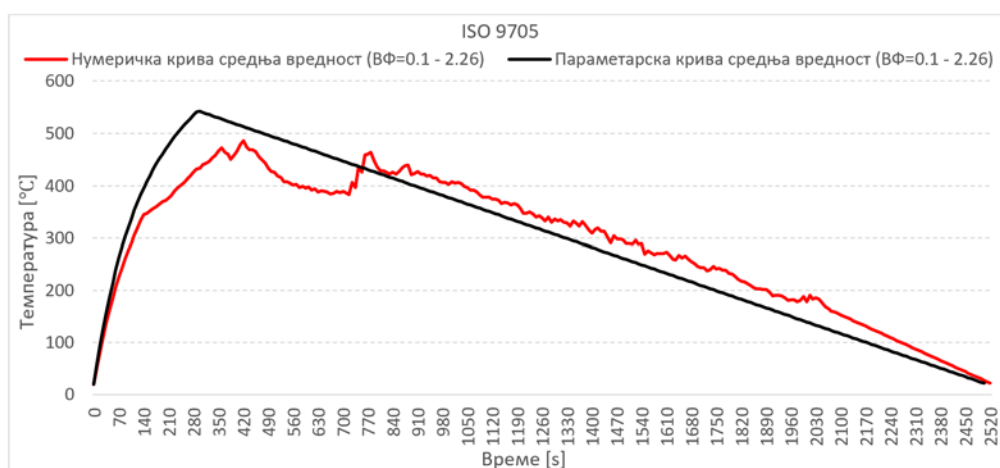
Слика 7.4 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожара контролисаног горивом материјом за средњу вредност $B\Phi = 1 - 2.26$

График процентуалне разлике указује на значајна одступања током фазе развоја пожара, са разликама које премашују 650%. Највећа одступања уочена су у временском интервалу између 210 s и 220 s, при чему је температурна разлика 568 °C. Са друге стране, конвергенција између параметарске и нумеричке криве запажа се током фазе стишавања у интервалу од 516 s до 561 s, као и од 1663 s до 1863 s.

У фази развоја и развијеној фази пожара је изражена дивергенција, док се у фази стишавања уочава релативна конвергенција приказаних кривих.

7.1.3 Пожар за све услове вентилације

Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива за све услове вентилације, тј. за $B\Phi = 0.1 - 2.26$, модела ISO 9705, приказане су на слици 7.5.



Слика 7.5 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве (ISO 834), пожара контролисаног горивом материјом или вентилацијом, $B\Phi = 0.1 - 2.26$

Обе криве полазе са почетном температуром од 20°C. Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 540 °C достиже се у 306 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 479 °C достиже се у 411 s.

Процентуална разлика нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве ISO 834, ВФ = 0.1 – 2.26, приказана је на слици 7.6.



Слика 7.6 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), за средњу вредност, ВФ = 0.1 – 2.26

График процентуалне разлике указује на одступања у свим фазама пожара. Уочене разлике износе приближно 20%, а највећа одступања јављају се у временском интервалу између 228 s и 245 s, при чему температурна разлика износи око 100 °C.

7.1.4 Закључци на основу компаративне анализе

Иако параметарске криве нуде једноставност и применљивост у раним фазама пожара, истраживање показује да њихова ограничења проистичу из недовољне конзервативности у сценаријима пожара који су контролисани условима вентилације.

У сценаријима где развој пожара зависи од вентилационих фактора (ВФ = 0.1 – 0.75), параметарске криве не успевају да обезбеде конзервативна предвиђања. Конкретно, оне предвиђају у фази развоја пожара нижу максималну температуру за 28 °C (7.45%), као и до 20% ниже температуре у фази стишавања у поређењу са вредностима добијеним нумеричким кривама.

У сценаријима где је развој пожара доминантно одређен количином доступне гориве материје (ВФ = 1 – 2.26), разлика између нумеричке и параметарске криве је најизраженија. Параметарска крива достиже максималну температуру за 298 s до 709 °C,

у односу на нумеричку криву, која достиже свој максимум од 628 °C у 508 s. Ова разлика параметарске криве у односу на нумеричку криву у фази развоја пожара указује на варијацију температуре од 13% и краће време трајања фазе развоја до максималне температуре за 70%.

Средње вредности за све вентилационе факторе разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре до 540 °C за 306 s, што представља значајно одступање од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 479 °C после 411 s. Ове разлике указују на то да параметарски модел има тенденцију да прикаже краће време трајања фазе развоја пожара за 34% и већу максималну температуру од 5% у односу на нумеричку криву.

Основна запажања која пружа компаративна анализа су следећа:

- За пожаре контролисане вентилационим фактором, параметарска крива не пружа конзервативан приступ у односу на нумеричку криву и предвиђа мање вредности температуре у фази развоја 7.45% а у фази стишавања 20%.
- За пожаре контролисане горивом материјом параметарска крива пружа конзервативан приступ у односу на нумеричку криву и предвиђа већу максималну температуру од 13%.
- Нумеричке криве омогућавају прецизнија и свеобухватна предвиђања, уважавајући сложене интеракције између услова вентилације, гориве материје и геометрије простора.
- Нумеричке криве се ослањају на реалне податке и параметре, што омогућава бољи приказ реалног развоја пожара, укључујући фазе раста, развијену фазу и фазу стишавања.
- Нумеричке криве пружају увид у прелаз између пожара контролисаних горивом материјом и пожара који су контролисани условима вентилације.
- За разлику од параметарских кривих, које користе стандардизоване обрасце развоја пожара, нумеричке криве одражавају промене у реалном времену.

7.2 ISO 668:2020 HC 6 m модел

7.2.1 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор $ВФ = 0.53$

Облик и вредности нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, за овај модел и вентилациони фактор, $ВФ = 0.53$ приказани су на слици 7.7.



Слика 7.7 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$

У почетној фази пожара, обе криве почињу са вредношћу од 20 °C, нумеричка крива је релативно блиска параметарској кривој. Пошто геометрија и димензије отвора контролишу доток свежег ваздуха и регулишу и одвођење топлоте из простора, то има директан утицај на задржавање и расподелу температуре унутар затвореног простора.

Максималне вредности температуре параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 218 °C достиже се у 146 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 393 °C достиже се у 191 s.

Максимум нумеричке криве премашује максималну температуру параметарске криве за 80.27%. Нумеричка крива предвиђа дуже трајање развијене фазе пожара и више вредности температуре простора у временском периоду између 219 s и 591 s, у односу на параметарску криву.

Фаза стишавања параметарске криве је линеарна, температура почиње да опада након достизања максимума. Опадање је постепено, и одражава идеализовану фазу хлађења каква се очекује у стандардизованим условима тестирања. Фаза стишавања нумеричке криве је мање предвидива, са уочљивим флукуацијама након максимума. Флукуације су манифестација утицаја запремине унутрашњег простора (односа дужине и ширине 2:1) и контролисане вентилације.

Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску криву при условима када је развој пожара контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$, приказана је на слици 7.8.

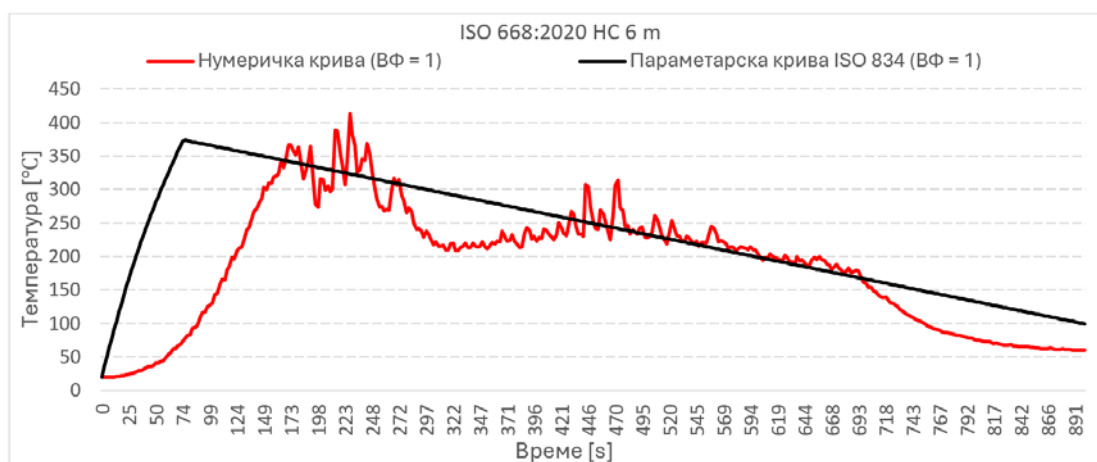


Слика 7.8 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$

На графику који приказује процентуалне разлике у времену током трајања пожара уочавају се значајна одступања током фазе развоја пожара, при чему разлике премашују 80%. Максимална разлика је у временском интервалу од 191 s до 208 s, при чему је средња температурна разлика 129°C . Параметарска крива у фазама развоја и стишавања пожара има значајно мање вредности од нумеричке криве, око 60%.

7.2.2 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор $ВФ = 1$

Облик и вредности нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, за вентилациони фактор, $ВФ = 1$ приказани су на слици 7.9.



Слика 7.9 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором $ВФ = 1$

У почетној фази пожара, обе пожарне криве полазе са почетном вредношћу од 20°C. И у овом случају, геометрија и димензије отвора омогућавају ефикасно и равномерно одвођење топлоте из простора, што доводи до разлике развоја између температурних крива пожара. Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 373 °C достиже се у 76 s.

б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 413 °C достиже се у 227 s.

У фази развоја пожара, параметарска крива описује стандардизовани ток развоја пожара са експоненцијалним растом. Нумеричка крива такође има експоненцијални раст користећи експерименталне податке калориметријских мерења, за запремину унутрашњег простора односа дужине и ширине 2:1 и концентрације кисеоника у простору.

Обе криве прелазе у фазу стишавања одмах након достизања својих максимума. Параметарска крива прати линеарни пад температуре. Фаза стишавања нумеричке криве манифестује флукуације и неуједначено хлађење.

Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску криву при условима где је развој пожара контролисан вентилацијом, фактор ВФ = 1 приказана је на слици 7.10.



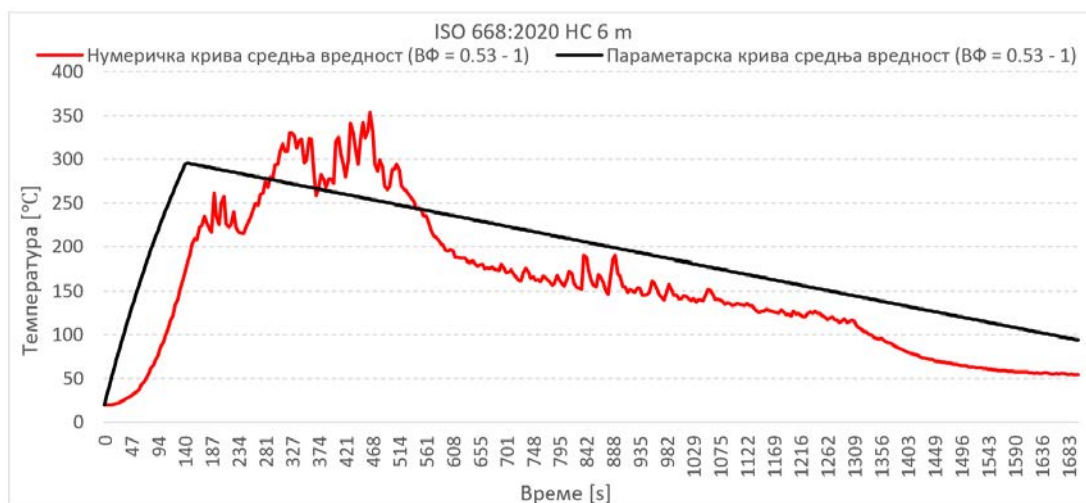
Слика 7.10 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором ВФ = 1

На графику који приказује процентуалне разлике виде се значајна одступања током фазе развоја пожара, при чему разлике премашују 600%. Највећа разлика је у временском интервалу од 30 s до 60 s, при чему је средња температурна разлика 237°C. Дивергенција је уочљива током фазе раста, при чему нумеричка крива достиже каснији

максимум. Конвергенција се дешава када обе криве улазе у фазу стишавања, постепено се усклађују, и на тај начин одражава сличне обрасце стишавања пожара током времена.

7.2.3 Пожар дефинисан за све услове вентилације

Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива за све услове вентилације, тј. за $ВФ = 0.1 - 1$, за модел ISO 668_2020 HC 6 m, приказане су на слици 7.11.



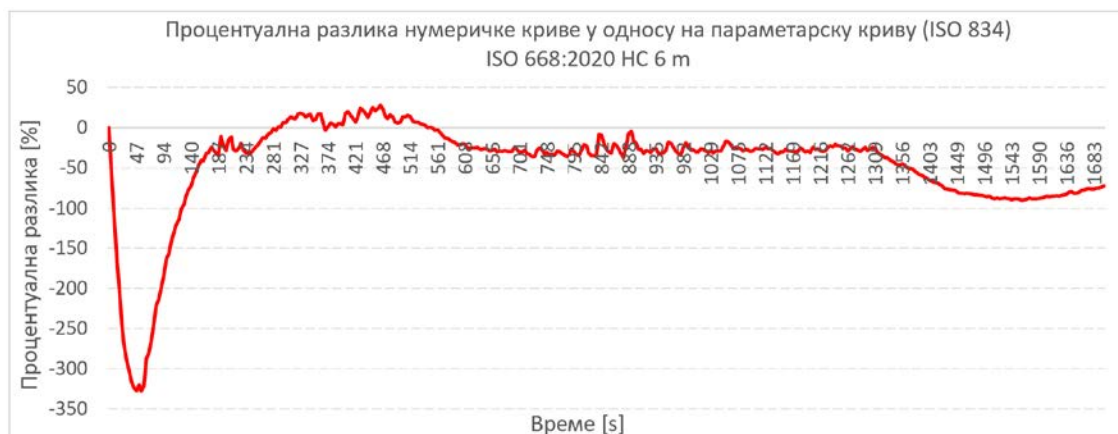
Слика 7.11 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве пожара контролисан вентилационим фактором $ВФ = 0.53 - 1$.

