



**Facultatea de Hidrotehnică
Departamentul de hidraulică și protecția mediului**

Denumirea tezei:

**Determinarea și simularea numerică a
proprietăților optice ale fumului generat în
incendii**

**Raport de cercetare nr.2
Analiza experimentală a influenței
proprietăților materialelor de construcții
asupra fumului generat în urma arderii**

Conducător de doctorat

Prof. univ. dr. ing. Andrei-Mugur GEORGESCU

Doctorand

Dan BURLACU

burlacudan92@gmail.com

Cuprins

Cuprins	2
Introducere	3
Fumul generat în urma arderii materialelor de construcții	4
<i>Clasificarea produselor de construcții pe baza emisiei de fum</i>	<i>4</i>
<i>Proprietăți ale materialelor de construcții care influențează emisia de fum.....</i>	<i>6</i>
Studii experimentale	8
<i>Testarea la scară naturală a fumului generat artificial.....</i>	<i>8</i>
Metodologie.....	8
Rezultate și discuție	10
Concluzii.....	12
<i>Testarea la scară redusă a fumului generat artificial</i>	<i>12</i>
Metodologie.....	12
Rezultate și discuție	15
Concluzii.....	19
<i>Testarea la scară redusă a fumului generat prin ardere</i>	<i>20</i>
Metodologie.....	20
Rezultate și discuție	22
Concluzii.....	26
Concluzii.....	27
Bibliografie.....	28

Introducere

Cadrul normativ privind asigurarea calității în construcții prevede realizarea și menținerea pe toată durata de viață a construcțiilor a cerinței fundamentale securitate la incendiu ca fiind obligatorie [1]. Domeniul ce se ocupă de aplicarea principiilor științifice și ingineresti în scopul reducerii pierderilor de vieți și a pagubelor produse în cazul unui incendiu este denumit ingineria securității la incendiu. Obiectivele acestui domeniu științific pot fi atinse prin cuantificarea riscurilor și pericolelor implicate în cazul manifestării unui incendiu și prezentarea unei soluții optime pentru aplicarea măsurilor preventive sau de protecție [2].

Nevoia de a asigura securitatea la incendiu a utilizatorilor clădirilor și a personalului de intervenție, precum și nevoia unei oarecare predictibilități a comportamentului materialelor de construcții, de instalații, și a clădirii în ansamblu la acțiunea focului, a condus la dezvoltarea sistemelor de testare la foc. Din dorința de utilizare a produselor cu performanțe echivalente din punct de vedere al securității la incendiu, materialele și produsele utilizate în construcții sunt supuse unor testări standard pentru a fi încadrate într-o anumită categorie. Categoria din care produsul face parte definește comportamentul acestuia la acțiunea focului, individual sau în cadrul unui ansamblu în care se regăsește în mod normal la punerea în operă.

Uniunea Europeană armonizează testarea și clasificarea materialelor de construcții, iar din motive de comerț liber, acestea sunt clasificate în același mod în toate țările Europene. Astfel au fost introduse euroclasele de reacție la foc, care constituie un sistem de ierarhizare a materialelor de construcții în funcție de performanța lor la acțiunea focului, evaluată cu ajutorul unor metode de testare unitare reglementate prin standarde de testare [3].

Metodele de testare necesită diferite cantități (uneori însemnate) de materiale de construcții pentru a fi supuse unei testări distructive, repetarea acestei testări necesitând o altă probă, iar pentru furnizarea datelor necesare clasificării este necesară testarea a cel puțin trei probe pentru un anumit produs. În domeniile unde nu sunt disponibile cantități însemnate de materiale, precum în cazul cercetării, dezvoltării și îmbunătățirii, sunt necesare alte metode de aproximare a comportamentului pe care materialele l-ar avea dacă ar fi testate cu metodele standard.

În ceea ce privește testarea cantității de fum generat prin expunerea unui anumit material de construcții la foc, se utilizează captarea fumului generat în urma arderii unui singur obiect arzând (Single Burning Item) conform unei metodologii de testare standardizate și măsurarea atenuării intensității unei raze de lumină albă sau monocromatică ce traversează stratul de fum. Dimensiunile produsului care trebuie testat variază între 100 și 150 cm pentru fiecare latură, necesitând astfel cantități considerabile de material, inaccesibile pentru domenii precum cercetarea și dezvoltarea de noi materiale [4]. Din acest motiv, lucrarea de față propune o abordare experimentală pentru evaluarea influenței diferitelor proprietăți ale materialelor de construcții uzuale asupra fumului generat prin arderea acestora prin utilizarea unei metodologii de comparare a proprietăților optice ale fumului la diferite scări experimentale.

Fumul generat în urma arderii materialelor de construcții

Clasificarea produselor de construcții pe baza emisiei de fum

Legislația națională în vigoare care transpune precizările legislației europene referitoare la clasificarea și încadrarea produselor pentru construcții pe baza performanțelor la foc prezintă o listă de criterii de performanță pentru reacția la foc pe baza căreia se face încadrarea produselor de construcții în clase de performanță. Sunt prezentate șapte clase de performanță privind reacția la foc a produselor pentru construcții, notate de la A1 la F și care reprezintă o măsură în care produsul contribuie la dezvoltarea și/sau extinderea incendiului, clasificarea variind de la produse incombustibile la cele care au o contribuție importantă, precum și cele care nu sunt evaluate în privința comportamentului la acțiunea focului. Clasele care cuprind materiale combustibile sunt însoțite și de informații suplimentare privitoare la producția de fum și picături arzând prin expunerea la foc, aceste caracteristici fiind reprezentate prin adăugarea literei s pentru emisia de fum și d pentru producerea de picături incandescente la notarea clasei de performanță. La rândul lor, informațiile privind emisia de fum, spre exemplu, sunt însoțite de o cifră care prezintă intensitatea emisiei de fum, 1 – slabă, 2 – medie, 3 – semnificativă, clasificarea finală fiind de forma B, s1, d0, litera B reprezentând produse care nu contribuie semnificativ la dezvoltarea incendiului, gruparea s1 semnificând faptul că produsul are emisie slabă de fum, iar d0 că nu produce picături incandescente [5].

Printre testele cele mai utilizate pentru încadrarea produselor de construcții în clase de performanță privind reacția la foc se numără testarea unui singur obiect arzând (Single Burning Item), aproximativ 80% dintre produsele de construcții din piața europeană fiind testate obligatoriu cu această metodă [6]. Pentru clasificarea din punctul de vedere al emisiei de fum, se utilizează criteriile redate în tabelul I [7].

Tabelul I. Clasificarea emisiei de fum

Nr.	Clasa emisiei de fum	Parametrii referitori la emisia de fum în testarea SBI	
		SMOGR	TSP _{600s}
1.	s1	< 30 m ² /s ²	<50 m ²
2.	s2	> 30 m ² /s ² ; <180 m ² /s ²	>50 m ² ; < 200 m ²
3.	s3	-	-

Parametrul SMOGRA este o prescurtare în limba engleză a vitezei de creștere a emisiei de fum (SMOke Growth RAte), măsurată în m²/s² și calculată conform ecuației 1.

$$SMOGRA = 10^4 \cdot \max\left(\frac{SPR_{av}(t)}{t}\right) \quad (1)$$

Variabilele utilizate în ecuație sunt timpul t măsurat de la începerea testării, în secunde, iar SPR_{av} este viteza medie de emisie a fumului (Smoke Production Rate) măsurată timp de 60 de secunde, în m²/s.

TSP_{600s} reprezintă emisia totală de fum (Total Smoke Production) măsurată în primele 600 de secunde ale testării, în m² conform ecuației 2.

$$TSP_{600s} = \sum_{0s}^{600s} SPR(t) \cdot \Delta t \quad (2)$$

SPR(t) reprezintă viteza de emisie a fumului în funcție de timp, iar Δt reprezintă intervalul de achiziție a datelor de către aparatul de măsură, în secunde [8]. La rândul ei, această

viteză de emisie a fumului se calculează în funcție de coeficientul optic de stingere al fumului și debitul volumetric al acestuia în cadrul testării.

Coeficientul optic de stingere al fumului este definit de către standardul ce definește vocabularul utilizat în ingineria securității la incendiu ca fiind logaritmul natural al raportului dintre intensitatea luminoasă incidentă și cea transmisă prin stratul de fum, raportat la lungimea căii străbătute de raza de lumină [9].

Calculul vitezei de emisie a fumului (SPR) este prezentat în ecuația 3, al coeficientului optic de stingere al luminii în ecuația 4, și a debitului volumetric al gazelor fierbinți degajate în urma arderii în ecuația 5.

$$SPR = k \cdot \dot{V}_{T_s} \quad (3)$$

Variabilele prezente în această ecuație sunt k , coeficientul optic de stingere al fumului, măsurat în m^{-1} prin evaluarea gradului de atenuare a intensității unei raze de lumină care străbate calea de evacuare a fumului generat de către specimenul analizat, iar $\dot{V}_{T_s}$ este debitul volumetric al gazelor produse în urma arderii, la temperatura înregistrată pe calea de evacuare a acestora.

$$k = \frac{1}{L} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (4)$$

Coeficientul optic de stingere al fumului depinde de raportul dintre intensitatea luminoasă inițială a fasciculului luminos și cea obținută după ce acesta străbate un traseu de lungime L prin stratul de fum. În cazul testării standard SBI, lungimea parcursă de fasciculul luminos prin stratul de fum coincide cu diametrul căii de evacuare.

$$\dot{V}_{T_s} = \frac{\dot{V}_{298} \cdot T_s}{298} \quad (5)$$

Debitul volumetric al gazelor fierbinți generate în urma arderii se calculează în funcție de temperatura măsurată în grade Kelvin (T_s) pe traseul de evacuare al acestora și debitul măsurat la temperatura considerată normală ($298\text{ K} = 24,85^\circ\text{C}$), datorită faptului că acesta este calculat în funcție de presiunea și densitatea gazelor, presiunea atmosferică și temperatura ambiantă [10]. Reprezentarea schematică a standului de testare SBI este redată în figura 1.

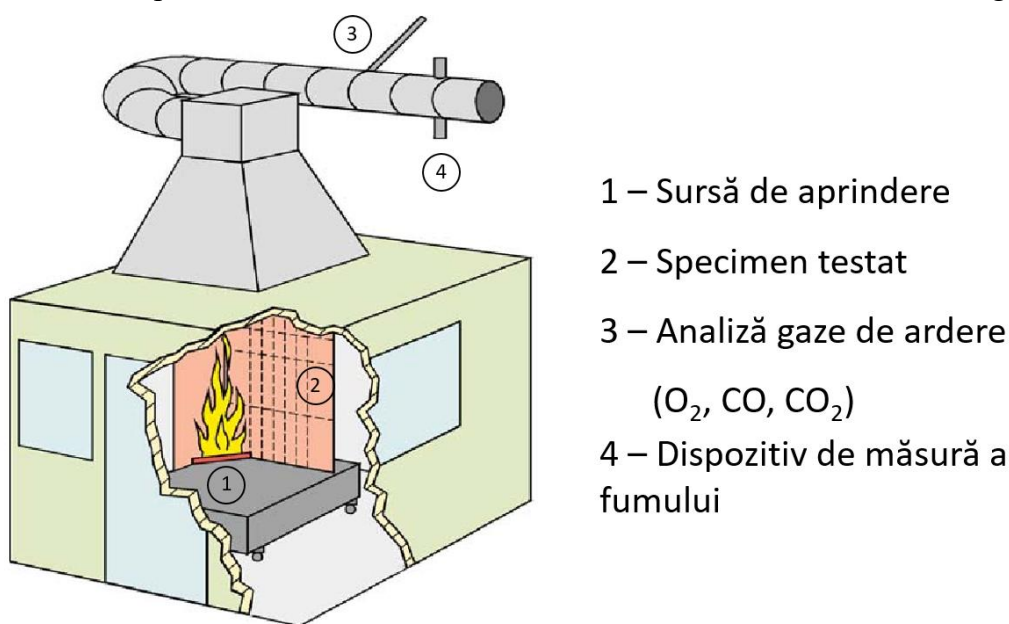


Fig 1. Stand testare SBI

Proprietăți ale materialelor de construcții care influențează emisia de fum

Pentru analiza modalităților prin care anumite proprietăți ale materialelor de construcții influențează emisia de fum, trebuie prezentate conceptele, vocabularul și măsurile caracteristice ale fumului generat în urma incendiilor. Astfel, în scopul lucrării de față, sunt prezentați termenii, fenomenele și măsurile definite de Standardul Vocabularului Ingineriei Securității la Incendiu [9] după cum urmează:

- Coeficientul optic de stingere al fumului – logaritmul natural al raportului dintre intensitatea luminoasă incidentă și cea transmisă prin stratul de fum, raportat la lungimea căii străbătute de raza de lumină
- Opacitatea fumului – raportul dintre intensitatea luminoasă incidentă și cea transmisă a unei raze de lumină ce străbate mediul inundat cu fum, în anumite condiții specifice, fiind reciproca transmitanței
- Aria de stingere a fumului – produsul dintre volumul ocupat de fum (volumul de fum produs) și coeficientul optic de stingere al acestuia. Este o măsură a cantității de fum, unitatea de măsură este de obicei m^{-1} și reprezintă o cantitate potrivită prin care se pot corela datele obținute prin testare la scări reduse și naturale [11]
- Transmitanța fumului – raportul dintre intensitatea luminoasă transmisă a unei raze de lumină printr-un mediu inundat cu fum și cea incidentă, în anumite condiții. Este reciproca opacității fumului și este de obicei exprimată în procente. În practică, transmitanța este o măsură a capacității de obscurare a fumului, care determină o scădere a vizibilității.
- Densitatea optică a fumului - măsură a atenuării intensității unei raze de lumină ce străbate fumul, exprimată ca logaritm în baza 10 din opacitatea fumului.

