

Analiza și estimarea parametrilor care influențează temperaturile stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu, în funcție de sistemul de ventilație folosit

Analysis and estimation of parameters influencing hot gas layer temperatures in a fire compartment as a function of the type of the ventilation system

Alexandra TEODOR¹, Alexandru-Florin CHIOJDOIU², Octavian LALU³, Ion ANGHEL⁴, Aurel TROFIN⁵, Ionel Alin MOCIOI⁶, Liviu-Valentin BALANESCU⁷

¹Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania
alexandravictoriasteodor@gmail.com

²Inspectoratul pentru situații de urgență “Dealul Spirii” București-Ilfov București, sector 5, Calea 13 Septembrie, nr.135, Romania
alex.floryn@yahoo.com

³British Research Establishment, Watford, UK.
octavian.lalu@gmail.com

⁴Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania
ion_anghel2003@yahoo.com

⁵Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania
aureltrofin@gmail.com

⁶Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania
alin.mocioi@gmail.com

⁷Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3, Romania
liviubalanescu@yahoo.com

Rezumat. În acest studiu s-au utilizat metode empirice de estimare a temperaturilor stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu cu dimensiuni standardizate. S-au impus o serie de ipoteze și limitări metodelor utilizate, în baza cărora au fost analizate două scenarii de incendiu, și anume: compartimentul de incendiu, ale cărui suprafețe interioare sunt căptușite, pe rând, cu PAL, ghips carton, polistiren și beton, arde și este ventilat în două moduri diferite: ventilație naturală și, respectiv, ventilație mecanică. De asemenea, s-a considerat că valoarea fluxului de căldură degajat (HRR) este constantă, aceasta luând, pe rând, valorile de 250 kW, 500 kW și, respectiv, 1000 kW. Prin utilizarea Fire Dynamics Tools (FDT[®]) dezvoltat de US Nuclear Regulatory Commission [11], s-au obținut diagrame ale temperaturii stratului de gaze fierbinți și s-a efectuat o analiză comparativă a rezultatelor obținute. Astfel, s-a constatat că valorile de temperatură din stratul de gaze fierbinți degajate într-un compartiment în urma unui incendiu sunt influențate de o serie de parametri, cum ar fi: proprietățile termice ale finisajelor interioare, fluxul de căldură degajat, geometria compartimentului de incendiu, sistemul de ventilație utilizat. În cadrul Facultății de Pompieri a fost creat un astfel de compartiment de incendiu, care urmează să fie folosit pentru teste experimentale în scopul validării rezultatelor empirice, estimate cu FDT[®] în prezentul articol.

Cuvinte cheie: fluxul de căldură degajat, temperatură strat gaze fierbinți, influență ventilare, proprietăți termice ale finisajelor

Abstract. In this study, some empirical methods were used to estimate the temperatures of the hot gas layer in a fire compartment with standardised dimensions. A number of assumptions and limitations were imposed on the methods used, on the basis of which two fire scenarios were analysed, namely: the fire compartment, whose inner surfaces are lined, successively, with chipboard, gypsum board, expanded polystyrene and concrete is natural ventilated, respectively mechanically ventilated. It was also considered that the value of the heat release rate (HRR) is constant, with values of 250 kW, 500 kW and 1000 kW. By using the Fire Dynamics Tools (FDT[®]) developed by the US Nuclear Regulatory Commission [11], diagrams of the temperature of the hot gas layer were obtained and a comparative analysis of the results was performed. Thus, it was found that the temperature values of the hot gas layer released in a fire compartment are influenced by a number of parameters, such as: the thermal properties of the interior finishes, the heat release rate, the geometry of the fire compartment, respectively the ventilation system that was used. On the premises of Fire Safety Engineering Faculty, one such a fire compartment was built. In the fire compartment. This fire compartment will be used for, experimental tests that are to be conducted in order to validate the empirical results initially estimated with FDT[®].

Key words: heat release rate, hot gas layer temperature, ventilation influence, thermal properties of interior lining

1. Introducere

Prezenta lucrare de cercetare descrie metodologia de calcul a temperaturii stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu, utilizând un sistem de ventilație naturală sau forțată. Compartimentul este considerat, în mod alternativ, cu următoarele finisaje la interior: placă de PAL, placă de ghips carton, panou decorativ din polistiren, respectiv, beton. Un incendiu inițiat într-un compartiment poate fi tratat ca un incendiu

liber, până când feedback-ul termic și scăderea cantității de oxigen devin relevante. Evoluția unui incendiu depinde de următoarele variabile: fluxul degajării de căldură (HRR), dimensiunile, structura și tipul de ventilație al încăperii.

Pe timpul dezvoltării unui incendiu, fluxul termic de căldură degajat variază în funcție de cele patru faze distincte ale incendiului: inițierea sau aprinderea incendiului (începutul combustiei); perioada pre-flashover sau de creștere (incendiul este localizat la câteva obiecte care ard); stadiul post-flashover (incendiul este complet dezvoltat și a cuprins întreg compartimentul de incendiu); stadiul de stingere. Trecerea de la faza de creștere la cea de dezvoltare se numește *flashover*. Fluxul de degajare a căldurii depinde de caracteristicile combustibilului, inflamabilitatea, căldura degajată de combustie, cantitatea de combustibil, aranjarea în spațiu a elementelor din compartiment, proximitatea primului material aprins față de alte material inflamabile, caracteristicile materialelor ce intră în construcția compartimentului, rata de absorbție termică și inflamabilitatea, mărimea și geometria compartimentului, respectiv de condițiile de ventilare.

În vederea aprofundării fenomenelor care apar pe timpul dezvoltării unui incendiu, specialiștii din domeniul securității la incendiu au folosit modelarea matematică. Aceasta ajută în aplicațiile de protecție împotriva incendiilor, în cuantificarea posibilităților de predicție ale modelelor de incendiu, dar și în comparația modelelor matematice cu datele experimentale existente.

S-au efectuat numeroase cercetări privind stabilirea unor corelații care să facă predicții cu privire la valoarea parametrilor rezultați în urma unui incendiu.

Un astfel de exemplu îl constituie corelația McCaffrey, Quintiere și Harkleroad (MQH) [1], care reprezintă o estimare simplificată a temperaturilor stratului de gaze fierbinți. Această metodă a fost obținută în urma efectuării a peste 100 de experimente și se bazează pe expresia conservării energiei, presupunându-se că fluxul de energie convectivă care iese din incintă și pierderile prin conducție prin suprafețele incintei ale unui strat superior, cu temperatură uniformă, sunt egale cu fluxul căldurii degajate de incendiu.

Au fost efectuate cercetări asupra unei noi corelații, capabilă să facă predicția temperaturii gazelor fierbinți atât în cazul incendiilor slab ventilate cât și în cazul incendiilor puternic ventilate [2]. Această corelație a fost stabilită și validată prin comparația cu un set de experimente și prin comparația cu corelația MQH. Pentru obținerea rezultatelor experimentale s-au folosit incinte de mici dimensiuni (0,8 m x 1,2 m x 0,8 m), prevăzute cu o tavă de carburant lichid, dispusă pe podea, în diverse zone ale camerei și cu diferite configurații ale ușii, în cazul încăperilor puternic ventilate, respectiv cu diferite configurații ale ferestrei, în cazul încăperilor slab ventilate. Astfel, s-a constatat faptul că noua corelație a condus la rezultate mai apropiate de valorile experimentale, doar în cazul încăperilor slab ventilate. La încăperile puternic ventilate, s-au obținut valori specifice corelației MQH.

Utilizându-se corelația Law, o metodă de estimare a temperaturii maxime din compartimentele de incendiu cu ventilație naturală, care se bazează pe o serie de teste efectuate la scară naturală, a fost dezvoltată o formulă a debitului masic care arată

dependența acestuia de factorul de ventilație $[(\text{aria uşii} / \text{înălţimea uşii})^{1/2}]$, raportul de aspect al uşii (lăţimea uşii / înălţimea uşii) și temperatura stratului de fum [3]. Caracteristicile constructive ale unei incinte, date de existența uşilor și / sau a ferestrelor, influențează, în mod direct, evoluția unui incendiu. Această formulă, însă, nu se aplică configurațiilor de tip fereastră. Ventilația prin ferestre este mai complexă decât cea prin uși, datorită efectului dat de înălțimea pervazului ferestrei. În acest sens, a fost dezvoltată o formulă generală pentru debitul masic, prin utilizarea unui model teoretic reprezentat de o sursă de aprindere ideală, la nivelul podelei, și două zone staționare, caracterizate de faptul că nu are loc amestecul dintre stratul de fum și aer. Astfel, prin combinarea configurațiilor în cazul ventilațiilor prin uși și ferestre într-o singură ecuație, a fost obținută o formulă cu o acuratețe de până la 15 %, în comparație cu datele experimentale disponibile [4].