Обе криве крећу од почетне температуре која износи 20 °C.

Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 295°C достиже се у 149 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 353°C достиже се у 463 s.

Процентуална разлика у условима вентилације, $ВФ = 0.53 - 1$, нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве приказана је на слици 7.12.



Слика 7.12 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), за средњу вредност, $ВФ = 0.53 - 1$

График процентуалне разлике указује на одступања током фазе развоја пожара, при чему разлике износе око 320%. Највећа разлике се појављују у временском интервалу од 30 s до 60 s, при чему средња температурна разлика износи 104 °C.

7.2.4 Закључци на основу компаративне анализе

У сценаријима за вентилациони фактор 0.53, параметарска крива предвиђа нижу максималну температуру за 175 °C (80.27%) од нумеричке криве, као и до 60% ниже температуре током фазе стишавања у поређењу са вредностима нумеричке криве.

У сценаријима за вентилациони фактор 1, разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре за 76 s до 373 °C, што је различито од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 413°C након 227 s. Ове разлике указују на то да параметарски модел има тенденцију да прикаже краће трајање фазе развоја пожара за 199% и мање вредности интензитета пожара за 11%.

У сценаријима, средње вредности за све вентилационе факторе разлике између нумеричких и параметарских крива најизраженије су у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре до 295 °C за 149 s, што представља значајно одступање од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 353 °C за 463 s. Ове разлике указују на то да параметарски модел има тенденцију да прикаже краће трајање фазе развоја пожара за 211% а мање вредности интензитета пожара за 20%, што може довести до мање поузданих процена ризика од пожара.

Основна запажања која пружа компаративна анализа су следећа:

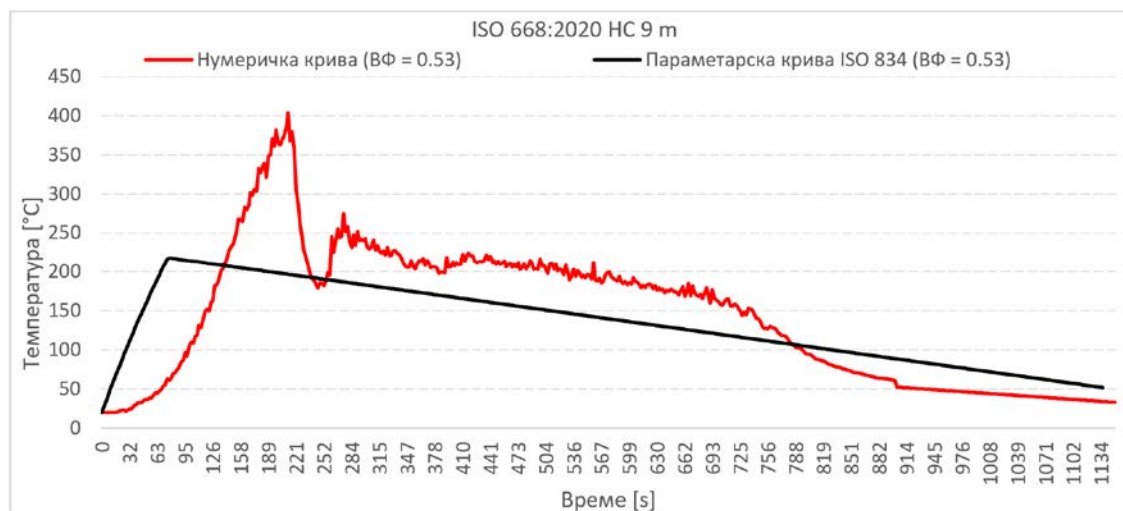
- Параметарска крива не пружа конзервативан приступ развоју пожара у односу на нумеричку криву, без обзира да ли се ради о пожару контролисаном вентилацијом или горивом материјом.
- Током фазе развоја пожара, процентуалне разлике између кривих достижу и преко 320%.
- Нумеричка крива илуструје прецизније праћење динамике пожара, док параметарска крива показује тенденцију задржавања више температуре и након што дође до сагоревања преко 80% гориве материје.
- Када је пожар контролисан условима вентилације, за геометријске облике затвореног простора где је дужина у односу на ширину 2:1, у фази развоја параметарска крива предвиђа температуру простора мању за 80% а у фази стишавања мању за 60%, у односу на нумеричку криву.

- Нумеричка крива одражава реални развој пожара, што је од значаја за процену дугорочних ефеката пожара.

7.3 ISO 668:2020 HC 9 m модел

7.3.1 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор $ВФ = 0.53$

Облик и вредности нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, за овај модел и за вентилациони фактор, $ВФ = 0.53$ приказани су на слици 7.13.



Слика 7.13 Нумеричка пожарна крива и параметарску пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$

У почетној фази пожара пожарне криве полазе са почетном вредношћу од $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Максималне вредности температуре параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од $219\text{ }^{\circ}\text{C}$ достиже се у 81 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од $403\text{ }^{\circ}\text{C}$ достиже се у 212 s.

Нумеричка крива симулира развој пожара, користећи експерименталне калориметријске податке, геометрију простора и доступност кисеоника, при чему њен максимум премашује максималну температуру параметарске криве за 84.02%.

У фази развоја нумеричка крива показује виши пораст температуре простора у дужем временском периоду, између 135 s и 794 s, у односу на параметарску криву.

Фаза стишавања параметарске криве је линеарна, температура почиње да опада након достизања максимума. Фаза стишавања нумеричке криве показује смањену предвидљивост, при чему је појачан интензитет пожара резултат утицаја запремине унутрашњег простора, одређеног односом дужине и ширине који износи 3:1, као и контролисане вентилације.

Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску криву при условима где је развој пожара контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$, приказана је на слици 7.14.



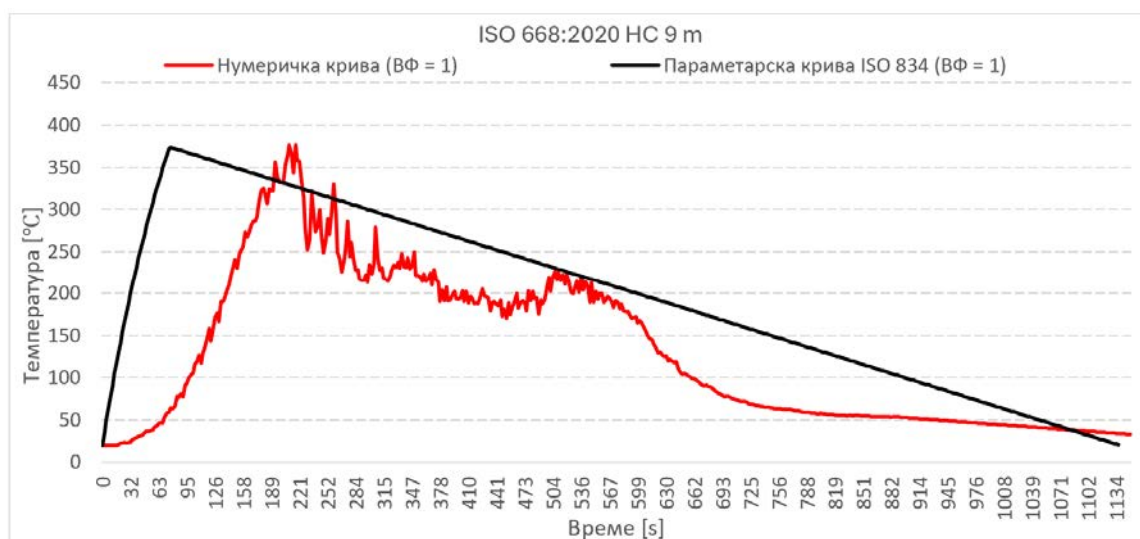
Слика 7.14 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором $ВФ = 0.53$

График процентуалне разлике показује значајна одступања током фазе развоја пожара, при чему разлике премашују 100%. Максимална разлика је у временском интервалу од 196 s до 218 s, при чему је средња температурна разлика 172 °C.

Параметарска крива у фази развоја пожара има значајно мање вредности од нумеричке криве, око 100%, а током фазе стишавања 40%.

7.3.2 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор $ВФ = 1$

Облик и вредности нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, за вентилациони фактор, $ВФ = 1$ приказани су на слици 7.15.



Слика 7.15 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором $ВФ = 1$

Као и претходним случајевима, у почетној фази пожара обе пожарне криве полазе са почетном вредношћу од 20 °C.

Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 371 °C достиже се у 83 s.

б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 375 °C достиже се у 216 s.

У фази развоја пожара, параметарска крива описује стандардизовани ток развоја пожара са експоненцијалним растом. Нумеричка крива такође има експоненцијални раст користећи експерименталне податке калориметријских мерења, за запремину унутрашњег простора односа дужине и ширине 3:1 и концентрације кисеоника у простору.

Обе криве прелазе у фазу стишавања одмах након достизања својих максимума. Фаза стишавања нумеричке криве манифестује флукутације. Параметарска крива прати линеарни пад температуре.

Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску криву при условима када је развој пожара контролисан вентилацијом, фактор ВФ = 1, приказана је на слици 7.16.



Слика 7.16 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву, пожар контролисан вентилационим фактором ВФ = 1

Са слике су приметна значајна одступања током фазе развоја пожара, и те разлике премашују 700%. Највећа разлика је у интервалу од 20 s до 160 s, при чему средња температурна разлика износи 320 °C. Дивергенција је уочљива током фазе раста, при чему нумеричка крива достиже каснији максимум. Конвергенција се дешава када обе криве улазе у фазу стишавања, постепено се усклађују, и одражавају сличне обрасце стишавања.

7.3.3 Пожар дефинисан за све услове вентилације

Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива за све услове вентилације, тј. за $ВФ = 0.1 - 1$, за модел ISO 668_2020 HC 9 m, приказане су на слици 7.17.



Слика 7.17 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, пожара контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53 - 1$

Обе криве, полазе са почетном температуром од 20 °C. Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 294 °C достиже се у 83 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 377 °C достиже се у 216 s.

Процентуална разлика у условима вентилације, $ВФ = 0.53 - 1$, нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву приказана је на слици 7.18.



Слика 7.18 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), за средњу вредност, $ВФ = 0.53 - 1$

Са графика се виде одступања током фазе развоја пожара, при чему она износе око 500%. Највећа разлике се појављују у временском интервалу од 20 s до 120 s, када разлика средње температуре износи 230 °C.

7.3.4 Закључци на основу компаративне анализе

У сценаријима вентилационог фактора 0.53, параметарска крива предвиђа максималну температура нижу за 184 °C (84%) од нумеричке криве, као и до 40% ниже температуре у фази стишавања у поређењу са вредностима нумеричке криве.

У сценаријима вентилационог фактора 1, разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре до 371°C за 83 s, што се значајно разликује од нумеричке криве која достиже свој максимум од 375°C након 216 s. Ове разлике указују на то да параметарски модел има тенденцију да прикаже краће трајање фазе развоја пожара за 160% а мање вредности интензитета пожара за 1%.

У свим сценаријима, за све вентилационе факторе, средње вредности разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре до 294 °C за 83 s, што значајно одступа од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 377 °C након 216 s. Ове разлике указују на то да параметарска крива има тенденцију да прикаже краће трајање фазе развоја пожара за 160%, а мање вредности интензитета пожара за 28%, што може довести до мање поузданих процена ризика.

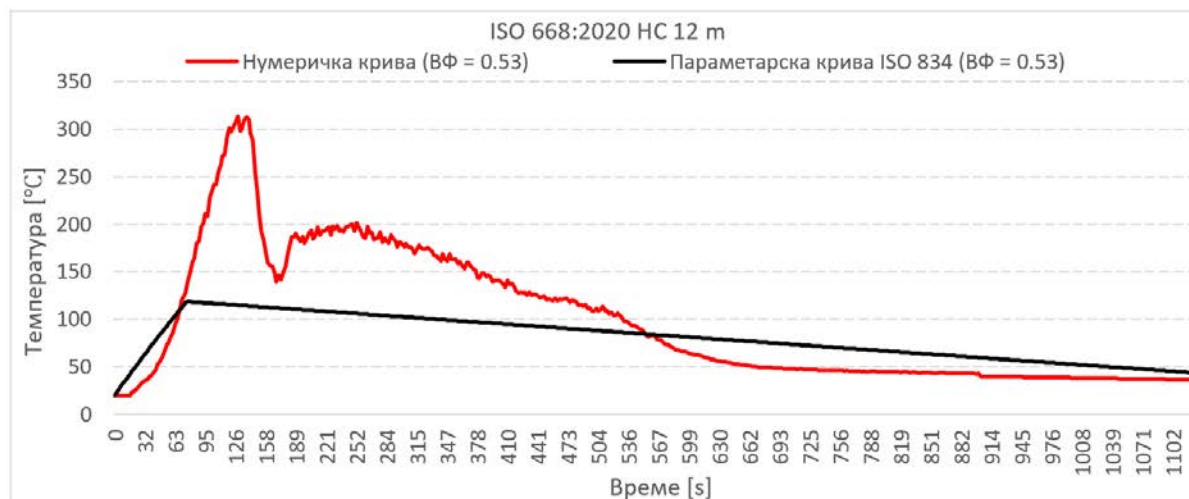
Основна запажања која пружа компаративна анализа су следећа:

- Параметарска крива не пружа конзервативан приступ развоју пожара у односу на нумеричку криву, без обзира да ли се ради о пожару контролисаном вентилацијом или горивом материјом.
- Током фазе развоја пожара процентуалне разлике између кривих достижу и преко 500% а у фази стишавања 50%.
- Када је пожар контролисан вентилацијом, за геометријске облике затвореног простора где је дужина у односу на ширину 3:1, у фази развоја параметарска крива предвиђа температуру мању за 84%, и у фази стишавања мању за 40% у односу на нумеричку криву.
- Нумеричка крива одражава реалан развој пожара, што је од значаја за процену дугорочних ефеката пожара.