Modalitatea de formare a fumului generat în urma arderii este în general studiată din două puncte de vedere, unul chimic, care analizează transformarea materialului combustibil prin reacția de ardere în particulele de funingine din care este compus fumul, și unul fizic, care analizează comportamentul particulelor de funingine purtate de curenții de convecție. Din acest motiv, factorii care afectează caracteristicile produșilor de ardere pot fi grupate conform tabelului II, adaptat din referința [12].

Tabelul II. Factori care afectează caracteristicile produșilor de ardere

Nr.	Factori fizici	Factori chimici
1.	Aria suprafeței expuse	Tipul combustibilului
2.	Grosime, greutate și densitate probă	Ignifugare
3.	Orientarea probei	Stratificare
4.	Volumul incintei de testare	Grupări funcționale
5.	Fluxul de căldură	
6.	Disponibilitatea oxigenului	
7.	Ventilarea	
8.	Temperatura ambientală	
9.	Formarea de strat carbonizat	
10.	Coalescența ¹ , depunerea	
11.	Difuzia, dispersia	

¹ Contopire a picăturilor dintr-o emulsie sau a granulelor dintr-o suspensie coloidală în picături sau particule mai mari.

În lucrarea de față se va prezenta determinarea experimentală a influenței factorilor fizici ce caracterizează materialele de construcții și care influențează emisia de fum.

În ceea ce privește aria suprafeței probei care este expusă sursei de căldură utilizată pentru ardere, s-a demonstrat că densitatea optică a fumului crește liniar cu aceasta, pentru o anumită grosime a probei. Pentru grosimii diferite ale probelor, aceeași referință menționează faptul că în general densitatea optică a fumului generat de probă prin expunerea acesteia la sursa de căldură este direct proporțională cu grosimea probei, până la o anumită grosime critică, peste care densitatea optică a fumului produs încetează să mai crească odată cu creșterea grosimii probei [13].

Una dintre testările standard pentru determinarea densității optice a fumului utilizează probe așezate în poziția verticală atunci când sunt expuse la acțiunea focului. Această poziție accelerează arderea prin facilitarea propagării flăcării, dar nu este de preferat în cazul materialelor plastice, care produc picături în timpul arderii. Poziția optimă pentru testarea emisiei de fum a fost stabilită ca fiind cea orizontală, cu fața expusă a probei orientată în sus.

Pentru experimentele la scară redusă, de o deosebită importanță este efectul volumului incintei de testare asupra emisiei de fum. Date experimentale [14] indică faptul că pentru plăci din fibre lemnoase (PFL) și OSB (Oriented Strand Board) care ard mocnit (cu flacără redusă sau fără flacără) emisia de fum determinată prin măsurători la scară redusă este asemănătoare cu cea determinată prin măsurători la scară naturală. Același lucru este valabil și pentru polistirenul care arde cu flacără, cu toate că la scară naturală valorile pentru densitatea optică a fumului au fost obținute într-un timp mai îndelungat decât la scară redusă, acestea sunt în concordanță între cele două scări experimentale.

Natura sursei de căldură afectează de asemenea emisia de fum a materialului supus testării, în cazul testării arderii fără flacără (piroliză) utilizându-se surse radiante de căldură ce produc fluxuri termice de 25kW/m^2 care nu sunt suficiente pentru a aprinde materialul, dar provoacă arderea mocnită și emisia de fum. În cazul testării emisiei de fum prin arderea cu flacără, în testarea standard se utilizează o flacără-pilot de propan care să aprindă materialul, iar fluxul termic necesar întreținerii arderii este furnizat și de material în sine [13].

Clasificarea materialelor de construcții ia în calcul viteza de generare a fumului de către materialul analizat, precum și cantitatea totală de fum generat în urma testării. Efectele fumului generat în cazul incendiilor în care astfel de materiale sunt implicate depind nu numai de cantitatea de fum generată [15], dar și de toxicitatea [16], iritabilitatea [17] și capacitatea acestuia de a influența reducerea vizibilității [18].

Lucrarea de față analizează impactul pe care diferite proprietăți ale materialelor de construcții îl au asupra capacității fumului generat prin arderea acestora de a reduce vizibilitatea în spațiul în care se regăsește. Motivația acestui efort de cercetare se regăsește în faptul că în cazul incendiilor, reducerea vizibilității cauzată de fum conduce la imposibilitatea sau întârzierea evacuării și la numeroase victime omenești. La nivel internațional, vizibilitatea în cazul incendiilor este utilizată și ca măsură de calcul a vitezei teoretice de evacuare a utilizatorilor clădirilor surprinși de incendii [19].

Studii experimentale

În scopul determinării influenței proprietăților materialelor de construcții asupra emisiei de fum, a fost utilizată testarea la scară redusă prin varierea proprietăților acestor materiale. Aceste variații au fost analizate din prisma influenței pe care o au asupra valorilor măsurate ale intensității unei raze de lumină ce străbate stratul de fum generat prin arderea materialelor de construcții supuse testării.

Pentru a se asigura validarea acestor testări experimentale, mai întâi a fost demonstrată aplicabilitatea metodei de măsură a reducerii vizibilității într-un compartiment inundat cu fum prin analiza scăderii intensității unei raze de lumină ce străbate stratul de fum. Acest lucru a fost posibil prin desfășurarea unei testări la scară naturală utilizând fum generat artificial, pentru un mai bun control al condițiilor experimentale.

În continuare a fost demonstrată aplicabilitatea metodei în cazul testării la scară redusă a aceluiași fenomen, prin utilizarea unei machete la scară 1:10 a incintei experimentale și a fumului generat artificial, iar mai apoi aceeași metodă de determinare a reducerii vizibilității generate de inundarea cu fum a unui compartiment a fost utilizată în cazul materialelor de construcții expuse la acțiunea focului, pentru testarea la scară redusă.

Deoarece testarea standard a materialelor de construcții pentru a determina emisia de fum a acestora nu este accesibilă în cadrul acestui studiu, influența diferitelor proprietăți ale materialelor de construcții asupra producției de fum va fi evaluată prin comparație a rezultatelor obținute pentru anumite proprietăți relevante analizate și nu prin furnizarea unor date standardizate, de sine stătătoare, de calitate a celor obținute prin testarea standard.

Testarea la scară naturală a fumului generat artificial

Una dintre cele mai des măsurate proprietăți ale fumului este coeficientul optic de stingere al acestuia [20], care se poate determina prin analiza reducerii intensității unui fascicul de lumină ce străbate pe o anumită distanță un compartiment inundat cu fum. Această analiză poate furniza date referitoare și la opacitatea și transmitanța fumului, două măsurări reciproce care reprezintă capacitatea fumului de a obscura sau de a reduce vizibilitatea în spațiul în care este prezent. Principiul măsurării reducerii intensității luminii la parcurgerea unei distanțe prin stratul de fum este cel utilizat pentru testarea standard a producției de fum a materialelor de construcții, proprietate relevantă în ingineria securității la incendiu.

Metodologie

O incintă cu lungimea de 20 de metri, lățimea de 4,5 metri și înălțimea de 3 metri a fost limitată la lungimea de 13 metri prin utilizarea unei folii de plastic care să asigure păstrarea fumului generat în cadrul experimentului în zona de testare, dar care să nu genereze formarea suprapresiunii. În acest compartiment a fost utilizată o mașină pentru generarea de fum artificial prin acționare repetată pentru anumite perioade de timp corelate care să asigure o anumită cantitate de fum produs cu o anumită cantitate de lichid de fum consumat. Conform specificațiilor producătorului mașina de fum este capabilă ca în lucru continuu să genereze 128 m³/min de fum consumând 72 ml/min de lichid de fum. Pentru asigurarea stabilității atmosferice înaintea măsurărilor, acționările consecutive ale mașinii de fum au avut loc la diferențe de 60 de secunde.

Raza monocromatică de lumină a fost generată cu ajutorul unui fascicul laser de putere 1mW și lungimea de undă 635nm. Măsurarea distanțelor dintre sursa de lumină și locurile de măsură ale valorilor intensității luminoase a fost efectuată cu ajutorul unui telemetru laser montat în dreptul sursei de lumină. Imagini cu elementele descrise înainte și în timpul experimentului se pot revedea în figura 2. În timpul experimentului au fost surprinse imagini și înregistrări video cu detaliile relevante.



Fig 2. Dispozitive experimentale

O imagine cu contrast ridicat atașată unui suport a fost utilizată ca reper vizual pentru evaluarea subiectivă a reducerii vizibilității în cadrul experimentului prin surprinderea de imagini digitale. Pentru măsurarea intensității luminoase a razei monocromatice de lumină a fost utilizat un luxmetru Testo 480 cu domeniul de măsură între 0 și 100.000 Lux atașat țintei poziționate la 5, 7,5 și respectiv 10 metri de sursa de lumină, experimentul fiind repetat pentru fiecare dintre aceste distanțe. Luxmetrul și ținta cu imaginea cu contrast ridicat sunt reprezentate în figura 3 înainte și în timpul experimentului.

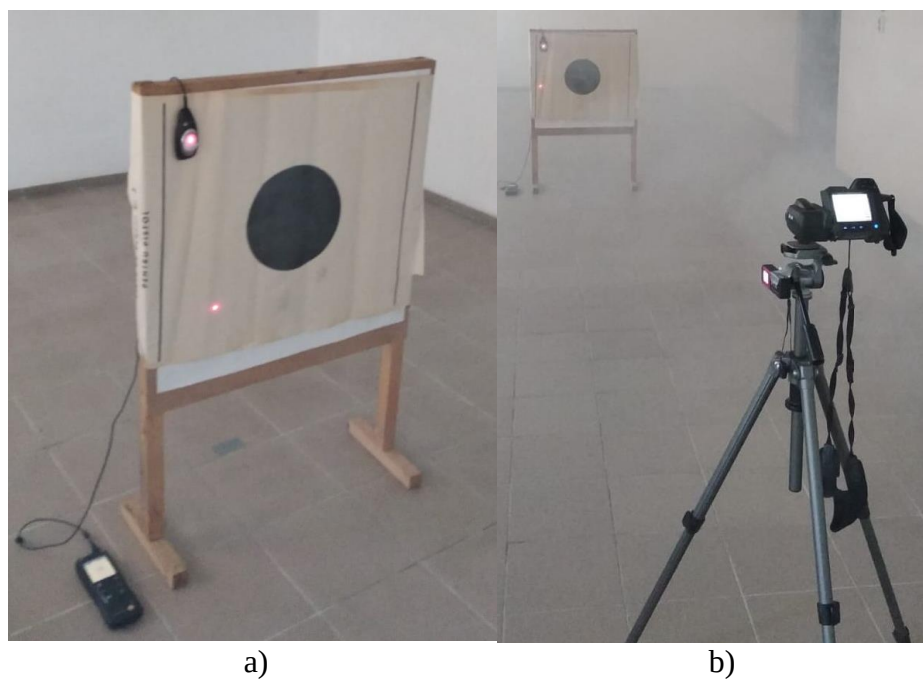


Fig 3. Luxmetru și țintă

Experimentul s-a desfășurat atât în condiții de iluminare naturală, cât și în condiții de întunecime, pentru fiecare dintre cele trei distanțe ale țintei față de sursa de lumină, iar valorile instantanee ale intensității luminoase au fost înregistrate după perioada de pauză dintre acționările consecutive ale mașinii de fum. De asemenea, a fost utilizată și înregistrarea continuă a valorilor intensităților luminoase în timpul experimentului, pentru a avea o istorie fidelă a acestora. Valorile instantanee ale intensității luminoase înregistrate în cazul testării în lumină ambientală naturală sunt redate în tabelul III.

Tabelul III. Măsurători experimentale în condiții lumină ambientală naturală

Timp (s)	Lichid de fum utilizat (ml)	Intensitate luminoasă (lx) lumină naturală			Intensitate luminoasă (lx) lumină artificială		
		5m	7.5m	10m	5m	7.5m	10m
0	0	917	736	462	358	242	210
5	6	769	670	322	304	210	174
9	11	743	423	297	293	140	148
18	22	601	326	191	253	110	94
27	32	564	283	164	216	85	27
36	43	556	274	139	195	59	25
45	54	462	247	129	122	50	29
54	65	383	222	117	83	42	24

Rezultate și discuție

Măsurătorile obținute în cadrul acestui experiment arată că utilizarea acestei metode de măsurare a variației intensității luminoase este potrivită pentru evaluarea impactului asupra nivelurilor de vizibilitate a fumului generat artificial. Valorile intensității luminoase pentru distanțele de 5, 7,5 și 10 metri măsurate în cadrul variantei experimentale în lumină naturală sunt prezentate în figura 4.