Totodată, a fost dezvoltată o altă corelație, care face predicția pierderii de masă a combustibilului și care este dependentă de efectele răspunsului termic, curentul de aer ambiental și cantitatea de aer acumulată la nivelul deschiderii [5]. Condițiile atmosferice, cum ar fi prezența vântului, influențează circulația aerului în clădiri și, implicit, evoluția unui incendiu. Astfel, vântul poate intra prin geamurile sparte sau topite ale ferestrelor unei clădiri și poate devia flacăra, ceea ce ar conduce la propagarea incendiului la alte etaje sau la clădirile învecinate și poate influența mișcarea fumului și eficiența evacuării acestuia. Flăcările ies din încăperea incendiată prin deschiderile acesteia, când debitul de aer care intră nu este suficient pentru ardere, acesta numindu-se foc sub-ventilat. Pentru a analiza influența vântului, s-au efectuat studii privind caracteristicile unui incendiu într-un compartiment cu două deschideri (ușă și fereastră), amplasate la niveluri verticale diferite, pe ziduri opuse, în condițiile unui vânt ambiental. La viteze mici ale vântului, aerul proaspăt intră în compartiment prin partea de jos a uşii, iar gazele fierbinți și flăcările ies pe geam și prin partea de sus a uşii. La viteze mari ale vântului, flăcările ies pe uşă. Aceasta reprezintă tranziția mișcării fumului de la forța de rezistență a vântului cu curgere în sus (viteza de intrare a vântului în compartiment pe geam este mică, iar gazele fierbinți ies pe geam), la forța de rezistență a vântului cu curgere în jos (viteza de intrare a vântului în compartiment pe geam este mare, iar gazele fierbinți ies prin partea de jos a uşii). Rata de pierdere a masei combustibilului este influențată de temperatura din apropierea tavanului. În baza analizelor dimensionale este propusă o lungime caracteristică, „l”, care reprezintă cantitatea de aer acumulată la intrarea pe uşă. Lungimea caracteristică „l” poate fi utilizată pentru a estima efectele vântului asupra ratei de pierdere de masă a combustibilului. Creșterea vitezei vântului ar conduce la ieșirea flăcărilor pe uşă și restricționarea intrării aerului pe uşă, ceea ce ar reduce pierderea de masă a combustibilului.

Predicția debitului masic al gazelor fierbinți are o deosebită importanță, în vederea evaluării expunerii oamenilor la căldura și fumul degajate în urma incendiului. În acest sens, a fost dezvoltată o ecuație, în baza căreia poate fi estimat debitul masic al gazelor fierbinți, atunci când înălțimea stratului gazelor fierbinți este cunoscută. S-a constatat, astfel, că debitul masic este dependent de înălțimea și temperatura stratului gazelor

fierbinți la evacuarea dintr-un compartiment de incendiu [6]. De asemenea, s-au efectuat cercetări în vederea estimării debitului masic, a temperaturii și a interfeței înălțimilor stratului de gaze fierbinți, atât într-un compartiment de incendiu, cât și în încăperea adiacentă acestuia. Au fost folosite două metode, prima metodă fiind reprezentată de două modele empirice similare corelației MQH, a doua metodă fiind bazată pe principiul conservării energiei și masei [7].

Cea mai importantă predicție, pe care un model de incendiu o poate face este temperatura stratului gazelor fierbinți. Astfel, impactul incendiului (amplora și intensitatea incendiului) nu este influențat atât de mult de fluxul de eliberare a căldurii, ci, mai ales, de temperatura înregistrată în interiorul compartimentului [12].

Pe lângă metoda MQH [1], care estimează temperatura stratului de gaze fierbinți într-un compartiment cu ventilație naturală, în cuprinsul acestei lucrări sunt prezentate alte câteva metode empirice. Astfel, Beyler [8] a creat o formulă pentru a estima temperatura stratului de gaze fierbinți într-o încăpere închisă, în timp ce Deal și Beyler (DB) [9], respectiv Foote, Pagni și Alvares (FPA) [10] au dezvoltat o metodă de predicție a temperaturii stratului de gaze într-o încăpere cu ventilație forțată. Aceste corelații au stat la baza unor studii efectuate la nivel internațional, dintre care se poate aminti cel referitor la verificarea și validarea unor modele de incendiu selectate pentru aplicații ale centralelor nucleare [12]. Acel studiu a constatat în realizarea a șase seturi de teste și compararea estimărilor teoretice ale temperaturilor stratului de gaze fierbinți obținute prin metodele empirice [1], [8], [9], [10] cu valorile experimentale obținute.

Astfel, preocupările în domeniu la nivel internațional întăresc faptul că prezentul studiu conține informații importante și de actualitate.

2. Metode empirice de estimare a temperaturii stratului de gaze fierbinți într-un compartiment

2.1. Estimarea temperaturii stratului de gaze fierbinți într-un compartiment cu ventilare naturală; metoda lui McCaffrey, Quintiere și Harkleroad (MQH)

Temperatura de-a lungul compartimentului este afectată de aerul care alimentează incendiul și de locul prin care intră aerul în compartimentul de incendiu.

De obicei, pentru experimente ce implică incendii în spații închise este folosită o încăpere cu o singură deschidere dreptunghiulară în perete, deoarece astfel de scenarii sunt des întâlnite în viața reală, unde o singură ușă sau fereastră reprezintă calea pentru ventilație naturală. Stratul de gaze fierbinți, care se formează, coboară la nivelul deschiderii până când se atinge un echilibru cvasi-static între debitul masic spre interiorul stratului de gaze fierbinți și debitul masic spre exterior.

McCaffrey, Quintiere și Harkleroad [1] au dezvoltat o corelație statistică, adimensională pentru estimarea temperaturii stratului de gaze fierbinți cu ventilație naturală, pentru care sursa incendiului a fost plasată în centrul compartimentului. Formula este dată de expresia:

$$\Delta T_g = 6,85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_v \sqrt{h_v A_T h_k}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

unde

$\Delta T_g = T_g - T_a$ - creșterea temperaturii gazului din stratul superior față de temperatura ambientală (K);

T_a - temperatura aerului ambiental (K);

\dot{Q} - fluxul termic de căldură degajat de către incendiu (kW);

A_v - aria deschiderii ventilației (m²);

h_v - înălțimea deschiderii (m);

h_k - coeficientul de transfer termic efectiv (kW/m²K);

A_T - suprafața totală a compartimentului care acoperă marginile suprafeței, cu excepția suprafeței deschiderilor de ventilare (m²).

Calcularea ariei deschiderii ventilației se realizează după formula $A_v = (w_v)(h_v)$, unde w_v și h_v sunt lățimea, respectiv înălțimea deschiderii. Aria totală a suprafețelor interioare ale compartimentului se obține după expresia:

$$A_T = 2w_c l_c + 2h_c w_c + 2h_c l_c - A_v \quad (2)$$

unde

w_c - lățimea compartimentului (m);

l_c - lungimea compartimentului (m);

h_c - înălțimea compartimentului (m).

Coeficientul de transfer termic efectiv, h_k , este constanta de proporționalitate dintre fluxul de căldură și diferența de temperatură. Acesta se calculează în funcție de timpul de penetrare, t_p , timpul necesar ca temperatura să fie transferată în material înainte de a începe să se piardă prin partea (rece) opusă focului. Dacă perioada de ardere nu depășește timpul de penetrare termică, materialul de suprafață va reține mare parte din energia transferată. Astfel, h_k are următoarea expresie:

$$h_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{k\rho c}{t}}, & t \leq t_p \\ \frac{k}{\rho}, & t > t_p \end{cases} \quad (3)$$

unde

$k\rho c$ - inerția termică a construcției interioare (proprietate termică a materialului responsabil pentru creșterea temperaturii) (kW/m²K)²sec;

k - conductivitatea termică a materialului (kW/mK);

ρ - densitatea materialului (kg/m³);

c - capacitatea termică (J/K);

t - timpul după aprindere (sec).

Durata de penetrare termică este aproximată astfel:

$$t_p = \frac{\rho c_p}{k} \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 \quad (4)$$

Analiza parametrilor care influențează temperaturile stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu și metode utilizate pentru estimarea acestora în funcție de sistemul de ventilație folosit

unde

t_p - durata de penetrare termică (sec);

c_p - căldura specifică a materialului (kJ/kgK);

δ - grosimea materialului (m).

2.2. Estimarea temperaturii stratului de gaze fierbinți într-un compartiment cu ventilație forțată

Foote, Pagni și Alvares (FPA) [10] au creat o metodă de predicție a temperaturii stratului de gaze într-o încăpere cu ventilație forțată, pe baza metodei MQH. Experimentele care au stat la baza metodei au presupus introducerea de aer la nivelul podelei și scoaterea afară a gazelor de la nivelul tavanului printr-un ventilator axial. Au obținut următoarea corelație adimensională:

$$\frac{\Delta T_g}{T_a} = 0,63 \left(\frac{\dot{Q}}{mc_a T_a} \right)^{0,72} \left(\frac{h_k A_T}{mc_a} \right)^{-0,36} \quad (5)$$

unde

m - debitul masic de ventilație din compartiment (kg/sec);

c_a - căldura specifică a aerului (kJ/kgK).