7.4 ISO 668:2020 HC 12 m модел

7.4.1 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор $ВФ = 0.53$

Облик и вредности нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, за овај модел и за вентилациони фактор $ВФ = 0.53$, приказани су на слици 7.19.



Слика 7.19 Нумеричка пожарна крива и параметарску пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$

У почетној фази пожара обе пожарне криве полазе са почетном вредношћу од 20 °C.

Максималне вредности температуре параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 115 °C достиже се у 72 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 314 °C достиже се у 137 s.

Нумеричка крива симулира развој пожара, користећи експерименталне калориметријске податке, геометрију простора и доступност кисеоника, при чему њен максимум премашује максималну температуру параметарске криве за 173%.

У фази развоја нумеричка крива показује већи пораст температуре простора у дужем временском периоду, између 79 s и 563 s, у односу на параметарску криву.

Фаза стишавања параметарске криве је линеарна, температура почиње да опада након достизања максимума. Фаза стишавања интензитета нумеричке криве показује смањену предвидљивост, при чему је појачан интензитет пожара резултат утицаја запремине унутрашњег простора, одређеног односом дужине и ширине који износи 4:1, као и контролисане вентилације.

Процентуална разлика у времену трајања нумеричке пожарне криве у односу на параметарску криву при условима где је развој пожара контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$, приказана је на слици 7.20.



Слика 7.20 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ИСО 834), пожар контролисан вентилационим фактором, ВФ = 0.53

График процентуалне разлике показује значајна одступања током фазе развоја пожара, при чему разлике премашују 160%. Максимална разлика је у временском интервалу од 110 s до 151 s, при чему је средња температурна разлика 183°C.

Параметарска крива у фази развоја има значајно мање вредности од нумеричке криве, око 160%, а током фазе стишавања 60%.

7.4.2 Пожар контролисан вентилацијом – вентилациони фактор ВФ = 1

Облик и вредности нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, за вентилациони фактор, ВФ = 1 приказани су на слици 7.21.



Слика 7.21 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором ВФ = 1

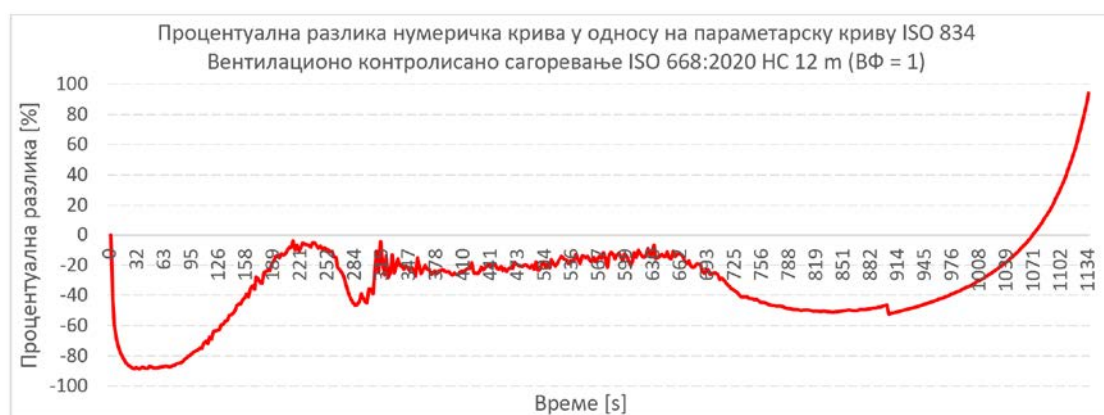
У почетној фази пожара, почетна вредност температуре износи $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за обе пожарне криве.

Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од $371\text{ }^{\circ}\text{C}$ достиже се у 83 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од $314\text{ }^{\circ}\text{C}$ достиже се у 212 s.

У фази развоја пожара, параметарска крива описује стандардизовани ток развоја пожара са експоненцијалним растом. Нумеричка крива такође има експоненцијални раст користећи експерименталне податке калориметријских мерења, за запремину унутрашњег простора односа дужине и ширине 4:1. Обе криве прелазе у фазу стишавања одмах након достизања својих максимума. Фаза стишавања нумеричке криве манифестује флукуације. Параметарска крива прати линеарни пад температуре.

Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску криву када је развој пожара контролисан вентилацијом, $ВФ = 1$ приказана је на слици 7.22.



Слика 7.22 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву, пожар контролисан вентилационим фактором $ВФ = 1$

График процентуалне разлике у времену показује значајна одступања током фазе развоја пожара, при чему разлике премашују 80%. Највећа разлика је у временском интервалу од 20 s до 160 s, при чему је средња температурна разлика $279\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дивергенција је уочљива током фазе раста и стишавања.

7.4.3 Пожар дефинисан за све услове вентилације

Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива за све услове вентилације, тј. за $ВФ = 0.53 - 1$, за модел ISO 668_2020 HC 12 m, приказане су на слици 7.23.



Слика 7.23 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, пожара контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53 - 1$

Обе криве полазе са почетном температуром од 20°C . Максималне вредности параметарске и нумеричке криве су следеће:

- а) Параметарска крива: Максимална температура пожара од 245°C достиже се у 83 s.
- б) Нумеричка крива: Максимална температура пожара од 255°C достиже се у 212 s.

Процентуална разлика у условима вентилације, $ВФ = 0.53 - 1$, нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву приказана је на слици 7.24.



Слика 7.24 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву, за средњу вредност $ВФ = 0.53 - 1$

График процентуалне разлике у времену показује одступања током фазе развоја пожара, при чему разлике износе око 75%. Највеће разлике појављују се у временском интервалу од 16 s до 59 s, средња температурна разлика износи 99°C .

7.4.4 Закључци на основу компаративне анализе

У сценаријима за вентилациони фактор 0.53, параметарска крива предвиђа нижу максималну температуру за 199 °C (173%) од нумеричке криве, као и до 60% ниже температуре у фази стишавања у поређењу са вредностима нумеричке криве.

У сценаријима за вентилациони фактор 1, разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре до 371°C за 83 s, што се значајно разликује од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 314°C након 212 s. Ове разлике указују на то да параметарски крива има тенденцију да прикаже краће трајање фазе развоја пожара за 155% и већи интензитет пожара за 18%.

У сценаријима средње вредности за све вентилационе факторе разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре до 245 °C за 83 s, што је значајно одступање од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 255 °C након 212 s. Ове разлике указују на то да параметарска крива има тенденцију да прикаже краће трајање фазе развоја пожара за 155% а мањи интензитет пожара за 4%, што може довести до мање поузданих процена ризика од пожара.

Основна запажања која пружа компаративна анализа су следећа:

- Параметарске криве не пружају конзервативан приступ у фази развоја за 173% и фази стишавања за 60% у односу на нумеричке криве за пожаре контролисане вентилацијом.
- Нумеричке криве илуструју прецизније праћење динамике пожара, док параметарске криве предвиђају веће вредности температуре и након што у пожару сагори горива материја испод 20% у односу на нумеричке криве.
- Када је пожар вентилационо контролисан, за геометријске облике затвореног простора где је дужина у односу на ширину 4:1, у фази развоја параметарска крива предвиђа температуру мању за 160% и у фази стишавања мању за 60%, у односу на нумеричку криву.
- Нумеричка крива одражава реалан развој пожара, што је од значаја за процену дугорочних ефеката пожара.

7.5 Нове пожарне криве дефинисане на основу перформанси - PBFC

Применом PBD и компаративне анализе пројектоване су нове пожарне криве, за све претходно анализиране моделе и приказане на сликама које следе. Нове пожарне криве за све услове вентилације дефинисане су на основу перформанси (PBFC), и дата су одговарајућа образложења.

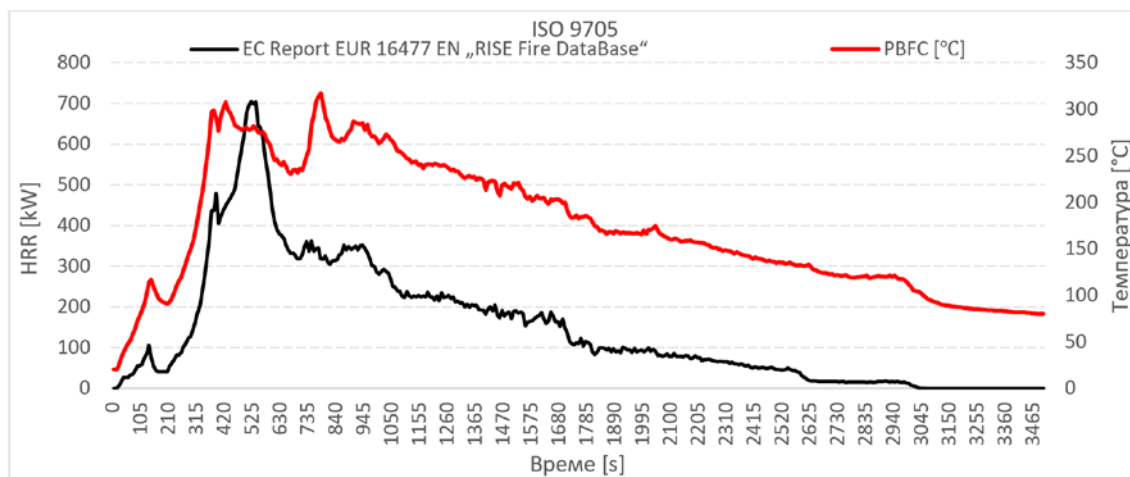
7.5.1 Нова пожарна крива за модел ISO 9705

Закључци на основу компаративне анализе и основна запажања за ISO 9705 модел су следећи:

- У сценаријима где је развој пожара контролисан вентилационим фактором параметарске криве предвиђају нижу максималну температуру од нумеричких кривих за 28°C (7.45%), као и до 20% мање температуре у фази стишавања у поређењу са нумеричким кривама.
- У сценаријима где је развој пожара доминантно одређен количином доступне гориве материје, разлика између нумеричке и параметарске криве је најизраженија. Параметарска крива достиже максималну температуру од 709 °C за 298 s, у односу на нумеричку криву, која достиже свој максимум од 628 °C у 508 s. Ова разлика у времену и температури указује на варијацију од 13% а за температуру краће трајање фазе развоја пожара до максималне температуре за 70%, што може довести до мање поузданих процена ризика од пожара.
- За пожаре контролисане горивом материјом, параметарска крива пружа конзервативан приступ у односу на нумеричку криву, док нумеричка крива даје реални увид у динамику пожара.
- За пожаре контролисане вентилационим фактором, параметарска крива не пружа конзервативан приступ у односу на нумеричку криву и предвиђа мање вредности температуре у простору.
- Нумеричке криве омогућавају прецизнија и свеобухватна предвиђања, уважавајући сложене интеракције између услова вентилације, гориве материје и геометрије простора.
- Нумеричке криве се ослањају на реалне податке и параметре, што омогућава бољи приказ реалног развоја пожара, укључујући фазе раста, развијене фазе и стишавања.
- Нумеричке криве пружају увид у прелаз између пожара контролисаних горивом материјом и пожара који су контролисани условима вентилације.

- За разлику од параметарских кривих, које користе стандардизоване обрасце развоја пожара, нумеричке криве одражавају промене у реалном времену.

Применом PBD и компаративне анализе пројектована је нова пожарна крива на основу перформанси (PBFC), за све услове вентилације ISO 9705 модела, слика 7.25.



Слика 7.25 Дефинисана HRR крива и PBFC крива за све услове вентилације ISO 9705 модела

PBFC показује значајне предности у предвиђању реалних услова пожара и практично интегрисање експерименталних HRR података.

