



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie  
**POLITEHNICA BUCUREȘTI**  
**FACULTATEA DE ENERGETICĂ**  
060042 București, Splaiul Independenței, nr. 313, sector 6



## REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

*Managementul stingerii incendiilor în spații închise prin eficientizarea jeturilor de apă*

*Fires extinguishing management that occurs in enclosed spaces by streamlining water jets*

**Autor:** drd. ing. Alexandru-Florin Chiojdoiu

**Conducător de doctorat:** prof. univ. dr.ing. Valeriu Nicolae PANAITESCU

prof. dr. ing. Carmen-Anca Safta

### COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. dr. ing. Radu PORUMB	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA BUCUREȘTI
Conducător de doctorat	Prof. dr. ing. Carmen Anca SAFTA	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA BUCUREȘTI
Referent	Prof. dr. ing. Ilinca NĂSTASE	Universitatea Tehnică de Construcții din București
Referent	Conf. dr. ing. Ion ANGHEL	Academia de Poliție „Alexandru Ioan-Cuza”
Referent	Conf. dr. ing. Andrei DRAGOMIRESCU	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA BUCUREȘTI

București, 2023

## Rezumat

*Teza de doctorat „Managementul stingerii incendiilor în spații închise prin eficientizarea jeturilor de apă” reprezintă o cercetare aplicativă prin care se urmărește identificarea parametrilor care influențează favorabil stingerea incendiilor care se manifestă în spații închise, în urma refulării apei folosind diferite tehnici. În particular, prezenta lucrare investighează refularea apei folosind tehnica literelor „T”, „Z” și „O”, comparativ cu alte tehnici de refulare, atât în ceea ce privește analiza distribuției apei, cât și în ceea ce privește influența acesteia asupra stingerii incendiilor.*

*Obiectivele principale ale tezei sunt:*

- ✓ *Elaborarea unor proceduri experimentale pentru refularea apei în lipsa, respectiv în prezența arderii:
  - manual - folosind tehnica literelor „T”, „Z”, „O” și menținând țeava de refulare fixă, înclinată sub un unghi de 45° față de planul orizontal, unghiul conic al jetului luând, pe rând, valoarea de 30°, respectiv de 45°;*
  - automat – folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă.**
- ✓ *Realizarea simulărilor numerice privind arderea liberă a patru stive pentru cuantificarea influenței ventilației naturale asupra variației în timp a temperaturii înregistrate în interiorul unei încăperi;*
- ✓ *Realizarea încercărilor experimentale de refulare a apei, în lipsa arderii, în interiorul unei încăperi manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă, pentru a cunoaște modul în care apa va acționa prin intermediul mecanismelor sale de stingere asupra focarului de incendiu; în acest sens vor fi utilizate șapte scenarii;*
- ✓ *Realizarea încercărilor experimentale de refulare a apei, în prezența arderii, în interiorul unei încăperi, folosind procedura manual, cu țeavă de refulare, și automat, folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă, pentru a identifica parametrii care influențează semnificativ stingerea unui incendiu într-un spațiu închis; în acest sens vor fi utilizate șapte scenarii.*

*Primul capitol reprezintă o introducere în tematica tezei și prezintă stadiul actual al cunoașterii în domeniu, atât din punct de vedere experimental cât și numeric, al stingerii incendiilor folosind diferite tehnici de refulare a apei, așa cum reiese din literatura de specialitate.*

*În capitolul al 2-lea al tezei sunt prezentate principalele caracteristici ale incendiilor care se manifestă în spații închise, mecanismele apei de stingere a incendiilor, echilibrul energetic al unui compartiment de incendiu, parametrii fundamentali care stau la baza eficientizării procesului de stingere, metode de bază ale stingerii incendiilor folosind apa, conceptul de control al incendiului, precum și analiza rezultatelor obținute în urma unei simulări numerice folosind programul PyroSim,*

*comparativ cu încercările experimentale efectuate la scară naturală, de ardere liberă a unei stive.*

*În Capitolul al 3-lea sunt descrise ecuațiile matematice care stau la baza proceselor de ardere și stingere a incendiilor în cadrul programului FDS.*

*În Capitolul al 4-lea al tezei sunt prezentate următoarele: standul experimental, dispozitivul de intervenție, echipamentele utilizate pentru măsurare și clasele de precizie ale acestora. De asemenea, sunt descrise procedurile de testare în interiorul unei încăperi privind: (a) analiza distribuției apei în urma refulării acesteia în lipsa arderii; (b) arderea liberă a patru stive; (c) stingerea a patru stive care ard. Procedurile privind analiza distribuției apei și a stingerii presupun utilizarea a șapte scenarii (S1 – S7), în urma refulării apei manual, folosind țeava de refulare (refularea apei folosind tehnica literelor „T” (S1), „Z” (S2) și „O” (S3) și refularea apei prin menținerea unei țevi de refulare fixă și înclinată la 45°, unghiul conic al jetului luând pe rând valorile de 30° (S4) și 45° (S5)), și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere (S6) și ceață de apă (S7).*

*În Capitolul al 5-lea sunt prezentate modelele de piroliză utilizate în programul PyroSim și simularea numerică a arderii libere a patru stive.*

*În Capitolul al 6-lea sunt interpretate rezultatele obținute în urma: (A) analizei distribuției apei în interiorul încăperii de testare, în lipsa arderii, în cadrul celor șapte scenarii de refulare a apei (S1 – S7); (B) arderii libere a patru stive; (C) analizei comparative dintre încercarea experimentală și simularea arderii libere a patru stive; (D) stingerii în urma refulării apei manual, folosind țeava de refulare (S1 – S5), și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere (S6) și ceață de apă (S7) a patru stive care ard.*

*Astfel, se constată faptul că eficientizarea stingerii incendiului se obține în urma reducerii temperaturii în interiorul compartimentului de incendiu, a volumului apei refulate, a timpului necesar controlului incendiului, precum și a reducerii fluxului căldurii degajate pe unitatea de suprafață. Parametrii principali care influențează procesul de eficientizare a stingerii sunt: direcția de refulare a jetului de apă, debitul apei, densitatea distribuției apei, unghiul conic al jetului, tehnica de refulare utilizată și modul de refulare a apei în ceea ce privește continuitatea.*

*În Capitolul al 7-lea este prezentat conceptul de control al incendiului, acesta fiind la baza managementului operațional al stingerii incendiilor în spații închise.*

*Capitolul al 8-lea încheie teza prin prezentarea concluziilor extrase din analiza rezultatelor obținute, a contribuțiilor originale aduse de prezenta lucrare, respectiv perspectivele de cercetare ulterioară.*

**Cuvinte cheie:** *tehnica literelor, încercare experimentală, simulare numerică, controlul focului, eficientizarea stingerii.*

## Cuprins

<b>Capitolul 1. INTRODUCERE.....</b>	<b>5</b>
1.1. Contextul prezentei lucrării .....	5
1.2. Scopul și obiectivele lucrării .....	5
1.3. Organizarea tezei pe capitole .....	6
<b>Capitolul 2. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU7</b>	
2.1. Caracteristicile incendiilor care se manifestă în spații închise 7	
2.2. Importanța apei în eficientizarea procesului de stingere a incendiilor .....	8
2.3. Echilibrul energetic al unui compartiment de incendiu .....	8
2.4. Principalii parametri care stau la baza eficientizării procesului de stingere a incendiilor .....	9
2.5. Metode de stingere utilizând țevile de refulare a apei .....	10
2.6. Controlul incendiului, principiu de bază al managementului stingerii incendiilor la clădiri .....	11
2.7. Modele matematice existente .....	12
2.8. Rezultate obținute prin simulare numerică comparativ cu încercări experimentale în urma arderii libere a unei stive din lemn	
13	
<b>Capitolul 3. ELEMENTE TEORETICE DE MODELARE MATEMATICĂ.....</b>	<b>15</b>
3.1. Modelul gazodinamic .....	15
3.2. Modelul transferului termic .....	16
3.3. Modelul pirolizei.....	16
3.4. Modelul arderii controlate de amestec .....	16
3.5. Modelul matematic al stingerii incendiilor în urma refulării apei în cadrul programului FDS .....	17
<b>Capitolul 4. ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE.....</b>	<b>18</b>
4.1. Standul experimental.....	18
4.2. Echipamentele de măsurare .....	21
4.3. Procedura de testare .....	23
<b>Capitolul 5. ANALIZA PROCESULUI DE ARDERE PRIN MODELARE ȘI SIMULARE NUMERICĂ .....</b>	<b>25</b>
5.1. Modele de piroliză utilizate în PyroSim .....	25
5.2. Simularea arderii libere a patru stive .....	25
<b>Capitolul 6. DISCUȚII ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR .</b>	<b>26</b>
6.1. Analiza distribuției apei .....	26
6.2. Arderea liberă a patru stive .....	28
6.3. Analiza comparativă dintre încercarea experimentală și simularea arderii libere a patru stive .....	32

6.4. Stingerea cu apă manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere și ceață de apă, a patru stive care ard .....	33
<b>Capitolul 7. MANAGEMENTUL OPERAȚIONAL AL STINGERII INCENDIILOR ÎN SPAȚII ÎNCHISE .....</b>	<b>41</b>
<b>Capitolul 8. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII.....</b>	<b>43</b>
8.1. Contribuții originale .....	43
8.2. Perspective de dezvoltare ulterioară.....	44
8.3. Lista de publicații.....	45
<b>Capitolul 9. EXTRAS DIN BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>47</b>

## **Capitolul 1. INTRODUCERE**

### **1.1. Contextul prezentei lucrări**

Dinamica incendiilor care se manifestă la clădiri de locuit a cunoscut schimbări semnificative în urma dezvoltării domeniului construcțiilor de clădiri, ceea ce a condus la: propagarea mult mai rapidă a incendiilor, micșorarea timpului de evacuare a persoanelor surprinse de incendiu, degajarea unor mari cantități de fum și gaze toxice, precum și schimbări rapide în modul de manifestare al incendiului prin apariția unor fenomene deosebit de periculoase precum flashover sau backdraft [26].

Astfel, este necesară cunoașterea aprofundată a impactului diferitelor tehnici de refulare a apei asupra dinamicii incendiilor care se manifestă în spații închise atât asupra securității și sănătății echipajelor de pompieri, respectiv a ocupanților clădirii surprinși de incendiu, cât și asupra structurii de rezistență a construcției.

Refularea apei manevrând țeava de refulare în forma literelor „T”, „Z”, „O” reprezintă o tehnică de refulare studiată atât teoretic cât și practic. Însă, în ceea ce privește studiile practice, acestea nu au fost efectuate prin refularea apei asupra unui focar de incendiu, în vederea analizării influenței utilizării tehnicii literelor asupra dinamicii incendiului într-un spațiu închis. Tehnica literelor „T”, „Z”, „O” a fost utilizată în cadrul unor încercări experimentale efectuate la scară naturală în vederea studierii, pe de o parte, a volumului aerului antrenat de jetul de apă refulat [42], iar pe de altă parte, în vederea analizării distribuției apei în interiorul unei încăperi [43].

În acest sens, impactul utilizării tehnicii literelor „T”, „Z”, „O” comparative cu alte tehnici de refulare a apei asupra dinamicii unui incendiu care se manifestă într-un spațiu închis reprezintă un subiect de studiu important care necesită a fi exploatat.

### **1.2. Scopul și obiectivele lucrării**

Teza de doctorat „Managementul stingerii incendiilor în spații închise prin eficientizarea jeturilor de apă” reprezintă o cercetare aplicativă prin care se urmărește identificarea parametrilor care influențează favorabil stingerea incendiilor care se manifestă în spații închise, în urma refulării apei folosind diferite tehnici. În particular, prezenta lucrare investighează refularea apei folosind tehnica literelor „T”, „Z” și „O”, comparativ cu alte

tehnici de refulare, atât în ceea ce privește analiza distribuției apei, cât și în ceea ce privește influența acesteia asupra stingerii incendiilor.

Scopul lucrării este reprezentat de identificarea principalilor parametri care influențează semnificativ eficientizarea procesului de stingere a unui incendiu care se manifestă într-un spațiu închis, analizând comparativ rezultatele obținute în urma refulării apei folosind diferite tehnici.

Obiectivele principale ale tezei sunt:

- (i) Elaborarea unor proceduri experimentale pentru refularea apei în lipsa, respectiv în prezența arderii:
  - ✓ manual - folosind tehnica literelor „T”, „Z”, „O” și menținând țeava de refulare fixă, înclinată sub un unghi de  $45^\circ$  față de planul orizontal, unghiul conic al jetului luând, pe rând, valoarea de  $30^\circ$ , respectiv de  $45^\circ$ ;
  - ✓ automat – folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă;
- (ii) Realizarea simulărilor numerice privind arderea liberă a patru stive pentru cuantificarea influenței ventilației naturale asupra variației în timp a temperaturii înregistrate în interiorul unei încăperi;
- (iii) Realizarea încercărilor experimentale de refulare a apei, în lipsa arderii, în interiorul unei încăperi prin procedeu manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă, pentru a cunoaște modul în care apa va acționa prin intermediul mecanismelor sale de stingere asupra focarului de incendiu; în acest sens vor fi utilizate șapte scenarii;
- (iv) Realizarea încercărilor experimentale de refulare a apei, în prezența arderii, în interiorul unei încăperi manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă, pentru a identifica parametrii care influențează semnificativ stingerea unui incendiu într-un spațiu închis; în acest sens vor fi utilizate șapte scenarii.

### **1.3. Organizarea tezei pe capitole**

Teza de doctorat este organizată pe 8 capitole și se încheie cu bibliografia. Capitolele sunt prezentate într-o anumită ordine în scopul evidențierii evoluției cercetării efectuate, pornind de la aspecte teoretice, experimentale, respectiv simulări numerice și continuând cu analize comparative ale rezultatelor obținute.

## Capitolul 2. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU

### 2.1. Caracteristicile incendiilor care se manifestă în spații închise

Incendiile care se manifestă în spații închise sunt influențate de tipul, cantitatea și dispunerea materialelor combustibile, geometria și existența ventilației compartimentului de incendiu, respectiv de sursa de aprindere. Tipul și dispunerea materialelor combustibile influențează caracteristicile creșterii incendiului, în timp ce cantitatea totală a materialelor combustibile și caracteristicile ventilației influențează intensitatea și durata incendiului.

Fazele unui incendiu, reprezentate în Fig. 2.1., sunt: aprinderea, creșterea, arderea generalizată și regresia. Dacă fenomenul de flashover are loc, incendiul este caracterizat de etapa pre-flashover, care include aprinderea și creșterea incendiului, respectiv faza post-flashover, care include arderea generalizată și regresia [15].

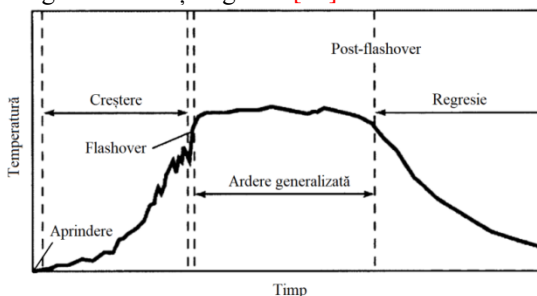


Fig. 2.1. Fazele dezvoltării unui incendiu [15]

Principalii parametri care definesc modelele de incendiu, și anume incendiile care sunt reprezentative ce pot avea loc într-o clădire și care sunt utilizate pentru a evalua performanța clădirii în ceea ce privește protecția împotriva incendiilor, sunt fluxul de căldură degajată de incendiu - HRR (eng: heat release rate), temperatura înregistrată în încăperea și viteza de producere a gazelor toxice [5]. Fluxul de căldură degajată de incendiu reprezintă viteza cu care un incendiu eliberează energie termică, fiind măsurat în J/s sau W [14], fiind un parametru strâns legat de sarcina termică. Sarcina termică reprezintă valoarea totală a fluxului termic care poate fi degajat prin arderea completă a tuturor materialelor combustibile aflate în interiorul unui compartiment de incendiu și se măsoară în MJ, fiind un parametru de intrare important în modelarea incendiilor [32].



