

Analiza comparativă a influenței principalilor parametri asupra eficientizării stingerii cu apă a incendiilor

Comparative analysis of the main parameters influence on the efficiency of fire extinguishing using water

Alexandru-Florin CHIOJDOIU¹, Ion ANGHEL², Valeriu Nicolae PANAITESCU³

¹Universitatea Politehnica din București
București, sector 6, Splaiul Independenței, nr. 313
Inspectoratul pentru situații de urgență “Dealul Spirii” București-Ilfov
București, sector 5, Calea 13 Septembrie, nr.135
alex.floryn@yahoo.com

²Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri
București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3
ion_angel2003@yahoo.com

³ Universitatea Politehnica din București
București, sector 6, Splaiul Independenței, nr. 313
Universitatea Politehnica București
e-mail: valeriu.panaitescu@yahoo.com

Rezumat. În acest studiu este subliniată importanța conceptului de eficiență a stingerii incendiilor folosind apă. Astfel, sunt prezentate mecanismele generale de stingere a incendiilor, manual, folosind țevile de refulare, și automat, folosind instalațiile fixe de stingere cu sprinklere, respectiv cu ceață de apă. Este realizată o analiză comparativă a influenței principalelor caracteristici ale jetului de apă obținut prin utilizarea țevilor de refulare și a instalațiilor fixe asupra eficienței stingerii incendiilor, și anume, a distribuției dimensiunii picăturilor de apă, a densității fluxului de apă refulat și a impulsului jetului. De asemenea, este prezentată și influența altor parametri asupra stingerii manuale și automate a incendiilor, precum dimensiunea picăturilor de apă, tehnicile de manevrare a țevilor de refulare, viteza ventilației longitudinale și debitul de refulare.

Cuvinte cheie: eficiența stingerii incendiilor, dimensiunea picăturilor de apă, sprinklere, ceață de apă

Abstract. This study highlights the importance of the concept of firefighting efficiency using water. Thus, are presented the general mechanisms of water for firefighting, manually, using nozzles, and automatically, using fixed system of sprinklers and water mist. A comparative analysis of the influence of the main characteristics of the water jet obtained by the use of nozzles and fixed installations on fire-extinguishing efficiency is carried out, such as the drop size distribution, the flux density and the spray momentum. Also is shown the influence of other parameters on manual and automatic fire

extinguishing, such as the size of water droplets, discharge nozzle techniques, longitudinal ventilation speed, and flow rate.

Key words: efficiency of firefighting, water droplet dimension, sprinklers, water mist

1. Introducere

Apa este cel mai important agent utilizat la scară largă pentru stingerea incendiilor, putând fi folosită atât în stare solidă, cât și în stare lichidă sau gazoasă [1]. Importanța apei ca agent principal de stingere a incendiilor este dată, în primul rând, de principalele proprietăți ale acesteia, și anume, dilatarea volumică, căldura specifică, respectiv căldura latentă de vaporizare [2].

Dilatarea volumică presupune mărirea volumului apei prin transformarea acesteia în aburi, fenomen determinat de creșterea temperaturii apei ca urmare a absorbției energiei termice degajate de incendiu. De asemenea, odată cu creșterea temperaturii aburilor, are loc o creștere direct proporțională a volumului acestora. Această teorie poate fi explicată prin legile gazelor și prin modul în care acestea pot fi integrate în legea gazului ideal, conform figurii 1 [3].

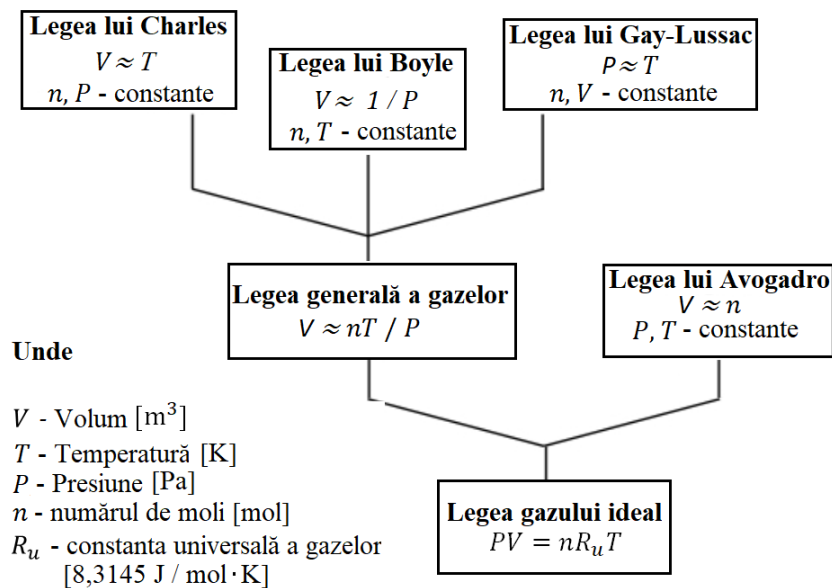


Figura 1 Integrarea legilor gazelor în Legea gazului ideal [3]

Utilizând legea gazelor ideale, se poate determina de câte ori se mărește volumul apei transformată în aburi la temperatura de 100 °C, ținând cont de valorile următorilor parametri: masa moleculară a apei $18 \cdot 10^{-3}$ kg/mol; punctul de fierbere al apei la presiunea atmosferică: 100 °C (373,15 K); densitatea apei, $\rho_{ap\grave{a}}$, la 20 °C (293,15 K): 10^3 kg/m³; presiunea atmosferică: 101325 Pa; constanta universală a gazelor (R_u): 8,3145 J/molK. Volumul unui mol de aburi se poate calcula folosind legea gazului ideal,

$$V = R_u \left(\frac{nT}{P} \right) = 8,3145 \left(\frac{1 \cdot 373,15}{101325} \right) = 0,0306 \text{ m}^3. \quad (1)$$

Densitatea aburilor la temperatura de 100 °C este dată de raportul dintre masa molară a vaporilor de apă, H₂O, 2×1+16=18, și volumul unui mol de aburi,

$$\rho_{aburi} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{0,0306} = 588,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3. \quad (2)$$

Raportul dintre densitatea apei și densitatea aburilor arată de câte ori se mărește volumul apei atunci când aceasta se transformă în aburi,

$$\frac{\rho_{apă}}{\rho_{aburi}} = \frac{10^3}{588,2 \cdot 10^{-3}} = 1700,10. \quad (3)$$

Astfel, dilatarea volumică a apei poate conduce la stingerea incendiilor prin reducerea concentrației de oxigen a noului amestec format de aer-aburi.

Căldura specifică a apei, reprezintă cantitatea de energie pe care 1 kg de apă o poate absorbi de la incendiu pentru a crește temperatura acesteia cu 1 °C, având valoarea de 4,2 kJ/kg.