Главне предности PBFC су следеће:

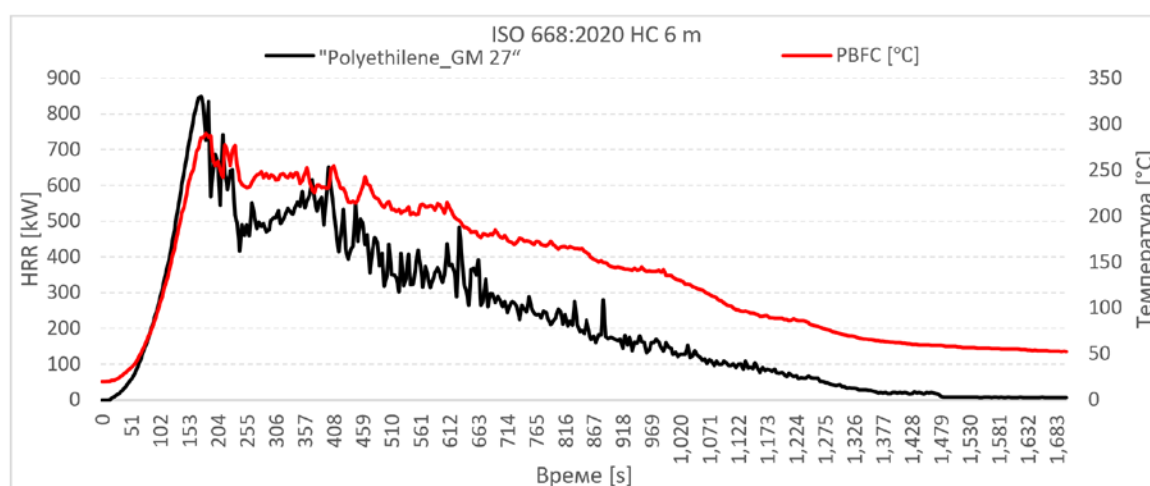
- Интеграција услова вентилације и геометрије простора:* PBFC оптимално рефлектују утицај геометрије простора и вентилације на развој HRR и трајање пожара, чиме се добијају реални пожарни сценарији. За ISO 9705 модел PBFC предвиђа дуже трајање HRR за 1329 s (75%), у односу на експерименталне податке.
- Прецизно моделирање температуре:* PBFC за ISO 9705 модел предвиђа трајање развијене фазе пожара је од 376 s до 936 s с максималном температуром од 313 °C. Током развијене фазе пожара средња вредност температуре је 277 °C. PBFC обезбеђује континуирану и доследну процену температуре током свих фаза пожара за све услове вентилације, што је кључно за пројектовање мера безбедности од пожара.
- Динамички одзив:* PBFC прецизно моделује осцилације током фазе раста и стишавања, као и преласка из фазе контролисаног горивом материјом у фазу пожара који је контролисан вентилацијом.

7.5.2 Нова пожарна крива за модел ISO 668:2020 HC 6 m

Закључци на основу компаративне анализе и основна запажања за ISO 668:2020 HC 6 m модел су следећи:

- У сценаријима за вентилациони фактор 0.53, параметарска крива предвиђа нижу максималну температуру за 175 °C (80.27%) од нумеричке криве, као и до 60% ниже температуре током фазе стишавања у поређењу са вредностима нумеричке криве.
- У сценаријима за вентилациони фактор 1, параметарска крива илуструје брз раст температуре за 76 s до 373 °C, што је различито од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 413°C након 227 s. Параметарске криве ISO 834 предвиђају краће трајање фазе развоја пожара за 199% а мању вредност интензитета пожара за 11%, што може довести до мање поузданих процена ризика од пожара.
- Када је пожар вентилационо контролисан, за геометријске облике затвореног простора где је дужина у односу на ширину 2:1, у фази развоја пожара параметарска крива предвиђа температуру простора мању за 80% и фазу стишавања мању за 60% у односу на нумеричку криву.
- У фази развоја и стишавања пожара, параметарска крива не пружа конзервативан приступ за пожаре контролисане вентилацијом у односу на нумеричку криву.
- Током фазе развоја пожара, процентуалне разлике између параметарске и нумеричке криве достижу и преко 320%.
- Нумеричка крива илуструје прецизније праћење динамике пожара, док параметарска крива даје приказ веће температуре и након што у пожару дође до сагоревања преко 80% гориве материје.

Применом PBD и компаративне анализе пројектована је нова пожарна крива на основу перформанси (PBFC), за све услове вентилације ISO 668:2020 HC 6 m, слика 7.26.



Слика 7.26 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 668_2020 HC 6 m модела

PBFC приступ оптимално одражава утицај просторне геометрије и услова вентилације на развој HRR, како је примењено у моделу ISO 688:2020 HC 6 m. У поређењу са референтним подацима, PBFC предвиђа дужи период сагоревања од 1150 s, што представља повећање од 109%.

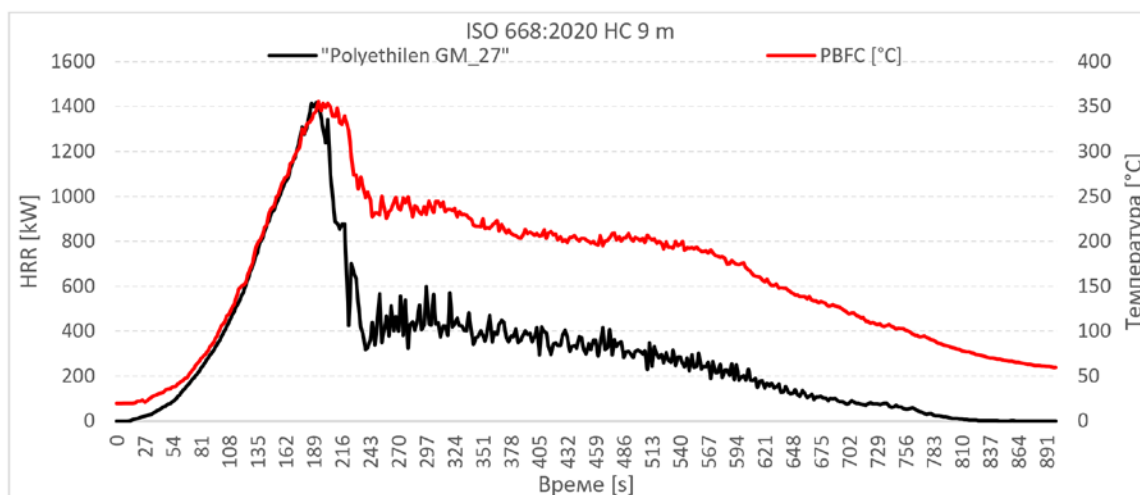
Додатно, методологија обезбеђује континуирану и конзистентну процену температурних профила током свих фаза пожара, укључујући предвиђања максималне температуре од 285 °C, без обзира на варијације у условима вентилације.

7.5.3 Нова пожарна крива за модел ISO 668:2020 HC 9 m

Закључци на основу компаративне анализе и основна запажања за ISO 668:2020 HC 9 m модел су следећи:

- У сценаријима за вентилациони фактор 0.53, параметарска крива предвиђа нижу максималну температуру за 184 °C (84%) од нумеричке криве, као и до 40% ниже температуре у фази стишавања у поређењу са вредностима нумеричке криве.
- У сценаријима за вентилациони фактор 1, разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре до 371°C за 83 s, што се значајно разликује од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 375°C након 216 s. Параметарске криве ISO 834 предвиђају већу брзину фазе развоја пожара за 160% а мању вредност интензитета пожара за 1%, у односу на нумеричку криву, што може довести до мање поузданих процена ризика од пожара.
- За геометријске облике затвореног простора где је дужина у односу на ширину 3:1, у фази развоја параметарска крива предвиђа температуру простора мању за 84%, и у фази стишавања мању за 40% у односу на нумеричке криве, у условима вентилационо контролисаних пожара.
- У фази развоја и стишавања пожара, параметарске криве не пружају конзервативан приступ за пожаре контролисане вентилацијом у односу на нумеричке криве.
- Током фазе развоја пожара, процентуалне разлике између кривих достижу и преко 500% а у фази стишавања 50%.
- Нумеричка крива одражава реалан развој пожара, што је од значаја за процену дугорочних ефеката пожара.

Применом PBD и компаративне анализе пројектована је пожарна крива на основу перформанси (PBFC), за све услове вентилације ISO 688:2020 HC 9 m модела, слика 7.27.



Слика 7.27 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 668_2020 HC 9 m модела

PBFC показује значајне предности у предвиђању реалних услова пожара и практично интегрисање експерименталних HRR података. PBFC оптимално рефлектује утицај геометрије простора и вентилације на развој HRR и предвиђа дуже трајање сагоревања за 850 s (55%). Такође, обезбеђује континуирану и доследну процену температуре током свих фаза пожара, са предвиђањем максималне температуре пожара од 350 °C за све услове вентилације.

7.5.4 Нова пожарна крива за модел ISO 668:2020 HC 12 m

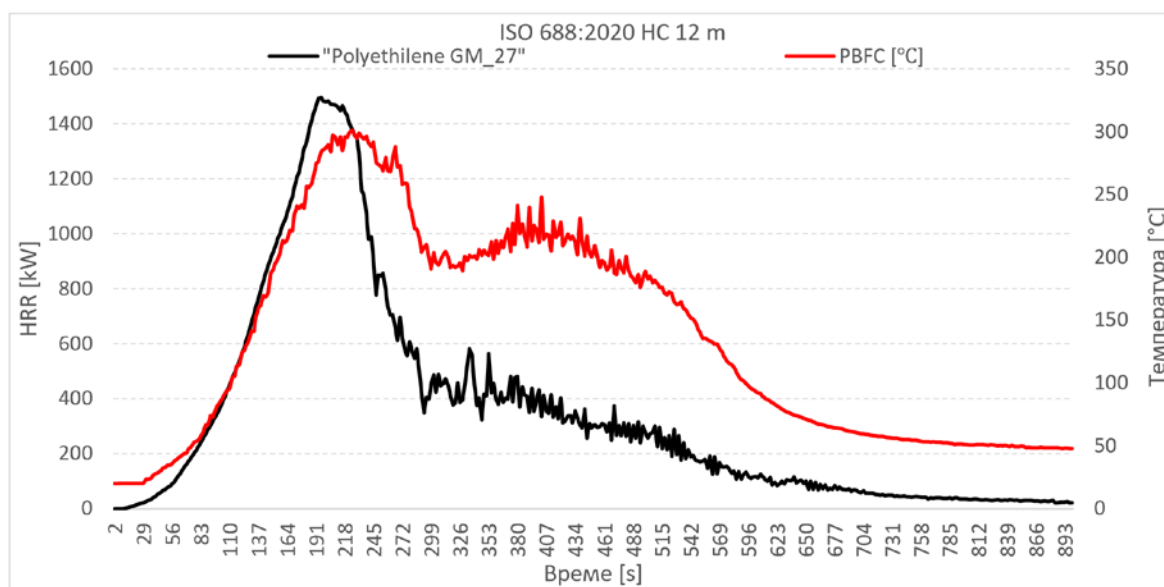
Закључци на основу компаративне анализе и основна запажања за ISO 668:2020 HC 12 m модел су следећи:

- У сценаријима за вентилациони фактор 0.53, параметарска крива у фази развоја предвиђа нижу максималну температура за 199 °C (173%) од нумеричке криве, као и до 60% ниже температуре у фази стишавања у поређењу са вредностима нумеричке криве.
- У сценаријима за вентилациони фактор 1, разлике између нумеричких и параметарских кривих су најизраженије у фази развоја пожара. Параметарска крива илуструје брз раст температуре за 83 s до 371°C, што се значајно разликује од нумеричке криве, која достиже свој максимум од 314°C након 212 s. Параметарске криве ISO 834 предвиђају краће трајање фазе развоја за 155% и већу вредност интензитета пожара за 18%, у односу на нумеричку криву.
- За геометријске облике затвореног простора где је дужина у односу на ширину 4:1, у фази развоја параметарска крива предвиђа температуру простора мању за 160%, и у

фази стишавања мању за 60%, у односу на нумеричке криве када је пожар вентилационо контролисан.

- У фази развоја и стишавања пожара, параметарске криве не пружају конзервативан приступ за пожаре контролисане вентилацијом у односу на нумеричке криве.
- Нумеричке криве илуструју прецизније праћење динамике пожара, док параметарске криве прецењују температуре и након што дође до сагоревања преко 80% гориве материје у односу на нумеричке криве.

Применом PBD и компаративне анализе пројектована је пожарна крива на основу перформанси (PBFC), за све услове вентилације ISO 688:2020 HC 12 m модела, слика 7.28.

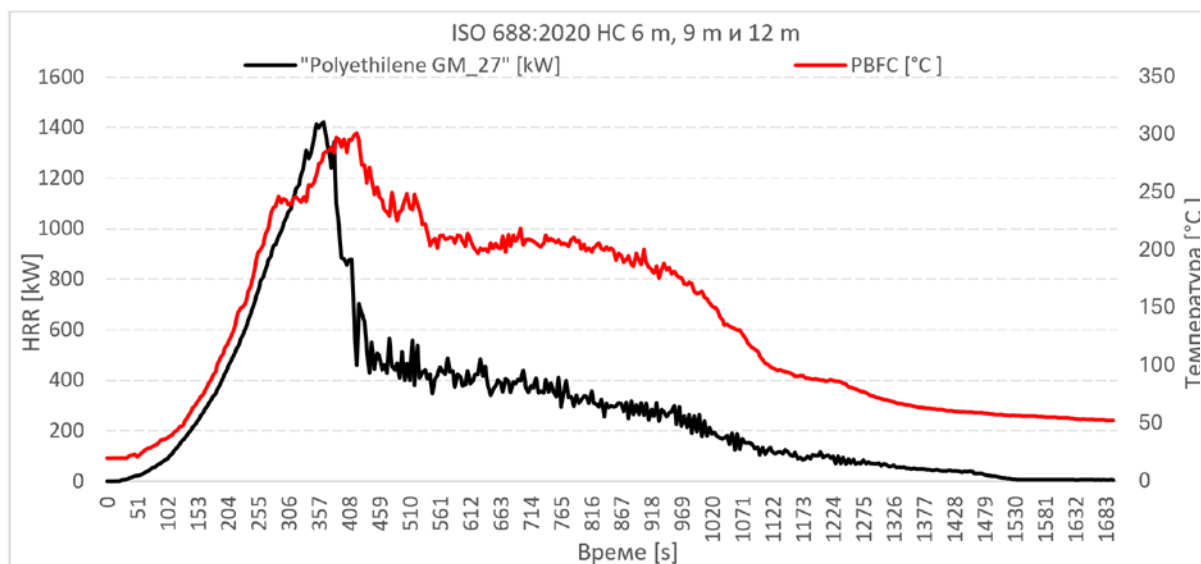


Слика 7.28 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 688_2020 HC 12 m модела

PBFC прецизно одражава утицај геометријских карактеристика простора и параметара вентилације на динамику развоја HRR. Резултати указују на продужено трајање сагоревања за 450 секунди (81%) у поређењу са референтним вредностима HRR за Polyethylene GM_27. Поред тога, PBFC модел обезбеђује континуирано и доследно праћење температурних профила током свих фаза пожара, укључујући предвиђање максималне температуре пожара од 297 °C, независно од различитих услова вентилације.