Metoda lui Deal and Beyler (DB) [9] constă într-o ecuație quasi-staționară de conservare energie simplificată (modelul presupunând pierderea de căldură printr-un singur perete).

$$\Delta T_g = \frac{\dot{Q}}{mc_a + h_k A_T} \quad (6)$$

Aici coeficientul de transfer termic este dat de expresia

$$h_k = \begin{cases} 0,4 \sqrt{\frac{k\rho c}{t}}, & t < t_p \\ 0,4 \frac{k}{\rho}, & t > t_p \end{cases} \quad (7)$$

2.3. Estimarea temperaturii stratului de gaze fierbinți într-un compartiment închis

Formula dezvoltată de Beyler [8] pentru a estima temperatura stratului de gaze fierbinți într-o încăpere închisă este următoarea:

$$\Delta T_g = \frac{2K_2}{K_1^2} (K_1 \sqrt{t} - 1 + e^{-K_1 \sqrt{t}}) \quad (8)$$

unde:

$$K_1 = \frac{2(0,4\sqrt{k\rho c})A_T}{mc_a} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{Q}{mc_a} \quad (10)$$

m - masa gazului în compartiment (kg).

3. Scenariile de incendiu analizate

Scenariile de incendiu constau în următoarele situații: un compartiment de lățime 3,1 m, lungime 5,4 m și înălțime 2,1 m (după cum se poate observa în *figura 1*) este ventilat natural sau forțat. Pentru ventilarea naturală s-au luat în considerare două cazuri: pentru primul caz, deschiderea este o ușă de lățime 0,9 m și înălțime 2 m, amplasată la nivelul podelei; pentru cel de-al doilea, deschiderea este o fereastră de lățime 1,4 m, înălțime 1 m, amplasată la o distanță de 0,8 m deasupra podelei. Materialul de finisaj al suprafețelor interioare este, pe rând, placă de PAL, placă de ghips carton, panou decorativ din polistiren și beton având grosimea de 1,2 cm, 1,25 cm, 2 cm, respectiv 3 cm. Fluxul degajării de căldură (HRR) ia pe rând valoarea de 250 kW, 500kW, respectiv 1000 kW.

Temperatura ambientală (T_a) e considerată 25 °C, căldura specifică a aerului (c_a) este 1,00 kJ/kgK și densitatea aerului ambiental (ρ_a) este 1,18 kg/m³.

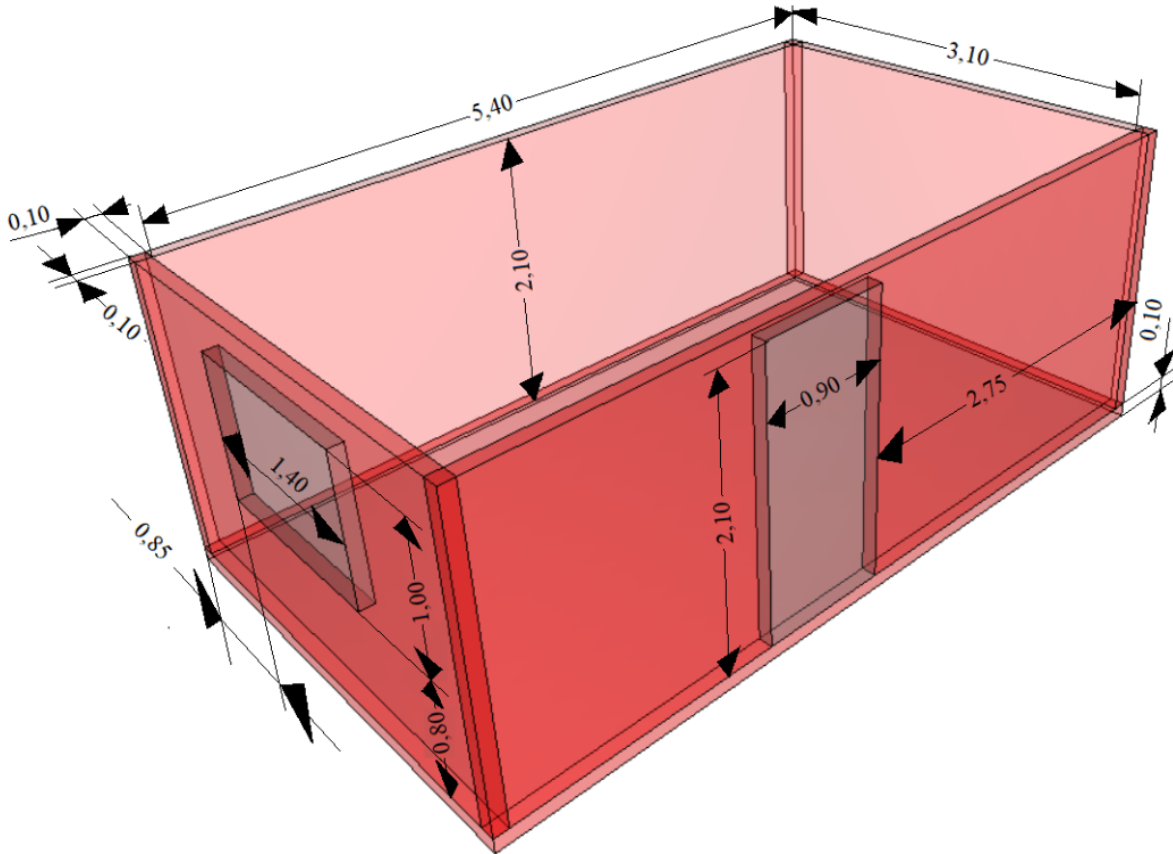


Fig. 1. Compartimentul de incendiu analizat

Materialele utilizate ca finisaje în interiorul compartimentului de incendiu prezintă valori diferite ale proprietăților termice, ceea ce conduce la comportări diferite pe timpul variațiilor de temperatură.

Placa de ghips-carton constă dintr-un strat de ghips sandwich, între două foi de hârtie de acoperire. Particulele de cristal ale ghipsului brut ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) conțin apă legată chimic (apă de cristalizare) în aproximativ 21% din greutate. Atunci când este

expus la un mediu cu temperatură înaltă, sulfatul de calciu dihidrat ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) suferă două reacții de descompunere endoterme, în timpul cărora apa legată chimic se disociază și se evaporă. Acest proces, cunoscut sub numele de „deshidratare de ghips” (sau „calcinare”), are loc între $80\text{ }^\circ\text{C}$ și $250\text{ }^\circ\text{C}$ [13]. Proprietățile termice ale plăcii de ghips variază în funcție de compoziția miezului (interiorului) acesteia. Variația temperaturii cu capacitatea termică volumică (ρc_p , unde ρ este densitatea și c_p este căldura specifică) a ipsosului pur a fost ilustrată de Kodur [14], pe baza informațiilor raportate în literatură [15]. Conductivitatea termică a produselor din ghips este dificil de evaluat, datorită variațiilor mari ale porozităților lor și naturii agregatelor.

O valoare tipică a conductivității termice pentru plăcile de ipsos cu o densitate de aproximativ $700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ este de $0,25\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Au fost efectuate măsurători ale căldurii specifice, la o viteză de încălzire de $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ și s-a constatat că deshidratarea ghipsului a condus la două vârfuri, care apar în curba de căldură specifică, la temperaturi de aproximativ $100\text{ }^\circ\text{C}$ și $650\text{ }^\circ\text{C}$. Valorile de vârf sunt ușor diferite față de cele raportate anterior de Kodur [15]. Acest lucru se poate datora compoziției neomogene a ghipsului. Placa de ghips normal poate cădea de pe un zid sau tavan imediat ce ghips-cartonul s-a deshidratat, aproape simultan cu începerea arderii montanților de lemn. Plăcile îmbunătățite cu fibră de sticlă și fixări realizate la distanțe mici vor cădea atunci când fibra de sticlă se topește, respectiv când întreaga placă ajunge la o temperatură de aproape $700\text{ }^\circ\text{C}$ [16]. În lucrarea „Structural design for fire safety”, sunt prezentate două temperaturi de desprindere a plăcilor de ghips-carton: $800\text{ }^\circ\text{C}$ pentru perete și $600\text{ }^\circ\text{C}$ pentru plafon (Konig and Walleij, 2000). Temperatura plăcii de ghips în momentul căderii primei bucăți de ghips-carton nu este un criteriu adecvat pentru cedarea plăcii, variind într-un interval mare de la un tip de asamblare la altul, fără să fie stabilite corelații între parametrii asamblărilor [17].

Polistirenul expandat, atunci când este expus la temperaturi de peste $100\text{ }^\circ\text{C}$, începe să se înmoaie, să se contracte și în cele din urmă să se topească. La temperaturi mai ridicate, produsele combustibile gazoase se formează prin descompunerea topiturii. Dacă acestea pot fi aprinse de o flacără sau scânteie, depinde în mare măsură de temperatura, de durata expunerii, de fluxul de căldură și de aerul din jurul materialului (disponibilitatea oxigenului). În mod normal, polistirenul nu se va aprinde prin scânteii de sudură sau de la jarul unei țigări aprinse; totuși, flăcările mici îl vor aprinde ușor, cu excepția cazului în care conține aditivi ignifugi. Temperatura de aprindere a acestui material este de $360\text{ }^\circ\text{C}$, iar dacă acesta este tratat ajunge la $370\text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura de autoaprindere a polistirenului expandat topit, în clasa sa standard, este de $450\text{ }^\circ\text{C}$. După aprinderea materialului standard, arderea se va propaga ușor pe suprafața expusă din cauza densității scăzute, 98% aer și 2% polistiren și va continua să ardă până când se va consuma tot materialul. Prin urmare, cantitatea de căldură eliminată este, de asemenea, scăzută [18]. În concluzie, polistirenul este inflamabil, așa cum sunt multe alte materiale de construcție. Se recomandă ca polistirenul expandat să fie întotdeauna protejat de un material confecționat în acest scop sau prin încapsulare completă.