## 2.2. Importanța apei în eficientizarea procesului de stingere a incendiilor

Apa reprezintă un agent important de stingere a incendiilor [3]. Două dintre cele mai importante proprietăți fizice ale apei sunt capacitatea acesteia de a-și mări volumul prin transformarea în aburi la 100 °C și capacitatea de absorbție a căldurii aflându-se atât în formă lichidă cât și în formă gazoasă [12]. Proprietățile unice ale apei sunt dilatarea volumetrică și capacitatea de absorbție a căldurii, care poate fi împărțită în trei categorii: căldura specifică a apei, căldura latentă de vaporizare, căldura specifică a vaporilor de apă. În funcție de modul în care apa este refulată, și anume manual, folosind țevile de refulare, respectiv automat, prin intermediul instalațiilor fixe de stingere cu ceață de apă și sprinklere, apa dezvoltă mecanisme diferite de stingere a incendiilor [7]. Mecanismele apei de stingere a incendiilor folosind țevile de refulare, conform Fig. 2.2., sunt: absorbția căldurii, reducerea concentrației de oxigen, efectul de răcire/ecranarea suprafeței, reducerea radiației termice, efectul de suflare.

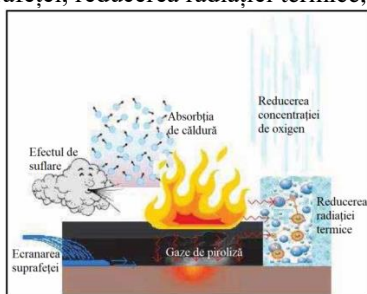


Fig. 2.2. Mecanismele apei de stingere a incendiilor folosind țevile de refulare [19]

Mecanismele apei de stingere a incendiilor utilizând instalația de sprinklere sunt: efectul de răcire și efectul de înăbușire.

Mecanismele apei de stingere a incendiilor folosind instalația de ceață de apă [1, 7, 17], se împart în două categorii: primare (absorbția căldurii degajate de flăcări și gazele fierbinți, materialele care ard și obiectele aflate în apropierea focarului, reducerea concentrației de oxigen, blocarea radiației termice) și secundare (diluarea amestecului dintre aer și vaporii materialelor combustibile care ard și efectele cinetice ale ceții de apă asupra flăcărilor).

## 2.3. Echilibrul energetic al unui compartiment de incendiu

În cadrul unui compartiment de incendiu, prevăzut cu o deschidere tip ușă, are loc un echilibru energetic, astfel: în cazul arderii libere a unei stive,



În Fig. 2.3. este prezentat bilanțul energetic privind capacitatea debitului de apă de absorbție a fluxului termic și capacitatea incendiului de producere a fluxului termic.

Principali parametri care stau la baza procesului de eficientizare a stingerii incendiilor sunt: debitul și volumul apei refulate (metodele matematice de determinare a celor doi parametri au ca element comun sarcina termică totală a compartimentului de incendiu), dimensiunea picăturilor de apă (cu cât diametrul acestora este mai mic cu atât suprafața totală a picăturilor care intră în contact cu flăcările este mai mare), densitatea distribuției apei refulate (influențează scăderea timpului necesar stingerii incendiului), presiunea de refulare a apei, unghiul conic al jetului și înclinarea jetului de apă față de planul orizontal.

## 2.5. Metode de stingere utilizând țevile de refulare a apei

Există o serie de metode principale utilizate pentru stingerea incendiilor care se manifestă în spații închise, și anume, metoda atacului direct, metoda atacului indirect, metoda atacului combinat, precum și o metodă complementară, „3D water fog”, utilizată pentru răcirea stratului superior de fum și gaze fierbinți. Metoda atacului direct constă în refularea apei direct asupra materialelor combustibile care ard, la baza focarului, în vederea răcirii acestora până la temperatura la care nu mai are loc procesul de piroliză, și anume sub temperatura de aprindere [20]. Metoda atacului indirect constă în refularea apei din exteriorul unei încăperi în care se înregistrează temperaturi mai mari de 537 °C la nivelul tavanului, pe ușă sau pe fereastră [16]. Metoda atacului combinat, constă în refularea apei în interiorul compartimentului de incendiu folosind tehnica literelor „T”, „Z”, „O”, „U întors”. Astfel, se realizează atât transformarea apei în aburi la contactul acesteia cu suprafețele fierbinți ale încăperii, precum și refularea apei asupra materialelor care ard, rezultând răcirea stratului superior de fum și gaze fierbinți, a suprafețelor și a focarului de incendiu [20]. Folosind tehnica literelor, punctul de plecare este de sus în jos, conform Fig. 2.4., această tehnică fiind utilizată pentru încăperi care au suprafața podelei de până la 10 m<sup>2</sup>, în cazul literei „T”, 10-20 m<sup>2</sup>, în cazul literei „O”, respectiv 20-30 m<sup>2</sup>, în cazul literei „Z” [4].



Fig. 2.4. Refularea jetului folosind tehnica literelor „T” [4], „Z”, „O”, „U întors” [42]

Distribuția apei refulate în interiorul unei încăperi folosind tehnica literelor este influențată de unghiul format de țeava de refulare și planul orizontal. Refulând apa în forma literelor în mijlocul tavanului, din dreptul ușii, apa s-a acumulat, în special, în jumătatea camerei aflată în plan depărtat față de poziția de refulare, valorile maxime înregistrându-se în apropierea peretelui diametral opus ușii. Refulând apa pe peretele diametral opus ușii, conform Fig. Error! No text of specified style in document..5., apa s-a acumulat în imediata apropiere a acestuia, valorile maxime înregistrându-se în extremitățile peretelui.

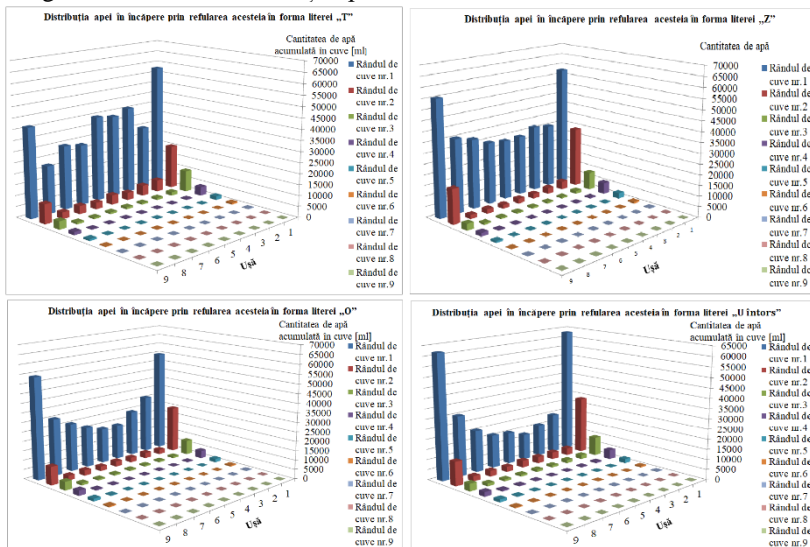


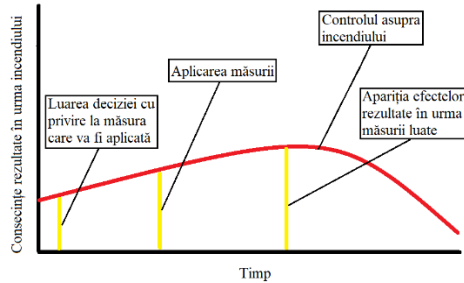
Fig. 2.5. Distribuția apei în urma refulării pe peretele diametral opus [8]

Metoda „3D water fog” constă în refularea apei în stratul de fum și gaze fierbinți sub formă de impulsuri scurte, în scopul creșterii securității și eficienței echipajelor de intervenție, prin crearea condițiilor necesare pătrunderii acestora și refulării apei direct asupra incendiului.

## 2.6. Controlul incendiului, principiu de bază al managementului stingerii incendiilor la clădiri

Operațiunea de stingere a unui incendiu are la bază doi factori cheie, și anume: factorul operațional, care include inițierea, coordonarea și aplicarea procedurilor de intervenție, respectiv factorul control, care presupune abilitatea de a îndeplini obiectivul comun al echipajelor la locul intervenției [39]. O condiție vitală pentru controlul incendiului este dată de accesul la informațiile referitoare la focarul de incendiu. Locul central în cadrul

acestui aspect care caracterizează controlul incendiului îl constituie factorul uman, reprezentat de către comandantul intervenției.

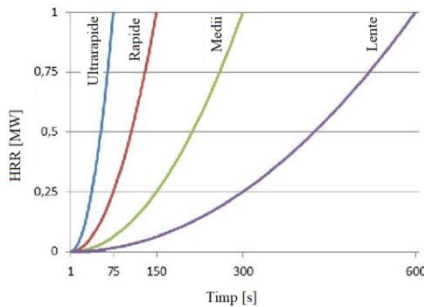


**Fig. 2.6.** Influența perioadei dintre luarea deciziei și efectele produse asupra consecințelor unui incendiu [40]

Conform Fig. 2.6., există o perioadă de timp între momentul luării deciziei cu privire la măsurile ce vor fi aplicate pe timpul desfășurării stingerii incendiilor și efectele produse de aceste măsuri [40]. Această perioadă este direct proporțională cu suma consecințelor rezultate.

## 2.7. Modele matematice existente

Incendiile pot fi definite pe baza unor modele matematice, un exemplu fiind modelul de incendiu „ $t^2$ ”, caracterizat de evoluția în timp a parametrului HRR.



**Fig. 2.7.** Fluxul căldurii degajate pentru modelul de incendiu „ $t^2$ ” [18]

Conform Fig. 2.7., creșterea (dezvoltarea) incendiului poate fi clasificată [34], în baza ecuației „ $t^2$ ”, ca fiind ultra rapidă ( $\alpha_g = 0,1874 \text{ kW/s}^2$ ,  $t_{1MW} = 75 \text{ s}$ ), rapidă ( $\alpha_g = 0,0466 \text{ kW/s}^2$ ,  $t_{1MW} = 150 \text{ s}$ ), medie ( $\alpha_g = 0,0117 \text{ kW/s}^2$ ,  $t_{1MW} = 300 \text{ s}$ ) și lentă ( $\alpha_g = 0,00293 \text{ kW/s}^2$ ,  $t_{1MW} = 600 \text{ s}$ ),  $\alpha_f$  reprezentând coeficientul de creștere al incendiului ( $\text{kW/s}^2$ ), iar  $t_{1MW}$ , timpul măsurat din momentul aprinderii până în momentul în care HRR atinge valoarea de 1 MW.

În cazul în care compartimentul de incendiu este ventilat natural, a fost dezvoltată o corelație statistică, adimensională [28], obținută în urma efectuării a peste 100 de experimente, bazată pe principiul conservării energiei, de determinare a temperaturii stratului de gaze fierbinți pe baza parametrului HRR

$$\Delta T_g = 6,85 \left( \frac{\dot{Q}^2}{A_v \sqrt{h_v A_T h_k}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

unde

$\Delta T_g = T_g - T_{amb}$  reprezintă creșterea temperaturii gazelor de ardere aflate în stratul superior amplasat la nivelul tavanului [K];

$T_{amb}$  - temperatura aerului ambiental [K];

$\dot{Q}$  - fluxul termic de căldură degajat de către incendiu [kW];

$A_v$  - aria deschiderii ventilației [m<sup>2</sup>];

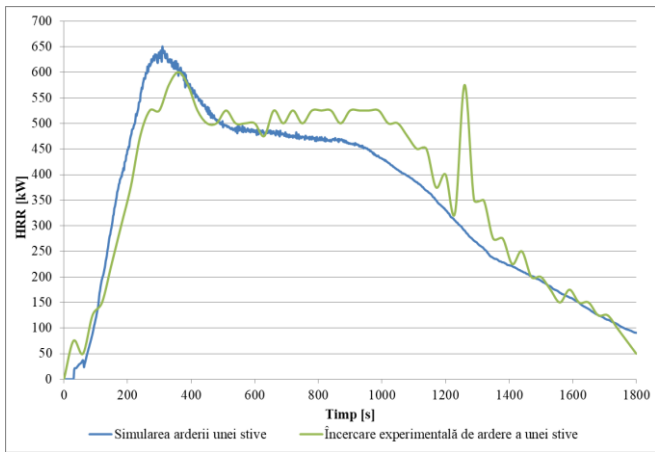
$h_v$  - înălțimea deschiderii [m];

$h_k$  - coeficientul de transfer termic efectiv [kW/m<sup>2</sup>K];

$A_T$  - suprafața totală a compartimentului care acoperă marginile suprafeței, cu excepția suprafeței deschiderilor de ventilare [m<sup>2</sup>].

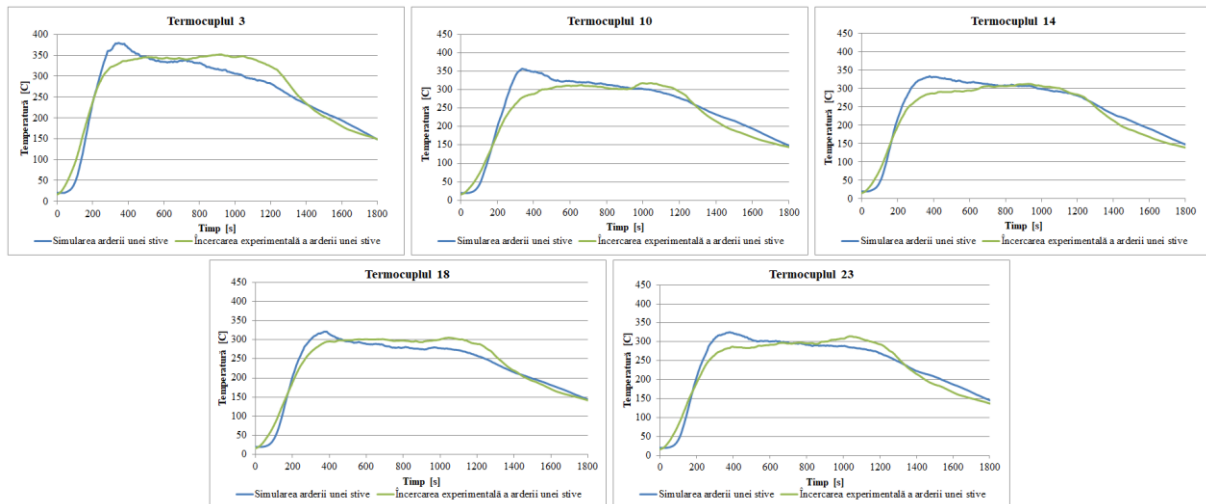
## 2.8. Rezultate obținute prin simulare numerică comparativ cu încercări experimentale în urma arderii libere a unei stive din lemn

Analizând rezultatele obținute în urma simulării numerice comparativ cu cele obținute în urma încercării experimentale de ardere a unei stive din lemn de pin, în cadrul unei încăperi de testare prevăzută cu ușa deschisă, conform Fig. Error! No text of specified style in document.8., a fost validată variația în timp a parametrului HRR, prin obținerea valorii acceptate a erorii medii egală cu 15 % [30].



**Fig.** Error! No text of specified style in document..8. Analiza comparativă a variației în timp a HRR pe baza rezultatelor obținute în cadrul încercării experimentale și a simulării folosind programul PyroSim de ardere a unei stive [11]

De asemenea, a fost validată variația în timp a temperaturii înregistrate de termocuplurile amplasate la 2,80 m, conform Fig. Error! No text of specified style in document..9., și 2,40 m față de pardoseală (dispuse pe linia mediană a deschiderilor de ventilație, respectiv pe peretele care nu este prevăzut cu deschideri), valorile acceptate ale erorii medii fiind mai mici sau egale cu 10 %.