7.5.5 Нова пожарна крива за све моделе ISO 688:2020 HC 6 m, 9 m и 12 m

Примена PBFC омогућава пројектовање криве за све моделе ISO 688:2020 HC 6 m, 9 m и 12 m у свим условима вентилације, слика 7.29.



Слика 7.29 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 688:2020 HC 6 m, 9 m и 12 m модела

PBFC показује значајне предности у моделовању пожара у затвореним просторима различите геометрије (ISO 688:2020 HC 6 m, 9 m и 12 m) и под различитим условима вентилације. Овај приступ омогућава прецизнију симулацију реалних услова пожара и интеграцију експерименталних података о HRR-а. PBFC оптимално одражава утицај геометрије простора и вентилационих параметара на развој HRR, при чему предвиђа продужено трајање сагоревања за 1150 s (109%). Уз то, обезбеђује континуирану и конзистентну процену температурних профила током свих фаза пожара, укључујући предвиђање максималне температуре од 300 °C, без обзира на услове вентилације.

8. Закључна разматрања

Сценарији развоја пожара који се традиционално користе за прорачун отпорности грађевинских конструкција на дејство пожара базирани су на методима који подразумевају анализу и екстраполацију постојећих експерименталних података о количини ослобођене топлоте и других параметара пожара под контролисаним условима. Такође, традиционални тестови подразумевају и добру циркулацију гасова и релативно хомогену расподелу температуре у простору у коме се одиграва пожар. Ови услови се разликују од услова који су присутни код реалних пожара, тако да је истраживање било усмерено на анализу развоја пожара у (полу)затвореном простору у реалним условима, као и на формирање одговарајућег модела који прецизније описује утицај вентилације и геометрије простора на развој пожара.

Резултати који су наведени у докторској дисертацији, анализа и дискусија резултата који су добијени појединачно за сваки од модела који су коришћени у нумеричким симулацијама, као и компаративна анализа збирних резултата на нивоу коришћених модела, показали су оправданост предмета истраживања које је било усмерено на анализу развоја пожара у условима променљиве геометрије простора у коме се пожар одиграва и променљивих услова вентилације.

Валидација је изведена кроз поређење резултата нумеричких симулација са експерименталним подацима CBUF (EC Report EUR 16477 EN), калориметријских база података RISE *Fire Database* и PyroSim *DataBase*. Посебна пажња је посвећена анализи релативних разлика између предвиђања нумеричког модела и експерименталних мерења, коришћењем методологије коју је развила NRC, као и препорука ASTM E1355-12 *Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models*¹ стандарда за евалуацију детерминистичких модела пожара. Израчунати показатељи поузданости свих симулација показали су да нумерички модели адекватно одражавају реалне услове и динамику развоја пожара у затвореним просторима.

У тексту који следи наведена су образложења којима се потврђује реализација постављених циљева истраживања, као и чињенице које указују на научни и практични допринос овог истраживања.

¹ ASTM E1355-12 „Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models“, је стандард који је развио American Society for Testing and Materials (ASTM), а односи се на поступке валидације и верификације детерминистичких модела пожара. Овај стандард поставља оквир за систематску процену тачности, поузданости и применљивости нумеричких модела који се користе у анализи пожарне динамике.

Циљеви истраживања који су постављени у потпуности су реализовани. За сваки од задатих циљева истраживања наведено је образложење које је засновано на резултатима нумеричких симулација приказаним у раду:

1. Дефинисани су **параметри пожара у затвореном простору** на такав начин да они репрезентују реалне услове у којима се пожар одвија и то:
 - о Нумеричке симулације су моделоване применом стандардизованих димензија затворених просторија у складу са стандардима ISO 9705:2016 и ISO 668:2020 (конфигурације HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m), док су особине конструктивних материјала дефинисане према стандардима Eurocode 2 и EN 206, чиме је осигурана веродостојност термичког понашања материјала.
 - о HRR криве су засноване на анализи експерименталних података из CBUF и калориметријске базе RISE Fire Database, као и стандардизованих материјала у PyroSim бази података. Процес моделирања HRR криве изведен је у складу са принципом дефинисане величине пожара, с циљем верификације способности нумеричког модела да репродукује експериментално добијене вредности HRR при идентичним условима доступности кисеоника. Након иницијалне калибрације, извршена је детаљна временска анализа HRR криве, чиме је потврђена конзистентност нумеричког модела са реалним сценаријима развоја пожара. Оваква методологија је обезбедила валидност и тачност симулација, омогућавајући примену у процени понашања пожара у затвореним просторима.
 - о Модификација вентилационог отвора и анализа утицаја вентилационог фактора на развој пожара спроведена је у условима различитих режима размене ваздуха, укључујући сценарије ограничене и слободне вентилације. Овакав приступ омогућио је прецизно нумеричко моделирање интеракције струјања ваздуха и продуката пожара, чиме је створена могућност предвиђања концентрације кисеоника у затвореном простору и његовог утицаја на развој HRR криве.
 - о Релативна разлика између резултата нумеричких симулација и података експерименталних мерења (EC Report EUR 16477 EN и PyroSim *DataBase* за Polyethylene GM_27) износи од 0.003 до 0.007, што потврђује тачност и поузданост нумеричких модела за предвиђања понашања пожара у реалним условима према NRC критеријима.
 - о Моделирање механизма преноса топлоте, термичког мешања, концентрације продуката сагоревања и кисеоника интегрисано је у нумеричке симулације ради

предвиђања температурне расподеле у затвореном простору и развоја HRR криве у реалним условима.

2. Прецизно је дефинисан **утицај вентилације и промене услова вентилације** у реалном времену на поједине фазе развоја пожара:

- О Анализа утицаја вентилације на фазе развоја пожара модела према стандарду ISO 9705:2016 показује значајне разлике развоја пожара у зависности од вентилационог фактора и карактеристика вентилационих отвора. Анализирано је осам (8) нумеричких симулација са различитим димензијама и локацијама вентилационих отвора.

Резултати корелационе анализе показали су високу позитивну корелацију између вентилационог фактора и HRR, с вредношћу коефицијента корелације од 0.865, што указује на значајан утицај вентилационог фактора на динамику сагоревања и развој HRR крива.

Резултати регресионе анализе показују статистички значајну повезаност, која у овом случају износи $P = 0.005$, при чему се потврђује хипотеза условљености развоја HRR криве од геометрије простора и вентилационог фактора.

Вентилационо контролисан пожар ($\varphi \geq 1$, ВФ = 0.1 – 0.75):

- Фазе развоја HRR кривих нису у складу са експерименталним подацима CBUF и RISE Fire DataBase референтне вредности. HRR криве имају спорији развој и дуже трајање до 54% за ВФ = 0.57, и преко 104% у сценаријима са ВФ = 0.1 – 0.18, у односу на референтну вредност (1716 s). Максималне вредности HRR крива мање су од 9.73% за ВФ = 0.75, и до 44% за ВФ = 0.1, у односу на референтну вредност (1366 kW).
- У условима еквивалентног односа $\varphi \geq 1$, HRR криве показују изражене неправилности и значајне пулсирајуће флукуације. Овај феномен је резултат конвективног преноса топлоте између улазног хладног ваздуха и излазних продуката сагоревања, што доводи до њиховог интерактивног мешања и повећања концентрације продуката сагоревања у улазном ваздушном току. Ово узрокује додатно успоравање оксидације, чиме се продужава укупна фаза стишавања пожара. Додатно, смањење вентилационог фактора појачава амплитуду и учесталост флукуација, што утиче на динамику процеса сагоревања.

- Резултати анализе указују да се калориметријски подаци који се примењују за процену пожарног оптерећења не могу директно применити на сагоревање у затвореним просторима, где вентилациони фактор и геометрија простора условљавају сагоревање које је контролисано природном вентилацијом.
- Сценарији са еквивалентним односом $\phi > 1$, доследно предвиђају већу просечну максималну температуру за вентилационе отворе на страни која је најудаљенија од места сагоревања, тј. на супротној страни модела од места сагоревања.

Пожар контролисан горивом материјом ($\phi < 1$, ВФ = 1 – 2.26):

- У условима када је еквивалентни однос $\phi < 1$, развој HRR криве прати CBUF експерименталне податке и RISE Fire DataBase референтне вредности.
 - Максимална вредност HRR достиже или премашује RISE Fire DataBase референтну вредност. На пример, у сценарију SC_8 (ВФ = 2.26), HRRmax износи 1498.14 kW, што је 9.67% више у односу на референтну вредност.
- О На основу нумеричких симулација за ISO 668:2020 HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m моделе, анализирано је 54 сценарија са различитим димензијама и локацијама вентилационих отвора, као и динамичким променама вентилационог фактора током пожара. Симулације за средње вредности HRR, манифестују високу позитивну корелацију вентилационог фактора и HRR у вредностима које се крећу од 0.641 до 0.809.

Резултати регресионе анализе, показују статистички значајну повезаност која у нумеричким симулацијама износи од $P = 0.001$ до $P = 0.024$.

За вентилационе факторе у опсегу од ВФ = 0.53 до ВФ = 1 уочено је следеће:

- Средње вредности HRR током трајања развијене фазе (190 – 210 s) мање су од референтних вредности PyroSim DataBase Polyethylene_GM 27 (1500 kW):
 - I. ISO 668:2020 HC 6 m, од 5.87% за ВФ = 1, и до 82.53% за ВФ = 0.53.
 - II. ISO 668:2020 HC 9 m, од 2.73% за ВФ = 1, и до 23.67% за ВФ = 0.53.
 - III. ISO 668:2020 HC 12 m, 0.2% за ВФ = 1, и до 4% за ВФ = 0.53.
- Смањењем вентилационог фактора смањује се и вредност достигнуте HRR.
- Уочене су значајне пулсирајуће варијације у HRR кривама услед ограниченог снабдевања кисеоником у зони сагоревања.
 - Трајање пожара је дуже од референтних вредности PyroSim DataBase Polyethylene_GM 27 (550 s), у свим сценаријима:

- I. ISO 668:2020 HC 6 m, од 31% за ВФ = 1, и до 245% за ВФ = 0.53.
- II. ISO 668:2020 HC 9 m, од 30% за ВФ = 1, и до 143% за ВФ = 0.53.
- III. ISO 668:2020 HC 12 m, од 8% за ВФ = 1, и до 140% за ВФ = 0.53.

Смањењем вентилационог фактора продужава се трајање пожара.

- Локација вентилационог отвора на супротној страни од сагоревања узрокује дуже трајање сагоревања у поређењу са идентичним вентилационим отворима на странама ближим локацији сагоревања.
- Динамичке промене вентилације у реалним условима директно утичу на развој HRR кривих и динамику развоја пожара. Услед промене вентилационог фактора са 0.85 на 2.83 нумеричког модела ISO 668:2020 HC 9 m, SC_5, узроковало је промену HRR вредности са 1260 kW на 3677 kW (+145.13%) у интервалу од само неколико секунди.

3. Дефинисан је **утицај промене геометрије простора** на поједине фазе развоја пожара:

- o У свим нумеричким симулацијама за сценарије са и без преградног зида модела ISO 668:2020 HC 9 m, уочава се висока позитивна корелација између вентилационог фактора и HRR, са коефицијентом корелације од 0.73.
- o Нумеричке симулације са преградним зидом за ВФ = 0.85, манифестују значајну подударност са експерименталним подацима који су наведени у PyroSim *DataBase* за *Polyethylene_GM 27*.
- o Нумеричке симулације са преградним зидом имају мању средњу вредност HRR од референтне вредности која се креће до 28.13% и дуже трајање сагоревања, док је без преградног зида средња вредност HRR мања од референтне до 20.67%. Преградни зидови мењају динамику струјања ваздуха и топлотне енергије, што доводи до хетерогености температуре унутар простора у коме се одиграва пожар.
- o Присуство преградних зидова значајно утиче на спречавање *backdraft*-а. Током нумеричких симулација у складу с моделом ISO 668:2020 HC 9 m, за сценарија SC_7 (без преградног зида) и SC_8 (са преградним зидом), у сценарију SC_7 је дошло до наглог сагоревања запаљивих гасова, док је у SC_8 овај феномен изостао.

4. Дефинисано је **одступање криве развоја пожара** при промени степена вентилације за различите геометрије простора у односу на стандардну параметарску пожарну криву, и то на следећи начин:

о ISO 9705 модел:

- Процентуалне разлике у времену указује на одступања у свим фазама пожара. Уочене разлике износе приближно 20%, а највећа одступања јављају се у временском интервалу између 228 s и 245 s, при чему температурна разлика износи око 100 °C.
- За пожаре контролисане вентилационим фактором, параметарска крива не пружа конзервативан приступ у односу на нумеричку криву и предвиђа мање вредности температуре у фази раста за 7.45%, а у фази стишавања 20%.