În ceea ce privește PAL-ul, lemnul este o parte integrantă a structurilor, dar este și sursa principală de realizare a mobilierului pe care-l regăsim în construcțiile din întreaga lume. Plăcile din PAL sunt realizate din aşchii de lemn aglomerate cu răşini sintetice. Ele se confecţionează din deşuri sau particule de lemn de foioase moi sau răşinoase, mărunţite pe cale mecanică şi aglomerate cu ajutorul unor adezivi sintetici, sub influenţa presiunii şi temperaturii. Când lemnul este încălzit treptat, la temperaturi ridicate, încep să apară schimbări în structura sa, accelerate de creşterile de temperatură. Cele trei componente polimerice din lemn încep să se descompună termic într-un amestec de gaze volatile, gudron (levoglucosan) şi reziduu carbonizat cu conţinut de cărbune. Descompunerea este adesea privită ca suprapunerea mecanismelor de descompunere a constituenţilor individuali: hemiceluloza se descompune mai întâi (la 180-350 °C), urmată de celuloză (la 275-350 °C) şi lignină (la 250-500 °C) [19]. Stabilitatea termică a ligninei este datorată structurii sale puternic reticulate şi greutatei moleculare înalte [19]. Reacţiile moleculare de oxidare deshidratează celuloza şi începe repolimerizarea levoglucosanului, slăbind structurile aromatice care devin structuri de carbon grafitat, în jurul la 500 °C. Acest proces de descompunere este numit piroliză. Piroliza lemnului a făcut obiectul unor cercetări ample în ultimii ani [20]. Astfel de studii au arătat că, în timp ce suprafaţa carbonizată a lemnului poate avea temperaturi de 800 °C, piroliza principală a lemnului începe la temperaturi de peste 225 °C şi se termină la temperaturi sub 500 °C. Pentru a înţelege şi modifica acest comportament la foc al lemnului, este necesar să cunoaştem cât mai multe detalii cu privire la procesele sale de descompunere. Pentru acest scop sunt utilizate diferite tehnici de analiză termică şi de evaluare a inflamabilităţii, inclusiv analiza termogravimetrică (TGA), con-calorimetria şi testul SBI (eng: Single Burning Item) - a unui singur element arzând. Rezultatele acestor teste sunt, deseori, în mare măsură, dependente de diferiţi parametri. Printre aceşti parametri se includ: modificările compoziţiei gazului, ale temperaturii, viteza de încălzire şi dimensiunea formei eşantionului. În cazul expunerii lemnului la acţiunea focului, încep reacţiile moleculare de oxidare care duc la deshidratarea celulozei şi începe repolimerizarea levoglucosanului; acest lucru slăbeşte structurile aromatice, care devin structuri de carbon grafitat în jurul temperaturii de 500 °C. Atunci când s-a atins concentraţia adecvată a amestecului combustibil-aer, oxidarea gazelor de piroliză conduce la arderea cu flacără. În continuare, oxidarea reziduuului carbonizat se produce cu incandescenţă sau cu ardere mocnită.

Betonul este un material de construcţii compus din ciment, agregat (pietriş şi nisip) şi apă. Proprietăţile termice ale betonului variază în funcţie de o serie de factori: raportul apă – ciment, dozajul de ciment, granulometria. În cazul încălzirii betonului (inclusiv a betonului armat) fiecare componentă va avea o comportare diferită, având coeficienţi de dilatare proprii, ceea ce conduce la apariţia şi dezvoltarea unor microfisuri şi, în final, la fenomenul de degradare termică a betonului la temperatură. Cedarea la foc a elementelor şi structurilor din beton armat poate avea loc prin: a) atingerea temperaturii critice în armătură (cca. 550 °C la betonul armat şi 450 °C la betonul precomprimat) datorită desprinderii totale sau parţiale a stratului de acoperire

Analiza parametrilor care influențează temperaturile stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu și metode utilizate pentru estimarea acestora în funcție de sistemul de ventilație folosit

al armăturii în timpul incendiului sau prin atingerea locală a temperaturii critice în dreptul unei fisuri; b) pierderea aderenței dintre beton și armătură din cauza dilatării inegale ale armăturii și betonului, cu smulgerea armăturilor ancorate și prăbușirea bruscă a elementului; c) explozia betonului - fenomen ce se manifestă prin desprinderea rapidă a unor bucăți de material de pe suprafețele încălzite ale elementelor de construcții după 5 – 15 minute, cu efecte sonore caracteristice (bubuituri). Explozia este provocată la temperaturi de aproximativ 400 – 500 °C de către dilatarea puternică a gazelor, precum și a vaporilor de apă rezultați din umiditate. Vaporii de apă e află într-un sistem închis prin impermeabilizarea stratului superficial, datorită particulelor de liant care închid porii de filtrare. Existența unor microfisuri care permit evacuarea gazului, precum și umiditatea insuficientă împiedică apariția fenomenului; d) Corodarea rapidă a armăturilor din beton, din cauza acțiunii agresive a unor substanțe chimice rezultate în urma intervenției pentru stingerea incendiului (de exemplu: acidul clorhidric rezultat din contactul apei cu produșii de ardere ai policlorurii de vinil). Elementele de construcții supuse la momente de încovoiere și la forțe tăietoare cedează mai repede sub acțiunea focului decât cele supuse la compresiune. Majoritatea betoanelor își schimbă culoarea în roz la cca. 300 °C. La 500 – 600 °C betonul devine gri și friabil. La 1200 °C betonul sinterizează, formând o suprafață fisurată de culoare galbenă, cu pete brune [21].

Proprietățile termice ale materialelor sunt prezentate în *Tabelul 1*:

Tabelul 1

Proprietățile termice ale materialelor [11]

Material	kpc (kW/m^2K) ² sec	k (kW/mK)	c (kJ/kgK)	ρ (kg/m^3)
PAL	0,15	0,00015	1,25	800
Ghips carton	0,18	0,00017	1,10	960
Polistiren	0,001	0,000034	1,5	20
Beton	2,90	0,0016	0,75	2400

Scenariile sunt centralizate în *Tabelul 2*:

Tabelul 2

Tipurile de scenarii utilizate

Nr.	Cod scenariu	Tip deschidere	HRR (kW)	Tip ventilație	Metodă
1.	U+F 250VN	Ușă și fereastră	250	Naturală	MHQ
2.	U+F 500VN	Ușă și fereastră	500	Naturală	MHQ
3.	U+F 1000VN	Ușă și fereastră	1000	Naturală	MHQ
4.	250VF1	-	250	Forțată	FPA
5.	500VF1	-	500	Forțată	FPA
6.	1000VF1	-	1000	Forțată	FPA
7.	250VF2	-	250	Forțată	DB
8.	500VF2	-	500	Forțată	DB
9.	1000VF2	-	1000	Forțată	DB

Codurile descrise în scenariile 1 – 9 au următoarele semnificații, care sunt prezentate în *Tabelul 3*:

Tabelul 3

Semnificațiile codurilor prezentate în scenariile de incendiu		
Nr.	Element cod scenariu	Semnificație
1.	U+F	Compartiment de incendiu prevăzut cu deschidere tip ușă, respectiv tip fereastră. Ventilația naturală a fost analizată separat pentru compartimentul cu deschidere tip ușă, respectiv pentru deschidere tip fereastră, cele două rezultate fiind prezentate pe aceeași diagramă.
2.	VN	Ventilație naturală (în compartimentul de incendiu a fost utilizată ventilația naturală)
3.	VF1	Ventilație forțată 1 (în compartimentul de incendiu a fost utilizată ventilația forțată – folosindu-se metoda FPA pentru calculul temperaturilor stratului de gaze fierbinți)
4.	VF2	Ventilație forțată 2 (în compartimentul de incendiu a fost utilizată ventilația forțată – folosindu-se metoda DB pentru calculul temperaturilor stratului de gaze fierbinți)
5.	250, 500, 1000	Valorile fluxului de căldură degajat

4. Ipoteze și limitări

Metodele prezentate în acest studiu implică o serie de presupuneri și limitări, în funcție de tipurile de mișcare a aerului, și anume: prin convecție naturală, respectiv convecție forțată.

Există ipoteze și limitări care se aplică atât situațiilor caracterizate prin convecție naturală, cât și celor prin convecție forțată. Acestea se referă la faptul că metodele utilizate în acest studiu se aplică cel mai bine încăperilor cu dimensiuni standardizate, ele trebuie să fie folosite cu precauție în cazul încăperilor mari. Geometria compartimentului presupune ca acesta să aibă o formă paralelipipedică, fără buzunare laterale, pentru a nu fi afectată rata de umplere cu fum a încăperii. Metodele se aplică atât incendiilor cu dezvoltare tranzitivă, cât și celor cu dezvoltare stabilă. Valoarea parametrului HRR este cunoscută. Nu este nevoie ca acesta să fie constantă, valoarea lui putându-se modifica în funcție de timp. Aceste metode prezentate anterior fac o predicție a temperaturilor medii și nu se aplică în cazurile în care se dorește predicția unor temperaturi punctuale. În situația în care, la partea superioară a încăperii există o serie de obstacole, cum ar fi trasee de cabluri electrice, conducte, tubulatură de ventilație, acestea necesită o analiză amănunțită. Se folosește un singur coeficient de transfer termic pentru toată suprafața interioară a încăperii. Fluxul termic către și prin limitele încăperii este unidimensional, ignorându-se colțurile și marginile. Aceste metode presupun că pierderea de căldură are loc în urma debitului masiv ce iese prin deschiderile încăperii. În consecință, aceste metode nu se aplică în cazurile în care trece un timp semnificativ înainte ca gazele fierbinți să iasă prin deschiderile încăperii.