Căldura latentă de vaporizare reprezintă cantitatea de energie necesară transformării unui 1 kg de apă în aburi la temperatura de 100 °C, având valoarea de 2260 kJ/kg. Ținând cont de faptul că fumul are valoarea căldurii specifice de 1 kJ/kg, se constată astfel că apa este capabilă să absoarbă o cantitate foarte mare de energie termică de la incendiu [3].

Conceptul de eficiență a stingerii incendiilor constă în faptul că, așa cum procentul care definește eficiența procesului de absorbție a căldurii de către apă nu poate atinge valoarea de 100 %, în același mod majoritatea clădirilor sau a încăperilor în care se manifestă incendiul nu pot absorbi 100 % din fluxul termic degajat de incendiu. Astfel, se utilizează coeficientul de absorbție a căldurii degajate de incendiu de către apă, fiind suficientă pentru stingerea unui incendiu o absorbție cuprinsă în intervalul 30 % - 60 % din căldura totală degajată. De asemenea, se folosește coeficientul de eficiență a producerii căldurii de către un incendiu, acesta luând valori cuprinse în intervalul 10 % - 50 % din valoarea totală degajată de incendiu. Eficientizarea stingerii incendiilor presupune: utilizarea unei cantități de apă cât mai mici în scopul reducerii costurilor și a eventualelor pagube provocate clădirilor de acțiunea apei utilizate în exces; reducerea timpului de stingere a incendiului, în scopul salvării vieții oamenilor și animalelor, al protecției mediului, precum și al limitării producerii pagubelor [4].

2. Mecanismele de stingere ale apei refulate prin intermediul țevilor

În funcție de zonele din interiorul unei încăperi în care picăturile de apă se pot vaporiza, există cinci metode principale de a acționa împotriva incendiului, conform figurii 2: refularea picăturilor de apă asupra flăcărilor, respectiv asupra stratului de fum și gaze fierbinți, crearea unei atmosfere inerte prin producerea de aburi în urma vaporizării apei refulate asupra suprafețelor fierbinți, răcirea suprafeței materialelor combustibile care ard, ecranarea suprafeței materialelor combustibile neimplicate încă în procesul de ardere.

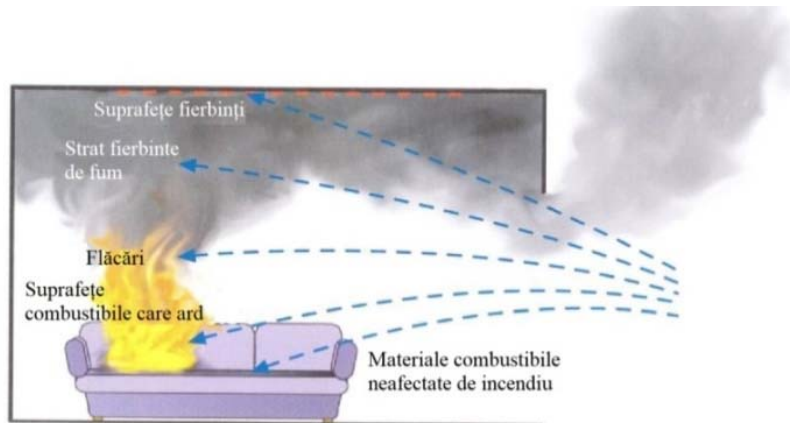


Figura 2 Zonele dintr-un compartiment de incendiu în care picăturile de apă se pot vaporiza [5]

În urma refulării apei asupra unui incendiu care se manifestă într-o încăpere, apa poate produce o serie de efecte [6] asupra acestuia, prezentate în figura 3, precum absorbția de căldură, reducerea concentrației de oxigen, efectul de răcire / ecranarea suprafeței, reducerea radiației termice, respectiv efectul de suflare.

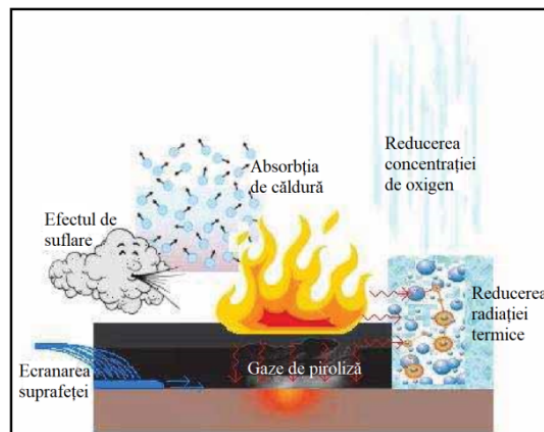


Figura 3 Efectele apei asupra incendiului [6]

Principalul efect pe care apa îl produce asupra unui incendiu este reprezentat de absorbția de căldură. Ținând cont de faptul că arderea este o reacție chimică exotermă, prin refularea apei reci, are loc absorbția energiei termice de către apă, ceea ce conduce la încălzirea acesteia. Arderea este o reacție chimică redox care necesită, pe lângă combustibil și o cantitate de energie suficientă pentru a susține arderea, prezența unui oxidant, și anume a oxigenului. Astfel, ținând cont de faptul că oxigenul se găsește în aer în proporție de 21 %, s-a constatat că, prin reducerea concentrației acestuia sub valoarea de 12 %, se încheie reacția în lanț generată de ardere, ceea ce conduce la stingerea incendiului. Efectul de răcire / ecranarea suprafeței presupune acțiunea directă a apei asupra materialului combustibil. Astfel, prin acoperirea eficientă a suprafețelor materialelor combustibile care ard, are loc răcirea acestora, împiedicarea producerii gazelor de piroliză și implicit stingerea incendiului. Reducerea radiației termice se poate produce, de asemenea, în urma refulării apei supra

incendiului, fiind dependentă de modul de distribuție al apei, dimensiunea picăturilor și modalitatea de stingere a incendiului. În situația în care apa este refulată sub formă de ceață de apă, în funcție de grosimea stratului format, radiația termică poate fi redusă sau blocată în întregime. Efectul de suflare constă în faptul că fluxul de aer antrenat în urma refulării jetului întrerupe continuitatea alimentării flăcării cu gazele de piroliză și a flăcării propriu-zise. Astfel, flăcările se sting deoarece, deși există o cantitate de energie suficientă întreținerii arderii, aceasta nu se află în același loc în care se găsește combustibilul [6].