**Fig. Error! No text of specified style in document..9.** Analiza comparativă a variației în timp a temperaturii înregistrate de termocuplurile stratului 1, amplasat la 2,80 m față de pardoseală, pe baza rezultatelor obținute în cadrul încercării experimentale și a simulării numerice folosind programul PyroSim de ardere a unei stive [9]

Conform Fig. Error! No text of specified style in document..9., a fost calculată valoarea medie a erorii, aceasta fiind egală cu 9,57 % (Termocuplul 3), 10,41 % (Termocuplul 10), 9,47 % (Termocuplul 14), 8,55 % (Termocuplul 18), 9,67 %



(Termocuplul 23). Astfel, variația în timp a temperaturii înregistrată de aceste termocupluri a fost validată deoarece, valoarea erorii temperaturii cuprinsă în intervalul 0 % și  $\pm 10$  % [30] este acceptată pentru majoritatea încercărilor experimentale la foc efectuate la scară naturală.

## Capitolul 3. ELEMENTE TEORETICE DE MODELARE MATEMATICĂ

Fire Dynamics Simulator (FDS), modelul de incendiu bazat pe Dinamica computațională a fluidelor, este un program cu sursă deschisă, dezvoltat de *National Institute of Standards and Technology* și de *VTT Technical Research Centre of Finland*, utilizat la scară largă de un număr mare de ingineri și profesioniști în domeniul securității la incendiu pentru simularea incendiilor, datorită caracteristicilor sale unice.

Programul de modelare a incendiilor, FDS, este caracterizat printr-o serie de ecuații și printr-o metodologie generală de rezolvare a acestora, care este practică pentru simulările „curgerilor” induse termic ale fluidelor, cum este cazul incendiilor. Opțiunile modelului FDS au fost selectate în baza rezultatelor obținute în urma unor game largi de experimente de validare [30].

Ecuatiile de guvernare ale Fire Dynamics Simulator sunt reprezentate de: a) modelul gazodinamic (ecuația de conservare a masei, denumită și ecuația de continuitate, ecuația de conservare a impulsului, ecuația de stare și ecuația lui Poisson, ecuația de conservare a speciilor de gaze), b) modelul transferului termic (conducție, convecție și radiație), c) modelul pirolizei și d) modelul arderii controlate de amestec.

### 3.1. Modelul gazodinamic

Programul FDS rezolvă numeric ecuațiile Navier-Stokes, scrise într-o formă adecvată pentru curgerile cu viteză mică, induse termic, punând accent pe transportul căldurii și al fumului degajat de incendiu. Algoritmul central este o schemă explicită predictor-corrector, cu o precizie de ordinul al doilea în spațiu și timp. Turbulența este tratată prin intermediul simulării vârtejurilor mari (LES), fiind posibilă efectuarea simulării numerice directe (DNS) dacă rețeaua de calcul numerică este suficient de fină. În consecință, metoda LES este principalul mod de operare.

Modelul gazodinamic este caracterizat de faptul că, o serie de sub-modele matematice sunt utilizate în FDS, precum modelul de turbulență a simulării vârtejurilor mari, care a fost dezvoltat într-un model de curgere tridimensional dependent de timp. Densitatea este determinată din ecuația de continuitate, în timp ce ecuația impulsului și ecuația de stare sunt utilizate în determinarea valorilor vitezei și temperaturii [29].

În cadrul modelului gazodinamic sunt utilizate următoarele: ecuația de conservare a masei, denumită și ecuația de continuitate; ecuația de conservare a impulsului; ecuația de stare; ecuația lui Poisson; ecuația de conservare a speciilor de gaze.

### 3.2. Modelul transferului termic

Modelul transferului termic este reprezentat de utilizarea ecuațiilor matematice caracteristice transferului termic prin conducție, convecție și radiație.

### 3.3. Modelul pirolizei

În cazul reacțiilor pirolizei poate fi utilizată ecuația lui Arrhenius, dată de relația [29]:

$$k_{reac} = A_{fpe} e^{\frac{-E}{RT}} \quad (3.1)$$

unde:

$k_{reac}$  – viteza reacției [ $s^{-1}$ ];

$A_{fpe}$  – factorul preexponențial [ $s^{-1}$ ];

$E$  – energia de activare [ $kJmol^{-1}$ ];

$R$  – constanta universală a gazului ideal [ $J/molK$ ];

$T$  – temperatura [ $K$ ].

În cadrul programului FDS, modelul vitezei reacției se bazează pe o formă ușor diferită a funcției Arrhenius, caracterizată de o funcție de oxidare care ține cont de concentrația locală de oxigen.

### 3.4. Modelul arderii controlate de amestec

Programul FDS folosește o reacție chimică controlată de amestec,... într-o singură etapă, caracterizată de trei „specii grupate” (denumite astfel deoarece reprezintă un grup de specii de gaze), și anume, aer, combustibil și produse de ardere. În cadrul metodei controlate de amestec, speciile de gaze ale unui singur combustibil, care conțin în primul rând C, H, O și N, reacționează cu oxigenul într-o singură etapă controlată de amestec pentru a forma  $H_2O$ ,  $CO_2$ , funingine și CO, reacția dintre combustibil și oxigen fiind considerată infinit de rapidă. Programul FDS utilizează reguli semi-empirice pentru determinarea vitezei de amestec a combustibilului cu oxigenul în cadrul unei rețele de celule date, la un anumit pas de timp. Fiecare celulă de calcul poate fi considerată drept o zonă în care pot reacționa doar compozițiile mixte [29].

### 3.5. Modelul matematic al stingerii incendiilor în urma refulării apei în cadrul programului FDS

În cadrul programului FDS, picăturile de apă sunt reprezentate folosind particulele Lagrangian. Programul FDS utilizează particulele Lagrangian pentru a reprezenta trei categorii principale, și anume, particulele urmăritoare fără masă, picăturile de apă și alte elemente. În descrierea Lagrangiană, poziția și proprietățile fizice ale particulelor sunt descrise în funcție de material sau de coordonatele de referință și timp. O particulă se consideră a fi Lagrangiană atunci când se deplasează de parcă ar fi un element de fluid. Mișcarea particulelor Lagrangian de-a lungul unui pas de timp se calculează folosind o soluție analitică și rămâne stabilă indiferent de pasul de timp folosit de solver-ul de curgere. Dacă particulele se deplasează pe lățimea mai multor celule ale rețelei într-un singur pas de timp, impulsul transferat între particule și gaze nu poate fi alocat corespunzător tuturor celulelor implicate. Pentru a preveni această problemă, programul FDS împarte pasul de timp al fazei gazoase pe baza vitezei fiecărei particule. Astfel, dacă particula traversează două celule într-un singur pas de timp, atunci traiectoria sa este calculată prin împărțirea pasului de timp la doi [29].

În ceea ce privește distribuția dimensiunii picăturilor apei refulate, se utilizează diametrul mediu volumic al picăturii,  $D_{v,0.5}$ . Distribuția cumulativă de volum a jetului de apă reprezintă o combinație între distribuția logaritmică normală și distribuția Rosin-Rammler [6].

Pentru a face predicția stingerii în cadrul programului FDS, există două opțiuni bazate pe conceptul *temperaturii critice a flăcării*, și anume, stingerea bazată mai ales pe concentrația de oxigen, și stingerea bazată atât pe combustibil cât și pe oxigen. Temperatura critică a flăcării se bazează, în cadrul programului FDS, pe indicele *limitei de oxigen* (LOI), fracția volumică de oxigen a fluxului oxidant în momentul stingerii flăcării.

Criteriul *stingerii bazate atât pe combustibil cât și pe oxigen* presupune faptul că arderea la nivelul unei celule a rețelei de calcul, la un anumit pas de timp, este suprimată, în situația în care căldura potențială degajată de către reactanți nu poate ridica temperatura celulei peste valoarea empirică a temperaturii critice a flăcării.

Absorbția radiației termice de către picăturile de apă refulate are loc în urma conservarea energiei și transformarea radiației termice în energie internă a picăturilor de apă.

În ceea ce privește reducerea vitezei de producere a pirolizei în urma refulării apei, suprimarea incendiului se constată a fi de natură exponențială [29].

## Capitolul 4. ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE

### 4.1. Standul experimental

Încăperea de testare, prezentată în Fig. 4.1., este o construcție care are zidurile realizate din BCA, iar stâlpii de rezistență, pardoseala și plafonul sunt realizate din beton. Aceasta este prevăzută cu două ferestre și o ușă.



Fig. 4.1. Încăperea de testare

Având o structură simplă și o comportare a arderii apropiată de dezvoltarea reală a incendiului în interiorul unui compartiment, stivele din lemn au fost alese ca sursă de aprindere în realizarea acestei teze. De asemenea, stivele din lemn sunt caracterizate și de faptul că acestea au o valoare mare a suprafeței expuse a materialului combustibil în interiorul structurii acestora, iar radiația termică încrucișată degajată de baghetele stivelor permite ca arderea acestora să fie susținută în lipsa unui flux termic exterior [33]. Considerându-se că spațiul de testare are destinația de dormitor și cunoscând valoarea căldurii totale degajate în urma unui incendiu (în urma produsului dintre suprafața pardoselii încăperii,  $16 \text{ m}^2$ , și a valorii medii a densității sarcinii termice pentru un dormitor,  $780 \text{ MJ/m}^2$  [36]), respectiv a căldurii totale degajate în urma arderii unei stive, se constată că, prin echivalarea valorii sarcinii termice a unui dormitor cu stive din lemn de pin sunt necesare 15,22 stive. Pentru reducerea costurilor generate de numărul încercărilor experimentale ce necesită a fi efectuate, care vor consta atât în arderea liberă a stivelor cât și în arderea și ulterior stingerea acestora cu apă, se vor utiliza patru stive din lemn pentru fiecare încercare experimentală. Cele patru stive din lemn reprezintă aproximativ echivalentul unui sfert din valoarea densității sarcinii termice a unui dormitor,  $204,98 \text{ MJ/m}^2$ . Această valoare se regăsește și în realitate, în cazul încăperilor cu destinația de cameră de spital, fiind  $230 \text{ MJ/m}^2$  [36].

Conform Fig. 4.2., cele patru stive sunt dispuse pe un rând, la distanța de 0,32 m față de peretele diametral opus ușii.

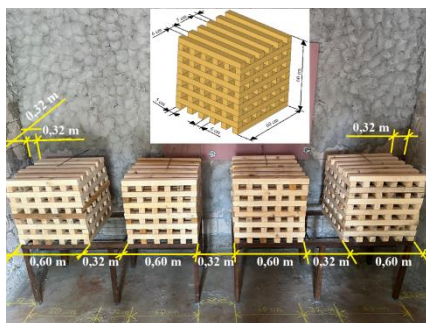


Fig. 4.2. Amplasarea celor 4 stive care constituie sursa de aprindere

Dispozitivul de intervenție constă în utilizarea *Autospecialei pentru lucru cu apă și spumă* de 2 tone marca Volvo FLL 4x2 [37], având debitul treptei de joasă presiune de 2000-2500 l/min la 8-10 bar și debitul treptei de înaltă presiune de 200-250 l/min la 35-40 bar [27].

Apa a fost refulată atât manual, folosind țeava de refulare *FlowMatic Compact* (intervalul valorilor debitului de refulare este 0 – 500 l/min la presiunea de 6 bar), cât și automat, conform Fig. Error! No text of specified style in document.3. a) și b), folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă. Au fost folosite capete de sprinkler Tyco tip TY3251 caracterizate de: temperatura de activare este egală cu 68 °, culoarea lichidului din interiorul bulbului fiind roșie (bulbul a fost spart înainte de începerea încercărilor experimentale); presiunea maximă de operare este de 12,1 bar; coeficientul de descărcare  $K=5,6 \frac{l}{min} (bar)^{1/2}$  [45]. Duzele de refulare a ceții de apă Tyco tip ULF AM29 Automatic au următoarele caracteristici: presiunea de operare ia valori în intervalul 7 - 12 bar; coeficientul de descărcare  $K=8,5 \frac{l}{min} (bar)^{1/2}$  [46].



Fig. Error! No text of specified style in document.3. Instalația fixă de stingere amplasată: a) în exteriorul încăperii de testare, perpendicular pe peretele cu ușa; b) în interiorul încăperii de testare, la nivelul tavanului

În Fig. 4.4. sunt prezentate tipurile de jeturi folosite în cadrul încercărilor experimentale: jetul compact, țeava fiind menținută fixă,

încălinată la 45° față de planul orizontal, respectiv jetul cu unghi conic egal cu 30° și 45°.

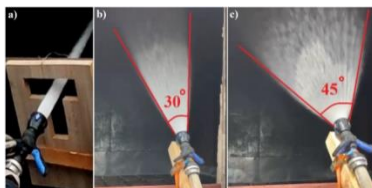


Fig. 4.4. Tipurile de jeturi folosite în cadrul încercărilor experimentale

Pentru refularea apei prin menținerea țevii fixă, înclinată la 45° față de planul orizontal, conform Fig. 4.5., a fost utilizat un suport din lemn, înclinat la 45° față de suprafața solului, furtunul și țeava de refulare fiind asigurate de suportul din lemn prin utilizarea a două chingi de prindere.



Fig. 4.5. Dispozitivul destinat menținerii fixă a țevii de refulare înclinată la 45 °

Pentru refularea apei folosind tehnica literelor „T”, „Z”, „O”, conform Fig. Error! No text of specified style in document..6., au fost realizate 3 machete din lemn, în urma efectuării unor încercări experimentale de refulare a apei [10].

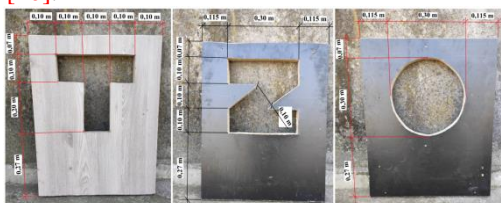


Fig. 4.6. Machetele literelor „T”, „Z”, „O” prin care se refulază apa

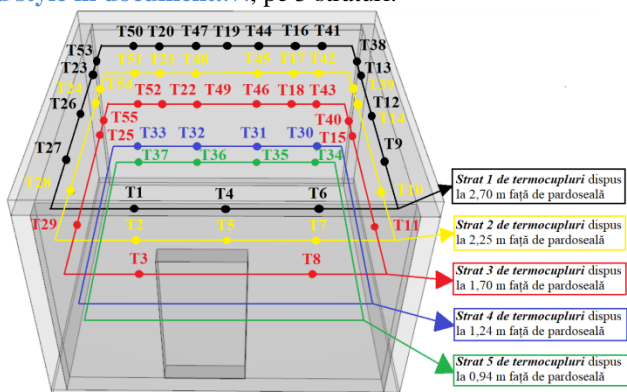
Dispozitivul de intervenție utilizat pentru refularea apei în interiorul încăperii de testare folosind țeava de refulare este realizat din: *autospecială cu capacitatea de 2000 l* (presiunea de refulare este 4 bar); *o linie de furtun tip „C”* (diametrul interior este egală cu 52 mm, iar lungimea este egală cu 20 m); *debitmetru; manometru; un furtun tip „C”* (lungimea este egală cu 3 m); *țeava de refulare*.

În cazul refulării apei folosind instalația fixă de sprinklere și ceață de apă, dispozitivul de intervenție este realizat din: *autospecială cu*

*capacitatea de 2000 l* (presiunea de refulare este 12 bar); *un furtun tip „D”* care alimentează *instalația fixă de stingere cu sprinklere/ceață de apă* montată la nivelul încăperii de testare.

