

# Metode de estimare a parametrilor caracteristici fenomenului de flashover

## Methods of estimating parameters characteristics of the flashover phenomenon

**Alexandru-Florin CHIOJDOIU<sup>1</sup>, Ion ANGHEL<sup>2</sup>, Manuel ȘERBAN<sup>3</sup>, Ștefan TRACHE<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Inspectoratul pentru situații de urgență “Dealul Spirii” București-Ilfov  
București, sector 5, Calea 13 Septembrie, nr.135, Romania  
*alex.floryn@yahoo.com*

<sup>2</sup>Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri  
București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania  
*ion\_anghel2003@yahoo.com*

<sup>3</sup>Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri  
București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania  
*manuel.serban@gmail.com*

<sup>4</sup>Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri  
București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania  
*stefan.trache@academiapolitie.ro*

DOI:10.37789/rjce.2020.11.2.3

**Rezumat.** În acest studiu este prezentată, pe de o parte, complexitatea fenomenului de flashover, iar pe de altă parte, o serie de metode de estimare a principalilor parametri ai acestui fenomen. Momentul producerii fenomenului de flashover este destul de greu de anticipat de către echipajele sosite la locul intervenției. Acesta prezintă un pericol deosebit atât pentru ocupanții clădirii surprinși de incendiu, cât și pentru forțele de intervenție, datorită faptului că, pe timpul acestui fenomen, valoarea temperaturii în interiorul compartimentului ajunge la 500-600 °C, iar densitatea fluxului căldurii degajate de incendiu, la nivelul pardoselii compartimentului, la cca 20 kW/m<sup>2</sup>. De asemenea, au fost folosite trei metode de estimare, prin intermediul FDT<sup>5</sup>, a fluxului căldurii degajate de incendiu pe timpul manifestării fenomenului de flashover, o metodă de estimare a temperaturii compartimentului de incendiu în faza post-flashover, respectiv o metodă de estimare a severității incendiului.

**Cuvinte cheie:** flashover, temperatură, fluxul minim al căldurii degajate de incendiu, metode de estimare.

**Abstract.** In this study is presented, on the one hand, the complexity of the phenomenon of flashover, and on the other hand, a number of methods for estimating the main parameters of this phenomenon. The moment of the flashover phenomenon is quite difficult to predict by incoming crews at the site of the intervention. It presents a special

*hazard for both the occupants of the fire building and the intervention forces, due to the fact that, during this phenomenon, the value of the temperature inside the compartment reaches 500-600 ° C, and the density of the heat flow emitted from the fire, at the level of the compartment floor, at about 20 kW/m<sup>2</sup>. Also, three methods were used to estimate, with FDT<sup>®</sup>, the rate of heat rate released by the fire during the phenomenon of flashover, a method of estimating the temperature of the fire compartment in the post-flashover phase, respectively, a method of estimation of the fire severity.*

**Key words:** flashover, temperature, heat release rate minim, estimation methods.

## 1. Introducere

Modul de realizare al construcțiilor moderne a condus la necesitatea efectuării unui număr semnificativ de experimente pentru a analiza impactul acestuia, respectiv, al operațiunilor de stingere, asupra modului de manifestare al fenomenului de flashover, în cazul incendiilor care se manifestă în interiorul unui compartiment.

Având în vedere că, în ultimii cincizeci de ani au avut loc o serie de schimbări în ceea ce privește modul de realizare al construcțiilor, a fost realizat un experiment în vederea comparării modului de manifestare al incendiilor într-o construcție modernă, respectiv o construcție clasică, datând din anul 1950. Casele moderne au camere cu suprafețe și înălțimi mai mari, având diferite compartimentări (încăperi open-space), a crescut cantitatea de materiale sintetice folosite în componența mobilierului modern și se utilizează materiale de construcție noi. În urma experimentului efectuat s-a constatat că, cu cât camerele sunt mai mari și mai înalte, cu atât este mai mult aer disponibil pentru întreținerea arderii, incendiile vor avea o amploare și o intensitate mai mare, iar cantitatea de apă folosită pentru stingere va crește. De asemenea, timpul de evacuare al ocupanților clădirii se va micșora, datorită degajărilor masive de fum și gaze fierbinți în întreaga construcție, îngreunându-se astfel, evacuarea în siguranță a persoanelor surprinse de incendiu. Timpul până la producerea fenomenului de flashover, măsurat din momentul aprinderii, s-a redus considerabil, de la 29 de minute, în cazul locuințelor clasice, la mai puțin de 5 minute, în cazul locuințelor moderne. În urma arderii, materialele naturale din componența mobilierului clasic au eliberat căldură (energie) cu o viteză mai redusă decât materialele sintetice din componența mobilierului modern. În urma analizei comparative a patru tipuri de materiale de construcții moderne, respectiv clasice, și anume, izolații ale zidurilor interioare, podea, ferestre, și uși, s-a constatat că, elementele de construcție moderne au cedat mai ușor, iar incendiul s-a propagat mai rapid decât în cazul celor clasice [1].

În cadrul unui alt experiment au fost analizate efectele operațiunilor de stingere pe timpul producerii fenomenului de flashover într-un compartiment asupra principalelor caracteristici ale acestuia, și anume, fluxul căldurii degajate de incendiu, temperatura, nivelurile de oxigen, respectiv, pentru prima dată, asupra valorilor concentrației substanțelor toxice degajate, precum și condițiile la care sunt expuși pompierii pe timpul intervenției. Echipajul de intervenție a utilizat tactica de stingere tridimensională (3-D), acționând inițial asupra stratului de gaze fierbinți pentru a putea