Pentru ca apa să absoarbă o cantitate de energie cât mai mare este necesar ca picăturile de apă să rămână cât mai mult timp suspendate în aer. Așa cum se poate observa în figura 4, apa poate absorbi energie termică atât de la fum și gaze fierbinți, cât și de la suprafețele fierbinți ale încăperii. Ecuația care descrie echilibrul energetic

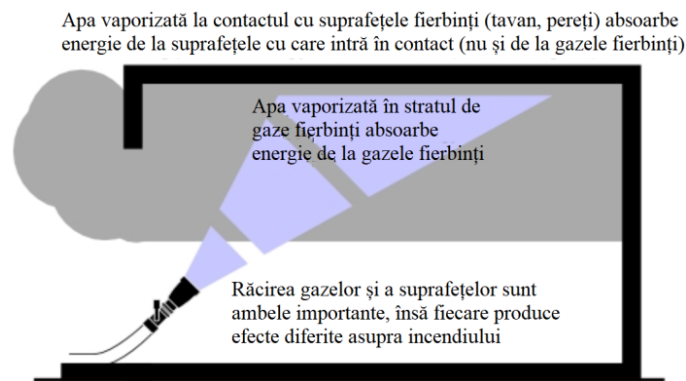


Figura 4 Răcirea gazelor și a suprafețelor fierbinți [7]

dintre gazele fierbinți aflate în stratul superior și apa refulată pentru răcire este:

$$n_1 C_{p,g} (T_{u1} - T_{u2}) = (n_2 - n_1) \left(b(C_{p,w}(373,15 - T_{w1}) + L_{Vw}) + C_{p,st}(T_{u2} - 373,15) \right) \quad (4)$$

unde

$C_{p,g}$ este căldura specifică a gazelor rezultate în urma incendiului/fumului (aproximativ egală cu cea a aerului, 33,2 J/mol K la 1000 K);

$C_{p,st}$ – căldura specifică a aburilor (41,2 J/mol K la 1000 K);

$C_{p,w}$ – căldura specifică a apei (76.663 J/mol K la 215,15 K);

L_{Vw} – căldura latentă de vaporizare a apei, 40680 J/mol;

T_u – temperatura stratului superior [K];

T_w – temperatura apei [K];

n – numărul de molecule;

b – procentul de apă care se vaporizează în stratul superior de fum și gaze fierbinți;

Subscript 1 – se referă la condițiile inițiale;

Subscript 2 – se referă la condițiile ulterioare după refularea apei;

Termenul din stânga al ecuației, reprezintă energia care trebuie transferată de la gazele fierbinți din stratul superior în scopul reducerii temperaturii acestora. Termenul din dreapta al ecuației, reprezintă energia care trebuie transferată apei refulate pentru a

crește temperatura apei, sub formă de aburi, cu aceeași valoare cu care scade temperatura stratului superior de fum și gaze fierbinți [7].

3. Mecanismele de stingere ale apei prin utilizarea instalației cu sprinklere

Unul dintre cele mai eficiente moduri de stingere a incendiilor în urma utilizării instalației cu sprinklere este reprezentat de efectele de răcire produse. Producerea unor picături de apă de dimensiuni mici produce o răcire semnificativă, ceea ce conduce la reducerea feedback-ului radiativ către foc sub nivelul necesar susținerii procesului de ardere [8]. Un alt mod de stingere a incendiilor este reprezentat de efectul de „înăbușire”. Acesta constă în evaporarea picăturilor de apă, ceea ce conduce la mărirea volumului de apă de circa 1700 de ori prin transformarea acesteia în aburi, rezultând scăderea concentrației de oxigen a amestecului nou format de aer și aburi. Cele două moduri de stingere a incendiilor au o serie de limitări, principalul aspect fiind reprezentat de faptul că acestea sunt eficiente în situația în care incendiul se manifestă într-o încăpere închisă, neventilată [9]. Cea mai mare eficiență a stingerii incendiilor se obține în cazul încăperilor mici, prin obținerea efectului de „înăbușire” a incendiului, deoarece aproape toate picăturile de apă se pot vaporiza fie la contactul cu flăcările, fie la contactul cu suprafețele fierbinți ale încăperii [10]. În cazul manifestării unui incendiu de amploare într-o încăpere mare, deschisă sau bine-ventilată, se pot crea curenți de aer care îndepărtează picăturile mici de apă făcându-le ineficiente pentru stingerea incendiului.

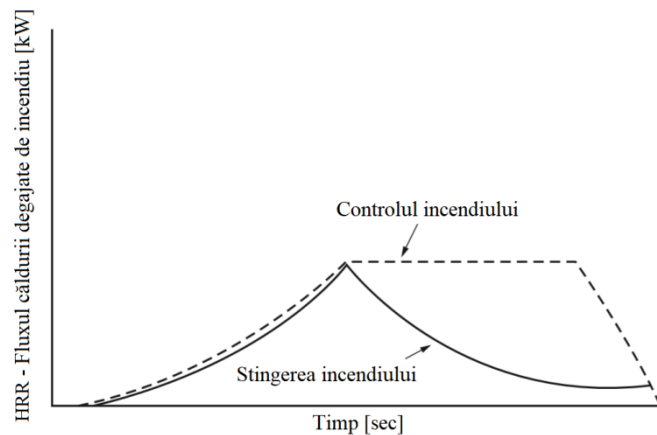


Figura 5 Variația în timp a HRR necesară realizării controlului, respectiv stingerii incendiului [8]

În figura 5 este reprezentată evoluția în timp a HRR (eng: heat release rate), fluxului căldurii degajate de incendiu, caracteristică realizării controlului asupra incendiului, respectiv stingerii acestuia. Controlul incendiului presupune limitarea dimensiunii incendiului prin reducerea fluxului căldurii degajate și refularea apei asupra materialelor combustibile aflate în apropiere, neimplicate încă în procesul de ardere. Stingerea incendiului presupune reducerea fluxului căldurii degajate de incendiu până în punctul în care creșterea din nou în intensitate a incendiului nu mai

Analiza comparativă a influenței principalilor parametri asupra eficientizării stingerii cu apă a incendiilor

este posibilă ca urmare a refulării apei, prin flăcări, către suprafața materialelor combustibile care ard.

4. Mecanismele de stingere a incendiilor folosind instalația cu ceață de apă

Modul de acțiune al sistemelor cu ceață de apă folosite pentru suprimarea unui incendiu este prezentat în figura 6 și constă în trei mecanisme de stingere primare și două mecanisme de stingere secundare [8]. Mecanismele de stingere primare sunt reprezentate de absorbția de căldură, scăderea concentrației de oxigen și blocarea radiației termice. Mecanismele secundare care intervin în stingerea incendiilor sunt diluarea amestecului de aer și vapori ai materialelor combustibile care ard, respectiv efectele cinetice, însă este dificil de cuantificat importanța acestora.