## 4.2. Echipamentele de măsurare

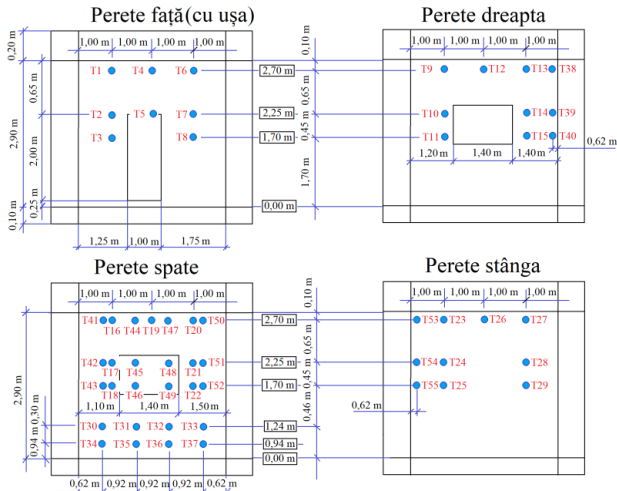
Sistemul de colectare a valorilor temperaturii înregistrate în interiorul încăperii de testare este compus din 55 termocupluri tip K (0 - 1200 °C), cu lungimea de 40 cm (47 buc., T1 – T29, T38 – T55) și 180 cm (8 buc., T30 – T37), unitate de achiziție a datelor, cabluri de compensație (fac legătura între termocupluri și unitatea de achiziție date) și un PC. Cele 55 termocupluri (T1 - T55) sunt dispuse, conform **Fig. Error! No text of specified style in document..7.**, pe 5 straturi.



**Fig. Error! No text of specified style in document..7.** Dispunerea pe straturi a celor 55 termocupluri în interiorul încăperii de testare

În **Fig. Error! No text of specified style in document..8.** este prezentat modul de amplasare al termocuplurilor.

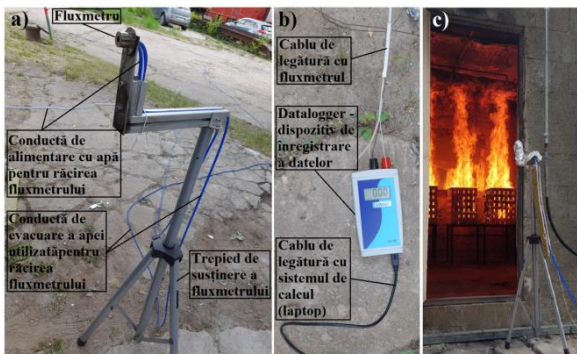




**Fig. Error! No text of specified style in document..8.** Amplasarea termocupurilor – vedere din exteriorul încăperii de testare

Cele 8 termocupluri cu lungimea de 1,80 m sunt amplasate în centrul, respectiv în mijlocul suprafeței superioare a celor 4 stive, iar restul termocupurilor, la 0,15 m față de suprafața peretelui pe care sunt dispuse. Precizia măsurătorilor este de 10 %.

Fluxmetrul SBG01, prezentat în **Fig. Error! No text of specified style in document..9.**, este folosit pentru măsurarea fluxului termic degajat atât în urma arderii libere cât și în urma stingerii celor 4 stive pe timpul încercărilor experimentale, luând valori în intervalul 5 - 50 kW/m<sup>2</sup>. Acesta este amplasat pe un trepied astfel încât senzorul să fie dispus la nivelul ușii de la intrarea în încăperea de testare, la înălțimea de 1,50 m față de suprafața solului. Precizia măsurătorilor este de 2-3%.



**Fig. 4.9.** Fluxmetru tip SBG01: a) Fluxmetru; b) Datalogger; c) modul de amplasare.

Camera de termoviziune Flir T420 este utilizată pe timpul încercărilor experimentale atât în ceea ce privește arderea liberă cât și în ceea ce privește stingerea cu apă a celor patru stive. Aceasta este amplasată la distanța de 2 m față de încăperea de testare, respectiv la înălțimea de 2 m față de sol. Caracteristicile principale ale camerei de termoviziune sunt: domeniul de temperatură înregistrat este  $-20 \dots + 1200^{\circ}\text{C}$ ; câmpul de vedere (FOV) este mai îngust de  $26^{\circ} \times 20^{\circ}$ , ceea ce oferă posibilitatea de a vedea detalii la distanță; rezoluția detectorului infraroșu este minim  $320 \times 240$  pixeli fizici. Precizia măsurătorilor este  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  sau  $\pm 2\%$  din indicație.

Debitmetrul electromagnetic *Style 9301 AkroFlow* este utilizat pentru măsurarea debitului și a volumului apei consumate, intervalul de măsurare fiind  $38 - 2270$  l/min. Precizia măsurătorilor este de  $\pm 1\%$ .

Manometrul de linie AKRON, tip HLGK-25NST-16, certificat ISO 9001, este folosit pentru controlul presiunii de refulare a apei, intervalul de măsurare fiind  $0 - 1100$  kPa.

În vederea măsurării volumului apei acumulate în încăperea de testare, conform Fig. Error! No text of specified style in document.10. a), au fost amplasate 81 de cutii din tablă (40 de ansambluri de cutii din tablă, prevăzute cu două compartimente, conform Fig. 4.10. b), și o cutie din tablă, ale cărei dimensiuni sunt egale cu cele ale unui singur compartiment). Fiecare cutie din tablă are valoarea volumului maxim egală cu 64 l.

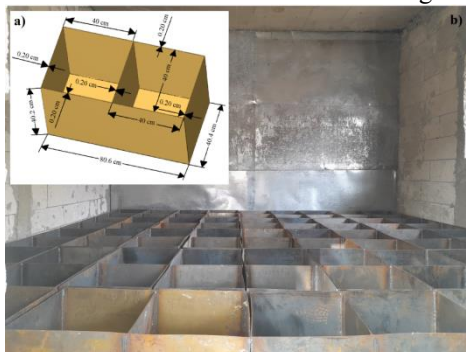
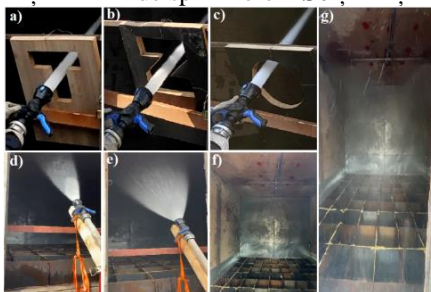


Fig. 4.10. Amplasarea celor 81 de cutii din tablă destinate acumulării apei refulate: a) dimensiunile unui ansamblu de cutii; b) modul de amplasare al cutiilor din tablă

### 4.3. Procedura de testare

Procedura de testare este întocmită pentru trei categorii de încercări experimentale, și anume: (a) analiza distribuției apei; (b) arderea liberă; (c) stingerea incendiului. În cazul analizei distribuției apei și a stingerii incendiului, conform Fig. 4.11., se folosesc șapte scenarii: i) refularea apei, în mijlocul tavanului, manevrând țeava în forma literelor „T” – S1, „Z” – S2

și „O” – S3, respectiv menținând țeava de refulare fixă, înclinată la 45° față de planul orizontal, unghiul conic al jetului fiind egal cu 30° - S4 și 45° - S5; utilizarea instalațiilor fixe de sprinklere – S6 și ceață de apă S7.



**Fig.** Error! No text of specified style in document..11. Refularea apei folosind: a) tehnica literei „T”; b) tehnica literei „Z”; c) tehnica literei „O”; d) țeava de refulare înclinată la 45°, unghiul conic egal cu 30°; e) țeava de refulare înclinată la 45°, unghiul conic egal cu 45°; f) instalația de sprinklere; g) instalația ceții de apă

Procedura de testare presupune:

(a) **analiza distribuției apei în lipsa arderii** în urma refulării apei manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere și ceață de apă:

- ❖ apa a fost refulată efectuându-se către trei încercări experimentale pentru fiecare dintre cele 7 scenarii;

- ❖ durata fiecărei încercări experimentale a fost reprezentată de refularea unui volum de apă egal cu 640 l;

- ❖ în vederea măsurării volumului apei acumulate în încăperea de testare au fost amplasate 81 de cutii din tablă, fiecare cutie având valoarea volumului egală cu 64 l.

- ❖ apa a fost extrasă cu ajutorul a două tipuri de pompe de apă.

(b) **arderea liberă a patru stive:**

- ❖ cele 4 stive au fost amplasate în apropierea peretelui diametral opus ușii încăperii de testare, la înălțimea de 0,64 m față de pardoseală; distanțele dintre stive, dintre stive și pereții laterali, respectiv dintre stive și peretele diametral opus ușii sunt egale cu 0,32 m;

- ❖ fiecare dintre cele 4 stive au fost aprinse cu câte 2 l de etanol; lichidul combustibil a fost amplasat în tăvi din tablă, dispuse sub fiecare stivă, central; distanța dintre limita superioară a tăvii de combustibil și suprafața inferioară a stivei este de 0,10 m;

- ❖ tăvile cu combustibil au fost înlăturate la 120 s după aprinderea etanolului, aceasta reprezentând durata de preardere a stivelor;

- ❖ durata încercării experimentale a fost de 1800 s.

(c) *stingerea a patru stive care ard* în urma refulării apei manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere și ceață de apă, în cadrul a 7 scenarii:

- ❖ cele 4 stive au fost amplasate în apropierea peretelui diametral opus ușii încăperii de testare, la înălțimea de 0,64 m față de pardoseală; distanțele dintre stive, dintre stive și pereții laterali, respectiv dintre stive și peretele diametral opus ușii sunt egale cu 0,32 m;

- ❖ fiecare dintre cele 4 stive au fost aprinse cu câte 2 l de etanol; lichidul combustibil a fost amplasat în tăvi din tablă, dispuse sub fiecare stivă, central; distanța dintre limita superioară a tăvii de combustibil și suprafața inferioară a stivei este de 0,10 m;

- ❖ tăvile cu combustibil au fost înlăturate la 120 s după aprinderea etanolului, aceasta reprezentând durata de preardere a stivelor;

- ❖ inițierea procesului de stingere s-a realizat la 600 s de la aprindere;

- ❖ apa a fost refulată în cadrul celor 7 scenarii, **S1 – S7**;

- ❖ durata încercărilor experimentale este egală cu 1800 s sau mai mică de 1800 s dacă, pe timpul desfășurării testelor, la înălțimea de 1,70 m, se constată că valoarea temperaturii scade sub 60 °C; acest aspect se bazează pe faptul că, în modelul bazat pe performanță al ingineriei securității la incendiu, temperatura înregistrată la înălțimea de 1,80 m ar trebui să fie mai mică de 60 °C [24, 31].

## Capitolul 5. ANALIZA PROCESULUI DE ARDERE PRIN MODELARE ȘI SIMULARE NUMERICĂ

### 5.1. Modele de piroliză utilizate în PyroSim

În cadrul PyroSim pot fi utilizate trei metode definite prin modele de piroliză diferite în vederea simulării arderii unei stive din lemn: a) **modelul chimiei complexe** - modelul arderii stivei din lemn comportându-se similar cu o ardere reală; b) **modelul chimiei simple** – se definește HRRPUA al stivei, în cadrul proprietăților suprafețelor fiecărei bare din compunerea stivei; c) **modelul chimiei simple** – se definește HRR al stivei, aceasta fiind considerată obiect cubic [13, 21]. Timpul de rulare și precizia rezultatelor simulării sunt maxime în cazul utilizării primei metode, respectiv minime în cazul utilizării celei de-a treia metode. Astfel, în cadrul tezei s-a decis utilizarea celei de-a doua metode.

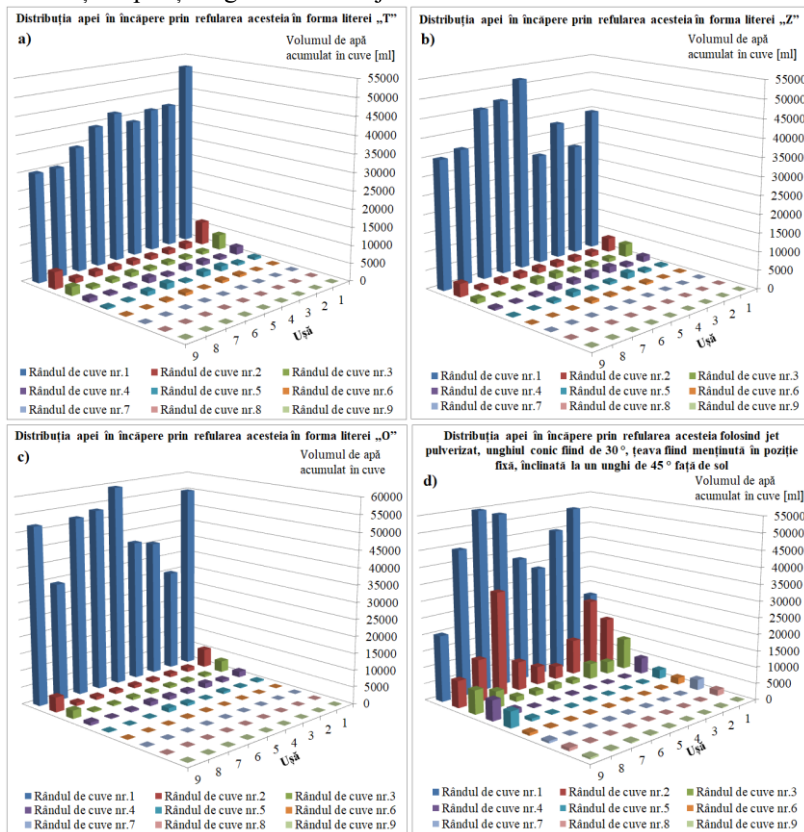
### 5.2. Simularea arderii libere a patru stive

Utilizând PyroSim a fost realizată simularea arderii libere a patru stive, durata simulării fiind de 1800 s. Dimensiunile încăperii sunt prezentate în Fig. 4.2., iar stivele au formă cubică, lungimea unei laturi fiind egală cu 0,60 m. Stivele sunt formate din baghete din lemn dispuse ortogonal, având lungimea de 0,60 m, iar secțiunea transversală, pătratică, având latura egală cu 0,05 m. Conform Fig. 4.5., distanțele dintre stive, respectiv dintre stive și pereții laterali ai încăperii sunt egale cu 0,32 m. Înălțimea la care sunt dispuse stivele față de pardoseală este egală cu 0,64 m. Scenariul de ventilație utilizat pe timpul arderii stivei este reprezentat prin deschiderea ușii încăperii, suprafața deschiderii de ventilație fiind egală cu 2 m<sup>2</sup>, înălțimea acesteia fiind egală cu 2 m. Sub fiecare stivă este amplasat câte un arzător, distanța dintre suprafața superioară a arzătoarelor și suprafața inferioară a stivelor fiind egală cu 0,10 m. În cadrul simulării au fost utilizați următorii parametri: a) căldura de ardere a lemnului de pin, valoarea acesteia fiind egală cu 17,66 MJ/kg, fiind obținută experimental [23, 25]; b) HRRPUA al stivei din lemn, valoarea maximă a acestui parametru fiind 175 kW/m<sup>2</sup>, aceasta fiind obținută din cadrul literaturii de specialitate [22, 35, 41]; c) HRRPUA al arzătorului (etanolului), valoarea maximă a acestui parametru, egală cu 535,60 kW/m<sup>2</sup>, fiind obținută experimental.