Analiza parametrilor care influențează temperaturile stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu și metode utilizate pentru estimarea acestora în funcție de sistemul de ventilație folosit

În cazul în care mișcarea aerului într-o încăpere este caracterizată doar prin convecție naturală, corelațiile sunt valabile pentru încăperi în care temperatura straturilor superioare de gaze fierbinți atinge 600 °C, ventilația se face natural și apare un echilibru cvasistatic între debitul masic ce intră și debitul masic ce iese din stratul de gaze fierbinți. Aceste corelații presupun că incendiul se localizează în centrul încăperii. Corelația asupra înălțimii stratului de fum ia în calcul o valoare medie constantă a densității stratului superior de fum pe toată durata procesului de umplere cu fum a încăperii. De asemenea, gurile de ventilare nu se amplasează în tavan.

În situația în care mișcarea aerului într-o încăpere este caracterizată doar prin convecție forțată, aceste corelații admit că încăperea este deschisă și că presiunea este de aproximativ o atmosferă. Aceste corelații nu se aplică pentru evaluarea sursei incendiului și se presupune că incendiul se localizează în centrul încăperii.

De asemenea, nu este luată în calcul contribuția materialelor de finisaj la ardere și nici influența descompunerii termice a acestora asupra proprietăților termice ale materialelor, cum ar fi conductivitatea termică, care se modifică în funcție de temperatură.

5. Rezultate. Analiza rezultatelor

Pentru obținerea graficelor comparative prezentate în figurile 2 ÷ 4, 5 ÷ 7, 8 ÷ 10, au fost prelucrate și comparate datele rezultate prin utilizarea Fire Dynamics Tools (FDT^s) dezvoltat de US Nuclear Regulatory Commission [11]. În acest studiu sunt analizate două situații, și anume: estimarea temperaturilor stratului de gaze fierbinți în cazul utilizării ventilației, naturale în cadrul unui compartiment de incendiu care arde, respectiv în cazul utilizării unui sistem de ventilație forțată.

5.1. Ventilație naturală

În cazul unui incendiu într-un compartiment cu ventilație naturală, folosindu-se metoda lui McCaffrey, Quintiere și Harkleroad [1], se iau în considerare două situații: în primul caz compartimentul este prevăzut cu o deschidere tip ușă, iar în al doilea caz, compartimentul este prevăzut cu o deschidere tip fereastră.

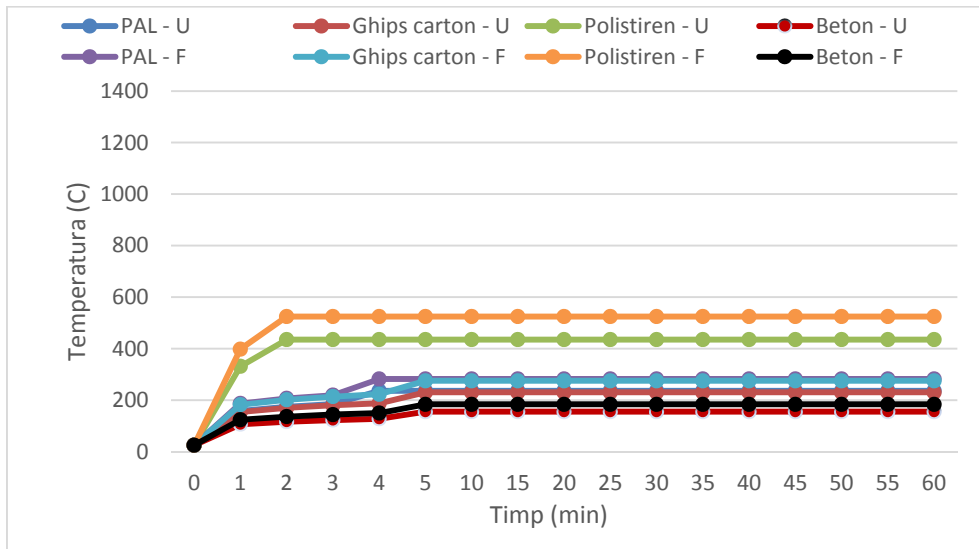


Fig. 2. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului (U+F)250VN

Analizând figura 2, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 435 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 236 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 230 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 155 °C, în 5 minute în cazul betonului, pentru deschiderea tip ușă. În situația compartimentului prevăzut cu deschidere tip fereastră, temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 525 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 282 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 275 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 183 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 250 kW.

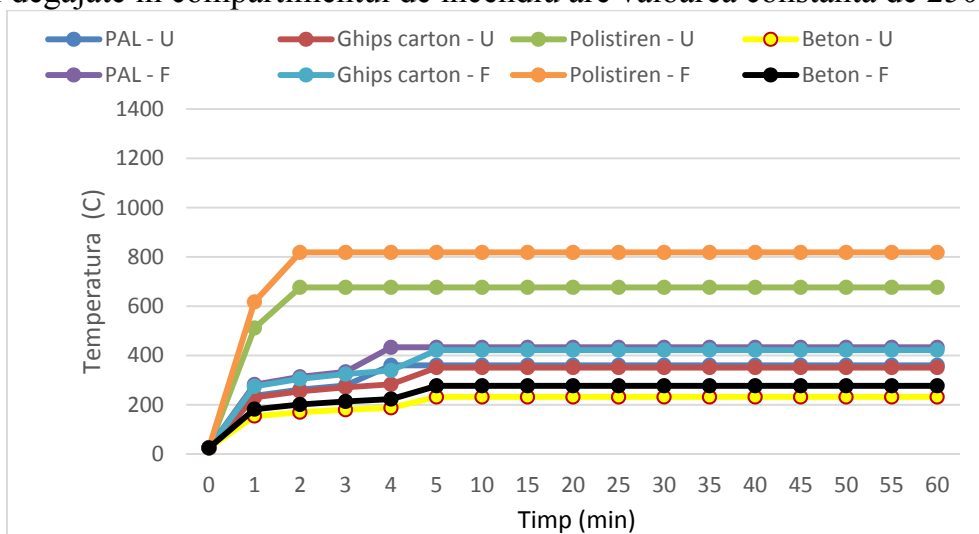


Fig. 3. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului (U+F)500VN

Analizând figura 3, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 676 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 360 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 350 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 231 °C, în 5 minute în cazul betonului, pentru deschiderea tip ușă. În situația compartimentului prevăzut cu deschidere tip fereastră, temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 818 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 433 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 421 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 276 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 500 kW.

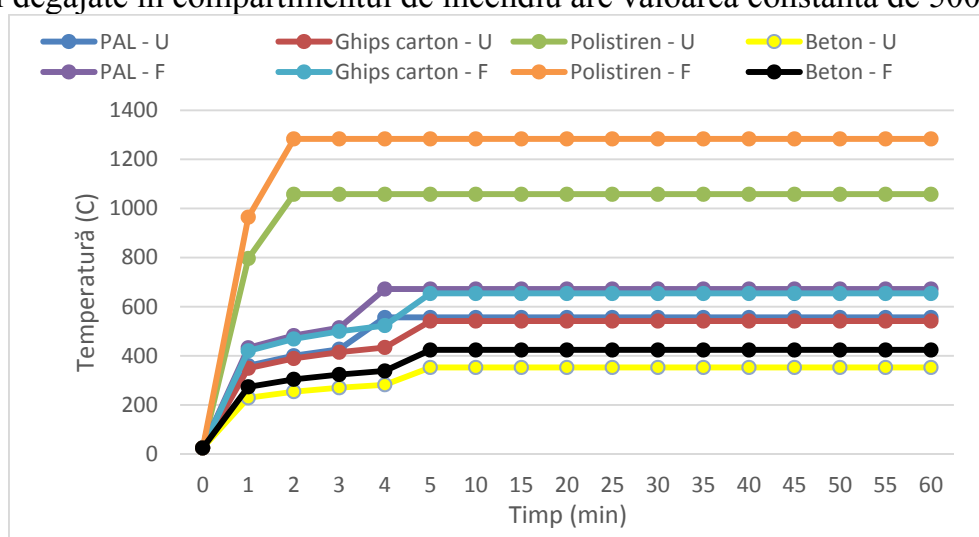


Fig. 4. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului (U+F)1000VN

Analizând figura 4, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 1058 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 556 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 542 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 353 °C, în 5 minute în cazul betonului pentru deschiderea tip ușă. În situația compartimentului prevăzut cu deschidere tip fereastră, temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 1283 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 672 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 654 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 424 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 1000 kW.