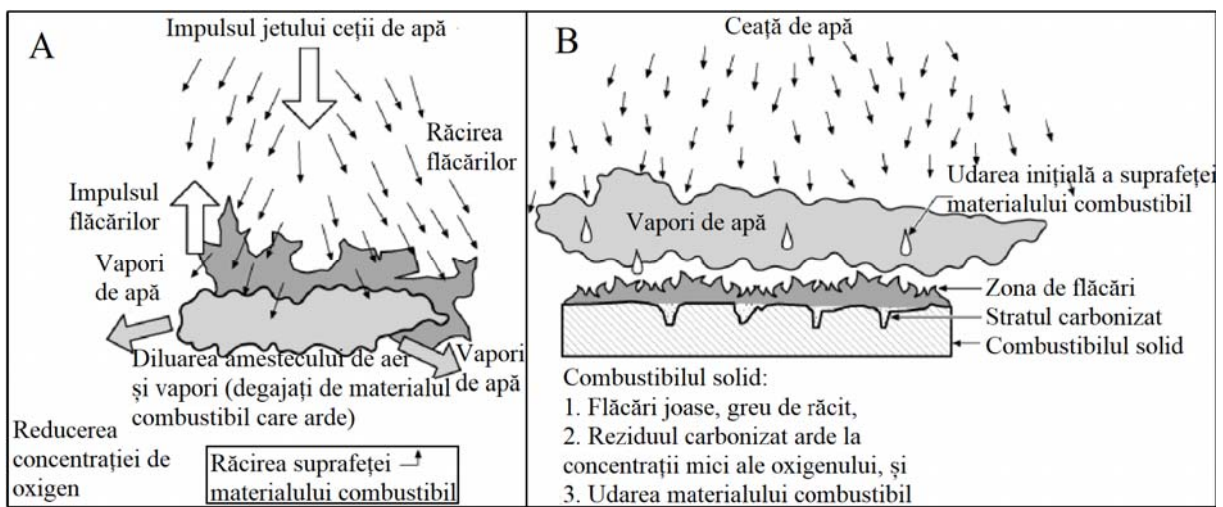


Figura 6 Mecanismele stingerii cu ceață de apă a unei tăvi cu combustibil lichid (A) și asupra unui combustibil solid caracterizat de un strat de reziduu carbonizat și degajări de flăcări (B) [8]

Absorbția căldurii, denumită și răcire, presupune faptul că, atunci când ceața de apă este refulată asupra incendiului, căldura este absorbită în trei zone, astfel: de la gazele fierbinți și de la flăcări, de la materialele combustibile care ard, respectiv de la obiectele și suprafețele aflate în apropierea incendiului. Dacă este absorbită o cantitate suficientă de căldură, temperatura fazei gazoase a flăcărilor poate fi scăzută sub valoarea critică necesară susținerii reacției de combustie, cca 1327 °C [11], și astfel flăcările sunt stinse. Conform unor studii efectuate [12], cantitatea „suficientă” de căldură absorbită necesară opririi procesului de ardere variază între 30 % și 60 % din căldura totală degajată de incendiu. Incendiile care se manifestă la lichide combustibile al căror punct de aprindere este peste temperatura ambientală, pot fi stinse relativ ușor prin răcirea flăcărilor și reducerea emisiei radiației termice către suprafața combustibilului. Incendiile care se manifestă la lichide combustibile ale căror puncte de aprindere sunt sub temperatura normală ambientală, sunt mult mai greu de stinse deoarece temperaturile nu pot fi reduse suficient de mult pentru a contracta amestecul de aer și vapori situat deasupra suprafeței combustibilului sub limita joasă de

inflamabilitate a acestuia [13]. Răcirea flăcărilor materialelor combustibile solide care ard reduce, de asemenea, fluxul termic radiativ către suprafața materialului combustibil și rata pirolizei materialului combustibil. Așa cum se poate observa în figura 4 B, reacția de ardere are loc în interiorul zonei poroase bogate în carbon care se formează la suprafața materialului combustibil [11].

Reducerea concentrației de oxigen, are un rol mai important decât răcirea flăcărilor [14]. Ținând cont de faptul că volumul apei rezultat în urma vaporizării la 100 °C se mărește de cca 1600 – 1700 de ori, refularea ceții de apă sub forma unor picături mici în interiorul unui compartiment de incendiu cu temperaturi ridicate conduce la vaporizarea rapidă a apei, dilatarea volumului acesteia și dislocarea aerului de către aburi. Testele [12], [9], [14], [15] efectuate în special asupra combustibililor lichizi confirmă faptul că reducerea concentrației de oxigen este principalul mecanism prin care ceața de apă produce stingerea flăcărilor atât în interiorul încăperilor cât și în aer liber, prin intermediul unei concentrații mari de vapori de apă. Concentrația vaporilor de apă la nivelul suprafeței materialului combustibil care arde poate fi făcută fie prin acoperirea incendiului care se manifestă în interiorul unei încăperi, fie prin direcționarea și aplicarea jetului cu suficientă forță, valoarea ridicată a impulsului jetului împingând vaporii de apă la nivelul suprafeței combustibilului. În general, gazele și vaporii inflamabili degajați prin arderea hidrocarburilor încetează să mai ardă la concentrații ale oxigenului sub 13 %, în timp ce materialele solide combustibile caracterizate prin reziduu carbonizat pot arde până la concentrații ale oxigenului de 7 % [11].

Blocarea radiației termice constă în oprirea propagării incendiului către materialele combustibile neafectate încă de incendiu și reducerea procesului de piroliză. Studiile teoretice [16], [17] au arătat că reducerea radiației termice este influențată de diametrul și de densitatea masică a picăturilor. Astfel, pe măsură ce concentrația picăturilor cu diametrul mai mic de 50 μm crește, se mărește și gradul reducerii radiației termice. De asemenea, considerațiile teoretice [18] sugerează faptul că ceața de apă, respectiv aburii care pătrund în spațiul dintre flăcări și suprafața materialului combustibil reduce fluxul termic radiativ către suprafața materialului.

Diluarea amestecului de vapori combustibili și aer constă în faptul că aerul, respectiv vaporii de apă antrenați de jetul de ceață de apă pot dilua amestecul aer-vapori degajați de materialele combustibile care ard, sub limita inferioară a inflamabilității. Diluarea amestecului de aer și vapori combustibili este considerat un mecanism de stingere secundar, deoarece este foarte greu de realizat stingerea incendiului doar prin aplicarea acestui mecanism. Amestecul realizat la nivelul materialelor combustibile care ard este deseori turbulent și neuniform, fiind foarte probabil să existe întotdeauna anumite zone de aer și vapori combustibili aflate în intervalul de inflamabilitate.

Efectele cinetice ale ceții de apă asupra flăcărilor constau în faptul că, uneori, arderea unui lichid combustibil se intensifică în urma refulării ceții de apă în primele secunde, rata de ardere mărindu-se pentru anumite perioade de timp. Intensificarea temporară a arderii este atribuită, conform concluziilor obținute în urma efectuării mai

Analiza comparativă a influenței principalilor parametri asupra eficientizării stingerii cu apă a incendiilor

multor teste [19], [20], efectului picăturilor de apă care lovesc suprafața materialului combustibil, determinând creșterea ratei de producere a vaporilor combustibili. Au fost efectuate teste în scopul analizării evoluției în timp a HRR, conform figurii 7, în urma stingerii heptanului și ulterior motorinei, care ardeau în tăvi, dispuse în aer liber.