pătrunde în interior și ulterior acționând direct asupra bazei focarului. Echipajul de intervenție a fost expus unor condiții extreme, fluxul căldurii degajate de incendiu fiind peste  $35 \text{ kW/m}^2$ , iar temperatura la nivelul pardoselii de cca  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , ceea ce a condus la retragerea echipajului de intervenție în afara compartimentului, după 20 de secunde. În urma calculelor efectuate, s-a constatat că, dacă echipajul ar mai fi rămas 10 secunde în compartimentul de incendiu, ar fi fost expus unei doze termice de 3500 de unități (2000 DTU este echivalentul DL50, care reprezintă doza termică letală care ar putea produce decesul a 50% din populația expusă), o cantitate suficientă pentru a afecta echipamentul de protecție al membrilor echipajului. Acest lucru subliniază timpul foarte scurt pe care îl au la dispoziție pompierii pentru a se autoevacua într-o zonă sigură, în cazul în care arderea este generalizată. Temperatura maximă înregistrată la nivelul tavanului a fost de  $780 \text{ }^\circ\text{C}$ , iar nivelul oxigenului a scăzut rapid, sub 5%, după primele 120 de secunde de la aprindere, ajungând la valoarea 0 % după cca 260 s. De asemenea, a fost analizat raportul de echivalență al incendiului, care reprezintă fracția dintre raportul combustibilului cu aerul necesar arderii și raportul stoichiometric dintre combustibil și aer. Valoarea de cca 1,80 a raportului de echivalență obținută în cadrul experimentului a arătat o ardere intensă cu degajări de gaze toxice, în special monoxid de carbon și hidrocarburi nearse, fiind astfel subliniată necesitatea diluării gazelor de ardere prin folosirea sistemelor de ventilație [2].

Pentru a căpăta mai multe cunoștințe și mai multă experiență, pompierii din Australia au efectuat atât un studiu experimental, cât și un studiu computerizat în ceea ce privește modul de manifestare al unui incendiu într-un container special amenajat, modificându-se condițiile privind sarcina termică, respectiv ventilarea. Prin mărirea eșalonată a sarcinii termice, s-a constatat apariția a două valori maxime ale temperaturii atinse în compartimentul de incendiu, respectiv o propagare rapidă a acestuia. Prin crearea unei deschideri mici de ventilație, s-a constatat o scădere a temperaturii și a presiunii în compartimentul de incendiu, ceea ce poate contribui la reducerea considerabilă a probabilității producerii fenomenului de backdraft, echipajele de intervenție putând să acționeze în siguranță pentru stingerea incendiului din interiorul încăperii. Utilizarea tehnicii de răcire corespunzătoare la scurt timp după atingerea primei temperaturi maxime a demonstrat o bună eficiență în controlul incendiului, prin menținerea temperaturii la nivelul tavanului sub  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectiv la nivelul înălțimii genunchilor pompierilor sub  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Comparând rezultatele experimentale cu cele computerizate obținute prin folosirea programului Fire dynamic simulation, valorile maxime ale temperaturilor au fost asemănătoare, însă temperaturile înregistrate în faza de regresie a incendiului au scăzut mai rapid în cadrul experimentelor. Pe măsură ce complexitatea incendiului a crescut, au crescut și diferențele între rezultatele experimentale și cele computerizate [3].

De asemenea, pe lângă experimentele efectuate pentru obținerea de noi date și informații rezultate în urma producerii fenomenului de flashover, au fost efectuate și experimente privind analiza modului de manifestare a incendiului în faza post-flashover. Pentru validarea unui model de incendiu, au fost analizate caracteristicile acestuia în faza post-flashover. În urma efectuării unor teste la incendiu în mărime

naturală, s-a folosit o metodă de interpretare a informațiilor înregistrate de termocuple, pentru a stabili un set de date cu privire la valorile parametrilor fizici care pot fi folosite în validarea unui model de incendiu computerizat. Astfel, au fost măsurate temperatura gazelor de ardere cu ajutorul unor termocuple, fluxurile de căldură degajate și vitezele produselor de ardere și al aerului înregistrate la nivelul deschiderilor compartimentului de incendiu cu ajutorul unor dispozitive bidirecționale și au fost comparate cu valorile obținute în urma unor metode de calcul a acestor parametri. Analizele efectuate au condus la generarea unei hărți a fluxului radiativ echivalent în interiorul compartimentului de incendiu, care caracterizează expunerea termică a componentelor structurale. Rezultatele obținute indică faptul că, în cazul în care un incendiu se manifestă într-un spațiu bine izolat și bine ventilat, acest compartiment poate deveni un mediu cu condiții termice severe, caracterizat prin temperatura gazelor de ardere de  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , fluxul căldurii degajate de  $300\text{ kW/m}^2$ , respectiv viteza gazelor de ardere la nivelul deschiderilor de  $13\text{ m/s}$  [4].

Pentru a înțelege mediul termic și condițiile cu care se confruntă pompierii pe timpul desfășurării acțiunilor de intervenție în cazul manifestării fenomenului de flashover, au fost realizate o serie de experimente pentru creșterea securității echipajelor de intervenție. Astfel, a fost creat, calibrat, respectiv integrat în echipamentul de protecție al unui pompier, un sistem portabil de măsurare a fluxului de căldură și a temperaturii gazelor de ardere fierbinți. Acest sistem portabil de măsurare a fost folosit în cadrul unui compartiment de incendiu din beton și oțel, respectiv într-un compartiment metalic care simulează condițiile existente pe timpul producerii fenomenului de flashover. Datele au fost colectate în urma expunerii termice a participanților de 25 de ori, în cadrul a 7 scenarii diferite, în care valorile obișnuite ale temperaturii și fluxului termic au fost de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectiv  $1\text{ kW/m}^2$ , iar valorile cele mai mari ale temperaturii și fluxului termic au fost între  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  și  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectiv între  $3\text{ kW/m}^2$  și  $6\text{ kW/m}^2$ . Valorile temperaturii măsurate de sistemul portabil au fost comparate cu valorile temperaturii măsurate de termocuplele amplasate în compartimentul de incendiu. În urma măsurătorilor efectuate, valorile fluxului de căldură obținute au fost mai mari decât valorile temperaturii, raportate la valorile claselor termice definite de National Institute of Standards and Technology (NIST), care descriu intervalele de siguranță în cazul echipamentelor electronice folosite de pompieri. Cele mai mari valori ale fluxului de căldură, respectiv ale temperaturii, s-au obținut în urma exercițiului efectuat în simulatorul de flashover [5].