În situația compartimentului de incendiu cu ventilație naturală, atât în cazul configurației tip ușă, cât și în cazul configurației tip fereastră, din figurile 2, 3 și 4 se constată faptul că, începând cu momentele 2 (minute), 4 (minute) și 5 (minute), pentru

finisajele interioare din panou decorativ din polistiren, placă de PAL, placă de ghips carton, respectiv beton, valoarea temperaturii stratului de gaze fierbinți este constantă. Acest lucru se datorează ipotezei conform căreia, valoarea fluxului de căldură degajată de incendiu este constantă, luând pe rând valorile 250 kW, 500 kW, respectiv 1000 kW.

5.2. Ventilație forțată

În vederea estimării temperaturilor stratului de gaze fierbinți în cazul unui incendiu cu ventilație forțată, se folosesc două metode, și anume metoda Foote, Pagni și Alvares (FPA) [10], respectiv metoda Deal and Beyler (DB) [9]. Astfel, se consideră faptul că, debitul de fum și gaze toxice evacuate din compartimentul de incendiu, în cazul ventilației forțate, prin utilizarea unui ventilator axial, are valoarea de 10 m³/s.

5.2.1. Metoda Foote, Pagni și Alvares (FPA)

Utilizând metoda lui Foote, Pagni și Alvares (FPA) [10], metodă de predicție a temperaturii stratului de gaze într-o încăpere cu ventilare forțată, se obțin rezultatele prezentate în figurile 5, 6 și 7.

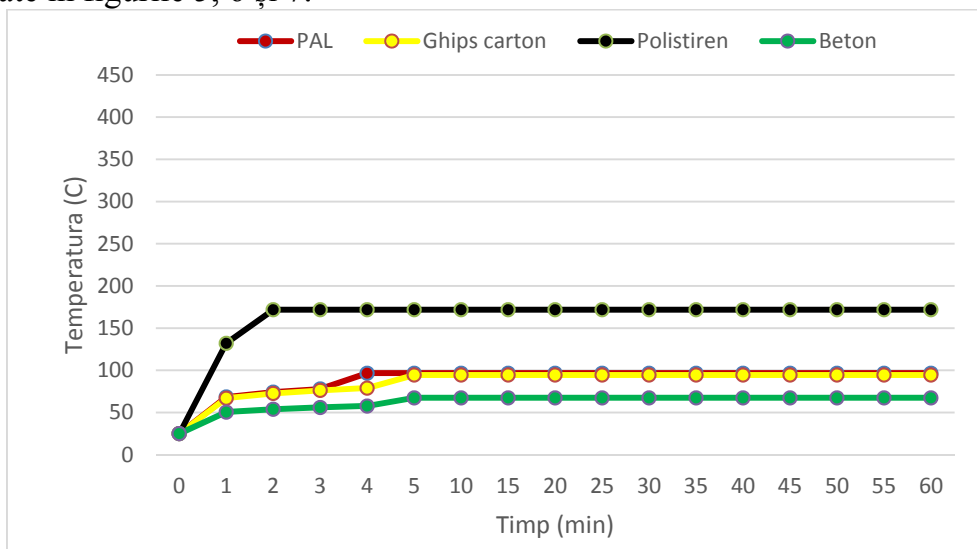


Fig. 5. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului 250VF1

Analizând figura 5, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 172 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 97 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 94 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 67 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 250 kW.

Analiza parametrilor care influențează temperaturile stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu și metode utilizate pentru estimarea acestora în funcție de sistemul de ventilație folosit

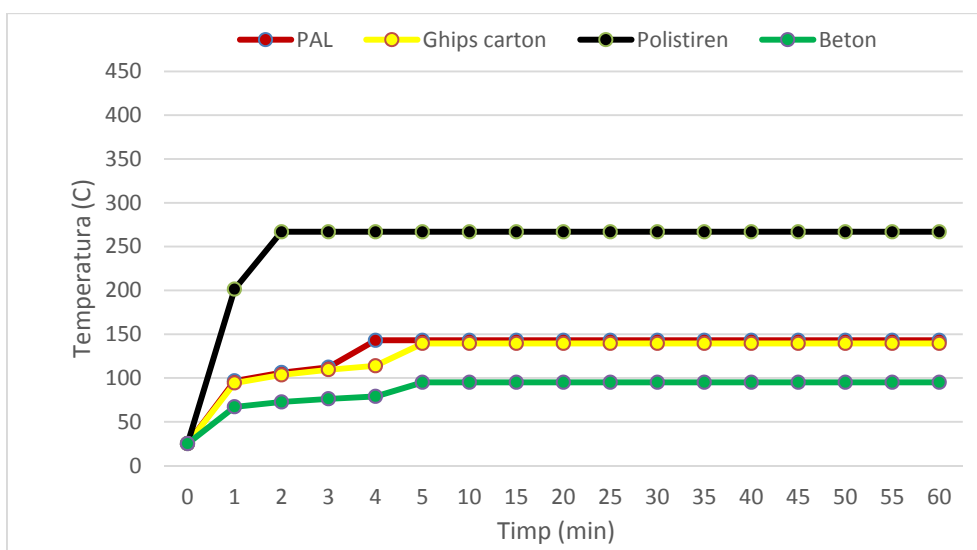


Fig. 6. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului 500VF1

Analizând figura 6, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 267 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 143 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 140 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 95 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 500 kW.

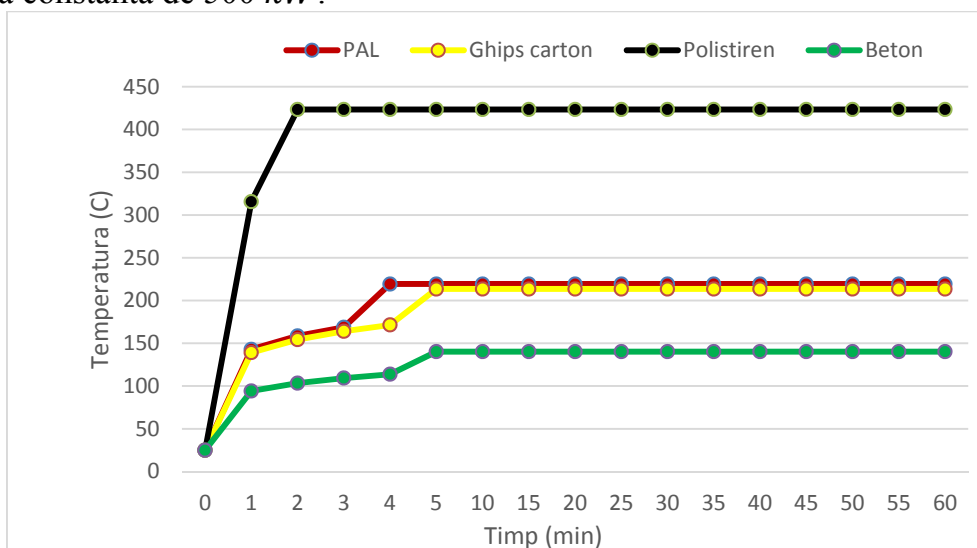


Fig. 7. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului 1000VF1

Analizând figura 7, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de aproximativ 423 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, aproximativ 219 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, aproximativ 213 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips

carton, respectiv aproximativ 140 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 1000 kW.

5.2.2. Metoda Deal and Beyler (DB)

Utilizând metoda lui Deal and Beyler [9], se obțin rezultatele prezentate în figurile 8, 9 și 10.

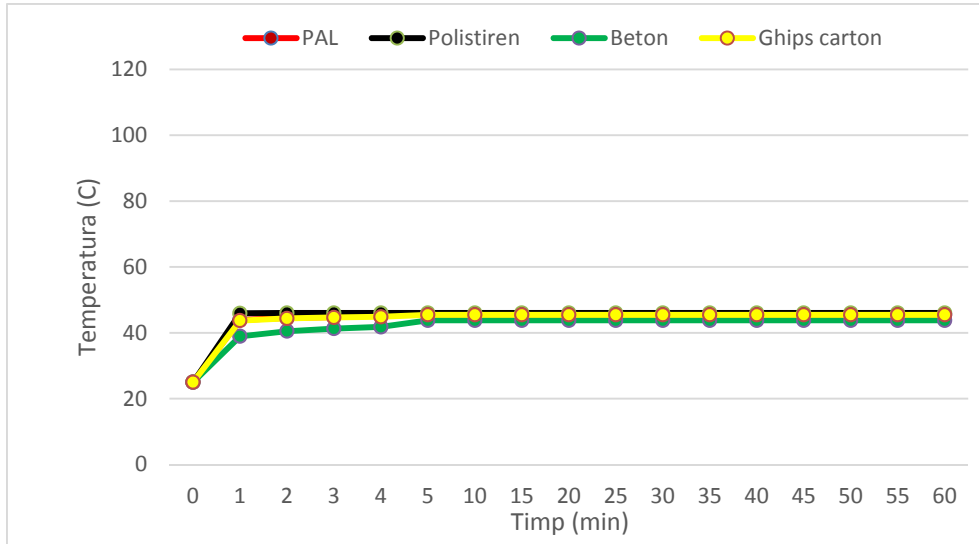


Fig. 8. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului 250VF2

Analizând figura 8, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de 46,02 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, 45,51 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, 45,45 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv 43,77 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 250 kW.