## Capitolul 6. DISCUȚII ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR

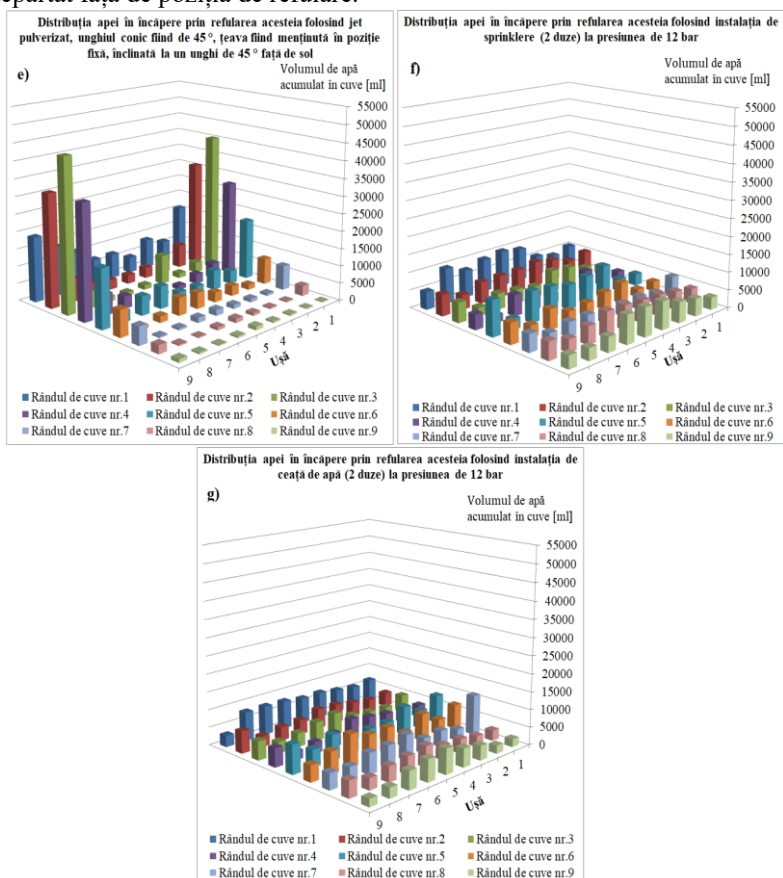
### 6.1. Analiza distribuției apei

În urma analizei distribuției apei în interiorul încăperii de testare, în lipsa arderii, utilizând scenariile S1 – S7, se constată faptul că aceasta este influențată de următorii parametri: direcția de refulare, debitul, densitatea distribuției apei și unghiul conic al jetului.



**Fig. 6.1.** Distribuția apei în urma refulării în interiorul încăperii de testare din dreptul ușii: a) folosind tehnica literei „T”; b) folosind tehnica literei „Z”; c) folosind tehnica literei „O”; d) menținând țeava fixă, înclinată la un unghi de 45° față de planul horizontal, unghiul conic al jetului având valoarea de 30°.

În situația în care direcția de refulare a jetului de apă este perpendiculară pe pardoseală, conform scenariilor S1 (Fig. 6.1. a)) și S2 (Fig. 6.1. b)), apa a fost uniform distribuită pe întreaga suprafață a încăperii de testare. Conform scenariului S5 (Fig. 6.2. e)), apa a fost distribuită pe cca 3/4 din suprafața totală a încăperii, în plan depărtat față de poziția de refulare, în special perimetral, de-a lungul pereților paraleli cu direcția de refulare. În schimb, refulând apa din dreptul ușii sub un anumit unghi față de tavan, conform scenariilor S1 - S4 (Fig. 6.1. a-d)), apa a fost distribuită în special în apropierea peretelui diametral opus ușii, dar și de-a lungul pereților paraleli cu direcția jetului, în jumătatea camerei aflată în plan depărtat față de poziția de refulare.



**Fig. 6.2.** Distribuția apei în urma refulării apei în interiorul încăperii de testare: e) menținând țeava în dreptul ușii, în poziție fixă, înclinată la 45° față de planul orizontal, unghiul conic al jetului având valoarea de 45°; f) folosind instalația de sprinklere; g) folosind instalația de ceață de apă.

Creșterea valorilor debitului și a densității distribuției apei conduc la îmbunătățirea distribuției apei refulate. Astfel, la presiunea de 12 bar, distribuția apei este mai bună în cazul scenariului S6 (Fig. 6.2. f) comparativ cu S7 (Fig. 6.2. g). În cazul refulării apei la presiunea de 4 bar, apa este uniform distribuită în scenariului S4 (debitul fiind cca 394 l/min, iar densitatea distribuției apei  $0,41 \text{ (l/s)m}^{-2}$ ), comparativ cu scenariile S1 – S4 (debitul fiind cca 376 l/min, iar densitatea distribuției apei  $0,39 \text{ (l/s)m}^{-2}$ ).

De asemenea, în cazul utilizării țevii de refulare, creșterea valorii unghiului conic al jetului în cazul scenariului S5 ( $45^\circ$ ) comparativ cu S4 ( $30^\circ$ ) și S1 – S3 ( $0^\circ$ ) conduce la o mai bună distribuție a apei.

## 6.2. Arderea liberă a patru stive

În urma arderii libere a patru stive au fost analizate variația în timp a temperaturii, instantaneele realizate normal și în infraroșu, respectiv variația în timp a HRRPUA.

Analizând variația în timp a temperaturii se constată, conform Fig. 6.3., faptul că, creșterea valorilor temperaturii este direct proporțională cu creșterea înălțimii încăperii de testare atât la nivelul zonei perimetrare interioare a încăperii de testare cât și la nivelul stivelor, în intervalul de înălțime 1,70 m – 2,70 m.

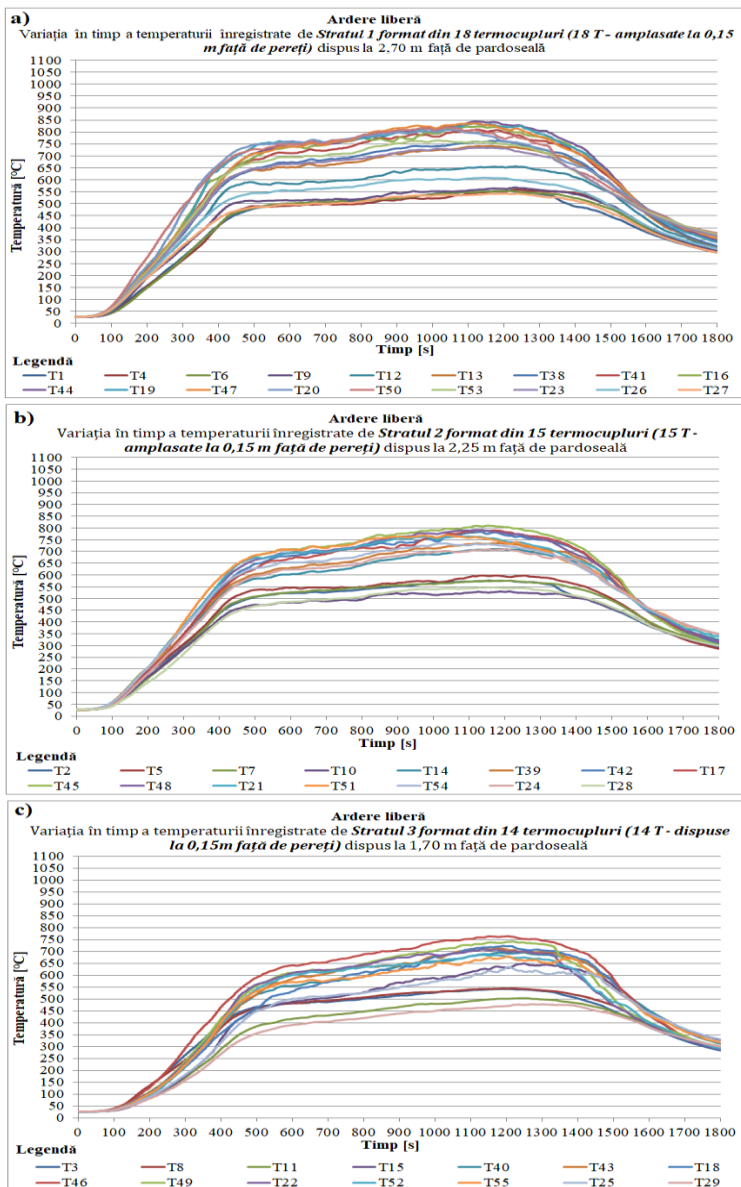
Conform Fig. 6.4., spre deosebire de aceste zone, în mijlocul suprafeței superioare a stivelor și în centrul stivelor se înregistrează valori mai mari ale temperaturii, valorile maxime obținându-se în centrul acestora.

Timpul de atingere al valorilor maxime ale mediei temperaturii înregistrate de termocuplurile amplasate la aceeași înălțime este invers proporțional cu înălțimea încăperii.

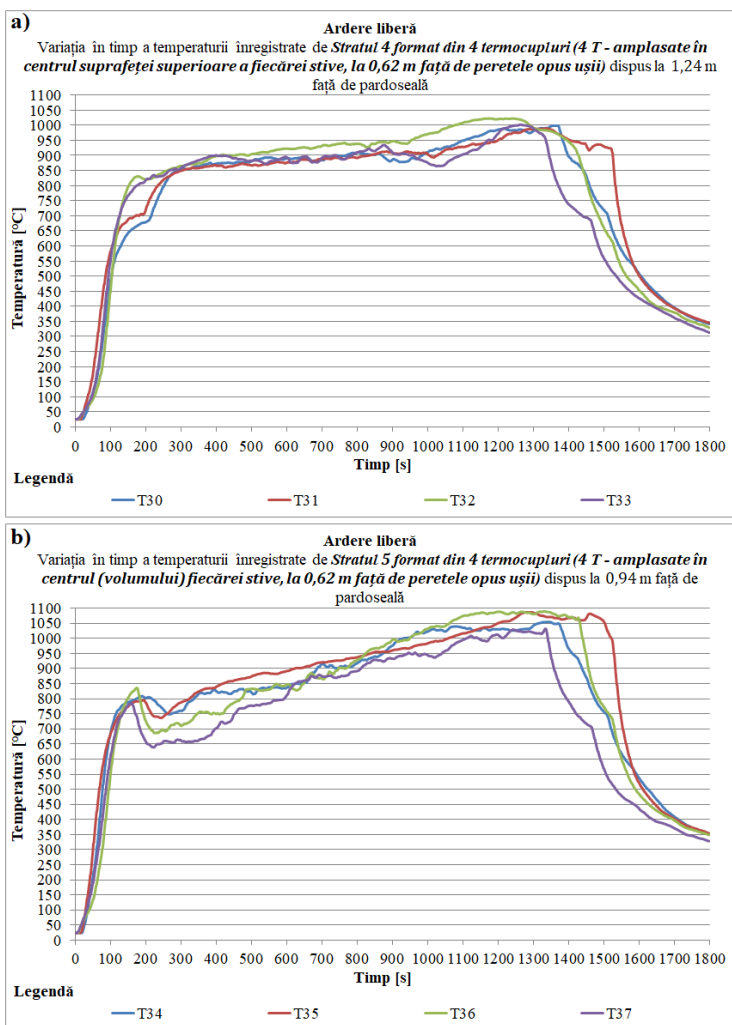
Valorile maxime ale temperaturii în intervalele de înălțime 1,70 m - 2,70 m și 0,94 m - 1,24 m s-au înregistrat deasupra, respectiv la nivelul celor două stive amplasate central.

Deoarece s-a constatat faptul că, la înălțimea de 2,70 m față de pardoseală, valoarea medie a temperaturii crește brusc până la cca  $750^\circ\text{C}$  la 600 s de la aprindere, observându-se o creștere lentă până la cca  $850^\circ\text{C}$  la 1200 s de la aprindere, s-a stabilit ca momentul inițierii refulării apei în cadrul celor șapte încercări experimentale să fie la 600 s de la aprinderea stivelor.



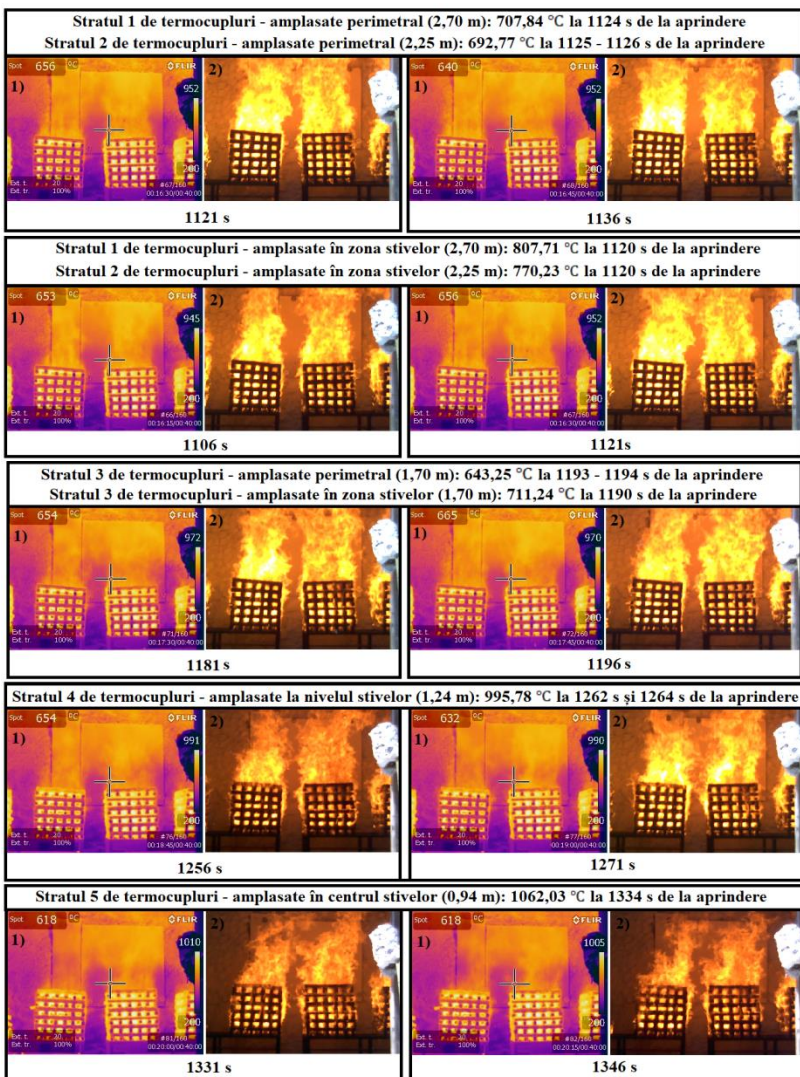


**Fig. 6.3.** Valorile temperaturii înregistrate de termocuplurile dispuse pe straturi, amplasate perimetral, în interiorul încăperii de testare, față de pardoseală la: a) stratul 1 - 2,70 m; b) stratul 2 - 2,25 m; c) stratul 3 - 1,70 m.



**Fig. 6.4.** Valorile temperaturii înregistrate de termocuplurile dispuse pe straturi, amplasate în zona stivelor, față de pardoseală, la: a) stratul 4 – 1,24 m; b) stratul 5 – 0,94 m.

Așa cum se poate observa în [Fig. 6.5.](#), conform instantaneelor realizate cu ajutorul camerei de termoviziune, atât în infraroșu cât și normal, în intervalele de timp în care s-au înregistrat valorile maxime ale mediei temperaturii înregistrate de termocuplurile dispuse la aceeași înălțime, corespunzător intervalului de înălțime 0,94 m – 2,70 m, se constată faptul că stivele nu s-au prăbușit.



**Fig. 6.5.** Instantanee realizate în momentul atingerii valorilor maxime ale mediei temperaturii înregistrate de termocupluri pe fiecare strat: 1) imagine în infraroșu; 2) imagine normală.

Analizând variația în timp a parametrului HRRPUA, se constată faptul că valoarea maximă de  $16,55 \text{ kW/m}^2$  se înregistrează la 1466 s de la aprindere, după atingerea valorii maxime a mediei temperaturii în centrul stivelor, obținută la 1334 s de la aprindere.

### 6.3. Analiza comparativă dintre încercarea experimentală și simularea arderii libere a patru stive

Conform Fig. 6.6., în urma simulării arderii libere a patru stive folosind programul PyroSim, se constată că forma curbei variației în timp a temperaturii este asemănătoare cu cea obținută în urma încercării experimentale.