În cadrul unui alt experiment au fost măsurate temperatura și fluxul căldurii degajate de incendiu. Pentru a corela aceste date cu condițiile cu care se confruntă pompierii pe timpul incendiilor, temperatura a fost măsurată în interiorul și în exteriorul echipamentului de protecție, iar fluxul căldurii degajate de incendiu a fost măsurat de o serie de dispozitive amplasate în exteriorul căștii, jachetei și pantalonilor pompierilor. În urma antrenamentelor efectuate s-a constatat că valorile maxime ale temperaturii în interiorul containerului au fost în jur de  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectiv  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , acestea fiind înregistrate la nivelul capului pompierilor. De asemenea, fluxul căldurii degajate de incendiu a înregistrat valori de  $40$  și  $50\text{ kW/m}^2$ , acesta fiind degajat în

principal, la nivelul pompierilor, direct de stratul de fum fierbinte și de pereții metalici ai containerului [6].

Pe timpul unui antrenament ce a constat în simularea fenomenului de flashover în condiții controlate, au fost evaluate tensiunea arterială și reacția în urma unor solicitări termice și fizice la care au fost expuși 66 de pompieri bărbați din Croația, 48 fiind pompieri profesioniști, iar 18 fiind pompieri voluntari,. Antrenamentul s-a desfășurat într-un simulator al fenomenului de flashover care era format din două module, un modul de ardere, respectiv un modul de observare în care participanții au stat pe bănci joase sau în genunchi, fiind echipați cu echipament individual de protecție și aparat de respirat. Antrenamentul a constat din trei exerciții cu durata a 20 de minute, și un exercițiu cu durata a 30 de minute. În momentul autoaprinderii stratului de fum, în modulul de ardere temperatura a crescut peste 1000 °C, iar în zona inferioară a modulului de observare, temperatura a atins valoarea de 200 °C. Participanții la antrenament au completat un chestionar medical și li s-au măsurat valorile temperaturii timpanice, a pulsului, a tensiunii arteriale sistolice și diastolice atât înainte de antrenament cât și după efectuarea acestuia. În cazul ambelor categorii de pompieri, tensiunea arterială sistolică nu a variat semnificativ, iar cea diastolică a scăzut în ambele cazuri. Pompierii profesioniști au prezentat o ușoară hipertermie și o creștere medie a temperaturii timpanice cu 1,1 °C, respectiv a pulsului cu 61% din valoarea maximă aferentă grupei de vârstă. În cazul pompierilor voluntari s-a constatat o creștere și mai mare a temperaturii timpanice, respectiv a pulsului comparativ cu pompierii profesioniști, ceea ce dovedește o mai bună adaptare a acestora la solicitări fizice și termice [7].

## 2. Fenomenul de flashover

Fenomenul de flashover este caracterizat prin faptul că, într-un anumit punct al dezvoltării incendiului, viteza de dezvoltare a acestuia crește atât de rapid, încât toate materialele combustibile din compartiment ating temperatura de aprindere, fiind implicate în procesul de ardere. Altfel spus, când un incendiu care se manifestă într-o încăpere este lăsat să se dezvolte, fără a se interveni, temperatura stratului de gaze de la partea superioară crește, măbind astfel fluxul radiant către toate obiectele din cameră. Dacă se atinge un nivel critic al fluxului de căldură, toate materialele combustibile din cameră vor începe să se aprindă și să ardă, ducând la o creștere rapidă atât a fluxului căldurii degajate de incendiu cât și a temperaturii. Această tranziție se numește "flashover". Flashoverul este descris de patru etape. În prima etapă, ce urmează aprinderii, se formează conul turbulent, apoi, pe timpul celei de-a doua etape, ajunge la tavan și se răspândește sub formă de strat de curgere laminară sub tavan. În timpul celei de-a treia și a patra etape, straturile de gaze fierbinți se îngroașă și ies prin deschideri.

În urma experimentelor și a datelor colectate în urma intervențiilor, fenomenul de flashover poate fi caracterizat de câțiva parametri principali, și anume, temperatura stratului de gaze fierbinți, care atinge valoarea de 500 °C – 600 °C, respectiv densitatea

de flux termic radiant la nivelul pardoselii compartimentului, care atinge valoarea minimă de  $20 \text{ kW/m}^2$ , pe toată suprafața pardoselii.

După producerea fenomenului de flashover, în fazele post-flashover, la temperaturile ridicate înregistrate în stratul de gaze, are loc un transfer termic radiant semnificativ de la dioxidul de carbon, vaporii de apă și particulele de funingine din fum. Stratul de gaze și flăcările radiază către podea, pereți și tavan, înapoi la foc și sursele de combustibil, către orice obiect se află în compartiment și prin deschiderile compartimentului. În plus, pereții încălziți, tavanul și orice alt obiect încălzit radiază căldură înapoi în compartiment. Deseori, un incendiu aflat într-o fază post-flashover poate avea cantități semnificative de combustibil pentru a continua arderea, dar cantitatea de aer care pătrunde în încăperea poate fi limitată. Incendiul, care ar continua să ardă dacă s-ar afla în spațiu deschis, intră într-o perioadă în care este limitat de condițiile de ventilare și încetează să se dezvolte datorită lipsei de oxigen. Rata consumului de combustibil/oxigen stagnează, iar temperatura în compartiment încetează să crească la fel de repede cum se întâmpla înainte de flashover. Acești parametri pot începe să scadă ușor ca urmare a amestecului nestoichiometric aer-combustibil. Incendiul poate continua să scadă în intensitate până când raportul aer-combustibil devine stoichiometric sau mai mare, permițând astfel dezvoltarea incendiului. În acest moment, incendiul poate deveni controlat de cantitatea de combustibil, viteza de ardere fiind dictată de aceasta și nu de cantitatea de aer disponibilă. Incendiul poate crește până devine din nou limitat de cantitatea de aer disponibilă și continuă într-o stare alternantă, între stări controlate de aer sau de combustibil, de-a lungul întregii perioade rămase de ardere activă a incendiului. Eventual, incendiul va intra în stadiul final în care este controlat de cantitatea de combustibil, pe măsură ce acesta este consumat total, iar incendiul va scădea în intensitate, până în faza de stingere.