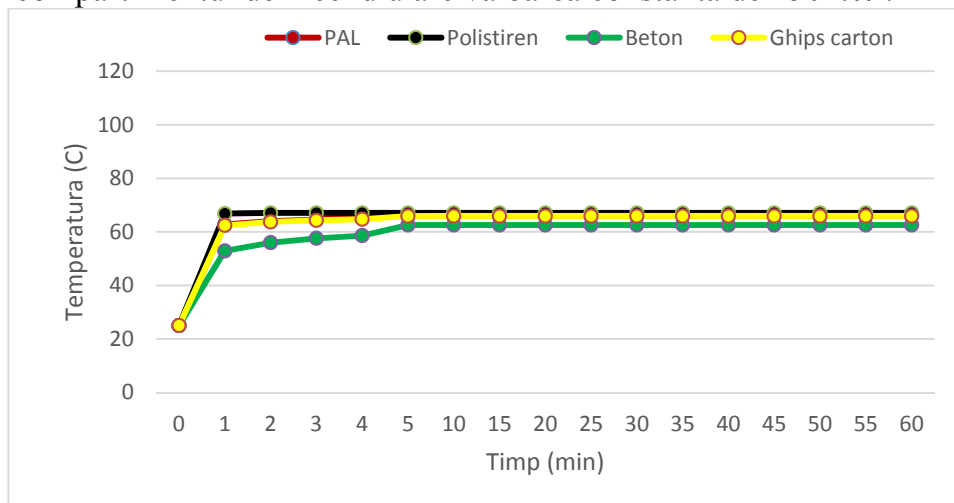


Fig. 9. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului 500VF2

Analizând figura 9, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de 67,04 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, 66,01 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, 65,91 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv 62,53 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 500 kW.

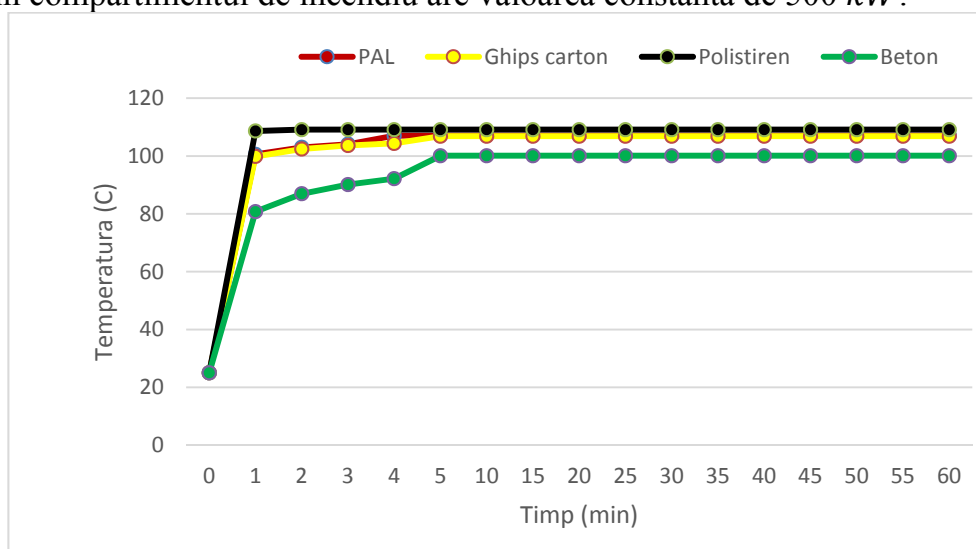


Fig. 10. Evoluția temperaturilor din stratul de gaze fierbinți în cazul scenariului 1000VF2

Analizând figura 10, se constată că temperatura stratului de gaze fierbinți atinge cea mai mare valoare, de 109,09 °C, în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul finisajului interior din polistiren, 107,02 °C, în 4 minute în cazul finisajului interior din PAL, 106,82 °C, în 5 minute în cazul finisajului interior din ghips carton, respectiv aproximativ 100,07 °C, în 5 minute în cazul betonului. Rezultatele sunt obținute în ipoteza în care fluxul căldurii degajate în compartimentul de incendiu are valoarea constantă de 1000 kW.

În situația compartimentului de incendiu cu ventilație forțată, atât în cazul utilizării metodei pentru estimarea temperaturilor stratului de gaze fierbinți a lui Foote, Pagni și Alvares (FPA), cât și în cazul utilizării metodei lui Deal and Beyler (DB), din figurile 5, 6, 7 respectiv 8, 9, 10, se constată faptul că, începând cu momentele 2 (minute), 4 (minute) și 5 (minute), pentru finisajele interioare din panou decorativ din polistiren, placă de PAL, placă de ghips carton, respectiv beton, valoarea temperaturii stratului de gaze fierbinți este constantă. Acest lucru se datorează ipotezei conform căreia, valoarea fluxului de căldură degajată de incendiu este constantă, luând pe rând valorile 250 kW, 500 kW, respectiv 1000 kW.

Concluzii

În cadrul acestui studiu, s-au obținut valori mari ale temperaturilor stratului de gaze fierbinți, atât în cazul finisajelor din polistiren, cât și în cazul PAL-ului, ghips-

cartonului sau al betonului. Cele mai mari valori ale temperaturilor stratului de gaze fierbinți au fost obținute în cazul compartimentului de incendiu prevăzut cu finisaj din polistiren, atât pentru valoarea HRR de 250 kW, cât și pentru valoarea de 500 kW, respectiv 1000 kW, în condițiile utilizării ventilației mecanice. Valorile mari ale temperaturilor stratului de gaze fierbinți, pot fi explicate și prin analiza rezultatelor obținute în urma proiectului efectuat pentru verificarea și validarea unor modele de incendiu selectate pentru aplicații ale centralelor nucleare prin utilizarea Fire Dynamics Tools (FDT^s) dezvoltat de US Nuclear Regulatory Commission [12]. Astfel, în cadrul aceluși studiu, în urma realizării a șase seturi de teste, s-a constatat că FDT^s supraestimează valorile teoretice ale temperaturilor stratului de gaze fierbinți obținute prin metodele empirice [1], [8], [9], [10] comparativ cu datele experimentale.

Pe de altă parte, valorile mari obținute ale temperaturilor stratului de gaze fierbinți se datorează faptului că nu este luată în calcul contribuția materialelor de finisaj la ardere și nici influența descompunerii termice. Astfel, la atingerea temperaturii de termodegradare a materialelor, se modifică conductivitatea termică a acestora. Conductivitatea termică, proprietate fizică specifică fiecărui tip de material, care exprimă comportarea acestuia la transferul termic conductiv, este dependentă de proprietățile fizice ale materialului, cum ar fi temperatura, densitatea, porozitatea și umiditatea. Conductivitatea termică crește liniar cu creșterea temperaturii. Betonul este însă, singurul material care nu contribuie la dezvoltarea incendiului, iar conductivitatea termică a acestuia scade la temperaturi mai mari de 100°C, ca urmare a schimbării conținutului de umiditate. De asemenea, în ceea ce privește descompunerea termică a materialelor, și anume atingerea, respectiv depășirea pe timpul incendiului a temperaturii de aprindere, temperatura cea mai mică, la care acesta poate împreună cu aerul să formeze un amestec gazos care să poată fi aprins, conduce la creșterea temperaturii stratului de gaze fierbinți.

Se constată astfel că, atât contribuția materialelor de finisaj la ardere cât și influența descompunerii termice conduc la creșterea temperaturii în interiorul compartimentului și, implicit, a temperaturii stratului de gaze fierbinți. Acest lucru explică astfel valorile supraestimate ale temperaturilor prin utilizarea modelului matematic.

În urma studiului efectuat se constată că temperaturile gazelor de ardere rezultate în urma unui incendiu sunt influențate de o serie de factori.

a) Influența proprietăților termice ale finisajelor interioare

Din figurile și calculele obținute se observă că, atât în cazul ventilației naturale, precum și în cazul ventilației forțate, valoarea cea mai mare a temperaturilor gazelor de ardere este în cazul finisajelor interioare din polistiren, fiind urmată de cele din PAL, ghips carton, respectiv beton.

Proprietățile termice ale materialelor folosite ca finisaje interioare, și anume placă de ghips carton, placa de PAL, panou decorativ din polistiren și beton influențează în mod direct temperatura gazelor fierbinți degajate în urma procesului de ardere.

Astfel, se observă faptul că, temperatura gazelor de ardere în compartimentul placat cu polistiren este cea mai mare, fiind urmată de temperatura gazelor de ardere în compartimentul placat cu PAL, ghips carton, respectiv beton. Acest lucru este posibil, deoarece, inerția termică, și anume capacitatea de a acumula căldura degajată în urma incendiului, este cea mai mică în cazul polistirenului (0,001) comparativ cu PAL (0,15), ghips carton (0,18), respectiv beton (2,90).

De asemenea, valorile mari ale temperaturilor gazelor de ardere obținute în cazul polistirenului, urmate de cele în cazul PAL-ului, ghips-cartonului, respectiv betonului se datorează și conductivității termice, caracterizată prin capacitatea unui material de a transmite căldura, prin conducție termică, atunci când este supus unei diferențe de temperatură. Conductivitatea termică este cea mai scăzută în cazul panoului decorativ din polistiren (0,000034), fiind urmată de conductivitatea termică a plăcii din PAL (0,00015), ghips carton (0,00017), respectiv beton (0,0016).