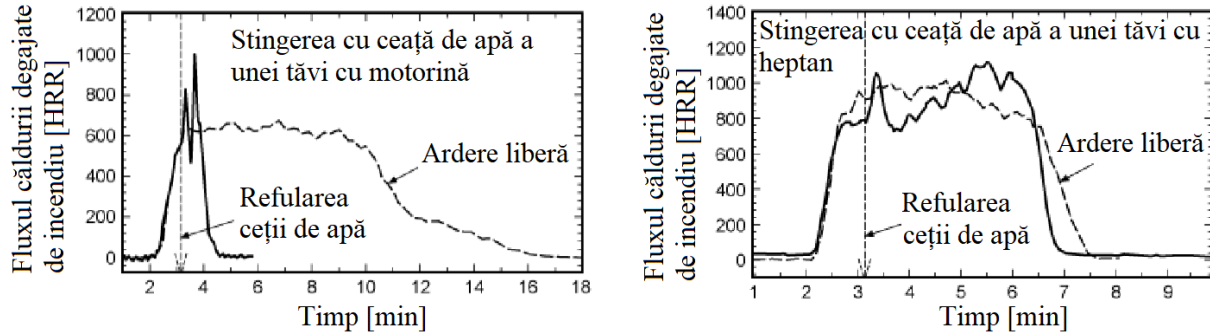


Figura 7 Evoluția în timp a HRR în cazul stingerii unor tăvi cu motorină și heptan folosind ceață de apă [8]

Spre deosebire de cazul stingerii motorinei, unde se constată o creștere pentru scurt timp a HRR urmată de stingerea completă în următoarele 60 sec, în situația stingerii heptanului, are loc, de asemenea, o creștere pentru scurt timp a HRR urmată de o stingere parțială și apoi de o creștere continuă a ratei de ardere a heptanului. Jetul de ceață de apă nu a reușit să stingă focul, iar flăcările turbulente au continuat până când combustibilul a fost consumat.

5. Influența principalelor caracteristici ale jetului apei refulate în urma utilizării țevilor de refulare și a instalațiilor fixe asupra eficienței stingerii incendiilor

Stingerea incendiilor poate fi realizată fie manual, prin utilizarea țevilor de refulare, fie automat, prin utilizarea unor instalații fixe de stingere, precum instalația de sprinklere sau instalația de ceață de apă. Dintre caracteristicile principale ale jetului apei refulate care influențează în mod direct eficiența stingerii incendiilor pot fi enumerate următoarele: distribuția dimensiunii picăturilor de apă; densitatea fluxului de apă – raportul dintre masa picăturilor de apă suspendate și unitatea volumului încăperii; impulsul jetului – viteza cu care apa este refulată către baza focarului de incendiu.

5.1. Influența distribuției dimensiunii picăturilor de apă asupra stingerii incendiilor

Distribuția dimensiunii picăturilor de apă este una dintre principalele caracteristici ale jetului refulat, cu impact direct asupra eficienței stingerii incendiilor, deoarece, cu cât suprafața picăturii este mai mică, cu atât cantitatea de căldură absorbită va fi mai mare. Astfel, cu cât numărul picăturilor cu dimensiune mică este mai mare, cu atât eficiența stingerii va fi mai ridicată. Distribuția dimensiunii picăturilor se referă la intervalul dimensiunilor picăturilor conținute într-un jet de apă

sau de ceață de apă, fiind dependentă de locația picăturilor în interiorul jetului, în centru sau către marginile exterioare, respectiv de timp.

În cazul unei refulări continue, distribuția dimensiunii picăturilor de apă este influențată de distanța față de duza / țeava de refulare, putând avea loc coliziunea picăturilor cu alte picături sau cu suprafețele încăperii. În cazul unei refulări de scurtă durată, distribuția dimensiunii picăturilor măsurată într-o anumită zonă este influențată de timp, datorită faptului că picăturile cu dimensiuni mai mari se deplasează rapid, părăsind zona respectivă, rămânând astfel picături cu dimensiuni mici, caracterizate de viteză mică de deplasare.

A fost realizată o clasificare a sistemelor de ceață de apă în funcție de distribuția dimensiunii picăturilor de apă, dimensiunea fiind reprezentată de diametrul mediu volumic al acestora [21]. Diametrul mediu volumic reprezintă diametrul unei picături de apă care are același volum cu media volumului tuturor picăturilor. Astfel, în cazul clasei I, 90 % din totalul picăturilor au diametrul mediu volumic mai mic de 200 μm , în cazul clasei a II-a, 90 % din totalul picăturilor au diametrul mediu volumic cuprins în intervalul 200 μm – 400 μm , iar în cazul clasei a III-a, 90 % din totalul picăturilor au diametrul mediu volumic cuprins în intervalul 400 μm – 1000 μm . Un număr mare de țevi de refulare și sprinklere au diametrul mediu volumic al picăturilor de apă mai mare de 400 μm [5].

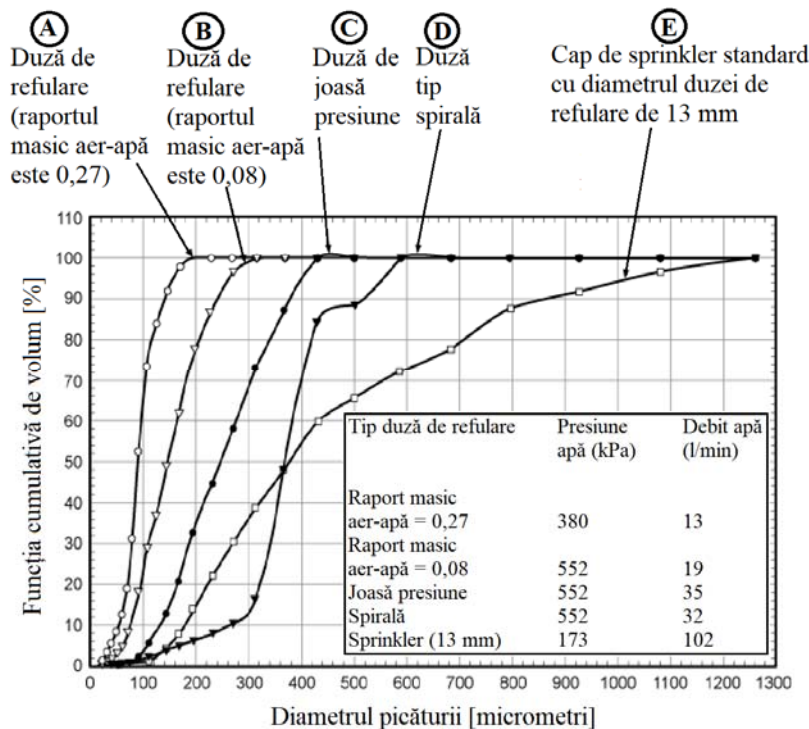


Figura 8 Variația funcției cumulative de volum a picăturilor de apă în funcție de diametrul acestora, pentru diferite duze de refulare a instalației cu ceață de apă, A, B, C, D, respectiv cu sprinklere E [8]

În figura 8 este analizată variația funcției (probabilității) cumulative a volumului picăturilor de apă cu diametrul acestora, în cazul utilizării unor duze de refulare diferite, caracteristice instalației cu ceață de apă și sprinklere. Funcția

Analiza comparativă a influenței principalilor parametri asupra eficientizării stingerii cu apă a incendiilor

cumulativă de volum reprezintă probabilitatea ca diametrul mediu de volum al picăturilor de apă refulate să fie mai mic sau egal cu o valoare dată. De exemplu, în cazul instalației cu sprinklere, există o probabilitate de 10 % ca diametrul mediu de volum al picăturilor să fie mai mic de cca 200 μm . Astfel, s-a realizat o analiză comparativă a distribuției dimensiunii picăturilor măsurate la o distanță de 0,9 m de duză, presiunea de refulare fiind mai mică de 11,9 bar.