Studiile efectuate referitoare la fluxul minim al căldurii degajate de incendiu necesar pentru producerea fenomenului de flashover într-un compartiment au arătat că acest flux minim crește cu mărirea compartimentului și depinde, într-un mod complex, de condițiile de ventilare din compartiment. Dacă ventilarea este insuficientă, flashoverul nu poate avea loc. Dacă ventilarea este prea intensă, excesul de aer diluează și răcește fumul, astfel încât fluxul căldurii degajate, necesară pentru a atinge condițiile de temperatură necesare producerii flashoverului, este mai mare. Materialele de construcție și grosimea tavanului și a părții superioare a pereților sunt de asemenea factori importanți când se evaluează posibilitatea producerii flashoverului. Acești factori determină și timpul necesar pentru producerea flashoverului, într-un compartiment în care s-a atins temperatura critică. Cercetătorii au folosit mai multe modalități pentru a estima momentul producerii flashoverului într-un compartiment. Aceste modalități sunt de obicei bazate pe bilanțuri simplificate de masă și energie într-un incendiu produs într-un singur compartiment, corelate cu date experimentale. Flashoverul este descris vizual, pe baza testelor la scară naturală și a incidentelor reale, ca fiind un eveniment discret. Trecerea incendiului la flashover poate fi influențată de multe variabile. Influențele termice sunt în mod evident

importante, fluxurile convective și radiante fiind cele care determină fenomenul. Condițiile de ventilare, volumul compartimentului și compoziția chimică a stratului de gaze fierbinți pot influența de asemenea producerea flashoverului.

Flashover-ul este, astfel, un moment între etapa de creștere a incendiului și etapa de ardere generalizată, fiind un fenomen termo-fizic complex, caracterizat, în urma arderii în interiorul unui compartiment, prin formarea unui strat fierbinte de gaze și fum în partea superioară a încăperii, transfer termic radiativ și convectiv către suprafețele materialelor combustibile. Aceste categorii de transfer termic pot conduce la creșterea fluxului căldurii degajate de incendiu [13]. Valoarea minimă a fluxului căldurii degajate de incendiu care poate conduce la producerea fenomenului de flashover în interiorul unui compartiment de incendiu, temperatura în faza post-flashover, respectiv severitatea incendiului, pot fi estimate folosind o serie de metode empirice.

### **3. Metode de estimare a principalilor parametri caracteristici fenomenului de flashover**

Producerea fenomenului de flashover într-o încăpere este semnalul esențial al existenței condițiilor instabile în compartimentul în care are loc incendiul, dar și un semn al riscului crescut pentru alte compartimente ale structurii. Astfel, au fost dezvoltate o serie de metode de estimare a fluxului căldurii degajate de incendiu, a temperaturii, respectiv a severității incendiului în cazul producerii fenomenului de flashover.

#### **3.1. Metode de estimare a fluxului minim al căldurii degajate de incendiu necesar pentru producerea fenomenului de flashover**

În urma efectuării a numeroase studii experimentale, la scară naturală, au fost elaborate o serie de formule de estimare a fluxului minim al căldurii degajate de incendiu.

##### **3.1.1. Metoda lui McCaffrey, Quintiere and Harkleroad (MQH)**

McCaffrey, Quintiere și Harkleroad [8] au descoperit că metoda lor de estimare a temperaturi gazelor fierbinți dintr-un compartiment poate fi extinsă pentru a estima fluxul minim al căldurii degajate de incendiu necesar pentru producerea flashoverului și au obținut următoarea expresie:

$$\dot{Q}_{FO} = 610 \cdot \sqrt{h_k \cdot A_T \cdot A_V \cdot \sqrt{h_V}} \quad (1)$$

unde:

$\dot{Q}_{FO}$ - fluxul minim al căldurii degajate de incendiu necesar pentru producerea flash-overului ( $kW$ );

$h_k$ - coeficientul de transfer termic ( $kW /m^2K$ );

$A_T$ -aria totală a suprafețelor ce delimitează încăperea ( $m^2$ ), excluzând aria gurilor de ventilare;

$A_V$ -aria gurilor de ventilare ( $m^2$ );

$h_V$ -înălțimea gurilor de ventilare ( $m$ ).

### 3.1.2. Metoda lui Babrauskas

Babrauskas [9] a dezvoltat o metodă simplificată care reprezintă valori corelate cu date experimentale. Bazată pe 33 teste cu rate de eliberare a căldurii între 11 și 3840  $kW$  cu combustibili principali folosiți: lemn și poliuretan, Babrauskas a descoperit că fluxul minim al căldurii degajate de incendiu necesar pentru a produce flashoverul este dată de relația:

$$\dot{Q}_{FO} = 750 \cdot A_V \cdot \sqrt{h_V} \quad (2)$$

Relația (2) este foarte simplă și ușor de folosit, cu toate că nu ia în considerare aria suprafețelor ce delimitează compartimentul și nici proprietățile termice ale acestora.