Se observă astfel că, temperatura maximă a gazelor de ardere se atinge în timpul cel mai scurt, 2 minute, în cazul polistirenului, respectiv 4 minute în cazul PAL-ului și 5 minute în cazul ghips cartonului și betonului.

Temperaturile gazelor de ardere în cazul compartimentului cu finisaj din PAL și ghips carton au valori apropiate, deoarece, plăcile din PAL și din ghips carton au valoarea inerției termice, respectiv a conductivității termice apropiate.

b) Influența fluxului de căldură degajat (HRR)

Rata de creștere a arderii în perioada pre-flashover și producerea de căldură și gaze toxice depind de caracteristicile combustibilului, cum ar fi inflamabilitatea, căldura degajată la combustie, cantitatea de combustibil și aranjarea în spațiu a elementelor din compartiment, proximitatea primului material aprins față de alte materiale inflamabile și caracteristicile materialelor ce intră în construcția compartimentului, ca rată de absorbție termică și inflamabilitatea, mărimea compartimentului, geometria și condițiile de ventilare.

Valoarea fluxului de căldură degajat influențează valorile temperaturilor gazelor de ardere. Astfel, cu cât parametrul HRR crește, luând pe rând valorile 250 kW, 500 kW respectiv 1000 kW, cu atât cresc temperaturile gazelor de ardere în cazul celor trei tipuri de finisaje interioare.

De asemenea, cu cât valoarea fluxului de căldură degajat în compartimentul de incendiu este mai mare și cu cât este mai mică suprafața deschiderii (aerisirea), cu atât crește temperatura stratului superior de gaze degajate în urma incendiului.

c) Influența geometriei compartimentului de incendiu

Tipul configurațiilor deschiderilor incintei, tip ușă, respectiv tip fereastră, prezintă o relație invers proporțională cu temperaturile gazelor de ardere.

În acest studiu se consideră că deschiderea tip ușă este mai mare decât deschiderea tip fereastră, ușa având o suprafață de $1,80 m^2$, iar fereastra o suprafață de $1,40 m^2$.

În cazul ventilației naturale, la o valoare a HRR, pentru compartimentul de incendiu prevăzut cu ușă, de 250 kW, 500 kW, respectiv 1000 kW egală cu valoarea HRR, pentru compartimentul de incendiu prevăzut cu fereastră, de 250 kW, 500 kW, respectiv 1000 kW, temperaturile gazelor de ardere sunt mai mari în cazul compartimentelor prevăzute cu fereastră, comparativ cu cele prevăzute cu ușă.

Astfel, cu cât suprafața deschiderii compartimentului de incendiu este mai mare, cu atât valoarea temperaturii gazelor de ardere este mai mică. Acest lucru demonstrează importanța existenței deschiderilor și implicit a spațiilor vitrate în clădiri. Cu cât numărul deschiderilor către exteriorul clădirii (ferestre, luminatoare, trape de desfumare) este mai mare, cu atât mai ușor le este echipelor de intervenție să execute operațiunile de evacuare a fumului și gazelor fierbinți rezultate în urma incendiului într-un timp cât mai scurt. Acest lucru conduce la scăderea temperaturii în compartimentul de incendiu și la îmbunătățirea vizibilității. Dacă aceste deschideri sunt într-un număr mic, sau lipsesc (cum s-a constatat în unele cazuri la locul intervenției), echipele de intervenție sunt nevoite să execute desfaceri, dislocări sau demolări ale elementelor de construcție, în lipsa unor echipamente pentru efectuarea ventilației mecanice. Acest aspect conduce la îngreunarea misiunilor de căutare-salvare, respectiv la creșterea timpului de localizare și lichidare a incendiului.

d) Influența sistemului de ventilație utilizat în compartimentul de incendiu

Temperaturile înregistrate într-un compartiment de incendiu sunt influențate atât de cantitatea de aer cu care este alimentat un incendiu cât și de locul în care aerul intră în compartiment.

Unul dintre parametrii analizați în această lucrare este reprezentat de influența sistemului de ventilație naturală, respectiv a sistemului de ventilație mecanică (forțată) asupra temperaturii stratului de gaze fierbinți.

Astfel, se constată că temperatura gazelor de ardere este mai mare în cazul compartimentului de incendiu în care se utilizează ventilația naturală, decât în cazul ventilației forțate.

Acest rezultat subliniază importanța dotării construcțiilor cu instalații de desfumare, precum și importanța dotării și utilizării de către echipele de intervenție a echipamentelor pentru efectuarea ventilației mecanice (fie prin introducerea de aer proaspăt în interiorul clădirii și realizarea unor deschideri la nivelul superior al acesteia în vederea scoaterii fumului, fie prin evacuarea fumului din clădire) în vederea protecției și salvării vieții oamenilor. Astfel, chiar dacă ventilația mecanică, comparativ cu ventilația naturală, prezintă dezavantajul unor costuri mai mari în ceea ce privește achiziția și mentenanța echipamentelor, principalul avantaj îl constituie evacuarea fumului într-un timp mai scurt, ceea ce conduce la scăderea temperaturii din compartimentul de incendiu, îmbunătățirea vizibilității și rezolvarea în timp operativ a misiunilor de căutare-salvare victimelor și de stingere a incendiilor.

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] *B. J. McCaffrey, J. G. Quintiere & M. Harkleroad*, Estimating room temperature and likelihood of flashover using fire test data correlation, *Fire Technology*, **v. 17**, No. 2, 1981, p.98-119.
- [2] *M. A. Delichatsios, I. P. Lee, P. Tofilo*, A new correlation for gas temperature inside a burning enclosure, *Fire Safety Journal*, **v.44**, 2009, p.1003-1009.
- [3] *L. Wang, J. G. Quintiere*, An analysis of compartment fire doorways flows, *Fire Safety Journal*, **v.44**, 2009, p.718-731.
- [4] *J. G. Quintiere, L. Wang*, A general formula for the prediction of vent flows, *Fire Safety Journal*, **v.44**, 2009, p.789-792.
- [5] *J. Ji, M. Li, M. Yuan, J. Sun*, Ambient wind effect on combustion characteristics in compartment with simultaneous door and window opened, *Energy and Buildings*, **v.105**, 2015, p.217-225.
- [6] *N. Johansson, P. Van Hees*, A Simplified Relation Between Hot Layer Height and Opening Mass Flow, *Fire Safety Science-Proceedings of the eleventh international Symposium*, 2014, p.432-443.
- [7] *N. Johansson, S. Svensson, P. Van Hess*, An evaluation of two methods to predict temperatures in multi-room compartment fires, *Fire Safety Journal-Proceedings of the eleventh international symposium*, **v.77**, 2015.
- [8] *C. Beyler*, Analysis of Compartment Fires with Overhead Forced Ventilation Science, *Proceeding of the 3rd International Symposium, International Association of Fire Safety Science (IAFSS)*, *Fire Safety* (pp. 291-300), New York: Cox and Langford, Editors, Elsevier Applied Science, (1991);
- [9] *S. Deal & C. L. Beyler*, Correlating Preflashover Room Fire Temperatures, *SFPE Journal of Fire Protection Engineering*, **v. 2**, 1990, p.33-48.
- [10] *K. L. Foote, P. J. Pagni & N. L. Alvares*, Temperatures Correlations for Forced-Ventilated Compartment Fires, *Fire Safety Science-Proceedings of the First International Symposium International Association of Fire Safety Science (IAFSS)*, p. 139-148. New York: Grant and Pagni, Editors, Hemisphere Publishing Corporation, 1985.
- [11] *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.
- [12] *K. Hill, J. Dreisbach*, Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. Final Report, *Fire Dynamics Tools (FDTs)*, **Volumul 3**, (2006), p.1-132.
- [13] *S. Zhong, K. Ni & J. Li*, Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder. *Waste management*, **32(7)**, (2012), p.1468-1472.
- [14] *P. Ljunggren*, Determination of Mineralogical Transformations of Gypsum by Differential Thermal Analysis. *Journal of the American Ceramic Society*, **43(4)**, 1960, p.227-227.
- [15] *V. K. R. Kodur, T. Z. Harmathy*, Properties of building materials. In *SFPE handbook of fire protection engineering* Springer, New York, NY(2016), p. 277-324.
- [16] *A. H. Buchanan & A. K. Abu*, *Structural design for fire safety*, John Wiley & Sons, 2017.
- [17] *M. Sultan*, Gypsum board performance in fire rated floor assemblies, *National Research Council Canada*, 2008.
- [18] *V. Babrauskas*, *Ignition Handbook*. Fire Science Publishers. A division of Fire Science and Technology Inc. Issaquah, WA 98027 USA, ISBN 0-9728111-3-3, 2003.
- [19] *H. S. Kim, S. Kim, H. J. Kim, H. S. Yang*, Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *ThermochimActa* 451:181–188, 2006.
- [20] *K. E. Bland*, Behaviour of wood exposed to fire: a review and expert judgement procedure for predicting assembly failure. Dissertation, Worcester Polytechnic Institute, 1991.
- [21] *S. Calotă*, *Elemente de teoria modernă a arderii*; Editura Ministerului de Interne, 1990.