5.2. Densitatea fluxului apei refulate necesară stingerii incendiilor

Densitatea fluxului apei refulate reprezintă o caracteristică importantă în ceea ce privește stingerea incendiilor, fiind exprimată fie în $\text{l}/\text{min} \cdot \text{m}^2$, fie în $\text{l}/\text{min} \cdot \text{m}^3$.

În cazul stingerii manuale a incendiilor folosind țevile de refulare, în vederea eficientizării acțiunii de stingere, este necesară o distribuție uniformă a apei. Distribuția apei, denumită și densitatea fluxului apei refulate, poate fi determinată folosind testul standard SS 3500, 1987. Proporția zonei în care nu a fost refulată apă nu trebuie să fie foarte mare. De asemenea, valoarea maximă a densității fluxului apei refulate nu trebuie să fie foarte mare comparativ cu valoarea medie. În cadrul unui studiu efectuat pentru a observa influența țevilor de refulare asupra răcirii gazelor de ardere, se analizează fluxul densității apei refulate prin intermediul a două țevi de refulare diferite, analiza comparativă fiind prezentată în figura 9.

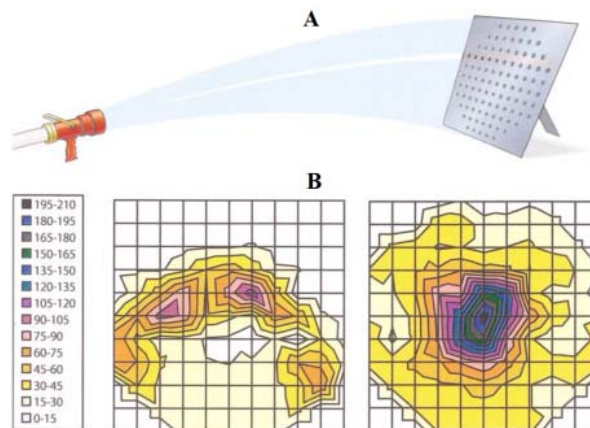


Figura 9 Densitatea fluxului apei refulate: mod de determinare folosind testul standard SS 3500, 1987 (A); analiză comparativă în urma folosirii a două țevi de refulare diferite (B) [5]

În figura 10 este prezentată variația densității fluxului apei refulate în funcție de distanța dintre țeava de refulare și zona în care se manifestă incendiul, pentru diferite valori ale debitului și presiunii, unghiul conic al jetului fiind de 30° [5].

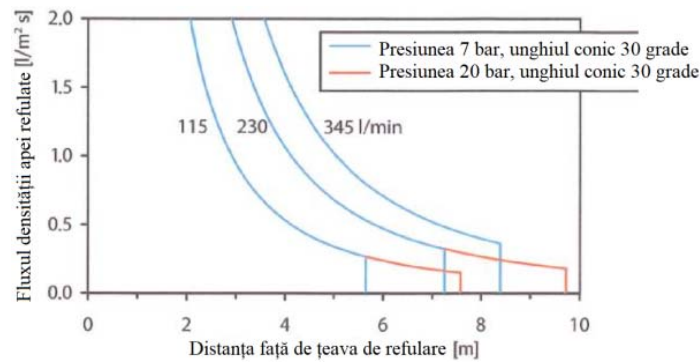


Figura 10 Variația fluxului densității apei refulate cu distanța dintre țeava de refulare și zona în care se manifestă incendiul, pentru valori diferite ale debitului și presiunii [5]

Fiecare țeavă de refulare are o distanță normată față de incendiu la care poate fi folosită, în funcție de traiectoria jetului și distribuția dimensiunilor picăturilor. Dacă țeava de refulare se află la distanță mare față de incendiu, este nevoie de o traiectorie mai mare, motiv pentru care modelul jetului va fi modificat. În cazul unui jet având forma ideală a unui con, gravitația fiind neglijată, valoarea medie a fluxului densității apei refulate [l/m^2s] poate fi estimată astfel:

$$q_{medie}'' = \frac{q}{\pi(l \tan(\alpha/2))^2} \quad (5)$$

unde

q_{medie}'' este valoarea medie a densității fluxului apei refulate [l/m^2s];

q – debitul apei refulate [l/s];

l – distanța țevii de refulare față de zona în care se manifestă incendiul [m];

α - unghiul conic al jetului [$^\circ$].

Astfel, se constată că valoarea densității medii a fluxului apei refulate este invers proporțională cu pătratul distanței țevii de refulare față de incendiu. Când această distanță este mică, densitatea fluxului apei refulate este de câteva ori mai mare decât valoarea necesară stingerii incendiului. Cu cât jetul este mai compact, cu atât mai mare este densitatea fluxului și mai mică suprafața acoperită de apa refulată. Dacă distanța dintre țeava de refulare și incendiu este mare, este necesară utilizarea unui debit mare și a unui unghi conic al jetului mic pentru ca apa să fie refulată acolo unde se dorește. Astfel, valoarea medie a densității fluxului apei refulate este mare acolo unde jetul lovește focul, fiind nevoie ca jetul să fie mutat energic pentru a acoperi o suprafață cât mai mare [5].

Stingerea automată a incendiilor prin utilizarea instalației de sprinklere presupune faptul că, odată cu creșterea densității fluxului apei refulate, exprimată în $l/min \cdot m^3$, sau în $l/min \cdot m^2$, peste valoarea critică, timpul necesar pentru controlul sau stingerea incendiului scade rapid. În figura 11 este prezentat faptul că, prin creșterea valorii densității fluxului apei refulate, se reduce timpul necesar stingerii incendiului [10].