### 3.1.3. Metoda lui Thomas

Thomas [10] a dezvoltat o formulă semi-empirică pentru a calcula fluxul minim al căldurii degajate de incendiu necesar pentru producerea flashoverului într-un compartiment. A prezentat un model simplu de flashover într-un compartiment, pe care l-a folosit pentru a studia influența materialelor de căptușire a pereților și influența asupra obiectelor care ard. El a prezis o creștere de temperatură de 520 °C și un nivel al radiației corpului negru absolut de 22  $kW/m^2$  către o suprafață depărtată de împrejurimile focarului format din lemn la fluxul căldurii degajate de incendiu prezis necesar pentru producerea flashoverului. Modelul de flashover al lui Thomas rezultă în urma simplificărilor aplicate unui bilanț de energie în compartimentul incendiat. Formula rezultată produce fluxul minim al căldurii degajate de incendiu pentru producerea flashoverului:

$$\dot{Q}_{FO} = 7,8 \cdot A_T + 378 \cdot A_V \cdot \sqrt{h_V} \quad (3)$$

Constantele din ecuația (3) sunt valori derivate din experimente în care se simulează producerea flashoverului. Se consideră că transferul termic prin conducție se face în regim staționar. Timpul de transfer termic este mare pentru compartimente cu pereți groși de beton, și este puțin probabil ca incendiu să se dezvolte încet și gradual către fluxul căldurii degajate de incendiu necesar producerii flashoverului în câteva ore. Un interval de timp rezonabil pentru a estima probabilitatea de producere a flashoverului este de câteva minute, până la 30 minute. Timpul de reacție al serviciilor de pompieri este de obicei în acest interval.



### 3.2. Metode de estimare a temperaturii compartimentului de incendiu în faza post-flashover

După producerea flashoverului, suprafețele expuse ale obiectelor expuse din compartiment vor arde, iar fluxul căldurii degajate de incendiu va atinge valoarea maximă, producând temperaturi înalte. De obicei, aceasta poate fi de 1100 °C, dar în anumite condiții se pot atinge temperaturi mai ridicate. Acestea vor fi menținute până când rata de generare a substanțelor volatile combustibile începe să scadă, ca urmare a consumării combustibilului. În perioada în care incendiul se află în etapa de dezvoltare totală, elementele de construcție pot ajunge la temperaturi la care pot ceda.

Thomas [12] a dezvoltat o metodă pentru a estima temperatura maximă la care se ajunge în cazul unui incendiu într-un compartiment bazată pe date referitoare la fazele post flashover ale unui incendiu într-un compartiment. Law [11] a extins această metodă incluzând și condițiile de ventilare, atât naturală cât și forțată, folosind numeroasele date rezultate din teste, referitoare la fazele dinaintea producerii flashoverului într-un incendiu de încăpere. Estimările obținute prezic rezonabil, dar nu exact, temperaturile înregistrate în timpul testelor.

Folosind datele rezultate din programul de cercetare a incendiilor dezvoltate în încăperi la “Conseil Internationale du Batiment” (CIB), Thomas și Law [12] au găsit următoarea formulă pentru a prezice temperatura post-flashover într-un compartiment ventilat natural:

$$T_{FO(max)} = 6000 \cdot \frac{(1 - e^{-0,1\Omega})}{\sqrt{\Omega}} \quad (4)$$

$$\Omega = \frac{A_T - A_V}{A_V \cdot \sqrt{h_V}} \quad (5)$$

unde:

$T_{FO(max)}$ -temperatura maximă atinsă pe timpul producerii fenomenului de flashover;

$\Omega$ -factorul de ventilare.

Ecuția (4) nu ține cont de variația proprietăților termo-fizice ale suprafețelor ce delimitează compartimentul.

### 3.3. Metoda Margaret Law de estimare a severității incendiului în cazul producerii fenomenului de flashover

Incendiile ard cu intensități diferite și au variații spațiale semnificative în ceea ce privește severitatea. Etapa fundamentală în proiectarea structurilor este aceea de a verifica dacă rezistența la foc a structurii (sau a fiecărei părți a structurii) este mai mare decât severitatea incendiului la care va fi expus. Rezistența la foc este măsura structurii de a rezista prăbușirii, propagării arderii sau altui tip de cedare atunci când este expusă la un incendiu de o anumită severitate, iar severitatea incendiului este o măsură a potențialul impact-distructiv al arderii tuturor materialelor combustibile din

compartiment, de cele mai multe ori fiind definită ca timpul de expunere la un incendiu standard.

Degradarea structurii este în cea mai mare parte dependentă de cantitatea de căldură absorbită de elementele structurale. Transferul de căldură în faza post-flashover este în cea mai mare parte radiant și este proporțional cu temperatura absolută la puterea a patra. Astfel, severitatea incendiului este dependentă în mare parte de temperaturile atinse și de durata de expunere la aceste temperaturi înalte.

Law [12] a dezvoltat o formulă pentru a prezice severitatea unui incendiu pe baza datelor rezultate dintr-un program internațional de cercetare. Formula prezice potențialul impact al unui incendiu post-flashover în termeni de expunere echivalentă la condiții care respectă standardul european echivalent cu ASTM E 119 și NFPA 251.

Severitatea incendiului pentru o anumită sarcină termică într-un compartiment cu cel puțin o deschidere poate fi estimată cu formula:

$$t_f = \frac{K L_{ech}}{\sqrt{A_v A_T}} \quad (6)$$

unde:

$t_f$ -severitatea incendiului sau durata (s);

$K$ -constantă de corelare;

$L_{ech}$ -sarcina termică în cantitate echivalentă de lemn ( $Kg$ ).

Sarcina termică exprimată în unități de masă echivalente de lemn se determină cu relația:

$$L_{ech} = \frac{L \Delta H_c}{\Delta H_{c,lemn}} \quad (7)$$

unde:

$L_{ech}$ - sarcina termică în cantitate echivalentă de lemn ( $Kg$ )

$L$ -sarcina termică totală din compartiment ( $Kg$ )

$\Delta H_c$ -căldura de ardere ( $kJ/Kg$ )

$\Delta H_{c,lemn}$ -căldura de ardere a lemnului ( $kJ/Kg$ )

#### 4. Scenariile de incendiu analizate

Au fost realizate trei scenarii pentru determinarea fluxului căldurii degajate de incendiu, a temperaturii în faza post-flashover, respectiv a severității incendiului. Incendiul s-a manifestat într-un compartiment de lățime 3,1 m, lungime 5,4 m și înălțime 2,1 m, așa cum se poate observa în figura 1. Compartimentul de incendiu este prevăzut cu o deschidere tip ușă de lățime 0,9 m și înălțime 2 m, amplasată la nivelul podelei, respectiv, o deschidere tip fereastră, de lățime 1,4 m și înălțime 1 m, amplasată la o distanță de 0,8 m deasupra podelei.