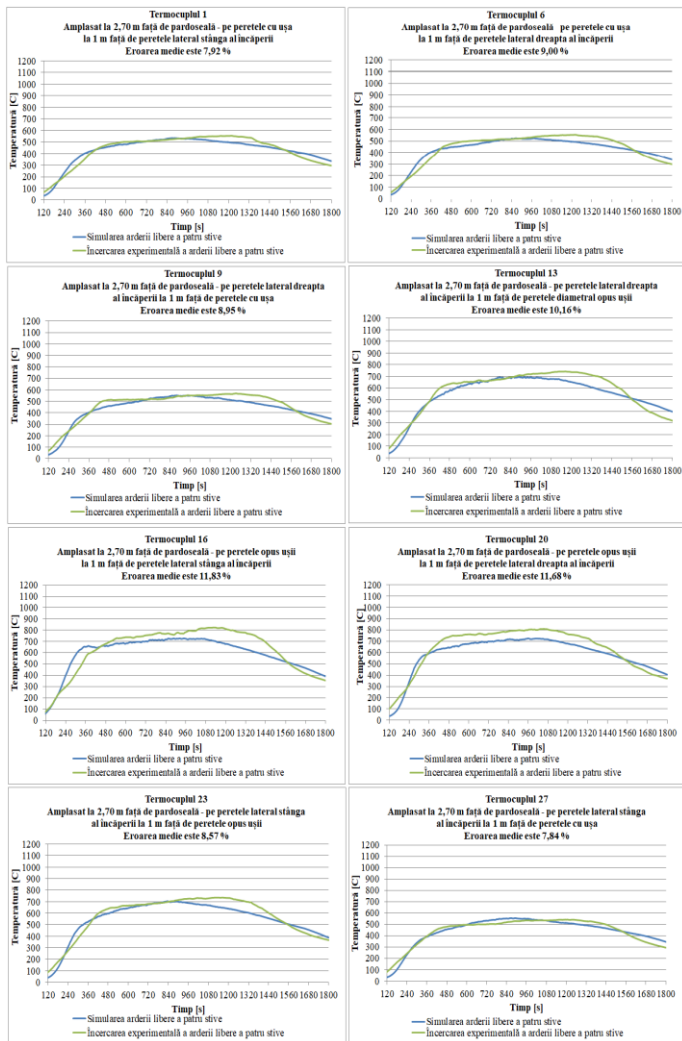


Fig. 6.6. Variația în timp a temperaturii obținute în urma încercării experimentale a arderii libere a patru stive comparativ cu simularea folosind programul PyroSim

În urma analizei comparative dintre încercarea experimentală și simularea arderii libere a patru stive se constată că eroarea medie a temperaturii este mai mică sau egală cu 10 % în cazul a 24 de termocupluri, celelalte 31 termocupluri având valorile erorii medii cuprinse în intervalul 11 % - 30,09 %.

Astfel, având în vedere faptul că modelul FDS supraestimează valoarea temperaturii măsurate cu 10 % [30], doar 24 de termocupluri se încadrează în valoarea acceptată a erorii medii.

Analiza a fost efectuată pentru intervalul de timp 121 s – 1800 s în care stivele au ars în absența tăvilor cu etanol. Intervalul de timp 0 s – 120 s, în care a avut loc prearderea stivelor, și anume ardererea etanolului, nu a fost supus analizei.

#### **6.4. Stingerea cu apă manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere și ceață de apă, a patru stive care ard**

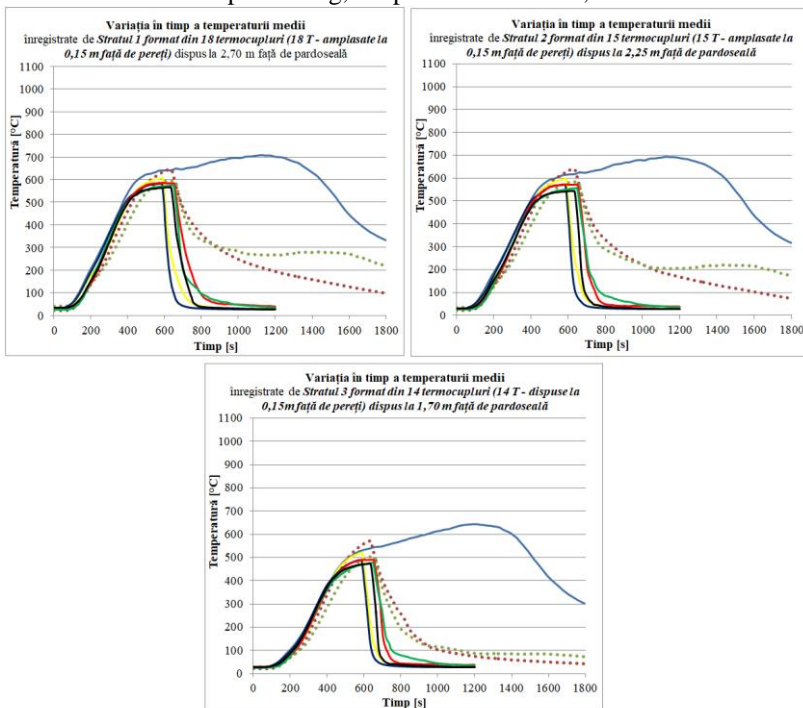
În cazul stingerii în urma refulării apei manual, folosind țeava de refulare (S1 –S5), și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere (S6) și ceață de apă (S7) a patru stive care ard, s-a constatat faptul că procesul de eficientizare al stingerii incendiilor în spații închise constă în reducerea temperaturii compartimentului de incendiu, a consumului apei refulate, a timpului necesar controlului focului și a fluxului căldurii degajate de incendiu pe unitatea de suprafață ținând cont de influența semnificativă a unor parametri precum:

- direcția de refulare a jetului de apă;
- debitul și densitatea distribuției apei refulate;
- unghiul conic al jetului de apă;
- tehnica de refulare;
- modul de refulare a apei în ceea ce privește continuitatea.

*Analizând eficientizarea stingerii incendiilor pe baza reducerii temperaturii în interiorul compartimentului de incendiu, se constată următoarele:*

➤ în urma refulării apei, situația profilului curbelor variației în timp a temperaturii pe zone, la diferite înălțimi, se prezintă astfel:

❖ atât la nivelul încăperii de testare, conform Fig. 6.7., cât și în zona stivelor, la 2,70 m, 2,25 m și 1,70 m față de pardoseală, este similar în cazul scenariilor S1 – S5, respectiv în cazul scenariilor S6 - S7; însă, comparativ cu scenariile S1 - S5, în cazul scenariilor S6 - S7 reducerea temperaturii se realizează într-un timp mai lung, în special în cazul S7;



**Legenda**

- Arderea liberă
- ..... Stingerea incendiului folosind instalația de sprinklere
- ..... Stingerea incendiului folosind instalația de ceață de apă
- Stingerea incendiului prin menținerea țevii de refulare în poziție fixă, înclinată la 45 ° față de sol (unghiul conic al jetului fiind egal cu 30 °)
- Stingerea incendiului prin menținerea țevii de refulare în poziție fixă, înclinată la 45 ° față de sol (unghiul conic al jetului fiind egal cu 45 °)
- Stingerea incendiului folosind tehnica literei „T”
- Stingerea incendiului folosind tehnica literei „Z”
- Stingerea incendiului folosind tehnica literei „O”

**Fig. Error! No text of specified style in document..7.** Variația în timp a temperaturii medii înregistrate la nivelul încăperii de testare de termocuplurile straturilor 1, 2 și 3

❖ la nivelul suprafeței superioare a stivelor, conform Fig. 6.8., reducerea temperaturii se realizează mai lent în cazul S2, S6 și S7; astfel, reducerea mai lentă a temperaturii se constată în cazul scenariilor S2, S6 și S7 pentru stiva 1, S2 și S7 pentru stiva 2, S2, S6 și S7 pentru stiva 3, respectiv S1, S2 și S7 pentru stiva 4;

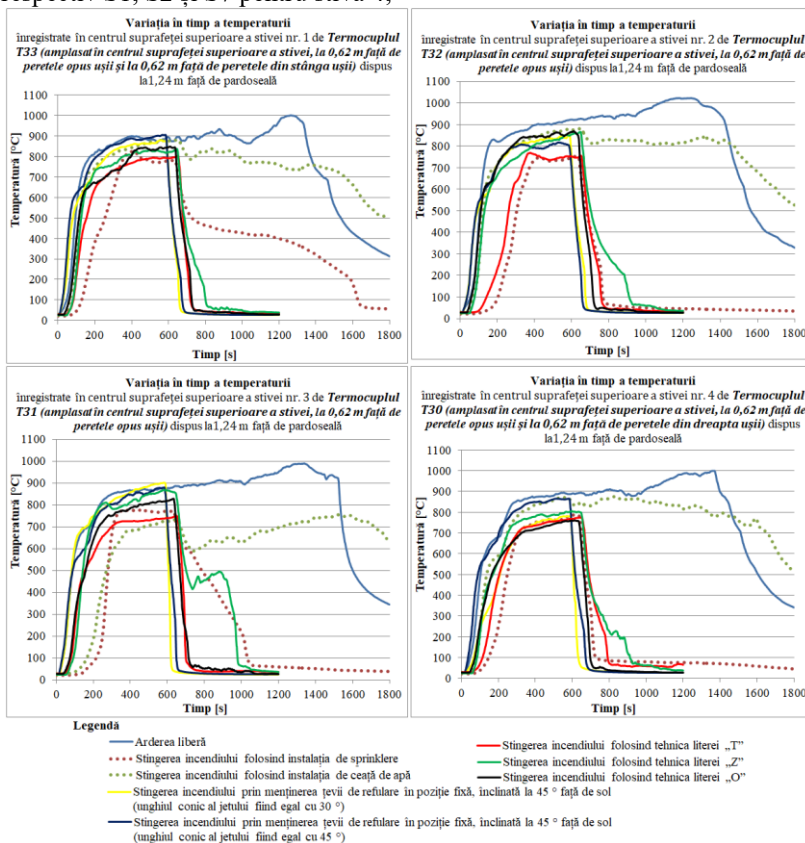


Fig. 6.8. Variația în timp a temperaturii înregistrate în mijlocul suprafeței superioare a stivelor de termocuplurile stratului 4



❖ în centrul stivelor, conform Fig. 6.9., reducerea temperaturii se realizează mai lent în cazul S2, S6 și S7; în ceea ce privește centrul stivelor, reducerea mai lentă a temperaturii se constată în cazul scenariilor S2, S6 și S7 pentru stiva 1, S2 și S7 pentru stiva 2, S2, S6 și S7 pentru stiva 3, respectiv S1, S2, S6 și S7 pentru stiva 4;

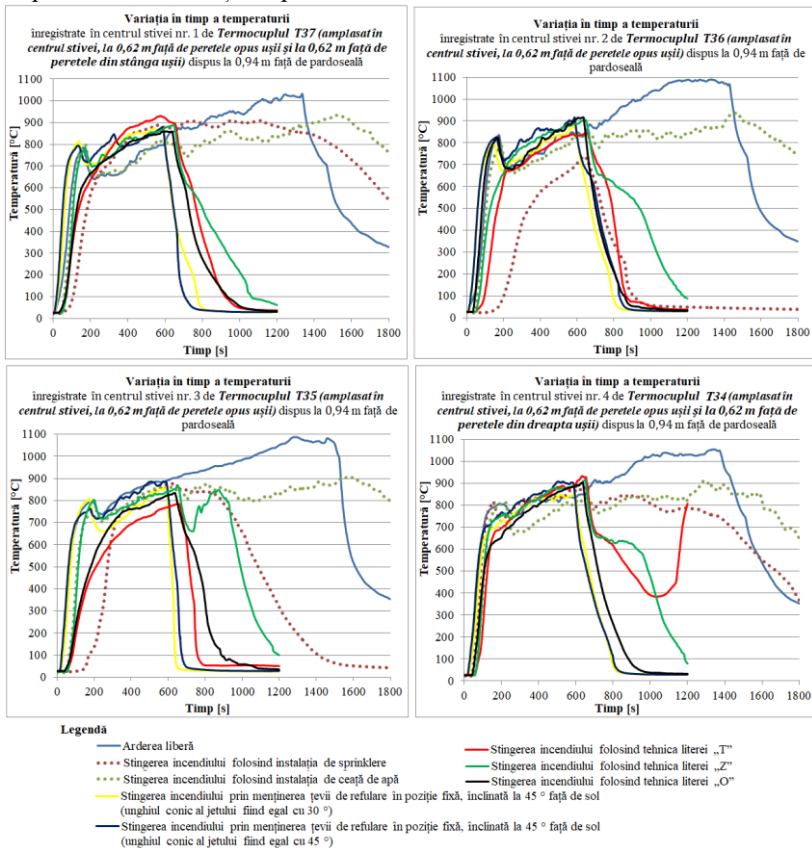


Fig. Error! No text of specified style in document.9. Variația în timp a temperaturii înregistrate în centrul stivelor de termocuplurile stratului 5



➤ media vitezei de reducere a temperaturii în cadrul scenariilor de stingere S1-S7, în funcție de zona analizată și de înălțimea față de pardoseală, prezentată în ordine descrescătoare, este următoarea:

- ❖ încăperea de testare / 1,70 m – 2,70 m: S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7;
- ❖ zona stivelor / 0,94 m – 2,70 m : S3, S2, S1, S4, S5, S6, S7;
- ❖ suprafața stivelor / 1,24 m : S2, S3, S1, S5, S4, S6, S7;
- ❖ centrul stivelor / 0,94 m : S3, S2, S5, S4, S1, S6, S7.

***Analizând eficientizarea stingerii incendiilor pe baza volumului minim al apei refulate, în cadrul celor două criterii de control al focului, se constată următoarele:***

În funcție de volumul minim al apei refulate în vederea reducerii temperaturii, conform celor două criterii de control al focului:

❖ sub valoarea de 60 °C, în interiorul încăperii de testare, la înălțimea de 1,70 m față de pardoseală (primul criteriu de control al focului), se recomandă următoarele scenarii: S5 (408,05 l), S4 (609,27 l), S3 (647,01 l), S1 (772,89 l), S6 (1298,48 l), S2 (1476,14 l); în cazul scenariului S7 nu se obține reducerea temperaturii sub 60 °C înainte de terminarea încercării experimentale;

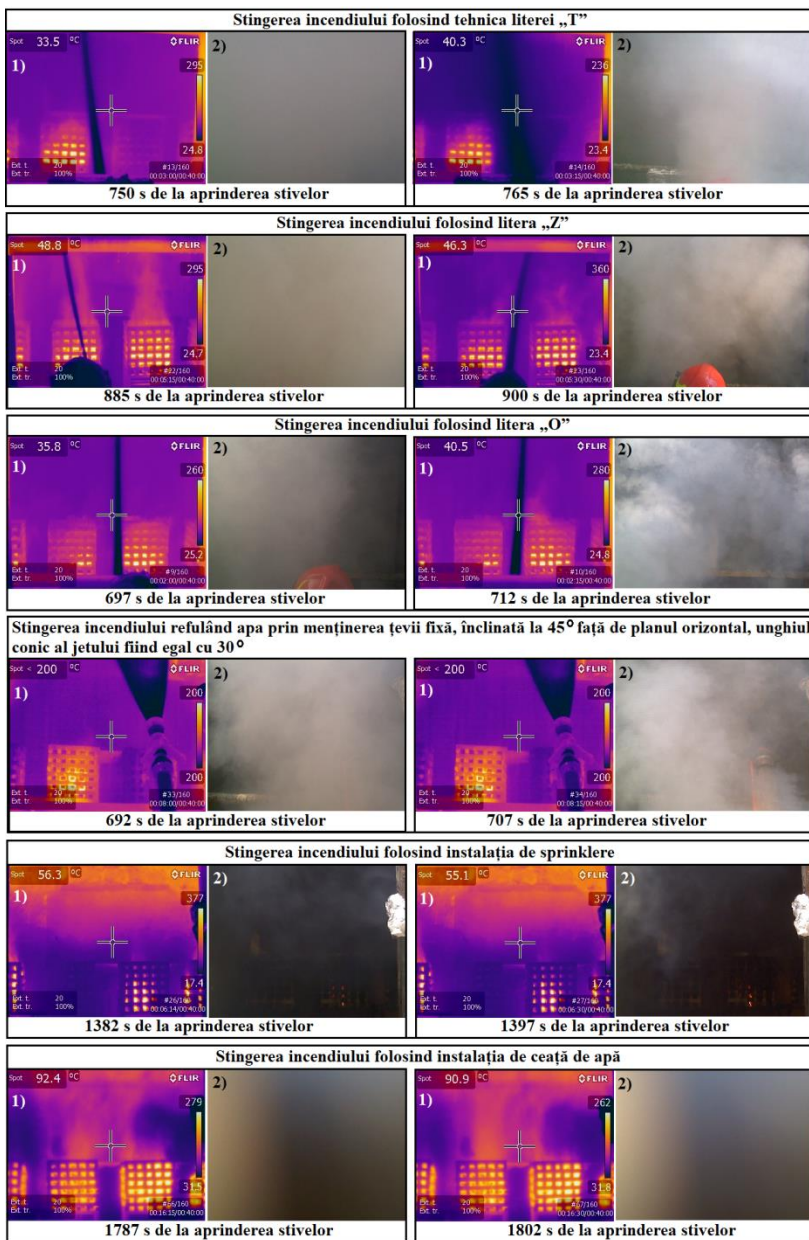
❖ sub valoarea de 100 °C, în centrul stivelor, la înălțimea de 0,94 m față de pardoseală (al doilea criteriu de control al focului), se recomandă următoarele scenarii: S4 (1143,17 l), S5 (1316,30 l), S3 (1815,40 l), S2 (2912,12 l); în cazul scenariilor S1, S6 și S7 nu se obține reducerea temperaturii sub 100 °C în centrul stivelor înainte de terminarea încercărilor experimentale.