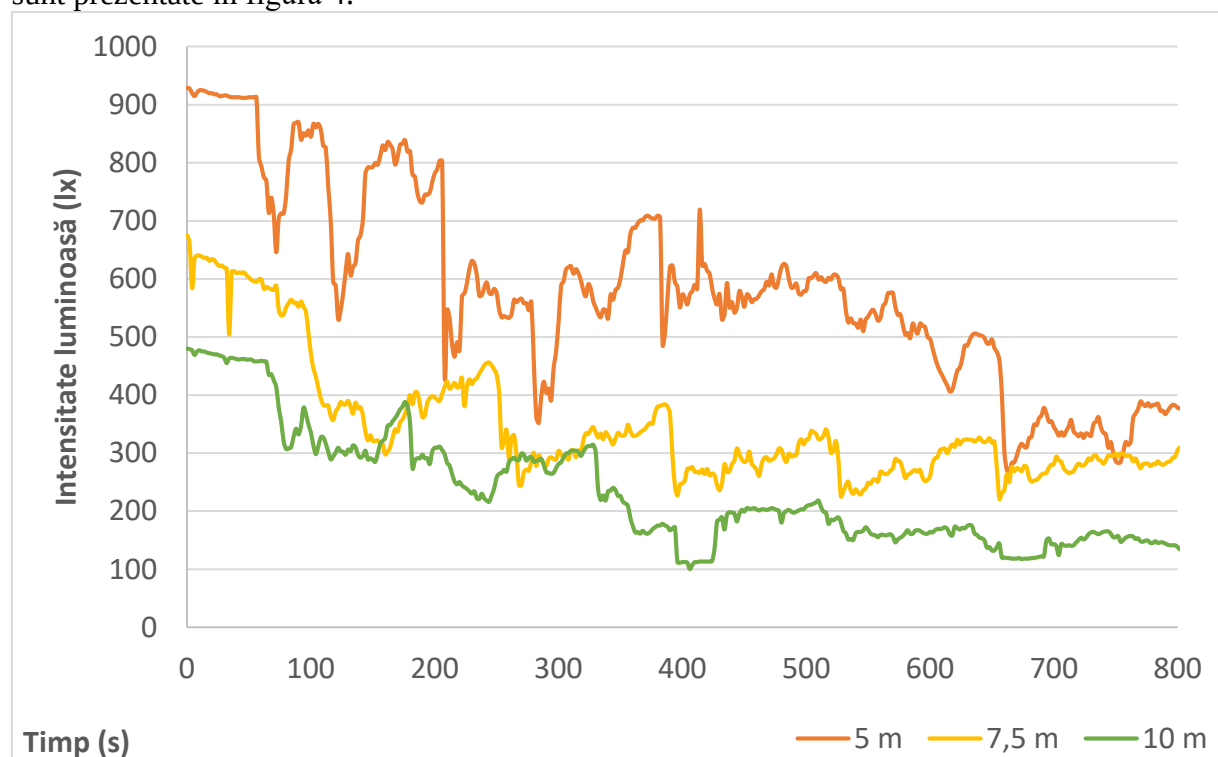


Fig 4. Intensitate luminoasă scară reală

Vizibilitatea în cadrul compartimentului inundat cu fum a fost calculată pe baza măsurătorilor intensității luminoase, iar evoluția acesteia corespunzătoare testării în lumină ambientală naturală este prezentată în figura 5.

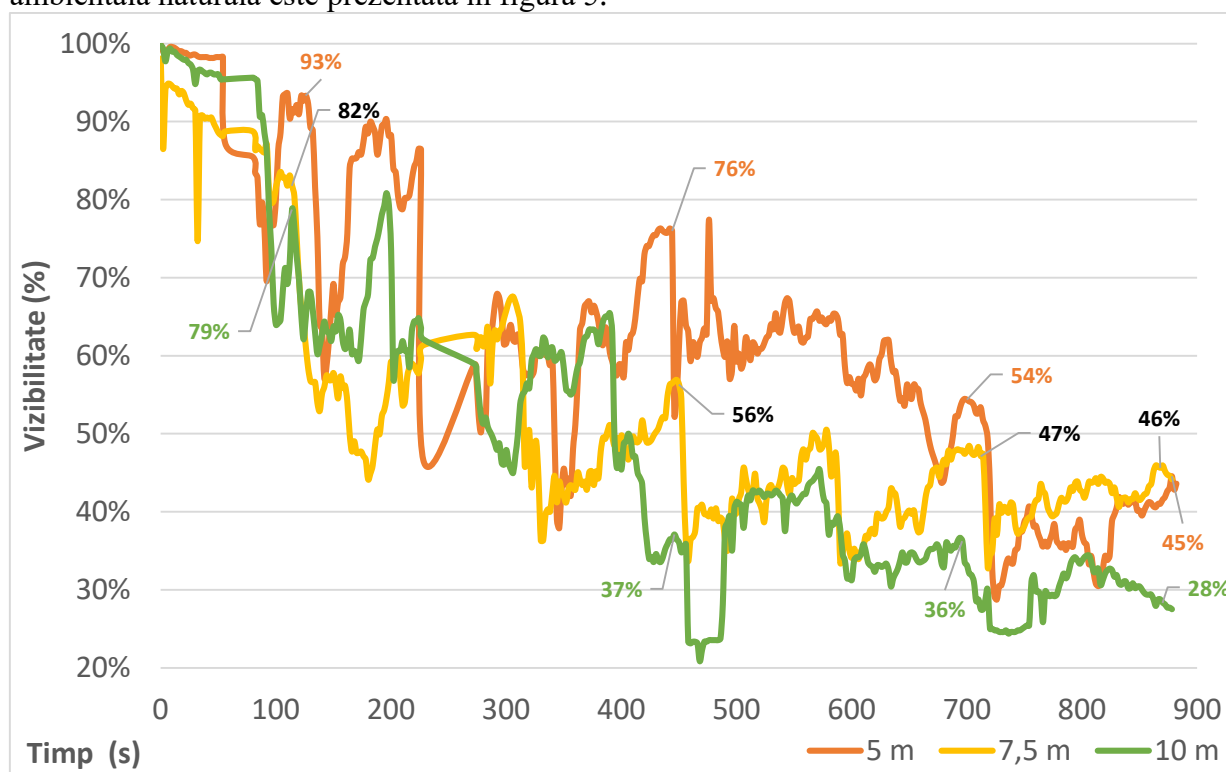


Fig 5. Vizibilitate scară naturală

Scăderile bruște din cazul măsurătorilor continue ale vizibilității reprezintă momentele de activare ale mașinii de fum, după care se poate observa stabilizarea treptată a atmosferei, până la punctul unde au fost efectuate măsurătorile instantanee.

Una dintre cele mai importante variabile în ceea ce privește corelarea datelor experimentale obținute din testarea la diferite scări de mărime este aria de stingere a fumului. Aceasta a fost calculată pentru testarea la scară naturală și rezultatele sunt prezentate în figura 6.

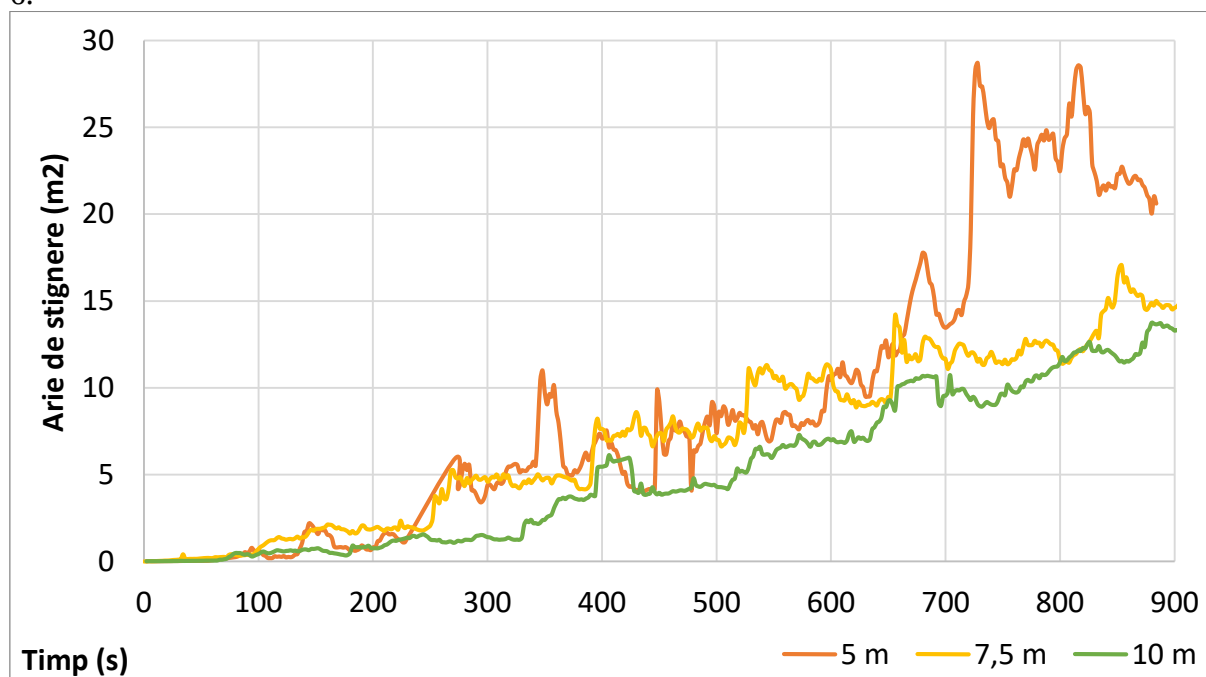


Fig 6. Aria de stingere scară naturală

Pentru fiecare acționare a mașinii de fum a fost calculată cantitatea de lichid de fum utilizată, un coeficient mediu de stingere al fumului și o arie de stingere medie pentru distanțele utilizate în cazul fiecăreia dintre condițiile de iluminat în care a fost desfășurată testarea experimentală. Rezultatele sunt prezentate în tabelul IV.

Tabelul IV. Valori medii ale coeficientului optic de stingere și a ariei de stingere a fumului

Lichid de fum utilizat (ml)	Cameră întunecată		Iluminat natural	
	Coeficient de stingere mediu (m^{-1})	Arie de stingere medie (m^2)	Coeficient de stingere mediu (m^{-1})	Arie de stingere medie (m^2)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.02	0.25	0.03	0.30
11	0.05	0.96	0.05	1.04
22	0.08	3.31	0.09	3.65
32	0.15	8.41	0.11	6.20
43	0.17	13.26	0.12	8.93
54	0.21	19.87	0.14	13.07
65	0.25	28.48	0.16	18.09

După cum se poate observa din aceste valori, impactul pe care o anumită cantitate de fum o are asupra măsurării coeficientului optic de stingere a fumului este mai scăzut în cazul unei iluminări mai bune a incintei de testare, acest lucru determinând același efect asupra vizibilității, și anume că o mai bună iluminare conduce la o scădere mai puțin accentuată a vizibilității pentru aceeași cantitate de fum.

Concluzii

Prin intermediul acestui experiment la scară naturală au fost colectate date cu privire la proprietățile optice ale fumului artificial generat prin utilizarea unei mașini de fum, precum și influența acestuia asupra vizibilității din compartimentul în care este introdus. Aria de stingere a fumului este un factor cheie care a fost determinat prin intermediul acestui experiment și care poate fi utilizat pentru corelarea datelor obținute prin intermediul testării la scară redusă.

Testarea la scară redusă a fumului generat artificial

Testarea la scară redusă a fumului generat artificial are scopul de a demonstra aplicabilitatea metodologiei de măsurare a proprietăților optice ale fumului pentru un ordin diferit de mărime decât cel natural, și de a identifica în ce măsură datele obținute pot fi corelate cu cele din cadrul testării la scară naturală, precum și dacă aceste corelații pot fi utilizate în cazul fumului generat prin ardere.

Metodologie

Pentru desfășurarea experimentelor la scară redusă, a fost utilizată o machetă din plexiglas care să asigure posibilitatea utilizării scărilor de 1:10 și 1:20 a distanțelor utilizate pentru poziționarea țintei în cadrul experimentului la scară naturală. Astfel, lungimea machetei a fost de un metru, lățimea de 45 de centimetri, iar înălțimea de 30 de centimetri, punctele de măsură în interiorul acesteia fiind așezate la 50 și 75 de centimetri și în exterior la 100 de centimetri față de sursa de lumină, pentru testarea la scara 1:10. Pentru testarea la scara 1:20, punctele de măsură din interiorul incintei de testare au fost la 25 și 37,5 centimetri, iar în exteriorul acesteia la 50 de centimetri. Macheta a avut latura de jos descoperită, pentru a se facilita introducerea fumului și evitarea suprapresiunii.

Pentru testarea la scara 1:20, lungimea machetei a fost limitată la 12,5 cm și au fost utilizate celelalte două dimensiuni ca atare, de 30 cm și 45 cm, pentru a se asigura reducerea volumului total al incintei de testare la scara 1:20 față de testarea la scară naturală. Figura 7 prezintă incinta experimentală utilizată pentru testarea la scara 1:10, iar figura 8 pe cea utilizată pentru testarea la scara 1:20.