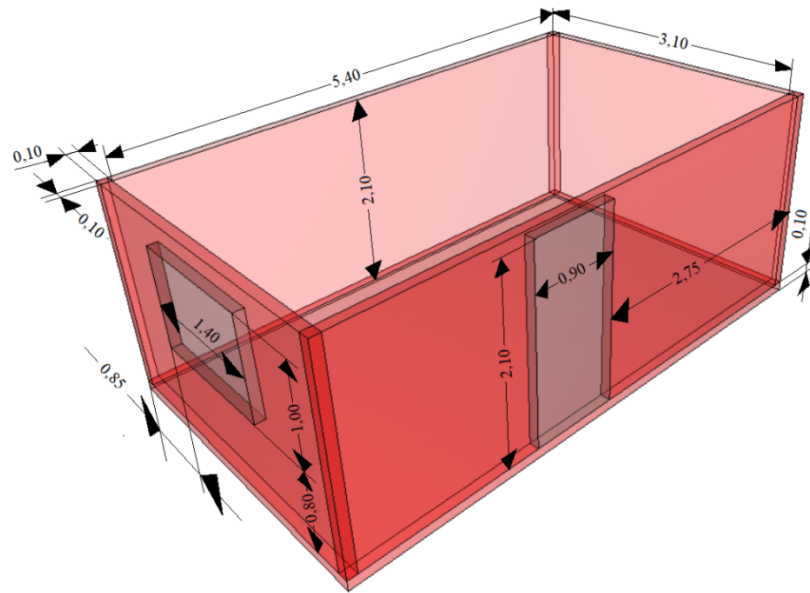


Figura 1 Compartimentul de incendiu analizat

#### 4.1. Scenariul de incendiu numărul 1 - determinarea fluxului căldurii degajate de incendiu

Scenariul de incendiu numărul 1 a constat în următoarele situații: compartiment este ventilat natural, în prima situație, prin intermediul unei uși, iar în a doua situație prin intermediul unei ferestre, materialul de finisaj al suprafețelor interioare ale compartimentului de incendiu fiind, pe rând, placă de PAL (conductivitatea termică având valoarea de  $0,00015 \text{ kW/mK}$ ), placă de ghips carton (conductivitatea termică având valoarea de  $0,000017 \text{ kW/mK}$ ), panou decorativ din polistiren (conductivitatea termică având valoarea de  $0,000034 \text{ kW/mK}$ ) și beton (conductivitatea termică având valoarea de  $0,0016 \text{ kW/mK}$ ) având grosimea de 1,2 cm, 1,25 cm, 2 cm, respectiv 3 cm.

#### 4.2. Scenariul de incendiu numărul 2 - determinarea temperaturii în faza post-flashover

Scenariul de incendiu numărul 2 a constat în următoarele situații: compartimentul de incendiu este ventilat natural, în prima situație, prin intermediul unei uși, iar în a doua situație prin intermediul unei ferestre.

#### 4.3. Scenariul de incendiu numărul 3 - determinarea severității incendiului

Scenariul de incendiu numărul 3 a constat în următoarele situații: compartiment este ventilat natural, în prima situație, prin intermediul unei uși, iar în a doua situație prin intermediul unei ferestre, sursa de foc fiind constituită din material lemnos, cu valoarea căldurii de ardere,  $\Delta H_{c,lemn} = 18608 \text{ kJ/Kg}$ , având pe rând greutatea de 100, 250, respectiv 500 Kg.

## 5. Ipoteze simplificatoare și limitări

Toate metodele discutate au limitări și le-au fost aplicate ipoteze simplificatoare. Formulele au fost dezvoltate din bilanțuri simplificate de masă și energie într-un singur compartiment, cu deschideri pentru ventilare.

Metodele de estimare utilizate au fost aplicate luându-se în considerare că încăperea este ventilată natural, neluându-se în considerare efectul vântului [13].

Datele experimentale folosite pentru stabilirea formulelor provin de la teste realizate în compartimente cu pereți cu conductivitatea termică mică și focare din material lemnos.

În aplicarea metodelor utilizate pentru estimarea fluxului minim al căldurii degajate de incendiu s-a considerat că aerul are concentrația de 21% oxigen, presiunea atmosferică și temperatura ambientală au valori apropiate de cele din interiorul compartimentului de incendiu, temperatura ambientală putând lua valori doar din intervalul 0 °C - 40 °C. O altă ipoteză este reprezentată de faptul că suprafața maximă a compartimentului de incendiu este de cca 16 m<sup>2</sup>, iar înălțimea maximă este de cca 3 m. De asemenea, se presupune că flăcările nu se propagă pe suprafața zidurilor și a tavanului [13].

Formula pentru estimarea severității incendiului nu se poate folosi pentru compartimente care nu au deschideri pentru ventilare. Cu toate că o mărime minimă nu poate fi stabilită, se recomandă să nu se folosească această metodă dacă aria deschiderilor este mai mică de 0,4 m<sup>2</sup>.

Compartimentul de incendiu este prevăzut cu o singură deschidere, într-o situație cu o deschidere tip ușă, iar în altă situație cu o deschidere tip fereastră. De asemenea, focarul de incendiu este dispus aproximativ în mijlocul încăperii [13].

## 6. Rezultate obținute. Analiza rezultatelor

Pentru obținerea rezultatelor, au fost prelucrate și comparate datele obținute prin utilizarea Fire Dynamics Tools (FDTs) dezvoltat de US Nuclear Regulatory Commission [12].

### 6.1. Analiza rezultatelor obținute în cadrul scenariului de incendiu numărul 1

În cadrul scenariului de incendiu numărul 1, în cazul în care compartimentul de incendiu a fost prevăzut cu deschidere tip ușă, folosindu-se metoda lui McCaffrey, Quintiere și Harkleroad, fluxul căldurii degajate de incendiu a luat următoarele valori: **893,19 kW** – în cazul PAL-ului; **931,66 kW** – în cazul ghips-cartonului; **329,39 kW** – în cazul polistirenului; **1844,97 kW** – în cazul betonului.