о ISO 668:2020 HC 6 m, HC 9 m и HC 12 m модели:

- За затворене просторе чија је геометрија таква да су дужина и ширина у односу 2:1, параметарска крива у фази раста предвиђа температуру простора мању за 80%, а у фази стишавања мању за 60%, у односу на нумеричку криву када је пожар вентилационо контролисан.
- Процентуалне разлике у времену ISO 668:2020 HC 6 m модела указује на одступања током фазе раста пожара, при чему разлике износе око 320%. Највећа разлике се појављују у временском интервалу од 30 s до 60 s, и средња температурна разлика износи 104 °C.
- За затворене просторе чија је геометрија таква да су дужина и ширина у односу 3:1, параметарска крива у фази раста предвиђа температуру простора мању за 84%, а у фази стишавања мању за 40%, у односу на нумеричке криве, у условима вентилационо контролисаних пожара.
- Процентуалне разлике у времену ISO 668:2020 HC 9 m током фазе раста пожара износе око 500%. Највећа разлике се појављују у временском интервалу од 20 s до 120 s, разлика средње температуре је 230 °C.
- За затворене просторе чија је геометрија таква да су дужина и ширина у односу 4:1, параметарска крива у фази раста предвиђа температуру простора мању за 160%, а у фази стишавања мању за 60%, у односу на нумеричке криве када је пожар вентилационо контролисан.
- Процентуалне разлике у времену ISO 668:2020 HC 9 m показује одступања током фазе раста пожара, при чему разлике износе око 75%. Највеће разлике појављују се у временском интервалу од 16 s до 59 s, а средња температурна разлика износи 99 °C.

5. Дефинисане су **нове криве развоја пожара** у условима промене вентилације и геометрије простора чије су основне карактеристике:

- о *Интеграција услова вентилације и геометрије простора*: PBFC оптимално рефлектују утицај геометрије простора и вентилације на развој HRR и трајање пожара, чиме се добијају реални пожарни сценарији.
- о *Прецизно моделирање температуре*: PBFC обезбеђује континуирану и доследну процену температуре током свих фаза пожара за све услове вентилације.
- о *Динамички одзив*: PBFC прецизно моделује осцилације током фазе раста и стишавања, као и преласка из фазе у којој је пожар контролисан горивом материјом у фазу у којој је он контролисан условима вентилације.

Примењене статистичке анализе одиграле су значајну улогу не само у дескриптивној обради добијених резултата кроз квантитативну и квалитативну анализу, већ и у њиховој детаљној верификацији и валидацији. Ове анализе су омогућиле процену поузданости нумеричких симулација и њихову конзистентност са експерименталним подацима. Применом корелационих и регресионих анализа утврђена је статистички значајна повезаност између вентилационог фактора, геометрије простора и HRR криве. Валидација резултата спроведена је поређењем вредности HRR криве са референтним експерименталним подацима у складу с критеријумима које је поставила NRC.

Реализацијом постављених циљева истраживања дошло се до нових сазнања у области заштите од пожара у теоријском и практичном смислу.

У **теоријском смислу** пружен је допринос у објашњавању процеса сагоревања и развоја пожара у затвореном простору када се пожар дешава у просторијама са преградама и препрекама. На овај закључак указују следеће чињенице:

- о Истраживањем је показано да стандардне пожарне криве *не пружају довољну тачност* за одређене димензије простора, посебно у условима вентилационо контролисаних пожара.
- о Утврђено је да механизам интеракције продуката сагоревања и улазног ваздуха, односно механизам конвективног преноса топлоте, *доводи до неправилности развоја HRR кривих* и појаве пулсирајућих флукуација, *при условима ограничене вентилације*.
- о Дефинисана су *одступања стандардне параметарске криве* у фазама пожара и утицаја динамичких промена вентилације на ток сагоревања у реалним условима.

- Утврђен је *утицај геометрије простора* – анализа је потврдила да преградни зидови и отвори могу значајно изменити температурну расподелу и ток сагоревања. Утврђено је да однос димензија простора (однос дужине према ширини) значајно мења HRR криву, при чему већи однос (3:1 и 4:1) доводи до већих одступања у фази раста и дуже фазе стишавања пожара.
- *Дефинисане су нове криве пожара* које одражавају утицај промене услова вентилације и геометрије простора на динамику пожара у реалним условима.

Нова сазнања до којих се дошло, а која имају **практичан значај** су следећа:

- Утврђен је *утицај односа димензија простора на развој пожара*. Смањењем односа дужина:ширина простора са 3:1 на 2:1 температура у фази раста смањује се за 80%.
- *Спречавање феномена backdraft-a* – Преградни зидови у простору могу значајно смањити ризик од експлозивног сагоревања гасова и заштиту ватрогасно-спасилачких јединица током уласка у зону пожара.
- *Локација вентилационих отвора* у односу на однос димензија простора значајно *утиче на брзину развоја пожара* – отвори на супротној страни од локације пожара продужавају трајање сагоревања.

Истраживање које је приказано у раду омогућава предвиђање развоја пожара у затвореном простору у зависности од природне вентилације и геометрије простора. Иако је истраживање засновано на релативно једноставним моделима и ограничено на утицај само ова два фактора на развој пожара, истраживање је поставило основе за даља истраживања.

Правци даљих истраживања на основу добијених резултата и стечених сазнања, као и проширење поља истраживања, могу да се дефинишу на следећи начин:

- Верификација нових пожарних кривих кроз експериментална тестирања у контролисаним условима.
- Истраживање утицаја преградних зидова и других структурно-грађевинских препрека на динамику пожара и потенцијалне опасности за ватрогасце-спасиоце током интервенције гашења пожара.
- Унапређење нумеричких модела пожара интеграцијом вештачке интелигенције у моделе предвиђања развоја пожара, системе детекције и контроле пожара у затвореним просторима.

- О На основу претходно наведеног, даље напоре у овој области треба усмерити на аутоматизоване системе предвиђања развоја пожара засноване на вештачкој интелигенцији, који би у реалном времену анализирали пожарне сценарије и оптимизовали доношење одлука у погледу евакуације и гашење пожара.

Показано је да адекватна примена нумеричке симулације може да прикаже реалне услове у којима се одвија пожар и самим тим да омогући предвиђање утицаја вентилације и геометрије простора на развој пожара у (полу)затвореном простору. Захваљујући флексибилности коју пружа симулација путем коришћења великог опсега граничних услова и могућности моделирања много детаљнијих и сложенијих геометрија простора у коме се одвија пожар него што се може постићи коришћењем алгебарских или зонских модела, значајно се смањују трошкови експерименталних истраживања и олакшава се анализа пожара чиме се повећава безбедност од пожара и смањују трошкови изградње објеката.

Препознат је простор за даља истраживања на унапређењу постојећих модела, на начин да се изврши интеграција нумеричких симулација, експерименталних мерења и метода вештачке интелигенције у јединствен оквир за анализу и предвиђање развоја пожара у затвореним просторима.

Аутор се искрено нада да ће резултати и сазнања до којих се дошло током овог истраживања, бар делом бити од користи у даљим истраживањима у овој области.

ЛИТЕРАТУРА

1. AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations. AIAA G-077-1998, Reston, VA, USA, (1998)
2. An Encyclopedia Britannica, Merriam Webster Dictionary, <https://www.merriam-webster.com>
3. Andersson, Ö. Experiment! Wiley, Chichester, UK. DOI: 10.1002/9781118311059, (2012)
4. Asimakopoulou EK, Chotzoglou K, Kolaitis DI, Founti MA., Characteristics of Externally Venting Flames and Their Effect on the Façade: A Detailed Experimental Study. Fire Technology 52:2043–69, (2016)
5. ASTM E1355 – 12, ASTM Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models, doi: 10.1520/E1355-12, (2012)
6. Axelsson J, Andersson P, Lönnemark A, et al. Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the room/corner test and the SBI. SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden, (2001)
7. Babrauskas V, Williamson RB., The historical basis of fire resistance testing — part I. Fire Technology 14:184–194, (1978)
8. Babrauskas V, Williamson RB., The historical basis of fire resistance testing — part II. Fire Technology 14:304–316, (1978)
9. Barnett, C. R., Replacing International Temperature-Time Curves with BDF Curve, Fire Safety Journal, 42 4, pp. 321-327, (2007)
10. Blagojević M., Pešić D., A New Curve for Temperature-Time Relationship, Thermal Science, Vol. 15, No. 2, pp. 339-352, (2011)
11. BS ISO 834-2: 2019 Fire Resistance Tests — Elements of Building Construction — Part 2: Requirements and Recommendations for Measuring Furnace Exposure on Test Samples, © The British Standards Institution, (2024).
12. CEN European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
13. Chorlton B., Forrest B., Gales J., Weckman B., Performance of type X gypsum board on timber to non standard fire exposure. Fire Mater, (2020)

14. Chow WK, Zou GW., Correlation equations on fire-induced air flow rates through doorway derived by large eddy simulation, *Building and Environment* 40:897–906. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.09.010, (2005)
15. Constable S., Comparative standard fireproof floor tests of the New York Building Department, *Eng Rec* 337–340; 359–363; 382–387; 402–440, (1897)
16. Cox, G., Chitty R., Kumar, S., Fire modelling and the King's cross fire investigation, *Fire Saf J*, 15., 1989.
17. Delichatsios MA, Silcock GWH, Liu X, Delichatsios M, Lee YP., Mass pyrolysis rates and excess pyrolysate in fully developed enclosure fires, *Fire Safety Journal*, 39:1–21, (2004)
18. Drysdale D., *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; (2011).
19. Drysdale D., *An introduction to fire dynamics*, Wiley, Hoboken, (2011)
20. Edin E., Ström M., „Comparing a full-scale test with FDS, FireFOAM, McCaffrey & Eurocode, Luleå University of Technology, (2019).
21. EN 1991-1-2024 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: Action on structure exposed to fire, CEN European Committee for Standardization, (2024).
22. Gales J., Chorlton B., Jeanneret C., The Historical Narrative of the Standard Temperature – Time Heating Curve for Structures, *Fire Technology*, doi:10.1007/s10694-020-01040-7. (2020).
23. Gillie M., Usmani A., Rotter J., A structural analysis of the first cardington test, *J Constr Steel Res* 57:581–601, (2001)
24. Hamins A, McGrattan K., *Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 2: Experimental Uncertainty*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA. (2007)
25. Hamins A., Maranghides A., Johnsson R., Donnelly M., Yang J., Mulholland G., Anleitner RL., *Report of Experimental Results for the International Fire Model Benchmarking and Validation Exercise # 3*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001, (2006)
26. He Y., Jamieson C., Jeary A., Wang J., Effect of Computation Domain on Simulation of Small Compartment Fires, *Fire Safety Science, Proceedings of the Ninth International Symposium* pg. 1365-1376, (2008)

27. Hertz K., Assessment of performance-based requirements for structural design, *Fire Saf. Sci.* 315–325., doi: 10.3801/IAFSS.FSS.8-315. (2005)
28. Höst, M., Regnell, B. and Runeson, P. Att genomföra examensarbete, Studentlitteratur, Lund, Sweden (2006).
29. Hurley, Morgan J.; Rosenbaum, Eric R., Performance-Based Fire Safety Design, (2018)
30. Hurley, Morgan J.; Rosenbaum, Eric R., Performance-Based Fire Safety Design, Taylor and Francis Group, LLC, (2015)
31. Ingason H., Wickström U., van Hees P., The Gothenburg Discotheque Fire Investigation. In: 9th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering, Interscience Communications, Edinburgh, Scotland 2:965–976, (2001)
32. Ingberg S., Fire tests of building columns, NFPA Q 253–260, (1916)
33. ISO 668:2020 Series 1, Container shipping. Classification, dimensions and calculations
34. ISO, Fire Safety Engineering, Guidance for Use of Fire Zone Models ISO/TS 13447, (2013).
35. Jason F., Jansen H., Evolution of the fire dynamics simulator, *Fire Protection Engineering*, Issue # 75, (2017)
36. Jessie, H., Distribution Curves for Interior Furnishings on CO₂, CO, HCN, Soot and Heat of Combustion, Department of Civil and Natural Resources Engineering: Christchurch, New Zealand, (2011).
37. Johansson N., Fire Dynamics in Multi-Room Compartment Fires, Doctoral Thesis, Lund University, (2015)
38. Johansson N., Wahlqvist J., van Hees P., Detection of a Typical Arson Fire Scenario - ComparISON Between Experiments and Simulations. *Journal of Fire Protection Engineering* 22:23-44. (2012)
39. Johansson, N., Anderson, J., McNamee, R., and Pelo, C.: A Round Robin of Fire Modelling for Performance-Based Design, *Fire and Materials*, (2020)
40. Johansson, N., Numerical experiments - a research method in fire science. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, (2013)
41. Johansson, N., Numerical experiments and compartment fires, *Fire Science Reviews*, 3 (1), doi: 10.1186/s40038-014-0002-2, (2014)
42. Jowsey A., Torero J., Lane B., Heat Transfer to the Structure during the Fire: Dalmarnock Fire Tests Exp. Model, School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, (2007).

43. Karlsson, Björn; Quintiere, James G., Enclosure Fire Dynamics, Second Edition, CRC Press, (2022)
44. Kawagoe K., Fire Behavior in Rooms, Report 27. Tokyo, Japan 1958.
45. Krasny, J., Babrauskas, V., Parker, W., Fire Behaviours of Upholstered Furniture and Mattresses; NoYes Publications: Norwich, UK, (2001).
46. Lange D., Sjöström J., Schmid J., A comparISON of the conditions in a fire resistance furnace when testing combustible and non-combustible construction, Fire Technol 56:1621–1654, (2020)
47. Lee YP, Delichatsios MA, Silcock GWH., Heat fluxes and flame heights in façades from fires in enclosures of varying geometry. Proceedings of the Combustion Institute, 31 II:2521–8. (2007)
48. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G., Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions, Fire Saf J 95:42–50, (2018)
49. M. Faraday, The chemical history of a candle, Chicago Review Pr, First edition, October (1988)
50. Malkočević D., Blagojević M., Enclosure Fire with Time-Dependent Changes in Ventilation Factor and Geometry—Field Model Parameters Analysis, doi: 10.3390/app13084813, Appl. Sci. (2023)
51. Malkočević D., Past, present and future for enclosure fire field model, Working and Living Environmental Protection Vol. 5, No 1, Facta Universitatis, (2022)
52. McCaffrey, N.J. and Rockett, J.A., Static Pressure Measurements of Enclosure Fires, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 82, (1977)
53. McGrattan K., McDermott R., Vanella M., Hostikka S., Floyd, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018- 1 (sixth edition), June (2022).
54. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Fire Dynamics Simulator, Sixth Edition, User Guide, National Institute of Standards and Technology Special Publication 1019, (2015)
55. McGrattan K., Miles S., Modeling Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD), pp. 1034 – 1066, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition, Springer New York Heidelberg Dordrecht London # Society of Fire Protection Engineers, (2016)
56. McGrattan, K. and Forney, G., Fire Dynamics Simulator: User's Manual (NISTIR 6469), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, (2000).

57. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., & Vanella, M. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology. (2019).
58. McGrattan, K.B., Peacock, R.D., and Overholt, K.J., Modelling Validity Validation of Fire Models Applied to Nuclear Power Plant Safety, Fire Technology, Vol. 52, No. 1, (2016).
59. Merci, Bart; Beji, Tarek., Fluid Mechanics Aspects of Fire and Smoke Dynamics in Enclosures (Second edition), CRC Press/Balkema, (2023)
60. Moinuddin, K, and Thomas, I.R., An experimental study of fire development in deep enclosures and a new HRR–time–position model for a deep enclosure based on ventilation factor, Fire and Materials, 33:157–185. doi: 10.1002/fam.986, (2009)
61. Moodie K., Jagger SF., The King’s Cross fire: Results and analysis from the scale model tests. Fire Safety Journal 18:83–103., doi: 10.1016/0379-7112(92)90049-I, (1992)
62. Morgan J. Hurley, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition, , Springer New York (2016)
63. N. Johansson., Multi Zone models bringing the gap between zone models and CFD models, SFPE Europe, Q3 – Issue 19, (2020).
64. Najafi D, Jolgar F, Dreisbach J., Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 1: Main report. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA, (2007)
65. NFPA 72, National Fire Alarm and Signaling Code, (2022)
66. Nils J., Enrico R., Rugiada S., Michele F., The use of multi-zone modelling for tunnel fire risk analysis, Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden, Report 3242, Lund, (2021).
67. Quintiere JG., Scaling applications in fire research, Fire Safety Journal 15:3–29., doi: 10.1016/0379-7112(89)90045-3. (1989)
68. Quintiere JG., The Use of Scale Modelling in Fire Safety Design & Investigation. In: 9th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Method, the Society of Fire Protection Engineers, Hong Kong, China, (2012)
69. Quintiere, J.G. and Wade, C.A., Compartment Fire Modeling, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed., Society of Fire Protection Engineers, Springer-Verlag, New York, (2016).
70. Robson, C., Real world research, 3rd Ed. Wiley, Chichester, UK. (2011)

71. Rockett JA., Fire Induced Gas Flow in an Enclosure. *Combustion Science and Technology* 12:165–75, (1976)
72. Ronald G. R., Howard R. B., The Equations of Motion for Thermally Driven Buoyant Flows, *Journal of research of the National Bureau of Standards Volume B3, No.3, May-June*, (1978).
73. Saber H.H, Kashef A., Bwalya A., Loughheed G. D. and M.A. Sultan, A numerical study on the effect of ventilation on fire development in a medium-sized residential room, IRC-RR-241, Institute for Research in Construction, Canada, (2008).
74. Simms DL, Hird D, Wraight HG., The temperature and duration of fires: Part I: Some experiments with models with restricted ventilation, *Fire Safety Science* 412:1, (1960)
75. Stern-Gottfried, J. et al., Experimental Review of the Homogeneous Temperature Assumption in Post-Flashover Compartment Fires, *Fire Safety Journal*, 45, 4, pp. 249-26, (2010)
76. Suzuki, K., Harada, K., & Tanaka, T., A multilayer Zone-model for predicting fire behavior in a single room, Gaithersburg, Maryland, USA: International Association for Fire Safety Science. (2003).
77. Svensson S., Patric Van H. and Johansson N., A Study of Reproducibility of a Full-scale Multi-Room Compartment Fire Experiment, *Fire Technology* 51(3):645 – 665, (2015)
78. Thomas P, Heselden A, Law M. Fully-developed Compartment Fires: Two Kinds of Behaviour, *Fire Research Station*, (1967).
79. Thomas PH, Heselden AJM., Fully developed fires in single compartments. A cooperative research programme of the conseil internationale du batiment, CIB Report No. 20, *Fire Research Note* 923, U.K., (1972).
80. Thomas PH., Studies of fires in buildings using models. *Research* 13:87, (1960)
81. Thomas, I.R, Bennetts, I.D., Fires in Enclosures with Single Ventilation Openings - Comparison of Long and Wide Enclosures, *Fire Safety Science-Proceedings of the Sixth International Symposium*, pp. 941-952, (1999)
82. Tilley N, Rauwoens P, Merci B., Verification of the accuracy of CFD simulations in small-scale tunnel and atrium fire configurations. *Fire Safety Journal* 46:186–193., doi: 10.1016/J.Firesaf.2011.01.007, (2011)
83. Van Hees P., Validation and Verification of Fire Models for Fire Safety Engineering. *Procedia Engineering* 62:154–168., doi: 10.1016/j.proengl.2013.08.052, (2013)

84. Vassart O., Zhao B., Cajot L.G., Robert F., Meyer U., Frangi A., Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design, Luxembourg: Publications Office of the European Union, (2014)
85. Walton W., Thomas P., Estimating temperatures in compartment fires, SFPE Handbook of Fire Protection, 4th edition, NFPA, Quincy, MA, (2008).
86. Wang Z., T. Zhang, X. Huang Numerical Modeling of Compartment Fire: Ventilation Characteristics and Limits of Kawagoe's Law, Fire Technology, doi: 10.1007/s10694-022-01218-1, (2022)
87. Wegrzynski W., Turkowski P., Roszkowski P., The discrepancies in energy balance in furnace testing, a bug or a feature? Fire Mater 44:311–322, (2019).
88. Wermiel SE John A., Roebling's Sons Co and Early concrete floors in New York city, 1890s–1910. In: Green T (ed) John A. Roebling: a bicentennial celebration of his birth 1806–2006 American Society of Civil Engineers, Reston, pp 137–150, (2007)
89. Woolson I., Miller R., Fire tests of floors in the United States. In: International Association for testing materials 6th congress, New York, (1912)
90. www.firemodelsurvey.com, Combustion Science & Engineering Inc., (2022). (u web)
91. www.ri.se/sv/vad-vi-gor/tjanster/rise-fire-database
92. Yeoh G. H., Yuen R. K. K., Chueng S. C. P., Kwok W. K., On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires, Build Environ, 38. (2003).
93. Yong Wang, Y., Burgess I., František W., Martin G., Performance-Based Fire Engineering of Structures (p. F), Taylor and Francis, (2013).
94. Yusuke, S., Tsutomu, N., Yoshikazu, D., Kazunori, H., An Application Method of Free Burn HRR Data to Room Fire Scenarios, Fire Saf. Sci., 11, 276–288, (2014)
95. Zhang X., Yang M., Wang J., He Y., Effects of Computational Domain on Numerical Simulation of Building Fires, Journal of Fire Protection Engineering pg. 225-251, (2010)
96. Zhao G., Beji T., Merci B., Application of FDS to Under-Ventilated Enclosure Fires with External Flaming, Fire Technology, (2015).

Списак слика

Слика 1.1 *Различите врсте студија и питања резултирати ће различите врсте знања и односа, репродуцирано према Anderssoni Ö*

Слика 1.2 *Принципи научне методологије рада*

Слика 1.3 *Илустрација експерименталног дизајна; инспирисано радом Höst, Regnell и Runeson (2006)*

Слика 1.4 *HRR – Разлика између мерења (пуна линија) и предикције модела (испрекидана линија) може бити у зависности о времену. У приказаном случају, разлике се мењају с временом (Слика је инспирисана радом Hamins A. и McGrattan K.)*

Слика 2.1 *Интеракција између гориве материје и околине током сагоревања у затвореном простору*

Слика 2.2 *HRR крива (четири фазе пожара: паљење, раст, пуни развој и стишавање)*

Слика 2.3 *Брза фаза раста, карактеристичан уски профил HRR*

Слика 2.4 *Спора фаза раста, карактеристичан широк профил HRR*

Слика 2.5 *Класификација пожара на основу брзине развоја, NFPA 72, National Fire Alarm and Signaling Code, edition 2022.*

Слика 2.6 *Кретање флуида кроз отвор затвореног простора*

Слика 2.7 *Идеализована HRR крива: промене током времена, HRR крива контролисана вентилацијом*

Слика 3.1 *Стандардна температурно – временска крива (ISO 834)*

Слика 3.2 *Илустрација параметарских кривих у односу на ISO 834 стандардну криву*

Слика 4.1 *Детерминистички модел: ручни прорачуни, зонски модел и рачунарска динамика флуида*

Слика 4.2 *Зонски модел*

Слика 4.3 *Проток флуида дуж ходника и вертикалних отвора*

Слика 4.4 *Општи концепт MLZ модела, преузето из публикације Suzuki и сар., 2004.*

Слика 4.5 *Илустрација MZ модела, представља затворени простор као апроксимацију тунела, визуализација помоћу MATLAB, преузето из публикације Nils J., Enrico R., Rugiada S., Michele F. 2021.*

Слика 4.6 *а) FDS 1: Модел сагоревања течности; б) FDS 6: Модел сагоревања течности (Извор:публикација Thanderhead Engineering, 2024.)*

Слика 5.1 *Модел у складу са стандардом ISO 9705:2016.*

Слика 5.2 *HRR крива - експеримент EC Report EUR 16477 EN, RISE Fire DataBase*

Слика 5.3 *Нумерички експеримент ISO 9705:2016: А, Б и Ц - зидови модела, Д - вентилациони отвор на зиду, локација термопарова и локација пожара*

Слика 5.4 *а) HRR крива експеримент - EC Report EUR 16477 EN, $\phi < 1$*

Слика 5.4 *б) FDS нумерички експеримент ISO 9705:2016 SC_8, $\phi < 1$.*

Слика 5.5 EC report EUR 16477 EN - HRR крива и HRR криве за $\varphi > 1$ за сценарија SC_1 – SC_5

Слика 5.6 EC report EUR 16477 EN HRR крива, HRR крива за сценарио SC_6 за $\varphi \geq 1$, и HRR криве за сценарија SC_7 – SC_8 за $\varphi < 1$.

Слика 5.7 Слика горе: Температура на геометријском отвору, мерена од дна на 0.1 m, на средини 0.2 m и 0.1 m од врха отвора. Слика доле - Масени проток улазне ваздушне струје испод неутралне линије до зоне сагоревања, четири зоне мерења од отвора: растојања 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m и 2.1 m.

Слика 5.8 Слика горе - Температура на геометријском отвору, мерена од дна на 0.1 m, средина отвора на 1 m и 0.1 m од врха отвора. Слика доле - Масени проток улазне струје ваздуха испод неутралне линије до зоне сагоревања, четири зоне мерења од отвора: 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m и 2.1 m.

Слика 5.9 Сценарио SC_1, масени проток улазне и излазне ваздушне струје на геометријском отвору, вентилациони фактор, $B\Phi = 0.10$. Сценарио SC_8, масени проток улазне и излазне ваздушне струје на геометријском отвору, вентилациони фактор, $B\Phi = 2.26$

Слика 5.10 Сценарио SC_1, HRR крива у условима $B\Phi = 0.10$, $\varphi > 1$. Сценарио SC_8, HRR крива у условима $B\Phi = 2.26$, $\varphi < 1$.

Слика 5.11 Хоризонтална дистрибуција средње температурне вредности нумеричких модела ($\varphi > 1$) и ISO 9705:2016 SC_8 ($\varphi < 1$)

Слика 5.12 Корелациона анализа за сценарија SC_1 – SC_8 (вентилациони фактор – HRR)

Слика 5.13 HRR крива Polyethylene_GM 27, извор - Handbook of Fire Protection Engineering, 5 edition, табеле A.38 и A 39.