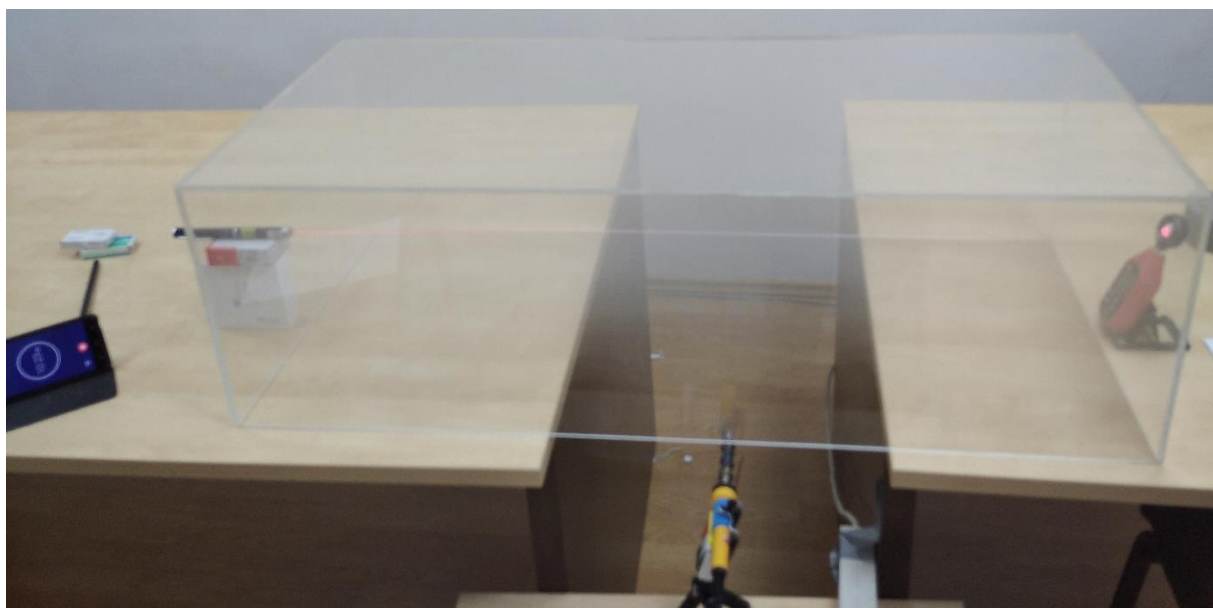


Fig 7. Incinta pentru testarea la scara 1:10

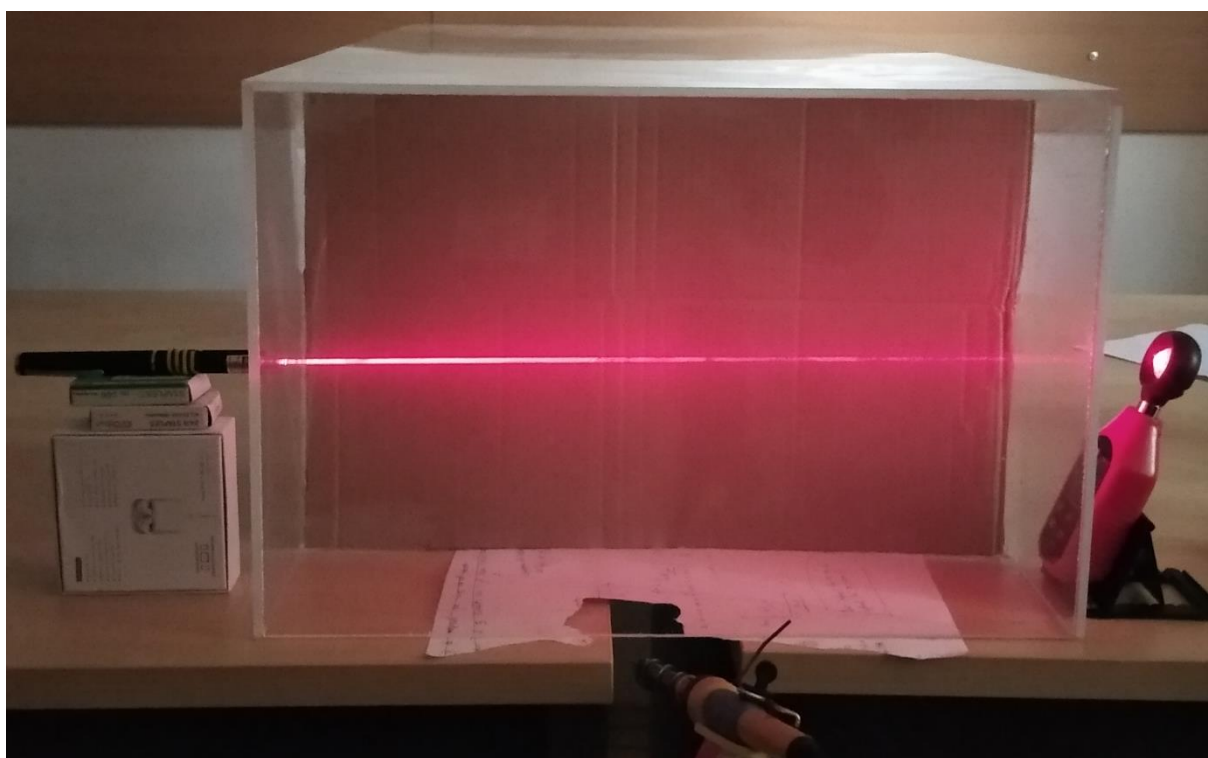


Fig 8. Incinta pentru testarea la scara 1:20

Lichidul de fum utilizat a fost același ca în cazul testării la scară naturală, pe bază de glicerol, care să genereze fum dens și persistent. Lichidul de fum a fost dozat cu ajutorul unei seringi pentru a reprezenta o fracție din cantitatea utilizată în cazul testării la scară naturală. Temperatura nominală la care funcționează mașina de fum este de 180°C, iar pentru asigurarea acestei temperaturi în cadrul testării la scară redusă, a fost utilizat un termometru electronic cu domeniul de măsură între -50 și +300°C.

Mecanismul de funcționare al mașinii generatoare de fum este vaporizarea lichidului de fum prin încălzirea acestuia la temperatura de aproximativ de 180°C. Din acest motiv, pentru testarea la scară redusă, o cantitate dozată de lichid de fum a fost introdusă pe un traseu elicoidal din țeavă de cupru cu diametrul interior de 2 milimetri, încălzit cu ajutorul unei rezistențe electrice pentru a produce fum. Prelevarea datelor referitoare la temperatură din timpul experimentului este reprezentată în figura 9.



Fig 9. Măsurarea temperaturii serpentinei lichidului de fum

Cantitatea de lichid fum utilizată a fost de redusă de zece, respectiv douăzeci de ori față de cea folosită în cadrul testării la scară naturală, dozarea lichidului de fum s-a obținut prin utilizarea unor seringi gradate, iar prezentarea sintetică a cantităților utilizate în cazul testărilor la scară naturală și redusă, defalcate pe praguri intermediare de utilizare este prezentată în tabelul V.

Tabelul V. Cantitatea de lichid de fum utilizat

Numărul utilizării	Lichid de fum utilizat (ml)		
	Testare la scară naturală	Testare la scară 1:10	Testare la scară 1:20
1.	6	0,6	0,3
2.	11	1,1	0,55
3.	22	2,2	1,1
4.	32	3,2	1,6
5.	43	4,3	2,15
6.	54	5,4	2,7
7.	65	6,5	3,25

În cazul testărilor la cele două scări reduse, timpul asigurat pentru calmarea atmosferei din incinta experimentală după acționarea mașinii de fum a fost de 120 de secunde față de 60 de secunde în cazul testării la scară naturală. Astfel, datorită diferențelor între cele două scări temporale, pentru corelarea valorilor măsurate pentru diferitele scări de mărime utilizate, a fost folosit minimul valorilor intensității luminoase măsurat imediat după fiecare acționare a mașinii de fum.

Raza monocromatică de lumină care străbate stratul de fum a fost generată cu ajutorul unui fascicul laser de putere 1mW și lungimea de undă 635nm $\pm 5\%$, iar valorile intensității luminoase au fost măsurate cu ajutorul unui luxmetru marca UNI-T, model UT383 BT cu domeniul de măsură cuprins între 0 și 9999 Lux, sensibilitate 1 Lux și precizie de $\pm 4\%$, la un interval de două secunde.

Experimentul s-a desfășurat în condiții de întunecime, iar instrumentele utilizate în cadrul experimentului la scară redusă sunt prezentate în figura 10.



Fig 10. Instrumente experimentale scară redusă

Valorile intensității luminoase măsurate în cadrul experimentelor la scară redusă sunt prezentate sintetic în tabelul VI pentru fiecare dintre pragurile de utilizare a lichidului de fum.

Tabelul VI. Măsurători experimentale în condiții lumină ambientală naturală

Scara 1:10				Scara 1:20			
Lichid de fum utilizat (ml)	Intensitate luminoasă (Lux)			Lichid de fum utilizat (ml)	Intensitate luminoasă (Lux)		
	50 cm	75 cm	100 cm		25 cm	37,5 cm	50 cm
0	3585	2261	2054	0	2922	2796	2618
0,5	2909	1771	1575	0,25	2110	1872	1793
1,5	1747	1437	1024	0,75	1687	1112	1145
2,5	1339	1106	650	1,25	1413	1065	681
3,5	1163	911	674	1,75	1399	1108	510
4,5	1107	621	321	2,25	1504	1095	445
5,5	1088	601	652	2,75	1005	1074	503
6,5	1116	570	237	3,25	1161	881	417

Rezultate și discuție

Valorile intensității luminoase măsurate în cadrul experimentului la scara 1:10 pentru distanțele de 50, 75 și 100 de centimetri sunt prezentate în figura 11, iar cele obținute în cadrul testării la scara 1:20 pentru distanțele de 25, 37,5 și 50 de centimetri sunt prezentate în figura 12.