Folosindu-se metoda lui Babrauskas, fluxul căldurii degajate de incendiu a luat următoarele valori: **1909,19 kW** – în cazul PAL-ului; **1909,19 kW** – în cazul ghips-cartonului; **1909,19 kW** – în cazul polistirenului; **1909,19 kW** – în cazul betonului.

Folosindu-se metoda lui Thomas, fluxul căldurii degajate de incendiu a luat

următoarele valori: **1487,79 kW** – în cazul PAL-ului; **1487,79 kW** – în cazul ghips-cartonului; **1487,79 kW** – în cazul polistirenilui; **1487,79 kW** – în cazul betonului.

În cadrul scenariului de incendiu numărul 1, în cazul în care compartimentul de incendiu a fost prevăzut cu deschidere tip fereastră, folosindu-se metoda lui McCaffrey, Quintiere și Harkleroad, fluxul căldurii degajate de incendiu a luat următoarele valori: **664,35 kW** – în cazul PAL-ului; **692,97 kW** – în cazul ghips-cartonului; **245,00 kW** – în cazul polistirenilui; **1372,28 kW** – în cazul betonului.

Folosindu-se metoda lui Babrauskas, fluxul căldurii degajate de incendiu a luat următoarele valori: **1050,00 kW** – în cazul PAL-ului; **1050,00 kW** – în cazul ghips-cartonului; **1050,00 kW** – în cazul polistirenilui; **1050,00 kW** – în cazul betonului.

Folosindu-se metoda lui Thomas, fluxul căldurii degajate de incendiu a luat următoarele valori: **1057,88 kW** – în cazul PAL-ului; **1057,88 kW** – în cazul ghips-cartonului; **1057,88 kW** – în cazul polistirenilui; **1057,88 kW** – în cazul betonului.

Având în vedere faptul că, metoda lui McCaffrey, Quintiere și Harkleroad este dependentă de grosimea izolației interioare a pereților compartimentului de incendiu, în cazul izolației din PAL, ghips-carton, polistiren și beton s-au obținut valori diferite ale fluxului căldurii degajate de incendiu, spre deosebire de metodele lui Babrauskas și Thomas, care nu sunt dependente de grosimea izolației interioare a pereților, motiv pentru care s-au obținut aceleași valori pentru fiecare tip de izolație.

Comparând valorile fluxului căldurii degajate de incendiu în cazul deschiderii tip ușă cu deschiderea tip fereastră, se constată că, s-au obținut valori mai mari în cazul deschiderii tip ușă pentru toate metodele folosite, deoarece, fiecare dintre metode este caracterizată de o formulă care este direct proporțională cu suprafața deschiderii ventilației. În situația dată, suprafața ușii este de  $1,80 m^2$ , iar suprafața ferestrei este de  $1,40 m^2$ .

De asemenea, analizând rezultatele obținute în urma folosirii metodei lui McCaffrey, Quintiere și Harkleroad, se constată că cea mai mare valoare a fluxului căldurii degajate de incendiu s-a obținut în cazul betonului, fiind urmată de ghips-carton, PAL, respectiv polistiren. Acest lucru se datorează faptului că formula fluxului căldurii degajate de incendiu este direct proporțională cu valoarea conductivității termice a izolației pereților interiori, betonul având cea mai mare valoare ( $0,0016 kW/mK$ ), fiind urmat de ghips-carton ( $0,000017 kW/mK$ ), PAL ( $0,00015 kW/mK$ ), respectiv polistiren ( $0,000034 kW/mK$ ).

## 6.2. Analiza rezultatelor obținute în cadrul scenariului de incendiu numărul 2

În cadrul scenariului de incendiu numărul 2, în cazul în care compartimentul de incendiu a fost prevăzut cu deschidere tip ușă, valoarea maximă a temperaturii incendiului în faza post-flashover a fost de **1115,11 °C**, iar în cazul deschiderii tip fereastră a fost de **863,75 °C**. Se constată, astfel, că valoarea temperaturii maxime este mai mare în cazul deschiderii tip ușă decât în cazul deschiderii tip fereastră, deoarece, aceasta este direct proporțională cu suprafața deschiderii de ventilație, suprafața ușii fiind mai mare decât suprafața ferestrei.

### 6.3. Analiza rezultatelor obținute în cadrul scenariului de incendiu numărul 3

În cadrul scenariului de incendiu numărul 3, în cazul în care compartimentul de incendiu a fost prevăzut cu deschidere tip ușă, timpul care descrie severitatea incendiului a luat pe rând valorile: **9,08 min** – pentru greutatea materialului lemnos de 100 kg; **22,70 min** - pentru greutatea materialului lemnos de 250 kg; **45,40 min** - pentru greutatea materialului lemnos de 500 kg.

În cazul în care compartimentul de incendiu a fost prevăzut cu deschidere tip fereastră, timpul care descrie severitatea incendiului a luat pe rând valorile: **10,27 min** – pentru greutatea materialului lemnos de 100 kg; **25,66 min** - pentru greutatea materialului lemnos de 250 kg; **51,33 min** - pentru greutatea materialului lemnos de 500 kg.

Se constată astfel că, cu cât masa materialului combustibil care arde este mai mare, cu atât timpul care descrie severitatea incendiului este mai mare. De asemenea, în situația în care suprafața deschiderii de ventilație se micșorează de la 1,80 m<sup>2</sup>, pentru deschiderea tip ușă, la 1,40 m<sup>2</sup>, pentru deschiderea tip fereastră, severitatea incendiului crește direct proporțional cu greutatea materialului combustibil supus arderii.

### Concluzii

Complexitatea fenomenului de flashover este dată de faptul că, în funcție de condițiile de ventilație, valoarea temperaturii atinsă în acel moment și tipul, respectiv, cantitatea materialelor combustibile care ard, este destul de greu pentru echipajele de intervenție să anticipeze momentul producerii acestuia.