Слика 5.14 Нумерички експеримент ISO 668:2020 HC 6 m: локација термопарова, зидови модела (А, Б, Ц и Д) и локација пожара

Слика 5.15 Модел ISO 668:2020 HC 6 m, SC_1: Exp_1

Слика 5.16 „Polyethylene_GM 27“ HRR крива, извор: „Fire Engineering Handbook, 5 edition“, подаци табела A.38 и A39. Сценарио SC_1, HRR криве нумеричких експеримената 1, 2 и 3. у условима еквивалентног односа $\varphi > 1$

Слика 5.17 „Polyethylene_GM 27“, HRR крива, извор: „Fire Engineering Handbook, 5 edition“, подаци табеле A.38. Сценарио SC_4, HRR криве нумеричких експеримената 10, 11 и 12. у условима еквивалентног односа $\varphi > 1$

Слика 5.18 Хоризонтална дистрибуција средње температуре модела, сценарија SC_1 и SC_4

Слика 5.19 Корелациона анализа за сценарија SC_1 – SC_4

Слика 5.20 Нумерички експеримент ISO 668:2020 HC 9 m: локација TC, зидови модела (А, Б, Ц и Д) и локација сагоревања

Слика 5.21 „Polyethylene_GM 27“, HRR крива, „Fire Engineering Handbook, 5 edition“, подаци-табеле A.38 и A39. Сценарио SC_1, HRR криве нумеричких експеримената 1, 2 и 3. у условима еквивалентног односа $\varphi > 1$

Слика 5.22 Polyethylene_GM 27 - HRR крива, извор: *Fire Engineering Handbook*, 5 edition, табеле А.38.; Сценарио SC_4, HRR криве нумеричких експеримената 10, 11 и 12. у условима еквивалентног односа $\phi > 1$

Слика 5.23 Хоризонтална дистрибуција средње температуре у сценаријима SC_1 и SC_4

Слика 5.24 Корелациона анализа за сценарије SC_1 – SC_4

Слика 5.25 Нумерички експеримент ISO 668:2020 HC 12 т: локација TC, зидови модела (А, Б, Ц и Д) и локација сагоревања

Слика 5.26 Polyethylene_GM 27 HRR крива, извор *Fire Engineering Handbook*, 5 edition, табеле А.38 и А.39. HRR криве за сценарио SC_1, нумерички експерименти 1, 2 и 3. за еквивалентни однос $\phi > 1$

Слика 5.27 Polyethylene_GM 27 HRR крива, извор *Fire Engineering Handbook*, 5 edition, табеле А.38 и А.39. HRR криве за сценарио SC_4, нумерички експерименти 10, 11 и 12. за еквивалентни однос $\phi \geq 1$

Слика 5.28 Хоризонтална дистрибуција средње температуре за сценарио SC_1 и SC_4

Слика 5.29 Корелациона анализа за сценарија SC_1 – SC_4

Слика 6.1 3Д модел ISO 668:2020 HC 9 т, локација геометријских отвора, зидови модела (А, Б, Ц и Д), термопарови (TC), преградни зид и локација сагоревања

Слика 6.2 Нумерички експеримент ISO 668:2020 HC 9 т: локација TC, зидови модела (А, Б, Ц и Д), локација преградног зида и локација сагоревања

Слика 6.3 Polyethylene_GM 27 - HRR крива, извор: *Fire Engineering Handbook*, 5 edition, табеле А.38 и А.39. HRR криве и ISO 668:2020 HC 9 т, сценарија SC_3 без преградног зида и SC_4 са преградним зидом, нумерички експерименти у условима еквивалентног односа $\phi > 1$

Слика 6.4 Корелациона анализа, модел ISO 668:2020 HC 9 т, сценарија SC_1 – SC_10, са и без преградног зида

Слика 6.5 Polyethylene_GM 27 - HRR крива. HRR крива за сценарио SC_3, у условима отварања прозора на А страни модела у 100 s.

Слика 6.6 Polyethylene_GM 27 - HRR крива и HRR крива за сценарио SC_5, у условима отварања прозора на Д страни модела у 120 s и врата на Б страни модела у 200 s.

Слика 6.7 Polyethylene_GM 27 - HRR крива и HRR крива ISO 668:2020 HC 9 т, сценарио SC_7 без преградног зида, у условима отварања прозора на А страни модела у 0 s, отварања прозора на Д страни модела у 150 s и отварање врата на Б страни модела у 400 s.

Слика 6.8 Сценарио SC_7, прогресија запаљења унутар простора од 400 s до 418 s, приказана средњом температуром простора

Слика 6.9 Polyethylene_GM 27 - HRR крива и HRR крива ISO 668:2020 HC 9 т, сценарио SC_8 са преградним зидом, у условима отварања прозора на А страни модела у 0 s, отварања прозора на Д страни модела у 150 s и отварања врата на Б страни модела у 400 s.

Слика 6.10 Сценарија SC_7 и SC_8, временски тренутак симулације 411 s, средња температура простора и вредност HRR. Идентични услови вентилације, разлика у

унутрашњој геометрији простора: SC_7 (а и б) без преградног зида. SC_8 (ц и д) са преградним зидом.

Слика 7.1 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором за средњу вредност $B\Phi = 0.1 - 0.75$

Слика 7.2 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором за средњу вредност, $B\Phi = 0.1 - 0.75$

Слика 7.3 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива (ISO 834), пожар контролисан горивом материјом за средњу вредност, $B\Phi = 1 - 2.26$

Слика 7.4 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан горивом материјом за средњу вредност $B\Phi = 1 - 2.26$

Слика 7.5 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве (ISO 834), пожара контролисаног горивом материјом или вентилацијом, $B\Phi = 0.1 - 2.26$

Слика 7.6 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), за средњу вредност, $B\Phi = 0.1 - 2.26$

Слика 7.7 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором, $B\Phi = 0.53$

Слика 7.8 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором, $B\Phi = 0.53$

Слика 7.9 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором $B\Phi = 1$

Слика 7.10 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором $B\Phi = 1$

Слика 7.11 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве пожара контролисан вентилационим фактором $B\Phi = 0.53 - 1$

Слика 7.12 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), за средњу вредност, $B\Phi = 0.53 - 1$

Слика 7.13 Нумеричка пожарна крива и параметарску пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором, $B\Phi = 0.53$

Слика 7.14 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), пожар контролисан вентилационим фактором $B\Phi = 0.53$

Слика 7.15 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором $B\Phi = 1$

Слика 7.16 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву, пожар контролисан вентилационим фактором $B\Phi = 1$

Слика 7.17 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, пожара контролисан вентилационим фактором, $B\Phi = 0.53 - 1$

Слика 7.18 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ISO 834), за средњу вредност, $B\Phi = 0.53 - 1$

Слика 7.19 Нумеричка пожарна крива и параметарску пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$ 142

Слика 7.20 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву (ИСО 834), пожар контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53$ 142

Слика 7.21 Нумеричка пожарна крива и параметарска пожарна крива, пожар контролисан вентилационим фактором $ВФ = 1$ 142

Слика 7.22 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву, пожар контролисан вентилационим фактором $ВФ = 1$ 143

Слика 7.23 Средња вредност нумеричке пожарне криве и параметарске пожарне криве, пожара контролисан вентилационим фактором, $ВФ = 0.53 - 1$ 144

Слика 7.24 Процентуална разлика нумеричке пожарне криве у односу на параметарску пожарну криву, за средњу вредност $ВФ = 0.53 - 1$ 144

Слика 7.25 Дефинисана HRR крива и PBFC крива за све услове вентилације ISO 9705 модела 147

Слика 7.26 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 688_2020 HC 6 m модела 148

Слика 7.27 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 688_2020 HC 9 m модела 150

Слика 7.28 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 688_2020 HC 12 m модела 151

Слика 7.29 Дефинисани HRR и PBFC за све вентилационе услове ISO 688:2020 HC 6 m, 9 m и 12 m модела 152

Списак табела

Табела 1.1 Преглед метода за прикупљања података које су примењене у истраживању

Табела 1.2 Методе за анализу података које су коришћене у раду

Табела 2.1 Класификација развоја пожара; извор: NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code, Табела B.2.3.2.3.6

Табела 5.1 Геометријске димензије отвора за сценарије нумеричких експеримената модела ISO 9705:2016 од SC_1 до SC_8.

Табела 5.2 Еквивалентни однос нумеричких резултата модела према ISO 9705:2016 и вентилационог фактора ВФ, у сценаријима SC_1 – SC_8

Табела 5.3 ISO 9705:2016 SC_1 – SC_8, нумерички резултати, ВФ, трајање HRR и HRR_{max}

Табела 5.4 Сценарија SC_1 – SC_8, резултати хоризонталне дистрибуција средње максималне температуре по висини

Табела 5.5 Димензије отвора и локације за сценарије SC_1 – SC_4

Табела 5.6 Еквивалентни однос резултата ISO 668:2020 HC 6 т модела и ВФ, за сценарија SC_1 – SC_4

Табела 5.7 Сценарија SC_1 – SC_4, нумерички резултати, локација геометријског отвора, ВФ и вредности HRR

Табела 5.8 Сценарија SC_1 – SC_4 нумеричка предикција хоризонталне дистрибуције средње максималне температуре у зависности од локације отвора и вентилационог фактора

Табела 5.9 Димензије отвора и локације за сценарије нумеричких експеримената модела ISO 668:2020 HC 9 т.

Табела 5.10 Еквивалентни однос резултата за сценарије SC_1 – SC_4

Табела 5.11 Карактеристике вентилационог фактора и вредности HRR

Табела 5.12 Сценарија SC_1 – SC_4 - нумеричка предикција хоризонталне дистрибуције средње максималне температуре у зависности од локације отвора и вентилационог фактора

Табела 5.13 Димензије отвора и локације за сценарије нумеричких експеримената модела ISO 668:2020 HC 12 т

Табела 5.14 Еквивалентни однос нумеричких резултата у сценаријима SC_1 – SC_4

Табела 5.15 Сценарија SC_1 – SC_4, нумерички резултати, локација геометријског отвора, ВФ и вредности HRR

Табела 5.16 Сценарија SC_1 – SC_4, нумеричка предикција хоризонталне дистрибуција средње максималне температуре у зависности од локације отвора и вентилационог фактора

Табела 6.1 Димензије отвора, број и локација отвора на основу сценарија, сценарији SC_1 – SC_10 са преградним зидом и без преградног зида модела ISO 668:2020 HC 9 т.

Табела 6.2 Еквивалентни однос нумеричких резултата ISO 668:2020 HC 9 т модела и ВФ, у сценаријима SC_1 – SC_10

Табела 6.3 Модел ISO 668:2020 HC 9 т, сценарија SC_1 – SC_10 нумерички резултати, локација и број геометријских отвора, преградни зид, ВФ и вредности HRR

Табела 6.4 Димензије отвора, број отвора и локација за сценарије SC_1 – SC_8 са и без преградног зида.

Табела 6.5 Вентилациони отвор, услови вентилације и ВФ током симулације за нумеричке експерименте модела ISO 668:2020 HC 9 т у сценаријима SC_1 – SC_8, са и без преградног зида

Табела 6.6 Сценарија SC_1 - SC_8 - нумерички резултати, локација и број геометријских отвора, преградни зид, ВФ у времену и вредности HRR

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Дамир Малкочевић рођен је 1975. године у Тузли, Босна и Херцеговина. Дипломирао је на Рударско-геолошко-грађевинском факултету Универзитета у Тузли, на одсеку Сигурност и помоћ, 2013. године. За изузетан академски успех, са просечном оценом 9.76, награђен је Златном плакетом Универзитета у Тузли. Током студија похађао је Академију за кризно управљање и цивилну заштиту у Бону, Немачка (Academy for Crisis Management, Emergency Planning and Civil Protection – AKNZ). Мастер академске студије завршио је на истом факултету 2014. године са просечном оценом 10.

Од септембра 2013. до децембра 2020. године био је асистент за научну област Сигурност и помоћ на Рударско-геолошко-грађевинском факултету Универзитета у Тузли. У том периоду, активно је учествовао у реализацији бројних истраживачких пројеката, укључујући и пројекте међународне сарадње у оквиру ERASMUS+ програма.

Са више од 25 година искуства у области заштите од пожара, своју интернационалну експертизу градио је у оквиру Министарства одбране САД (US DoD), где је радио као цивилни сарадник на позицијама ватрогасног официра и инструктора у Босни и Херцеговини и Авганистану (2000–2009). Руководио је тимовима у кризним ситуацијама и интегрисао међународне стандарде за превенцију и реаговање на пожаре у високоризичним окружењима. Од 2014. до 2022. године обављао је функцију главног руководиоца заштите од пожара у компанији GAZPROM Neft на нафтном пољу Бадра у Ираку, где је формулисао и примењивао стратегије за смањење ризика од пожара и уводио међународне стандарде заштите у нафтној индустрији. Од 2023. године ради као главни инжењер за заштиту од пожара у компанији Petrokemua, која је део SABIC групације у Саудијској Арабији. У оквиру ове позиције, одговоран је за стратешко управљање заштитом од пожара, процену ризика и развој система отпорности на пожаре у индустријским постројењима. Његов рад обухвата анализу и унапређење мера заштите од пожара, развој иновативних приступа у управљању ризиком и имплементацију интегрисаних безбедносних система.

Током своје професионалне каријере, Дамир Малкочевић је објавио више научних и стручних радова у области заштите од пожара и безбедносног инжењерства. Активно учествује на међународним конференцијама и научним пројектима усмереним на унапређење превенције и контроле пожара у индустријским и урбаним срединама.

Активан је члан неколико престижних међународних професионалних организација, укључујући Друштво инжењера заштите од пожара САД (SFPE), Национално удружење за заштиту од пожара САД (NFPA) и Савет инжењера Саудијске Арабије (SCE). Поседује више од 20 међународно признатих сертификата, међу којима су NEBOSH, IFSAC, JCSS и JOIFF, као и експертизу у нумеричком моделовању понашања пожара и експлозија помоћу софтвера PHAST, BakerRisk и FDS – PyroSim.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

НОВИ ПРИСТУП ПРЕДВИЂАЊУ ДИНАМИКЕ ПОЖАРА У ЗАТВОРЕНОМ ПРОСТОРУ У ЗАВИСНОСТИ ОД УСЛОВА ВЕНТИЛАЦИЈЕ И ГЕОМЕТРИЈЕ

која је одбрањена на Факултету заштите на раду у Нишу Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу,_____.

Потпис аутора дисертације:



Дамир Малкочевић

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈА

Наслов дисертације:

**НОВИ ПРИСТУП ПРЕДВИЂАЊУ ДИНАМИКЕ ПОЖАРА У ЗАТВОРЕНОМ
ПРОСТОРУ У ЗАВИСНОСТИ ОД УСЛОВА ВЕНТИЛАЦИЈЕ И ГЕОМЕТРИЈЕ**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу,_____.

Потпис аутора дисертације:



Дамир Малкочевећ

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

НОВИ ПРИСТУП ПРЕДВИЂАЊУ ДИНАМИКЕ ПОЖАРА У ЗАТВОРЕНОМ ПРОСТОРУ У ЗАВИСНОСТИ ОД УСЛОВА ВЕНТИЛАЦИЈЕ И ГЕОМЕТРИЈЕ

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, _____.

Потпис аутора дисертације:



Дамир Малкочевић