***Analizând eficientizarea stingerii incendiilor pe baza timpului cel mai scurt în care sunt îndeplinite cele două criterii de control al focului, se constată următoarele:***

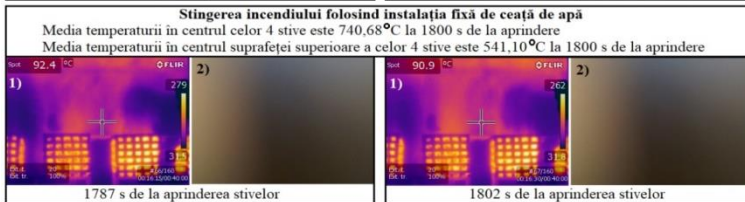
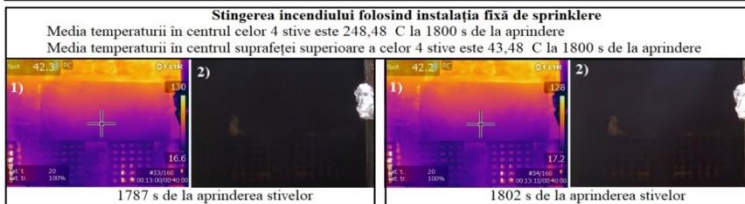
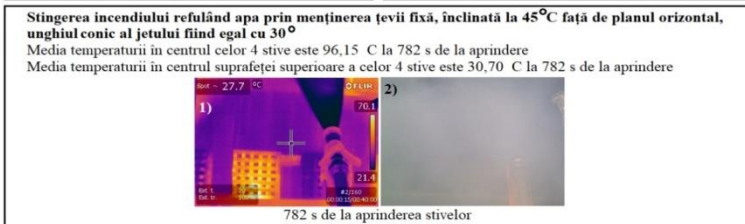
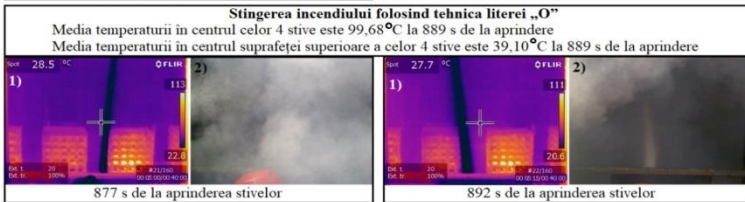
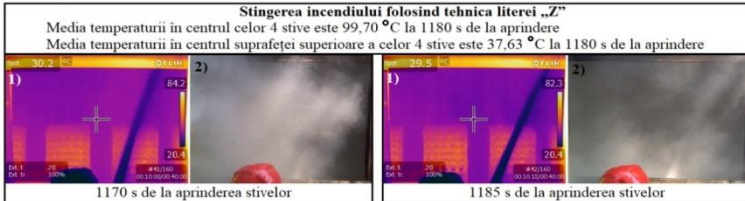
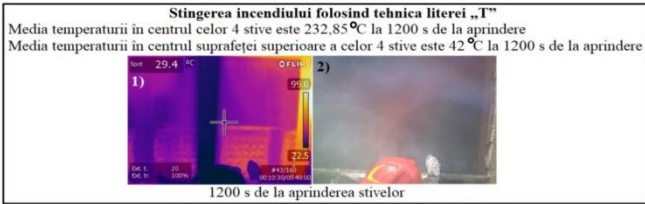
În funcție de timpul în care apa este refulată în vederea reducerii temperaturii, conform celor două criterii de control al focului:

❖ sub valoarea de 60 °C, în interiorul încăperii de testare, la înălțimea de 1,70 m față de pardoseală (primul criteriu de control al focului), conform Fig. 6.10., se recomandă următoarele scenarii: S5 (62 s), S4 (97 s), S3 (103 s), S1 (152 s), S2 (294 s), S6 (783 s); se constată astfel că, în cazul scenariului S7 nu se obține reducerea temperaturii sub 60 °C înainte de terminarea încercării experimentale;

❖ sub valoarea de 100 °C, în centrul stivelor, la înălțimea de 0,94 m față de pardoseală (al doilea criteriu de control al focului), conform Fig. 6.11., se recomandă următoarele scenarii: S4 (182 s), S5 (200 s), S3 (289 s), S2 (580 s); în cazul scenariilor S1, S6 și S7 nu se obține reducerea temperaturii sub 100 °C în centrul stivelor înainte de terminarea încercărilor experimentale.



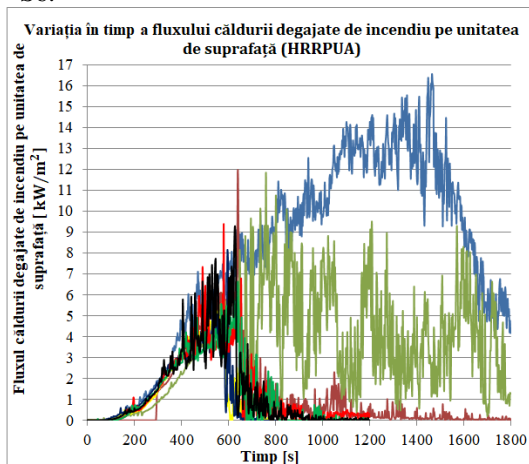
**Fig.** Error! No text of specified style in document..10. Instantanțe realizate în momentul scăderii temperaturii sub 60°C la înălțimea de 1,70 m față de pardoseală: 1) imagine în infraroșu; 2) imagine normală.



**Fig. Error! No text of specified style in document..11.** Instantanee realizate în momentul scăderii mediei temperaturii celor patru stive sub 100°C în centrul acestora: 1) imagine în infraroșu; 2) imagine normală.

***Analizând eficientizarea stingerii incendiilor pe baza reducerii fluxului căldurii degajate de incendiu pe unitatea de suprafață, se constată următoarele:***

Conform Fig. 6.12., variația în timp a HRRPUA în cazul utilizării instalației fixe de ceață de apă (S7), este mai mare comparativ cu celelalte tehnici de stingere, profilul curbei variației fiind asemănător în cazul scenariilor S1 – S6.



**Legendă**

- Arderea liberă
- Stingerea incendiului folosind instalația de sprinklere
- Stingerea incendiului folosind instalația de ceață de apă
- Stingerea incendiului prin menținerea țevii de refulare în poziție fixă, înclinată la 45 ° față de sol (unghiul conic al jetului fiind egal cu 30 °)
- Stingerea incendiului prin menținerea țevii de refulare în poziție fixă, înclinată la 45 ° față de sol (unghiul conic al jetului fiind egal cu 45 °)
- Stingerea incendiului folosind tehnica literei „T”
- Stingerea incendiului folosind tehnica literei „Z”
- Stingerea incendiului folosind tehnica literei „O”

**Fig. Error! No text of specified style in document..12.** Variația în timp a HRRPUA

În urma analizării valorilor vitezei de reducere a parametrului HRRPUA se recomandă utilizarea următoarelor scenarii: S4 (56,22 W/(m<sup>2</sup>s)), S5 (45,09 W/(m<sup>2</sup>s)), S3 (29,22 W/(m<sup>2</sup>s)), S2 (19,72 W/(m<sup>2</sup>s)), S1 (16,37 W/(m<sup>2</sup>s)), S6 (4,68 W/(m<sup>2</sup>s)), S7 (2,68 W/(m<sup>2</sup>s)).

## Capitolul 7. MANAGEMENTUL OPERAȚIONAL AL STINGERII INCENDIILOR ÎN SPAȚII ÎNCHISE

Principalul obiectiv în cazul desfășurării unei acțiuni de stingere a unui incendiu este reprezentat de obținerea și menținerea controlului asupra incendiului.

În cadrul acestei teze, au fost stabilite două criterii de control al focului, ambele având la bază atingerea unei anumite valori a temperaturii, și anume:

➤ primul criteriu de control al focului constă în reducerea valorii temperaturii în interiorul încăperii de testare sub 60 °C la înălțimea de 1,70 m față de pardoseală;

➤ al doilea criteriu de control al focului constă în reducerea mediei valorilor temperaturii înregistrate în centrul celor patru stive la care se manifestă arderea sub 100 °C la înălțimea de 0,94 m față de pardoseală.

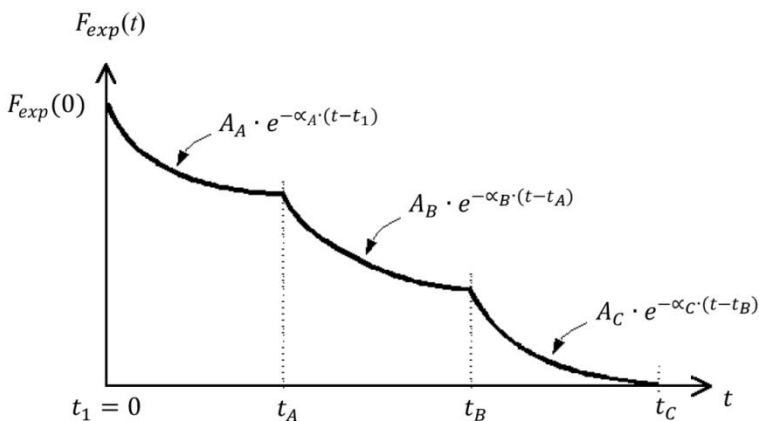
Conform primului criteriu de control, timpul de control al focului și volumul total al apei refulate sunt direct proporționale cu densitatea distribuției apei; astfel, se observă faptul că se obțin valori minime ale celor doi parametri pentru valoarea de 0,41 (l/s)m<sup>-2</sup> a densității distribuției apei, în cazul scenariului S5.

Conform celui de-al doilea criteriu de control, timpul de control al focului și volumul total al apei refulate sunt direct proporționale cu densitatea distribuției apei până la valoarea de 0,39 (l/s)m<sup>-2</sup>, acestea crescând până la valoarea de 0,41 (l/s)m<sup>-2</sup> a densității distribuției apei; astfel, se observă că se obțin valori minime ale celor doi parametri pentru valoarea de 0,39 (l/s)m<sup>-2</sup> a densității distribuției apei, în cazul scenariului S4.

Rezultatele obținute în urma încercărilor experimentale efectuate la scară naturală pot constitui baza unor cercetări ulterioare referitoare la conducerea acțiunilor de intervenție și controlul incendiului.

Analiza datelor experimentale obținute în cadrul acestei teze se poate realiza luând în calcul ipoteza potrivit căreia efectele rezultate în urma utilizării celor șapte tehnici diferite de refulare a apei pot fi reprezentate folosind funcții exponențiale.

Conform Fig. 7.1., efectele unor proceduri diferite de stingere a incendiului (precum deschiderea unei uși, deschiderea unei ferestre, utilizarea ventilației forțate cu presiune pozitivă, utilizarea unei anumite valori a debitului de refulare a apei) utilizate pe timpul unei intervenții pot fi reprezentate ca suma unor funcții exponențiale [39].



**Fig. Error! No text of specified style in document..1.** Reprezentarea grafică a procedurilor de stingere a incendiilor utilizate pe timpul unei intervenții sub forma sumei unor funcții exponențiale [39]

Pe baza rezultatelor obținute experimental se poate face o analiză statistică a acestora pentru determinarea funcțiilor exponențiale conform Fig. 7.1. Funcțiile exponențiale sunt caracterizate de amplitudinile  $A_A$ ,  $A_B$ ,  $A_C$  și frecvențele  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$ ,  $\alpha_C$ , caracteristice fiecărui interval de timp în care sunt aplicate anumite proceduri de intervenție. Parametrii  $t_1$ ,  $t_A$  și  $t_B$  reprezintă momentul aplicării unor anumite proceduri de intervenție, iar parametrul  $t_C$  reprezintă momentul finalizării încercării experimentale de stingere a incendiului.

Obținerea unor valori ridicate ale frecvențelor conduce la reducerea mai rapidă a valorilor temperaturii înregistrate în compartimentul de incendiu. Acest lucru presupune faptul că au fost alese procedurile de intervenție adecvate rezultând astfel eficientizarea stingerii incendiului [39].

Reprezentarea matematică folosind funcții exponențiale reprezintă o metodă utilizată des în cadrul aplicațiilor ingineresti. Aceasta poate fi folosită și în cazul operațiunilor de stingere a incendiilor, în scopul identificării tehnicilor de refulare a apei reprezentative în ceea ce privește eficiența stingerii incendiilor.

## Capitolul 8. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII

Scopul principal al cercetărilor efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat a fost eficientizarea stingerii incendiilor prin investigarea și analiza unor tehnici diferite de refulare a apei într-un spațiu închis.

Acest lucru s-a realizat prin analiza rezultatelor obținute în urma stingerii unui focar de incendiu, reprezentat de patru stive din lemn de pin, în urma refulării apei folosind tehnica literelor „T”, „Z”, „O”, comparativ cu alte tehnici precum: a) refularea apei menținând țeava de refulare fixă, înclinată la 45° față de planul orizontal, unghiul conic al jetului fiind egal cu 30°, respectiv 45°; b) refularea apei utilizând instalația fixă de sprinklere și ceață de apă.

Astfel, au fost identificați principalii parametri care influențează semnificativ eficientizarea procesului de stingere a incendiilor.

Teza de doctorat subliniază necesitatea cercetării continue a modului în care tehnicile de refulare a apei au un impact major asupra eficientizării stingerii incendiilor având în vedere complexitatea dinamicii incendiilor care se manifestă în spații închise.