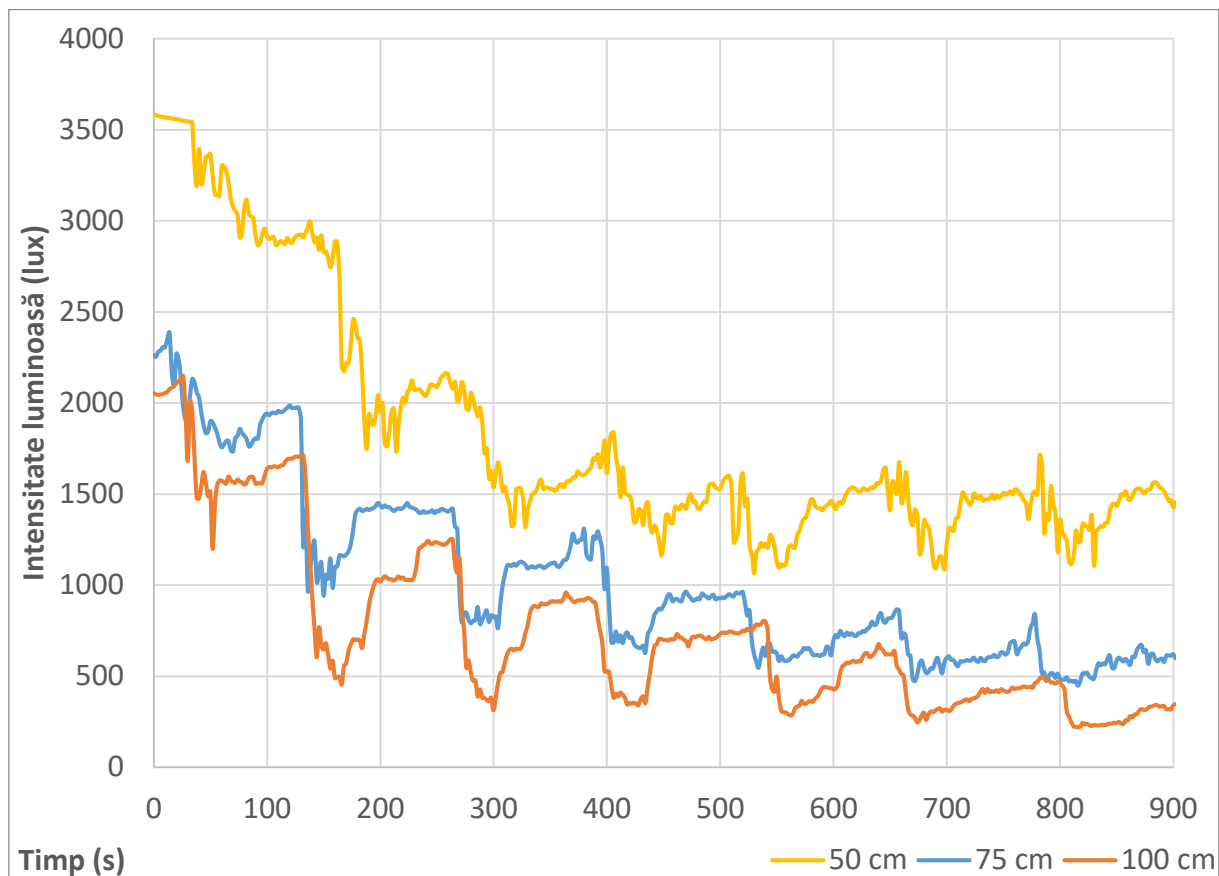


Fig 11. Intensitate luminoasă scara 1:10

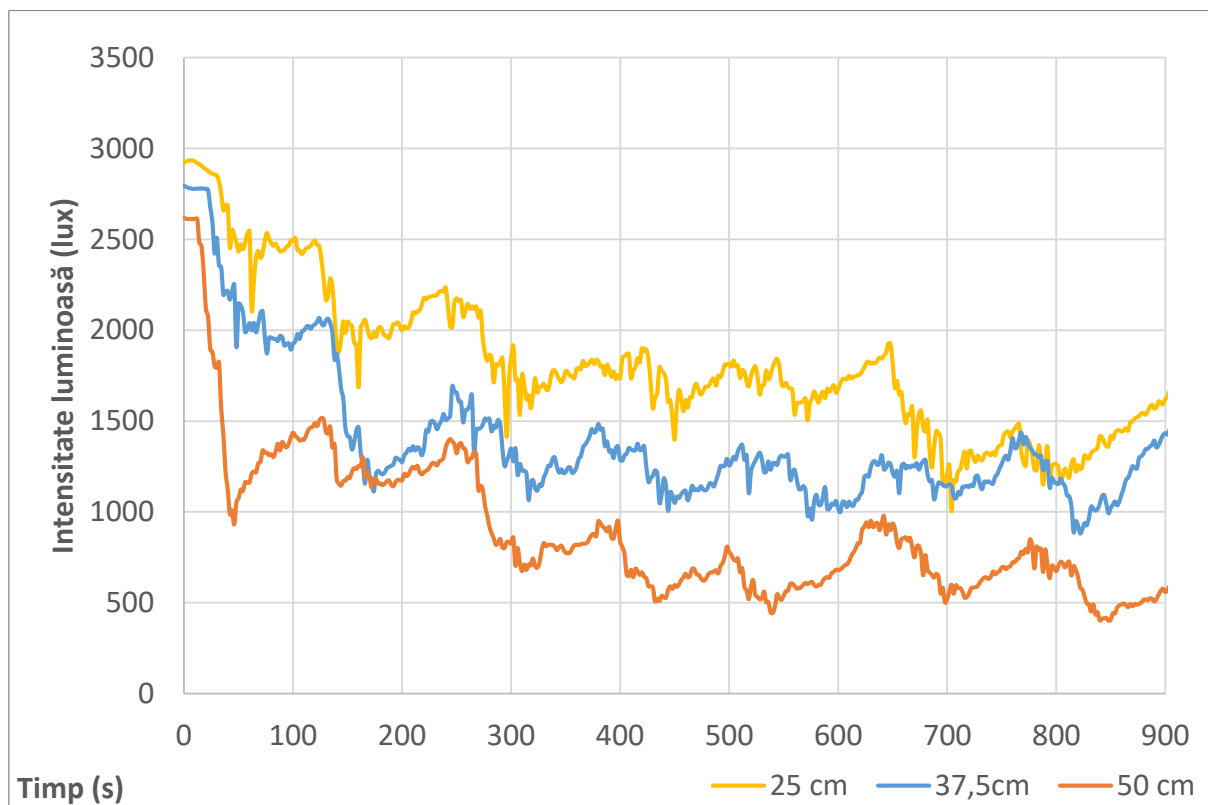


Fig 12. Intensitate luminoasă scara 1:20

Variația vizibilității în cazul testării la scara 1:10 este reprezentată în figura 13, iar cea corespunzătoare testării la scara 1:20 în figura 14.

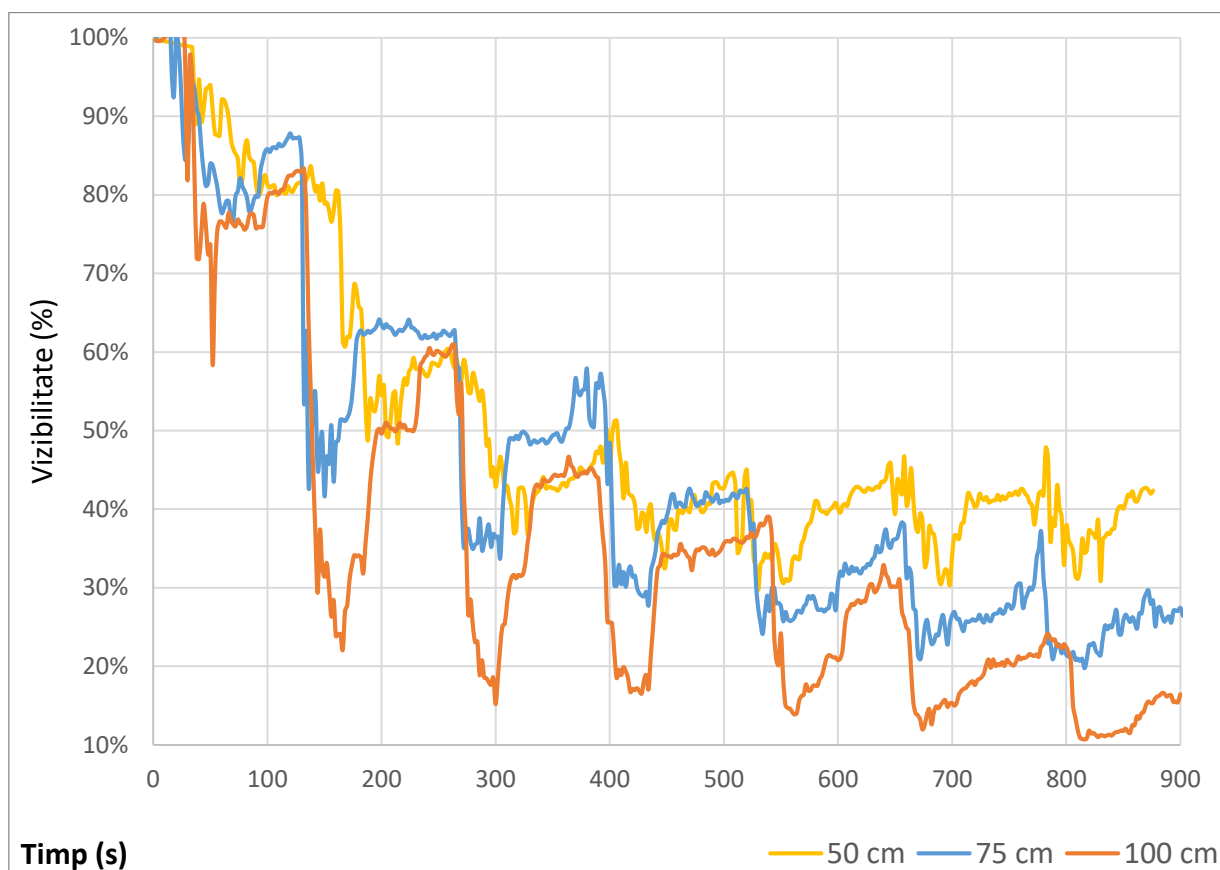


Fig 13. Vizibilitatea scara 1:10

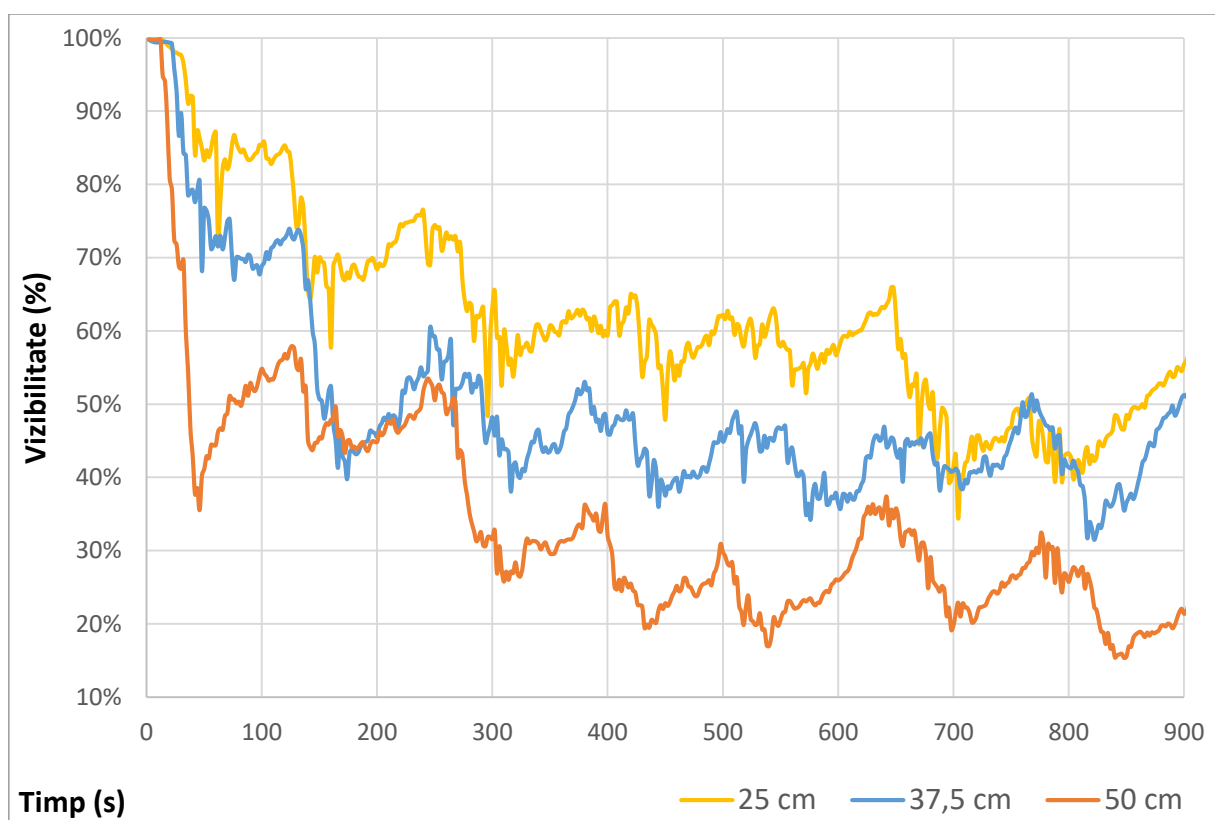


Fig 14. Vizibilitate scara 1:20

În ceea ce privește aria de stingere determinată în cadrul experimentelor la scară redusă, pentru scara 1:10 valorile pot fi consultate în figura 15, iar pentru scara 1:20 în figura 16.