Fenomenul de flashover prezintă un pericol deosebit de mare în ceea ce privește securitatea și sănătatea ocupanților clădirii, dacă aceștia sunt surprinși în interiorul compartimentului, respectiv a echipajelor de intervenție. Acest lucru se datorează valorilor parametrilor care caracterizează fenomenul de flashover, și anume, temperatura de cca 500-600 °C din interiorul compartimentului, respectiv, valoarea minimă a densității de flux termic radiant la nivelul pardoselii compartimentului de cca 20 kW/m<sup>2</sup>, pe toată suprafața pardoselii.

În urma studiului efectuat, s-a constatat că, prin folosirea metodei lui McCaffrey, Quintiere și Harkleroad de estimare a fluxului căldurii degajate de incendiu pe timpul producerii fenomenului de flashover, valoarea acesteia este dependentă de grosimea izolației pereților interiori ai compartimentului de incendiu. Formula fluxului căldurii degajate de incendiu este direct proporțională cu valoarea conductivității termice a izolației pereților interiori, betonul având cea mai mare valoare (0,0016 kW/mK), fiind urmat de ghips-carton (0,000017 kW/mK), PAL (0,00015 kW/mK), respectiv polistiren (0,000034 kW/mK). În consecință, rezultatele au arătat faptul că cea mai mare valoare a fluxului căldurii degajate de incendiu s-a obținut în cazul betonului, fiind urmată de ghips-carton, PAL, respectiv polistiren.

De asemenea, prin compararea valorilor fluxului căldurii degajate de incendiu în cazul deschiderii tip ușă cu deschiderea tip fereastră, s-au obținut valori mai mari în cazul deschiderii tip ușă pentru toate metodele folosite. Acest lucru se datorează

faptului că, suprafața ușii este de  $1,80 \text{ m}^2$ , respectiv, suprafața ferestrei este de  $1,40 \text{ m}^2$ , iar fiecare dintre metode utilizate este caracterizată de o formulă care este direct proporțională cu suprafața deschiderii ventilației.

În ceea ce privește valoarea maximă a temperaturii incendiului în faza post-flashover, aceasta este direct proporțională cu suprafața deschiderii de ventilație, suprafața ușii fiind mai mare decât suprafața ferestrei în cadrul studiului efectuat. Astfel, în cazul în care compartimentul de incendiu a fost prevăzut cu deschidere tip ușă, valoarea maximă a temperaturii incendiului în faza post-flashover a fost de  $1115,11 \text{ }^\circ\text{C}$ , iar în cazul deschiderii tip fereastră a fost de  $863,75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

În urma studiului efectuat a reieșit faptul că timpul care descrie severitatea incendiului crește direct proporțional cu creșterea masei materialului combustibil care arde este mai mare. De asemenea, în situația în care suprafața deschiderii de ventilație se micșorează de la  $1,80 \text{ m}^2$ , pentru deschiderea tip ușă, la  $1,40 \text{ m}^2$ , pentru deschiderea tip fereastră, severitatea incendiului se mărește.

### Acknowledgements

This work was supported by a grant of the Romanian Ministry of Research and Innovation, CCCDI – UEFISCDI, project number PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0350 / 02.03.2018 (Graphene4Life), within PNCDI III.

### Referințe

- [1] *S. Kerber*, Analysis of Changing Residential Fire Dynamics and Its Implications on Firefighter Operational Timeframes, *Fire Technology*, **v.48**, 865–891, 2012.
- [2] *A. A. Alarif, J. Dave, H. N. Phylaktou, O. A. Aljumaiah, G. E. Andrews*, Effects of fire-fighting on fully developed compartment fire: Temperatures and emission, *Fire Safety Journal*, **v.68**, 71–80, 2014.
- [3] *D. Mackaya, T. Barbera, G.H. Yeoh*, Experimental and computational studies of compartment fire behavior training scenarios, *Building and Environment*, **v.45**, 2620-2628, 2010.
- [4] *S. Welch, A. Jowsey, S. Deeny, R. Morgan, J. L. Torero*, BRE large compartment fire tests – Characterising post-flashover fires for model validation, *Fire Safety Journal*, **v.42**, 548-567, 2007.
- [5] *J. M. Willi, G. P. Horn, D. Madrzykowski*, Characterizing a Firefighter's Immediate Thermal Environment in Live-Fire Training Scenarios, *Fire Technology*, **v.52**, 1667–1696, 2016.
- [6] *A. Ljubičić, V.M. Varnai, B. Petrinec, J. Macan*, Response to thermal and physical strain during flashover training in Croatian firefighters, *Applied Ergonomics*, **v.45**, 544-549, 2014.
- [7] *S. Roblin, B. Batiot, T. Rogaume, F. Richard, J. Baillargeat, M. Poisson, A. Collin, Z. Acem, A. Marchand, M. Lepelletier*, Improvement of the Firefighters' Training: Assessment of the Constraints During Compartment Fire Behaviour Trainings in Shipping Container.
- [8] *B. I. McCaffrey, I. G. Quintiere, M. F. Harkleroad*, Estimating Room Fire Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations, *Fire Technology*, **v.17**, 2, 98-119, 1981.
- [9] *V. Babrauskas*, Estimating Room Flashover Potential. *Fire Technology*, **v.16**, 2, 94-104. 1980.
- [10] *P. H. Thomas*, Testing Products and Materials for Their Contribution to Flashover in Rooms. *Fire and Materials*, **5**, 3, 103-111, 1981.
- [11] *M. Law*, Fire safety of external building elements – the design approach, *Engineering Journal*, Second Quarter, p.59-74, American Institute of Steel Construction (AISC), USA, 1978.
- [12] *N. Iqbal, M. H. Salley*, Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the US Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. Final Report, 2006.
- [13] International Standard ISO 24678-6, Fire safety engineering-Requirements governing algebraic formulae-Part 6: Flashover related phenomena.