### 8.1. Contribuții originale

Lucrarea de față aduce o serie de contribuții originale la studiul experimental și numeric al refulării apei în spații închise, astfel:

➤ efectuarea unei analize a stadiului actual al studiilor teoretice, numerice și experimentale privind stingerea incendiilor în spații închise apărute în literatura de specialitate în ultima perioadă (Cap. 2.1. – 2.7., Cap. 3., Cap. 5.1.);

➤ validarea unui set de rezultate numerice privind variația în timp a parametrului HRR în urma arderii unei stive într-un spațiu închis (Cap. 2.8.);

➤ realizarea standului experimental (Cap. 4.1. – 4.2.);

➤ întocmirea procedurilor de testare privind: (a) analiza distribuției apei în lipsa arderii; (b) arderea liberă a patru stive; (c) stingerea a patru stive care ard în urma refulării apei manual, folosind țeava de refulare, și automat, folosind instalațiile fixe de sprinklere și ceață de apă (Cap. 4.3.);

➤ calculul valorii maxime a HRRPUA al etanolului pe baza rezultatelor obținute în urma încercării experimentale de ardere a 2 l de etanol timp de 1800 s (Cap. 5.2.4.);

- simularea numerică privind arderea a patru stive folosind programul PyroSim (Cap. 5.);
- efectuarea unui set de încercări experimentale privind:
  - ❖ efectuarea a 21 de încercări experimentale privind refularea apei în interiorul încăperii de testare, în lipsa arderii, câte 3 încercări pentru fiecare dintre cele șapte scenarii (Cap. 6.1.);
  - ❖ efectuarea unei încercări experimentale de ardere liberă a patru stive în vederea stabilirii momentului inițierii refulării apei în cadrul încercărilor experimentale de stingere (Cap. 6.2.);
  - ❖ analiza comparativă dintre încercarea experimentală și simularea folosind programul PyroSim a arderii libere a patru stive (Cap. 6.3.);
  - ❖ stingerea a patru stive care ard, folosind diferite tehnici de refulare a apei utilizând șapte scenarii (S1 – S7): S1 – refularea apei folosind tehnica literei „T”; S2 – refularea apei folosind tehnica literei „Z”; S3 – refularea apei folosind tehnica literei „O”; S4 – refularea apei prin menținerea fixă a țevii, înclinată la 45° față de planul orizontal, unghiul conic al jetului fiind egal cu 30°; S5 – refularea apei prin menținerea fixă a țevii, înclinată la 45° față de planul orizontal, unghiul conic al jetului fiind egal cu 4 °; S6 – refularea apei folosind instalația fixă de sprinklere; S7 – refularea apei folosind instalația fixă de ceață de apă (Cap. 6.4.);
- obținerea unor date privind, pe de o parte, distribuția apei refulate în interiorul unei încăperi, iar pe de altă parte, stingerea incendiului, folosind tehnici diferite de refulare a apei (Cap. 6.);
- identificarea unor elemente care conduc la eficientizarea stingerii incendiilor în spații închise, și anume reducerea temperaturii compartimentului de incendiu, a consumului apei refulate și a fluxului căldurii degajate de incendiu pe unitatea de suprafață ținând seama de influența semnificativă a unor parametri precum direcția de refulare a jetului de apă, debitul și densitatea distribuției apei refulate, unghiul conic al jetului de apă, tehnica de refulare, respectiv modul de refulare a apei în ceea ce privește continuitatea (Cap. 6. – 8.).

## 8.2. Perspective de dezvoltare ulterioară

Cercetările fundamentale în ceea ce privește dinamica incendiilor care se manifestă în spații închise pot fi aprofundate prin elaborarea unor studii cu privire la:

- stingerea folosind tehnica literei „U întors”;



- analize comparative privind rezultatele obținute în urma refulării apei folosind tehnica literelor „T”, „Z”, „O” și „U întors” în urma utilizării unor valori diferite ale debitului și presiunii apei refulate;
- măsurarea volumului apei rămase efectiv în urma refulării acesteia asupra focarului de incendiu în vederea estimării volumului apei reprezentat de pierderi ca urma a infiltrațiilor la nivelul încăperii, evaporarea în urma contactului cu suprafețele încăperii, respectiv evaporarea în urma căldurii degajate de incendiu;
- reprezentarea matematică folosind funcțiile exponențiale pe baza rezultatelor obținute în urma efectuării încercărilor experimentale;
- simularea numerică folosind programul PyroSim și validarea stingerii incendiului prin intermediul instalațiilor fixe de sprinklere și ceață de apă;
- automatizarea refulării apei în forma literelor „T”, „Z”, „O” și „U întors” asupra focarului de incendiu prin intermediul unui robot.

### 8.3. Lista de publicații

1. *Anghel, I., Chiojdoiu, A. F., Fire Behavior In Corner Tests Of Interior Finish Materials Under Natural Conditions, Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, And Engineering, 65(1), pp. 57-64, ISSN 1221-5872, <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1781>, Impact Factor: 0,3; 2022.*
2. *Anghel, I., Chiojdoiu, A. F., Petrache, M. A., Vrabie, S., The Influence Of Wood Cribs Shape On The Mass Loss And Temperature Variation In Enclosed Spaces, Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, And Engineering, 65(2), pp. 195-204, ISSN 1221-5872, <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1806>, Impact Factor: 0,3; 2022.*
3. *Chiojdoiu, A. F., Anghel, I., Enciu, V., Mocioi, I. A., Tudor, E. F., Influența performanțelor la foc ale plăcilor din așchii de lemn (PAL) asupra dezvoltării unui incendiu simulat la scară naturală, într-un spațiu închis, Revista Română de Inginerie Civilă, vol. 12, Iss. 1, pag. 105-125, 2021.*
4. *Chiojdoiu, A. F., Anghel, I., Panaitescu, N. V., Analiza comparativă a influenței principalilor parametri asupra eficientizării stingerii cu apă a incendiilor, Revista Romana de Inginerie Civila, 12(2), 329-350; 2021.*
5. *Chiojdoiu, A. F., Anghel, I., Șerban, M., Trache, Ș., Metode de estimare a parametrilor caracteristici fenomenului de flashover, Revista Romana de Inginerie Civila, vol. 11, Iss. 2, pag. 181-195, 2020.*
6. *Chiojdoiu, A. F., Anghel, I., Panaitescu, V. N., Popa, C., Bobu, D., Computer simulation study regarding the influence of ventilation openings on the fire dynamics in a closed area, Acta Technica Napocensis, Series:*

Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, vol. 64, Issue I, March, pag. 113 – 122, 2021.

7. *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I., Safta, C. A., Simion, A.*, Influence of water discharge using the „T”, „Z”, „O” and „inverted U” letters technique on its distribution in a confined space, Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, And Engineering, 66(3), pp. 397-406, ISSN 1221-5872, <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2190>, Impact Factor: 0,3; 2023

8. *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I., Dima, Safta, C.-A.*, The influence of ventilation on the temperature variation resulting from burning a wood crib inside a confined space, În curs de publicare în cadrul Buletin Științific, Universitatea Națională de Știință și Tehnică Politehnică București.

9. *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I.*, The procedure for performing discharge tests using the letter technique (TZO) for water distribution analysis, Scientific Conference „Provocări și Strategii în Ordinea și Siguranța Publică”, Bucharest, Romania, 2023.

10. *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I., Dragne, H., Dragomirescu, A., Safta, C.-A.*, The influence of ventilation conditions of heat release rate variation over time, Technium, col. 14, pp. 109-114, ISSN: 2668-778X, [www.techniumscience.com](http://www.techniumscience.com), 2023.

11. *Neamtu, C., Anghel, I., Chiojdoiu, A. F., Buna, Z., Trofin, A., Dragomir, D.*, Automatic Fire Extinguishing System Using „T”, „Z”, „O” Letters Technique Based On A Parallel Structure, Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, And Engineering, 62(3), pag. 389 – 396, 2019.

12. *Pricope, I. I., Olaru, E. C., Anghel, I., Chiojdoiu, A. F.*, Analysis Of Flames Spread From Tests Simulating A Single Burning Item Under 3 Ventilation Conditions, În curs de publicare în cadrul Revistei Construcții, INCD URBAN-INCERC, Bucuresti.

13. *Teodor, A., Chiojdoiu, A. F., Anghel, I., Panaitescu, V. N.*, Influence of heat release rate on the temperature of the hot gas layer in closed spaces, Journal of Engineering Sciences and Innovation, Volume 5, Issue 1, 2020, pag. 33 – 40, 2020.

14. *Teodor, A., Chiojdoiu, A. F., Lalu, O., Anghel, I., Trofin, A., Mocioi, I. A., Bălănescu, L. V.*, Analiza și estimarea parametrilor care influențează temperaturile stratului de gaze fierbinți într-un compartiment de incendiu, în funcție de sistemul de ventilație folosit, Revista Romana de Inginerie Civila, vol. 11, Iss. 1, pag. 47-69, 2020.

## Capitolul 9. EXTRAS DIN BIBLIOGRAFIE

- [1] *Anderson, J., Sjöström, J., Temple, A., Charlier, M., Dai, X., Welch, S., Rush, D.*, FDS simulations and modelling efforts of travelling fires in a large elongated compartment, *Fire and Materials*, 45(6), 699-707, 2021.
- [2] *Barnett, C. R.*, Calculation methods for water flows used for fire fighting purposes, SFPE (NZ) Technical Publication, TP2004/1, 2004.
- [3] *Barnett, C. R.*, Water Supply for Fire Fighting Purposes, Proceedings of 50th Jubilee Year Conference, Institution of Fire Engineers, New Zealand Branch, 1979.
- [4] *Braga, I., Ganea, C., Mocioi, A., Popoviciu, S., Constantin, I. C., Jackel, D. M., Anghel, I.*, Ghid privind tehnica și tactica stingerii incendiilor, Nivel I – Tura de serviciu, ISU 04, 2013.
- [5] *Bwalya, A.*, An overview of design fires for building compartments, *Fire Technology*, 44(2), 167-184, 2008.
- [6] *Chan, T. S.*, Measurements of water density and drop size distributions of selected ESFR sprinklers, *Journal of Fire Protection Engineering*, 6(2), 79-87, 1994.
- [7] *Chiojdoiu, A. F., Anghel, I., Panaitescu, N. V.*, Analiza comparativă a influenței principalilor parametri asupra eficientizării stingerii cu apă a incendiilor, *Revista Romana de Inginerie Civila*, 12(2), 329-350; 2021.
- [8] *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I., Safta, C. A., Simion, A.*, Influence of water discharge using the „T”, „Z”, „O” and „inverted U” letters technique on its distribution in a confined space, *Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, And Engineering*, 66(3), pp. 397-406, ISSN 1221-5872, <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2190>, Impact Factor: 0,3; 2023.
- [9] *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I., Dima, Safta, C.-A.*, The influence of ventilation on the temperature variation resulting from burning a wood crib inside a confined space, În curs de publicare în cadrul Buletin Științific, Universitatea Națională de Știință și Tehnică Politehnica București.
- [10] *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I.*, The procedure for performing discharge tests using the letter technique (TZO) for water distribution analysis, Scientific Conference „Provocări și Strategii în Ordinea și Siguranța Publică”, Bucharest, Romania, 2023.
- [11] *Chiojdoiu, A.-F., Anghel, I., Dragne, H., Dragomirescu, A., Safta, C.-A.*, The influence of ventilation conditions of heat release rate variation over time, *Technium*, col. 14, pp. 109-114, ISSN: 2668-778X, [www.techniumscience.com](http://www.techniumscience.com), 2023.

- [12] *Cozad, F. D.*, Water Supply for Fire Protection, Prentice Hall, 1981.
- [13] *Degler, J., Eliasson, A.*, A Priori Modeling of the Tisova Fire Test in FDS, Bachelor's thesis, Luleå University of Technology, Luleå Sweden, 2015.
- [14] *Dhurandher, B. K., Kumar, R., Dhiman, A. K., Gupta, A.*, Investigation of thermal equilibrium in a compartment involving crib fire, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(3), 1787-1797, 2017.
- [15] *Eduful, J.*, Correlation of fire load survey methodologies towards design fires for office buildings (Doctoral dissertation, Carleton University), 2012.
- [16] *Fredricks, A.*, Little drops of water: 50 years later, part 1. 2, 2000. [40]
- [17] *Grant, C.C., Hall, J.R., Solomon, R. E.*, Fire Protection Handbook, Twentieth Edition Volume I.
- [18] *Grigoraş, Z. C., Diaconu-Şotropa, D.*, Establishing the design fire parameters for buildings, *Bul. Inst. Polit. Iaşi*, 59, 133-141, 2013.
- [19] *Gsell, J.*, Assessment of fire suppression capabilities of water mist. Fighting compartment fires with the cutting extinguisher, Faculty of Art, Design and the Built Environment, University of Ulster, Belfast, 2010.
- [20] <http://cfbt-us.com/wordpress/?p=1793>, accesat în data de 10.01.2020, ora 16:15.
- [21] <https://support.thunderheadeng.com/PyroSim/resources/#tools>.
- [22] <https://support.thunderheadeng.com/tutorials/PyroSim/modeling-fire/>, Partea a 4-a - Heat Release Rate Per Unit Area Defined Fire, site accesat în data de 07.01.2023, ora 18.00.
- [23] <https://www.fire-testing.com/oxygen-bomb-calorimeter/>, site accesat în data de 30.09.2022, ora 14.00.
- [24] Institution BS, Draft British standard BS DD240 fire safety engineering in buildings, Part 1: guide to the application of fire safety engineering principles, 1997.
- [25] ISO 1716:2018 Reaction to fire tests for products — Determination of the gross heat of combustion (calorific value).
- [26] *Kerber, S.*, Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential construction. Underwriters Laboratories, Incorporated, 2010.
- [27] Manualul utilizatorului, Pompe centrifuge cu dispozitive de amorsare pentru stingerea incendiilor, Rădăcini Motors.
- [28] *McCaffrey, B. J., Quintiere, J. G., Harkleroad, M. F.*, Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations, *Fire Technology*, 17(2), 98-119, 1981.
- [29] *McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M.*, Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1:

Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, Sixth Edition, 2020.

[30] *McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M.*, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation, NIST Special Publication 1018-3 Sixth Edition, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>, June 28, 2022, Revision: FDS6.7.9-0-gec52dee42, pag. 134.

[31] NFPA 101 life safety code, National Fire Protection Association, 2011.

[32] NFPA, Proposed Draft of NFPA 557, Standard for Determination of Fire Load for Use in Structural Fire Protection Design 2012 Edition, National Fire Protection Association, Quincy MA, 2010.

[33] *Rappsilber, T., Below, P., Krüger, S.*, Wood crib fire tests to evaluate the influence of extinguishing media and jet type on extinguishing performance at close range, *Fire Safety Journal*, 106, 136-145, 2019.

[34] SFPE, S., *Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design of Buildings*, 2000.

[35] *Spearpoint, M. J.* Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model (NIST GCR 99-775), *Nat. Inst. Stand. and Technol.*, Gaithersburg MD., 1999.

[36] SR EN 1991-1-2, Eurocod 1: Acțiuni asupra structurilor; Partea 1-2: Acțiuni generale-Acțiuni asupra structurilor expuse la foc, 2004.

[37] Suprastructura pentru autospeciala pentru lucrul cu apă și spumă de 2 tone, Carte tehnică, Instrucțiuni de utilizare și întreținere, rev. 1, Rădăcini Motors.

[38] *Svensson, S.*, Fire ventilation, Swedish Rescue Services Agency, 2005.

[39] *Svensson, S.*, The operational problem of fire control (Doctoral dissertation, Lund University), 2002.

[40] *Svensson, S., Cedergårdh, E., Mårtensson, O., Winnberg, T.*, Tactics, command, leadership. Karlstad: Swedish Civil Contingencies Agency, 2009.

[41] *Tran, H. C., White, R. H.* Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. *Fire and materials*, 16(4), 197-206, 1992.

[42] *Weinschenk, C. G., Stakes, K., Zevotek, R.*, Impact of Fire Attack Utilizing Interior and Exterior Streams on Firefighter Safety and Occupant Survival: Air Entrainment, Underwriters Laboratory, Firefighter Safety Research Institute, 2017.

[43] *Weinschenk, C. G., Stakes, K., Zevotek, R.*, Impact of Fire Attack Utilizing Interior and Exterior Streams on Firefighter Safety and Occupant Survival: Water Mapping, Underwriters Laboratory, Firefighter Safety Research Institute, 2017.

- [44] *Wighus, R.*, Extinguishment of enclosed gas fires with water spray, In *Fire Safety Science—Proceedings of the Third International Symposium* (pp. 997-1006), Routledge, 2006.
- [45] [www.tyco-fire.com](http://www.tyco-fire.com), Series TY-B – 28, 5.6, and 8.0 K-factor Upright, Pendent and Recessed Pendent Sprinklers Standard Response, Standard Coverage, 2018.
- [46] [www.tyco-fire.com](http://www.tyco-fire.com), Ultra Low Flow AquaMist Nozzle Type ULF AM29 Automatic (Closed), Datasheet TFP2229.1, 2021.