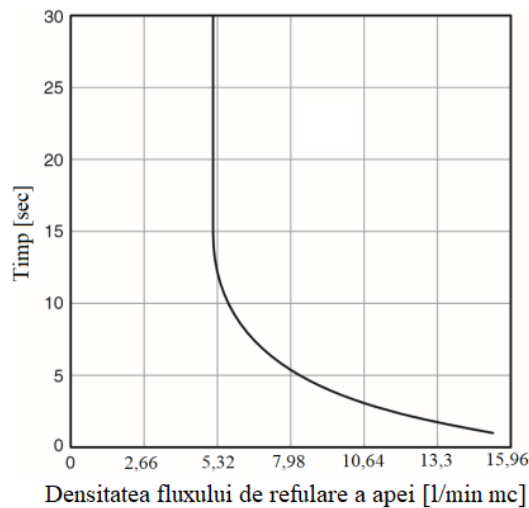


Figura 11 Corelația dintre densitatea fluxului de refulare a apei și timpul necesar stingerii incendiului [10]

Densitatea fluxului apei refulate este direct proporțională cu gradul riscului de incendiu al clădirilor cu diferite destinații. Astfel, există cinci clase principale de risc de incendiu, și anume, risc scăzut, risc moderat 1, risc moderat 2, risc ridicat 1 și risc ridicat 2. *Riscul scăzut* este caracteristic clădirilor cu destinația de biserică, club, educație, spital, adăpost de animale, muzeu, birou, clădiri instituționale, clădiri rezidențiale, mansarde/poduri neutilizate – cantitatea și gradul de combustibilitate al materialelor este mic, incendiile având valori ale fluxului căldurii degajate scăzute. *Riscul moderat 1* este specific clădirilor cu destinația de zone de showroom-uri auto, brutării, baruri, realizarea produselor lactate, a produselor electronice, a sticlei, spălătorii - gradul de combustibilitate este scăzut, există cantități moderate de materiale combustibile, depozitarea pe verticală nu depășește 2,4 m, fluxul căldurii degajate de incendiu fiind moderat. *Riscul moderat 2* este specific clădirilor cu destinația de hambare și grajduri, distilerii, uscătorii, librării, service-uri auto, industria chimică - cantitatea și gradul de combustibilitate al materialelor este moderat, depozitarea în plan vertical a materialelor cu un flux al căldurii degajate moderat nu depășește 3,6 m, iar a materialelor cu un flux al căldurii degajate mare nu depășește 2,4 m. *Riscul ridicat 1* este specific clădirilor cu destinația de hangare de aeronave, prelucrarea PAL-ului, textile, tapițerii, sală gaterie - cantitatea și gradul de combustibilitate al materialelor este foarte ridicat, fiind prezente praful, scamele sau ale materiale care conduc la o dezvoltare rapidă a incendiilor, cu valori ridicate ale fluxului căldurii degajate, în absența sau în prezența unei mici cantități de lichide inflamabile. *Riscul ridicat 2* este specific clădirilor cu destinația de prelucrare a materialelor plastice, parcări auto prevăzute cu lifturi, depozitarea lichidelor inflamabile – cantitatea de lichide combustibile sau inflamabile este de la moderată la însemnată [8], [22]. Conform figurii 12 se constată că, odată cu creșterea suprafeței încăperii și a gradului riscului de incendiu este necesară utilizarea unor valori mai mari ale densității fluxului apei refulate pentru stingerea incendiului.

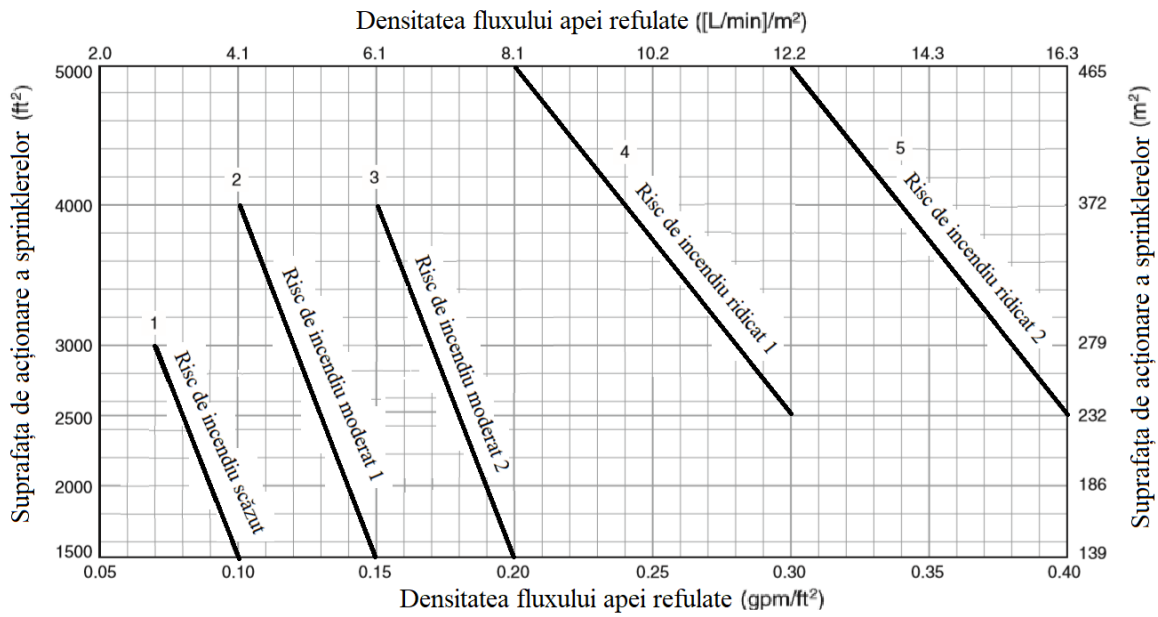


Figura 12 Variația densității de refulare a apei în funcție de suprafața încăperii, pentru tipurile de riscuri de incendiu asociate clădirilor cu diferite destinații [8]

Stingerea automată a incendiilor prin utilizarea instalației de ceață de apă este caracterizată de o densitate neuniformă a fluxului ceții de apă pulverizate. Astfel, în situația utilizării a două duze de refulare situate la 3 m deasupra podelei, la o distanță de 2 m între ele, pentru stingerea unei tăvi cu motorină și a unei tăvi cu heptan, valoarea densității fluxului de apă a variat de la 17,2 l/min · m² sub duza de refulare, la 3 l/min · m² la marginile exterioare, respectiv la 6,6 l/min · m² la mijlocul distanței dintre cele două duze, așa cum se poate observa în figura 13.