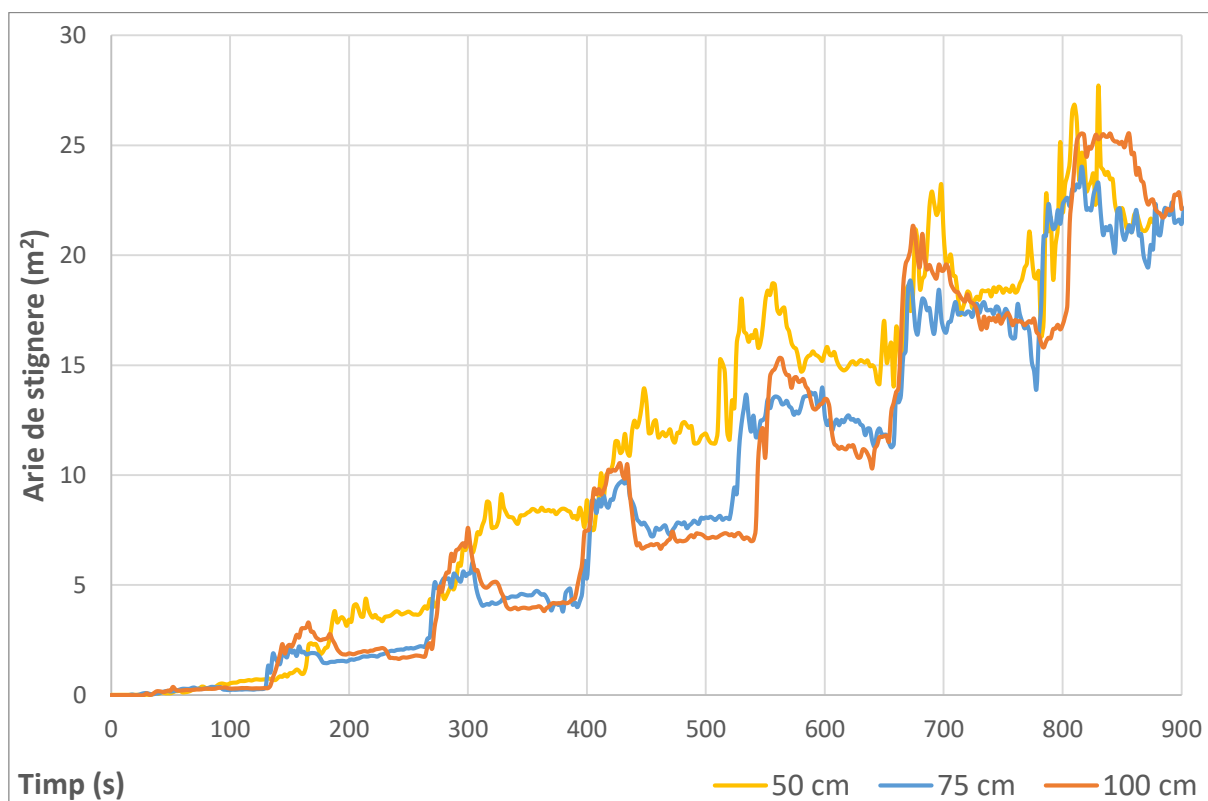


Fig 15. Arie de stingere scara 1:10

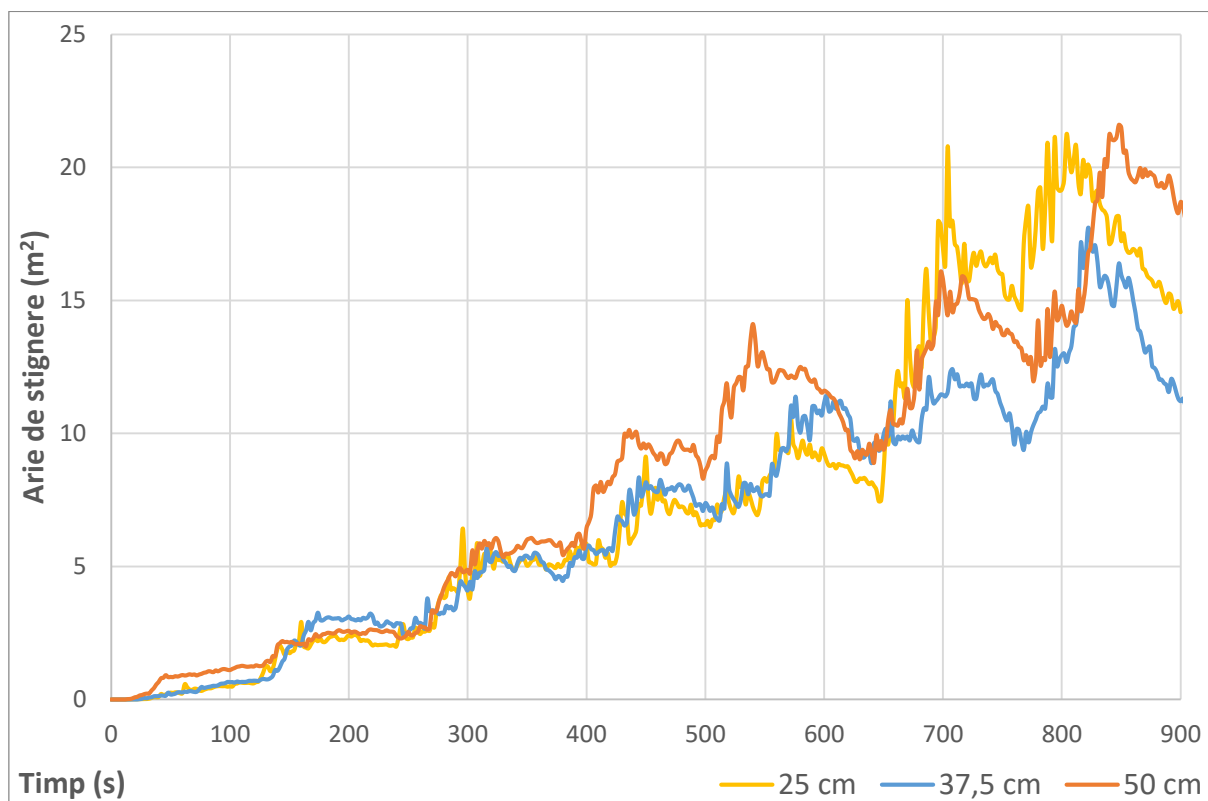


Fig 16. Arie de stingere scara 1:20

Pentru fiecare utilizare a lichidului de fum a fost calculat coeficientul mediu de stingere al fumului (k) și aria de stingere medie a acestuia (A), obținute din media valorilor corespunzătoare pentru cele trei distanțe de măsurare, luând în calcul valorile instantanee calculate imediat după fiecare acționare a mașinii de fum. Aceste valori sunt prezentate sintetic în tabelul VII.

Tabelul VII. Valori medii ale coeficientului optic de stingere și ariei de stingere a fumului

Lichid de fum utilizat (ml)	Testare la scara 1:10		Lichid de fum utilizat (ml)	Testare la scara 1:20	
	k mediu (m^{-1})	A medie (m^2)		k mediu (m^{-1})	A medie (m^2)
0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00
0,50	0,34	0,30	0,25	0,52	0,23
1,50	0,91	2,42	0,75	1,05	1,40
2,50	1,36	6,01	1,25	1,36	3,01
3,50	1,53	9,45	1,75	1,45	4,48
4,50	1,98	15,74	2,25	1,45	5,78
5,50	1,77	17,20	2,75	1,69	8,21
6,50	2,11	24,28	3,25	1,74	10,01

Datele din tabelul prezentat arată că pe măsură ce incinta de testare este mai mică, impactul pe care o cantitate proporțională de fum o are asupra reducerii vizibilității de asemenea scade.

Concluzii

Experimentele la scară redusă atestă faptul că prin utilizarea ariei de stingere a fumului se pot corela datele obținute experimental în cadrul celor trei scări, respectiv naturală, 1:10 și 1:20. Astfel, prin utilizarea testării la scară redusă se pot deduce concluzii referitoare la comportamentul fumului la scară naturală. Datorită faptului că producerea fumului la diferite scări dimensionale a fost obținută prin procedee diferite, a fost necesare diferite perioade de calmare a atmosferei pentru a se asigura corectitudinea măsurărilor. Astfel, scările temporale ale experimentelor nu corespund, iar pentru compararea graficelor a fost utilizată cantitatea de lichid de fum utilizată, proporțional cu scara experimentului. În figura 17 este prezentată evoluția ariei de stingere a fumului comparată între scara naturală și scara 1:10, respectiv 1:20.

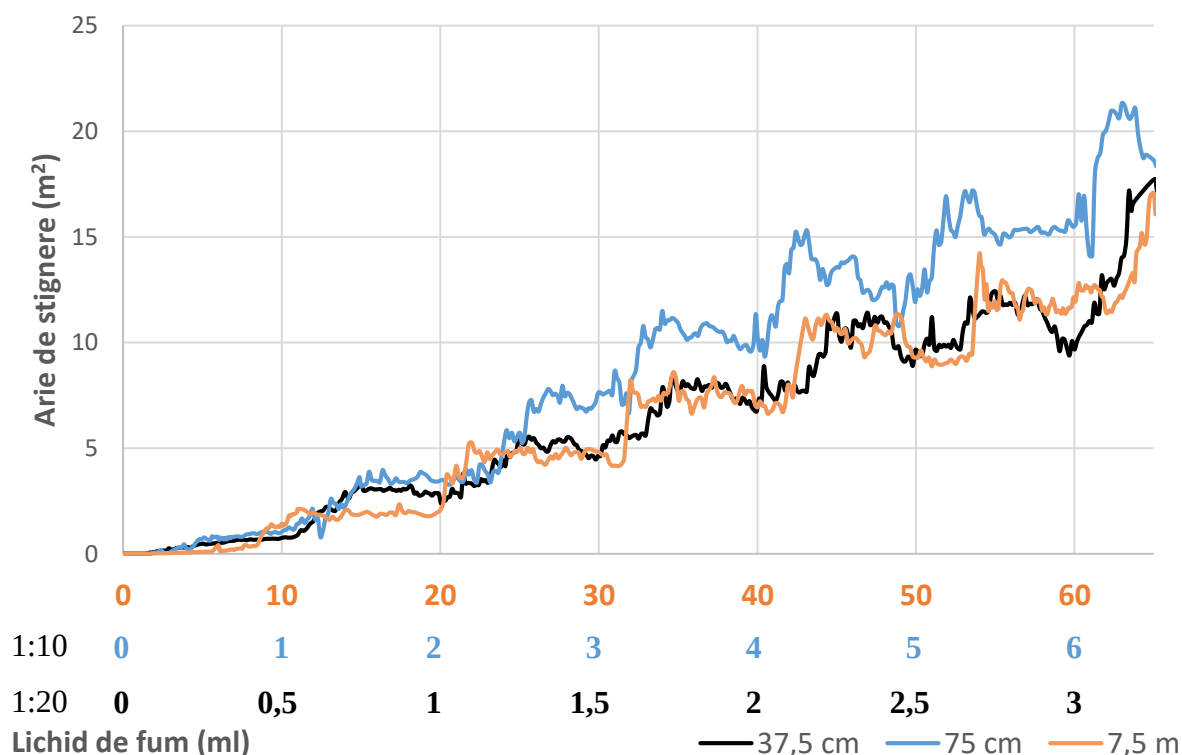


Fig 17. Arie de stingere a fumului comparativ

Pentru comparație sunt prezentate graficele pentru distanțele intermediare din cele trei analizate la fiecare scară dimensională în parte. Se poate observa din grafic că pentru scara 1:20, valorile ariilor de stingere calculate pe baza atenuării intensității luminii ce trece prin stratul de fum sunt cele mai apropiate de cele obținute în cadrul experimentului la scară naturală. Pentru fiecare scară și fiecare distanță au fost calculate diferențele de valori, în modul, față de valorile experimentale obținute la scară naturală. Diferențele maxime, media diferențelor și procentajele acestora din maximum valorilor comparate sunt prezentate în tabelul VIII.

Tabelul VIII. Diferențe ale ariei de stingere a fumului pentru testarea la scară redusă

Scara	Distanța	Valoare maximă	Diferența medie		Diferență maximă	
			Valoare	% din val. max	Valoare	% din val. max
1:10	50 cm	28.71	2.73	9,53%	12.64	44.04%
	75 cm	24.03	2.43	10.13%	11.91	49.58%
	100 cm	25.53	4.16	16.32%	13.97	54.73%
1:20	25 cm	28.71	2.86	9.98%	16.93	58.98%
	37,5 cm	17.71	1.05	5.93%	5.38	30.39%
	50 cm	21.60	3.30	15.32%	9.81	45.43%

Din datele obținute se poate concluziona că pentru distanța medie în cazul fiecăreia dintre cele trei scări dimensionale este cea mai potrivită pentru corelarea datelor, iar scara 1:20 a prezentat setul de date cu cea mai pronunțată similitudine față de cele obținute în cazul testării la scară naturală. Media diferențelor în valori procentuale față de rezultatele obținute în cadrul testării la scară naturală este de 12% pentru experimentul la scară 1:10, iar pentru cel la scară 1:20 de 10,41%. Experimentele cu fum artificial arată că aria de stingere a fumului este într-adevăr un parametru potrivit pentru a fi utilizat la corelarea datelor obținute prin experimentare la diferite scări.

Testarea la scară redusă a fumului generat prin ardere

În cadrul acestui tip de testare diferite materiale de construcții au fost expuse la foc pentru a se analiza influența proprietăților acestora asupra producerii de fum. În acest sens, a fost determinată densitatea optică a fumului (D) generat prin arderea mocnită a acestor materiale, prin măsurarea reducerii intensității unei raze luminoase incidente (I_0) ce străbate stratul de fum, obținându-se intensitatea razei luminoase transmise (I). Fumul a fost generat prin expunerea la un anumit flux termic al materialelor de construcții analizate, iar relația utilizată pentru determinarea densității optice a fumului se regăsește în ecuația 6, adaptată din referințele [21] și [22].

$$D = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (6)$$

Metodologie

Fumul degajat de probele testate a fost utilizată captat într-o incintă cu dimensiunile de 12,5 x 30 x 45 cm. Pentru a se evita aprinderea probelor, a fost utilizată tablă subțire de aluminiu pe care acestea au fost poziționate deasupra unui arzător cu alcool, după cum se poate revedea în figura 18. Alcoolul utilizat a avut concentrația de 70%, iar distanța dintre sursa de lumină și luxmetrul utilizat pentru măsurarea intensității acesteia a fost de 50 de centimetri. Raza

monocromatică de lumină care străbate stratul de fum a fost generată cu ajutorul unui fascicul laser de putere 1mW și lungimea de undă $635\text{nm} \pm 5\%$, iar valorile intensității luminoase au fost măsurate cu ajutorul unui luxmetru marca UNI-T, model UT383 BT cu domeniul de măsură cuprins între 0 și 9999 Lux, sensibilitate 1 Lux și precizie de $\pm 4\%$, la un interval de două secunde. Pentru măsurarea masei probelor supuse testării, a fost utilizat un cântar cu precizie de măsură de 0.01 grame și capacitate maximă de 200 de grame. În figura 19 este prezentată cântărirea unei probe înainte de testare, iar în figura 20 după ce aceasta a fost expusă fluxului termic.



Fig 18. Arzător alcool



Fig 19. PAL înainte de testare

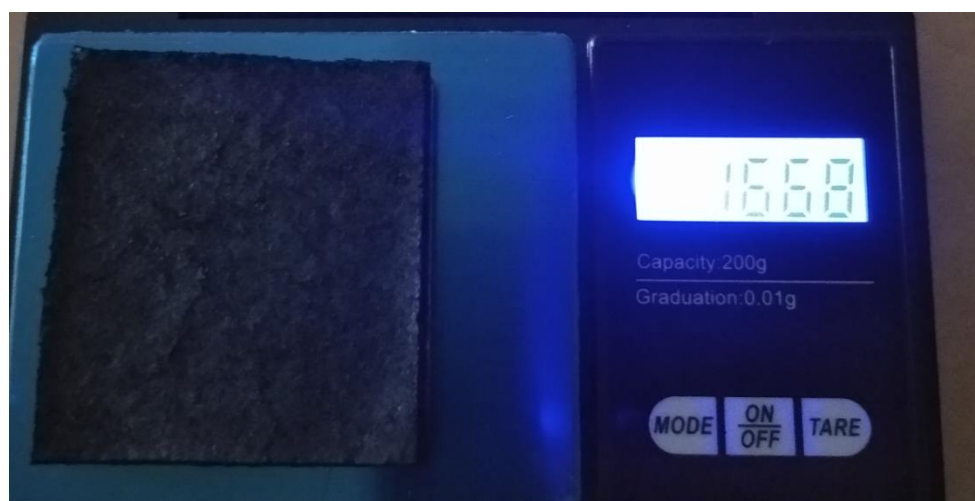


Fig 20. PAL după testare

Au fost supuse testării materiale de construcții uzuale, reprezentate de polistiren expandat, polistiren extrudat, lemn, plăci de aşchii lemnoase (PAL), polipropilenă (PP), policlorură de vinil (PVC) şi ghips carton şi a fost analizată modalitatea în care proprietăţi ale acestora precum densitatea sau aria suprafeţei expuse fluxului termic au influenţat producţia de fum. Pe măsură ce probele au fost expuse la fluxul termic, fumul degajat de acestea a produs o scădere a intensităţii luminoase, înregistrată de luxmetru. Când intensitatea luminoasă a început să revină la valorile anterioare, probele au fost scoase din sfera de influenţă a fluxului termic. Tabelul IX prezintă sintetic materialele utilizate, dimensiunile acestora, masa probelor, aria suprafeţei şi timpul de expunere la fluxul termic.

Tabelul IX. Materiale de construcţii utilizate

Nr. crt.	Material	Dimensiuni (cm) L x l x h	Masă (g)	Aria suprafeţei expuse (cm ²)	Timp expunere (s)
1.	Polistiren expandat (EPS)	5 x 5 x 5	1,75	25	220
2.	Polistiren extrudat (XPS)	5 x 5 x 5	3,5	25	240
		10 x 5 x 2,5	3,5	50	150
3.	Lemn	4 x 4 x 4	16,6	16	750
		4 x 4 x 4 Expunere la flacără	16,6	16	180
4.	Plăci din aşchii lemnoase (PAL)	5 x 5 x 1,2	19,7	25	300
		5 x 1,2 x 5	18,8	11	480
5.	Polipropilenă (PP)	Conductă instalaţii sanitare D 32 mm	4,14	-	470
6.	Ghips carton	5 x 5 x 1,2	3,20	25	430
7.	Tapet policlorură de vinil (PVC)	12 x 5 Împăturită în 2	2,94	60	170
		5,5 x 5,5 Împăturită în 4	2,94	30,25	190

Rezultate şi discuţie

Pentru a prezenta influenţa densităţii asupra producţiei de fum, au fost comparate probe de dimensiuni identice de polistiren expandat şi extrudat. Polistirenul expandat este caracterizat de o densitate de 28 kg/m³, iar cel extrudat de 35 kg/m³. Conform datelor producătorului, polistirenul extrudat este încadrat în clasa C de reacţie la foc, adică produse combustibile care contribuie la dezvoltarea incendiului în anumite limite. De asemenea, etichetarea s3, d0 arată faptul că produsul are o emisie ridicată de fum, dar nu produce picături arzând la expunerea la foc. Din datele obţinute, se poate observa că pentru o densitate mai mică a materialului, fumul este degajat într-o perioadă mai mică de timp, după care degajarea încetează relativ brusc. În cazul polistirenului extrudat, cu o densitate mai mare, degajarea de fum se desfăşoară pe o perioadă mai îndelungată, conducând astfel la cantităţi mai mici de fum, dar o emisie mai susţinută. Figura 21 prezintă graficul comparativ al densităţii optice a fumului pentru cele două materiale de construcţii.

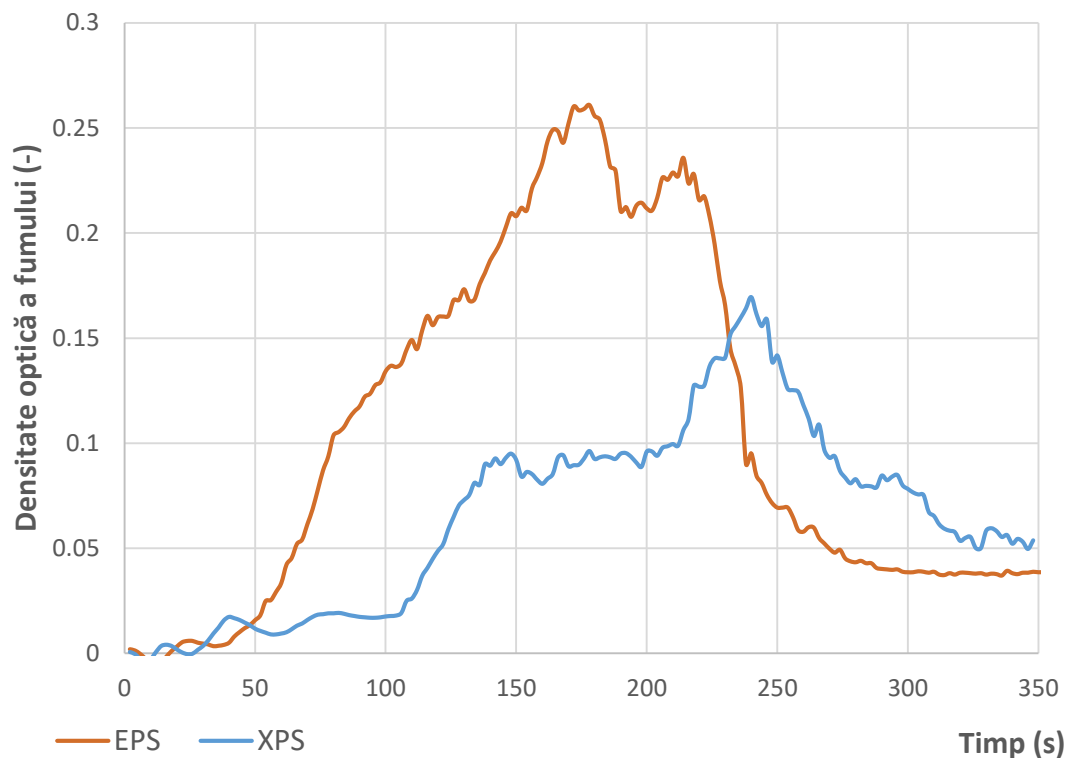


Fig 21. Emisie de fum densități diferite

Proba de lemn care a fost supusă arderii mocnite nu a produs cantități semnificative de fum. În cazul expunerii directe la flacără, proba de lemn a contribuit la ardere, iar după îndepărtarea flăcării pilot, arderea nu a pătruns în masa probei, ci a parcurs laturile acesteia, după care s-a stins. Totuși, emisiile de fum în cazul expunerii la flacără directă au fost mai însemnate decât în cazul arderii mocnite. Densitatea optică a fumului obținut în cazul testării lemnului este prezentată în figura 22.

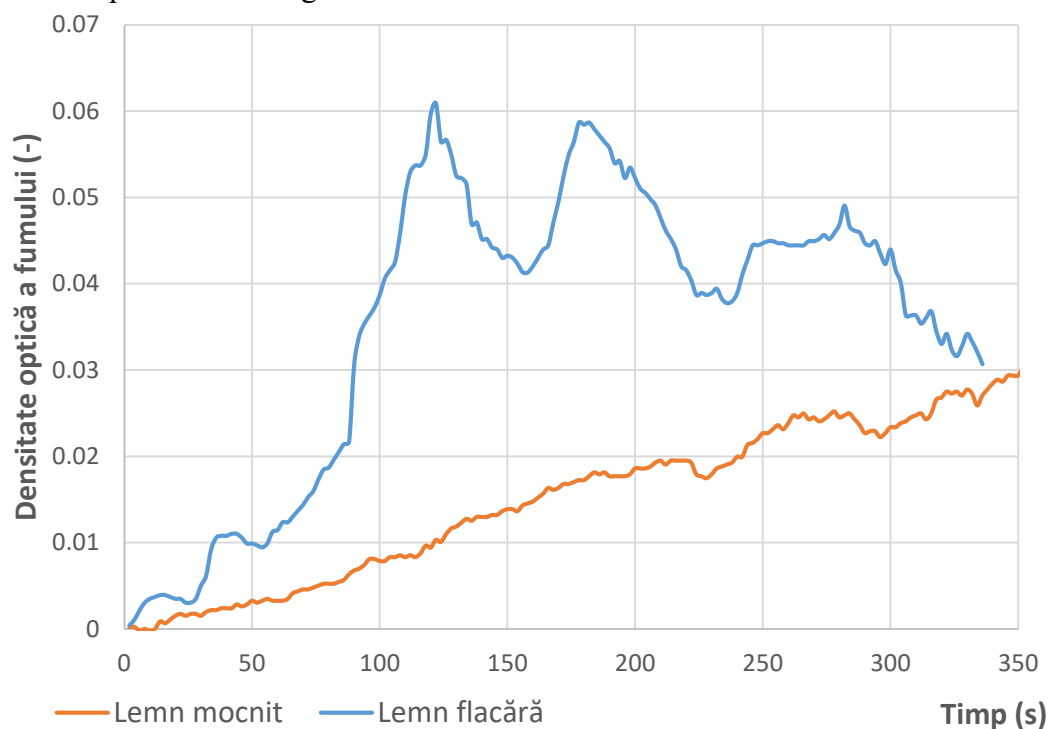


Fig 22. Emisie de fum ardere mocnită sau cu flacără

Modalitatea în care flacăra a parcurs laturile probei dar nu a pătruns în masa acesteia se poate vedea în figura 23.



Fig 23. Arderea cu flacără a lemnului

Pentru evidențierea modului în care aria suprafeței expusă la fluxul termic influențează emisia de fum, au fost utilizate probe de dimensiuni identice de plăci din aşchii lemnoase. Acestea au fost expuse pe rând la fluxul termic cu fețele de dimensiuni diferite. S-a observat că dacă aria suprafeței de expunere este mai mare, emisia de fum este semnificativ mai însemnată și rapidă. Graficul comparativ al emisie de fum în aceste cazuri se regăsește în figura 24.

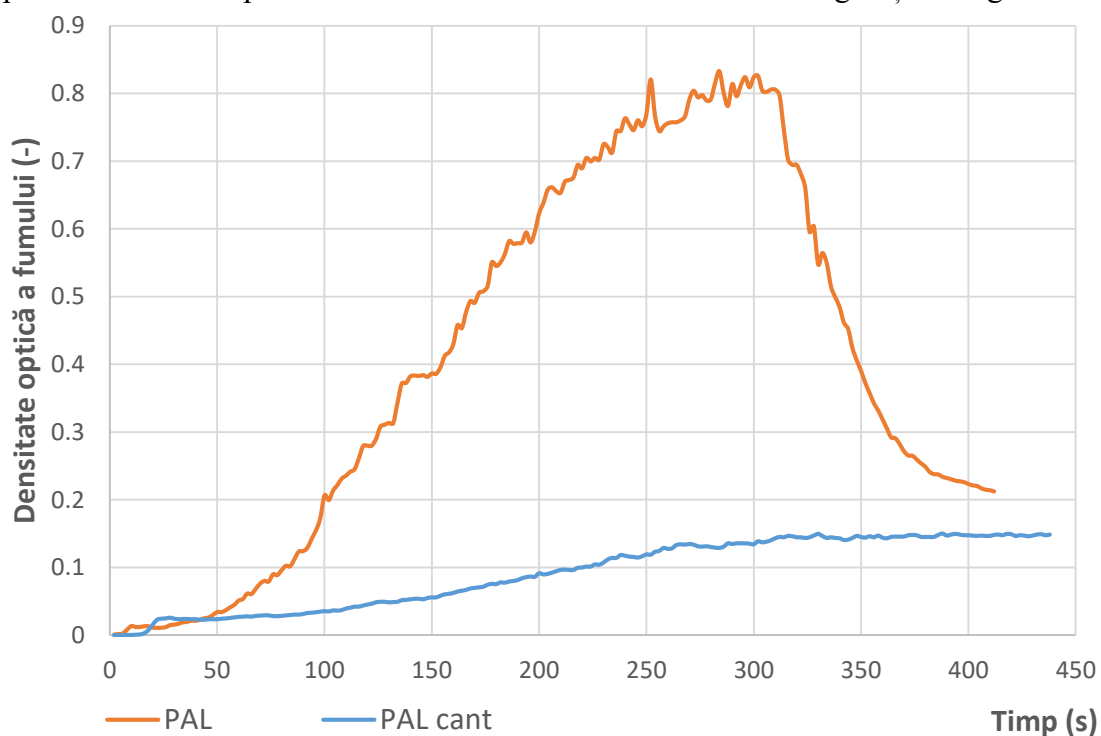


Fig 24. Emisie de fum arie diferită de expunere

Afectarea diferită a probelor de plăci de aşchii lemnoase se poate observa în figura 25, care prezintă comparativ cele două probe imediat după testarea experimentală.



Fig 25. Afectarea probelor de PAL

Alt tip de probe care a fost utilizat pentru a demonstra influența ariei suprafeței expuse la fluxul termic asupra emisiei de fum a fost tapetul din policlorură de vinil (PVC). Două probe de aceleași dimensiuni au fost supuse testării, una fiind împăturită de două ori, iar cealaltă de 4. Acest mod de testare evidențiază influența atât a numărului de straturi a materialului, cât și a ariei suprafeței expuse fluxului termic. S-a observat faptul că pentru o arie a suprafeței expuse fluxului termic mai ridicată și un număr mai redus de straturi, emisia de fum este mai însemnată. Graficul comparativ al rezultatelor obținute în cadrul acestei testări este prezentat în figura 26.

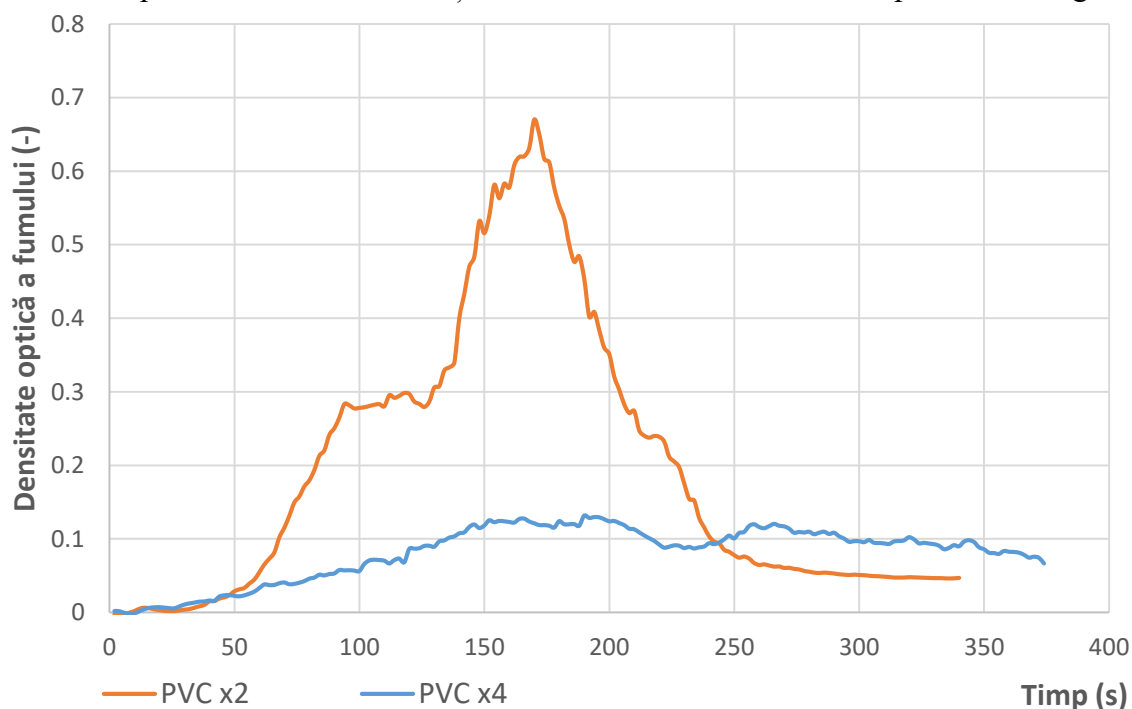


Fig 26. Emisie de fum arie diferită de expunere

Ghips cartonul utilizat la testare nu a produs cantități semnificative de fum, elementul din compoziția acestuia care a contribuit la emisia de fum fiind cartonul, care se regăsește în concentrație relativ redusă în compoziție față de celelalte componente. Ghips cartonul utilizat la testare este marcat A2, s1-d0, semnificând faptul că acesta este un produs care nu se poate aprinde cu flacăra și a cărei contribuție la dezvoltarea incendiului este extrem de limitată, emisivitate de fum redusă și nu produce picături arzând.

Proba de polipropilenă a fost utilizată pentru a se obține un profil al densității optice a fumului. Acest material este utilizat atât pentru traseele de canalizare ale obiectelor sanitare, cât și pentru traseele de alimentare a instalațiilor electrice. În urma expunerii la fluxul termic, proba s-a topit și a pierdut 0,43 grame din masa inițială. Având în vedere că nu a avut loc arderea cu flacără a acestei probe, se poate presupune că pierderea de masă este constituită în mare parte din fum și produși de ardere. Profilul densității optice a fumului produs de acest material se regăsește în figura 27.

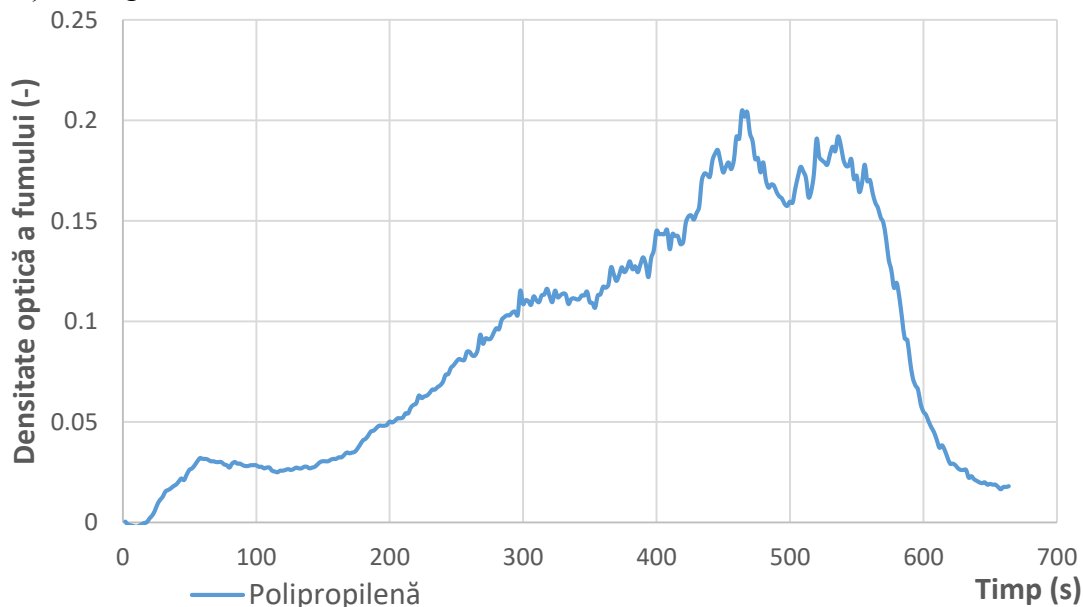


Fig 27. Profil densitate optică a fumului PP

Concluzii

Testarea la scară redusă a materialelor de construcții a condus la observații privind influența proprietăților acestora asupra emisiei de fum. S-a observat că aria suprafeței expusă la fluxul termic influențează direct proporțional emisia de fum, atât în cazul materialelor lemnoase, cât și în cazul materialelor plastice. Densitatea materialului a influențat în mod invers proporțional emisia de fum, fenomen intuitiv, având în vedere că cel puțin în cazul polistirenului expandat, densitatea mai mică decât a celui extrudat este asociată cu o cantitate mai ridicată de aer, care contribuie la întreținerea arderii, și o suprafață mai mare de influență, la nivel microscopic, a fluxului termic asupra materialului prin fenomenele de convecție și radiație.

S-a observat că arderea cu flacără determină o emisie mai însemnată de fum, cu atât mai mult cu cât flacăra auto-întreținută este instabilă, nu reușește să pătrundă în masa materialului și se stinge după o anumită perioadă de timp fără intervenție din exterior.

Totodată, pentru materialele uzuale de construcții analizate, a fost obținut profilul caracteristic al densității optice a fumului produs în cazul expunerii la un anumit flux termic și al arderii mocnite, fără flacără. Aceste date pot fi corelate cu cele din literatura de specialitate și simulări numerice pentru a putea aproxima comportamentul probabil al acestor materiale în condiții similare la scară naturală.

Concluzii

Lucrarea de față a prezentat o abordare experimentală pentru evaluarea emisiei de fum a materialelor de construcții, în contextul unei evoluții tehnologice continue și accentuate, în scopul contribuției la dezvoltarea modalităților de testare la scară redusă. Testarea standardizată pentru materialele de construcții existente sau incidente în spațiul comercial european necesită cantități însemnate de materiale, care în etapa de cercetare și dezvoltare, sunt de multe ori indisponibile sau costisitoare. Din acest motiv, testarea la scară redusă a materialelor de construcții în privința comportării la acțiunea focului este necesară pentru a se putea evalua oportunitatea producerii materialelor inovative la nivel industrial.

În cadrul acestei lucrări a fost abordată analiza emisiei de fum a materialelor de construcții prin utilizarea testării experimentale la scară naturală a fumului produs artificial, reducerea la scară 1:10 și 1:20 a acestei testări, precum și determinarea prin testare la scară redusă a influenței caracteristicilor materialelor de construcții asupra emisiei de fum.

Prin utilizarea fumului generat artificial și determinarea ariei de stingere a acestuia, s-a putut demonstra posibilitatea unei aproximări relativ precise (5-10%) a proprietăților optice ale fumului prin testarea la scară redusă. De asemenea, prin testarea la scară redusă a fumului generat prin ardere, au putut fi obținute corelații privitoare la influența proprietăților materialelor de construcții asupra fumului generat prin ardere.

Determinarea proprietăților optice ale fumului generat artificial la scară naturală și la scară redusă, precum și determinarea comparativă a cantităților de fum generate prin arderea materialelor de construcții s-au efectuat prin utilizarea unei metodologii proprii, inspirate de modalitățile standard de testare a emisiei de fum a produselor de construcții, în vederea încadrării acestora în clase standard de reacție la foc.

Diseminarea rezultatelor obținute în cadrul acestei lucrări și a celor conexe s-a desfășurat prin publicarea unui articol la o conferință indexată Web of Science [23], un articol la o conferință indexată în Baze de Date Internaționale [24], și un articol în curs de publicare, susținut la o conferință indexată Web of Science.

În ceea ce privește cercetările viitoare, este de interes reproducerea prin simularea numerică a valorilor proprietăților optice ale fumului generat prin arderea materialelor de construcții la scară redusă, precum și utilizarea programelor de simulare numerică pentru aproximarea la scară reală a comportamentului fumului produs de materiale de construcții testate la scară redusă, în scopul evaluării influenței acestuia asupra caracteristicilor incendiilor.

Bibliografie

- [1] R. Parlamentul, Legea nr. 10/1995 privind calitatea în construcții, București, 1995. http://www.aicps.ro/media/content/2016-10/legea-10-1995-republicata-30-09-2016_5919ad6e1ae3c.pdf (accessed November 29, 2018).
- [2] J. Purkiss, L.-Y. Li, Fire Safety Engineering Design of Structures, Third Edition, CRC Press, 2013. doi:10.1201/b16059.
- [3] ISO, EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services, 2016.
- [4] ISO, EN 13823:2014 The Single Burning Item Test, 2014.
- [5] MTCT, MAI, Regulamentului privind clasificarea și încadrarea produselor pentru construcții pe baza performanțelor de comportare la foc, 2004. http://www.dsu.mai.gov.ro/wp-content/uploads/2015/07/Ordin_1822_2004.pdf.
- [6] R. Van Mierlo, B. Sette, The Single Burning Item (SBI) test method-a decade of development and plans for the near future, n.d.
- [7] P. Van Hees, T. Hertzberg, A.S. Hansen, Development of a Screening Method for the SBI and Room Corner using the Cone Calorimeter, (2002). www.sp.se (accessed November 1, 2019).
- [8] EUROCLASS SYSTEM, (n.d.). <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/database/euroclass/euroclass.html> (accessed November 1, 2019).
- [9] International Organization for Standardization, ISO 13943:2017 Fire safety-Vocabulary, 2017. <https://www.iso.org/standard/63321.html> (accessed December 20, 2018).
- [10] J. Axelsson, P. Andersson, A. Lönnemark, P. Van Hees, I. Wetterlund, Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI, SP Swedish Natl. Test. Res. Inst. SP Fire Technol. SP Rep. 857 (2001) 501. www.sp.se (accessed November 1, 2019).
- [11] S. Karampran, D. Bun, B. Gautier, Extinction Properties of Smoke Mixtures, 2000. <http://www.iafss.org/publications/fss/6/829/view> (accessed December 27, 2018).
- [12] M.K.W. Chan, J. Mishima, NUREG/CR-2658, “Characteristics of Combustion Products: A Review of the Literature.,” 1983.
- [13] J.D. Seader, I.N. Einhorn, Some physical, chemical, toxicological, and physiological aspects of fire smokes, Int. Symp. Combust. 16 (1977) 1423–1445. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078477804268> (accessed November 27, 2019).
- [14] D. Gross, J.J. Loftus, A.F. Robertson, Method for Measuring Smoke from Burning Materials, in: Symp. Fire Test Methods—Restraint Smoke 1966, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, n.d.: pp. 166-166–39. doi:10.1520/STP41310S.
- [15] Y. Akizuki, T. Tanaka, K. Yamao, Calculation Model for Travel Speed and Psychological State in Escape Routes considering Luminous Condition, Smoke Density and Evacuee’s Visual Acuity, (2008). doi:10.3801/IAFSS.FSS.9-365.
- [16] International Organization for Standardization, ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires, 2012. <https://www.iso.org/standard/73217.html> (accessed December 14, 2018).
- [17] D.A. Purser, J.L. McAllister, Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat, in: SFPE Handb. Fire Prot. Eng., Springer New York, New York, NY, 2016: pp. 2308–2428. doi:10.1007/978-1-4939-2565-0_63.
- [18] K. Fridolf, D. Nilsson, H. Frantzich, E. Ronchi, Walking Speed in Smoke: Representation in Life Safety Verifications, Wsp.Com. (2018). <https://www.wsp.com/>

- /media/Insights/Sweden/Documents/2018/WALKING-SPEED-IN-SMOKE-REPRESENTATION-IN-LIFE-SAFETY.pdf (accessed August 30, 2019).
- [19] B. Truchot, C. Willmann, J. Guivarch, People evacuation in tunnel fires: a cross evaluation of two methodologies, *J. Phys.* (2004). doi:10.1088/1742-6596/1107/7/072004.
 - [20] G. Mulholland, Smoke production and properties, in: W.D. Walton (Ed.), *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, 3rd ed., National Fire Protection Association, 2002: pp. 473–482. http://www.academia.edu/download/55183070/sfpe_handbook_of_fire_protection_engineering_edisi_2002.pdf#page=473 (accessed November 29, 2019).
 - [21] H. Ingason, B. Persson, Prediction of Optical Density using CFD, *Fire Saf. Sci.* 6 (2000) 817–828.
 - [22] J. Tissot, M. Talbaut, J. Yon, A. Coppalle, A. Bescond, Spectral study of the smoke optical density in non-flaming condition, in: *Procedia Eng.*, Elsevier Ltd, 2013: pp. 821–828. doi:10.1016/j.proeng.2013.08.131.
 - [23] D. Burlacu, A. Georgescu, A. Vartires, I. Marinescu, An Experimental Evaluation of Visibility in Simulated Smoke, in: *Int. Conf. ENERGY Environ.*, 2019: pp. 39–43. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8937634/> (accessed January 13, 2020).
 - [24] D. Burlacu, Ștefan-N. Trache, Grid Resolution Influence On Smoke Simulation Accuracy, in: *2019 Int. Conf. Hydraul. Pneum. - HERVEX*, 2019: pp. 269–277.