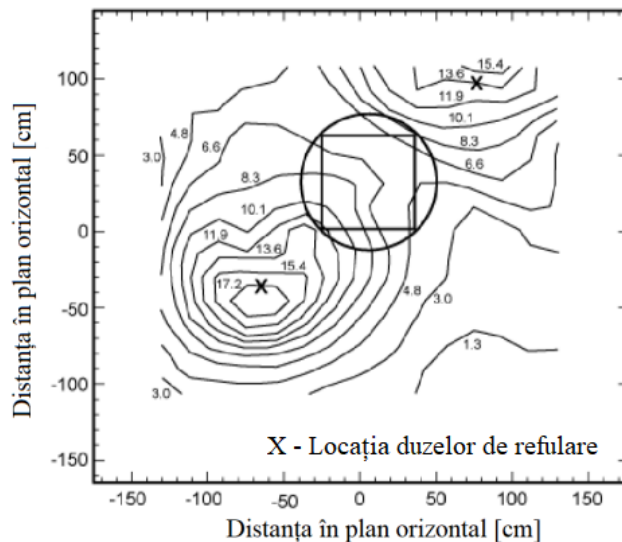


Figura 13 Influența distanței față de duza de refulare asupra densității fluxului apei refulate [8]

În situația în care cele două tăvi cu combustibil au fost plasate sub duzele de refulare, stingerea s-a realizat în mai puțin de 10 secunde. În situația în care tăvile cu

combustibil au fost plasate la mijlocul distanței dintre cele două duze de refulare, stingerea motorinei s-a realizat într-un timp mai mare, iar în cazul heptanului stingerea nu s-a realizat. Astfel, cu cât densitatea fluxului apei refulate este mai mare, cu atât timpul necesar stingerii incendiului este mai mic. Majoritatea duzelor concentrează un mare procent din jetul ceții de apă în centrul conului de refulare deoarece se creează o presiune negativă în interiorul conului ceea ce conduce la atragerea picăturilor refulate către marginile exterioare spre interior [8].

5.3. Influența impulsului generat de apa pulverizată asupra stingerii incendiului

Impulsul jetului de apă refulat reprezintă un parametru important în ceea ce privește eficiența stingerii incendiilor, fiind influențat de trei factori: viteza de deplasare a picăturilor de apă ce compun jetul, direcția acestuia față de flăcări, respectiv masa picăturilor de apă refulate în interiorul flăcărilor sau pe suprafața materialelor care ard. Cu cât se poate exercita un control mai mare asupra impulsului jetului, cu atât mai mare va fi capacitatea de a controla volumul total de apă și timpul necesar stingerii incendiului, precum și pagubele produse de acțiunea apei asupra proprietăților afectate de incendiu și / sau asupra celor adiacente.

În urma utilizării țevilor de refulare, prin folosirea unui jet pulverizat, având unghiul conic mai mare de 50° și dimensiuni mai mici ale picăturilor de apă decât în cazul jetului compact, impulsul jetului este transferat aerului pe o distanță de câțiva metri față de țeavă. Astfel, cantitatea de aer antrenată de jetul de apă poate conduce la stingerea incendiului prin întreruperea continuității alimentării flăcării cu gazele de piroliză și a flăcării propriu-zise. De asemenea, cu cât viteza picăturilor la ieșirea din țeavă este mai mare, cu atât acestea se deplasează pe o distanță mai mare, chiar dacă au dimensiunea mai mică.

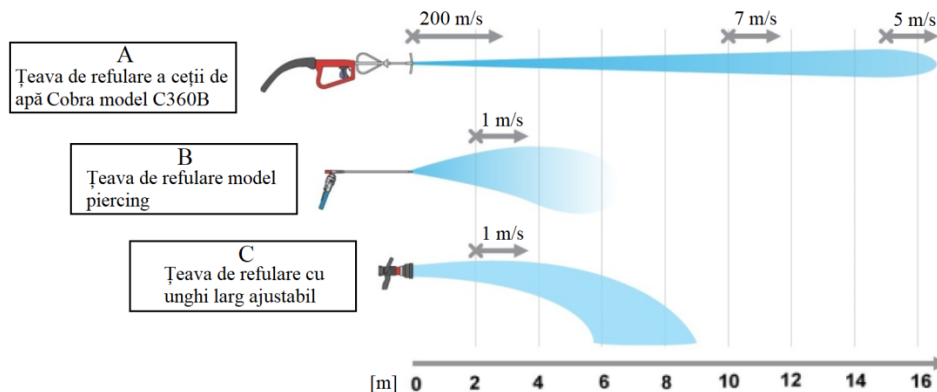


Figura 14 Analiza comparativă variației distanței de deplasare a picăturilor de apă în funcție de viteza acestora la ieșirea din țeavă, pentru diferite tipuri de țevi de refulare[23]

Conform figurii 14, țeava de refulare tip A produce ceață de apă, picăturile având viteza de 200 m/s la ieșirea din țeavă, iar țeava de refulare tip B, utilizată în special pentru a trece prin pereții și podelele clădirilor, respectiv tip C au viteza

picăturilor la ieșirea din țevă de 1 m/s. Cele trei țevi au dimensiunea picăturilor mai mică de 200 μm , 700 μm , respectiv 900 μm , în timp ce distanța de deplasare a picăturilor de apă este de minim 16 m, 6 m, respectiv 9 m. Cu cât distanța de deplasare a picăturilor este mai mare, cu atât acestea vor absorbi o cantitate mai mare de căldură de la incendiu. Folosind programul de simulare Fire Dynamic Simulator [25], a fost efectuată o analiză comparativă privind eficiența stingerii în urma utilizării țevii de stingere folosind hidro-perforarea și a unui sistem joasă presiune (presiune mai mică de 20 bar), caracteristicile jetului în cazul celor două sisteme fiind: debitul, 60 l/min, respectiv 100 l/min, viteza inițială a picăturilor, 220 m/s, respectiv 65 m/s și diametrul mediu Sauter, 162 μm , respectiv 1000 μm . O valoare mai mare a impulsului picăturilor crește gradul de amestecare al gazelor ceea ce conduce la omogenizarea temperaturii și implicit la creșterea valorii acesteia în apropierea picăturilor, rezultând mărirea vitezei răcirii gazelor și a vaporizării picăturilor.

În cazul instalației fixe de sprinklere, în momentul acționării acesteia, cantitatea picăturilor de apă care trec prin flăcări și ajung pe suprafața materialelor care ard este influențată de impulsul jetului. Aceasta poate fi fie calculată, în baza datelor referitoare la fluxul căldurii degajate în zona tavanului, distribuția unghiulară a picăturilor de apă, fluxul apei refulate și viteza picăturilor de apă în zona duzei, fie măsurată, așa cum se poate observa în figura 15.



Figura 15 Instalație de măsurare a cantității picăturilor de apă care trec prin flăcări și ajung pe suprafața materialelor care ard [8]

Sprinklerele care au dimensiuni mai mari ale duzelor de refulare produc picături de apă cu dimensiuni mai mari, caracterizate printr-un impuls al picăturii mai mare. Astfel, valoarea ridicată a masei picăturii coroborată cu valoarea ridicată a vitezei acesteia conduc la obținerea unui impuls al jetului de apă suficient de mare cât să pătrundă prin flăcări și să ajungă pe suprafața materialelor care ard.

În ceea ce privește instalațiile fixe de stingere cu ceață de apă, influența asupra impulsului jetului este dată nu doar de caracteristicile duzei de refulare, ci și de modul în care duzele pot fi amplasate pentru a acoperi cât mai bine zona afectată de incendiu. Astfel, în situația în care se folosește o duză cu un unghi mare de deschidere al jetului, aceasta este mai puțin eficientă, deoarece este acoperită o zonă mai mică decât situația în care se folosesc mai multe duze cu unghi mic de deschidere al jetului, obținându-se astfel o distribuție liniară, pe o suprafață mai mare.

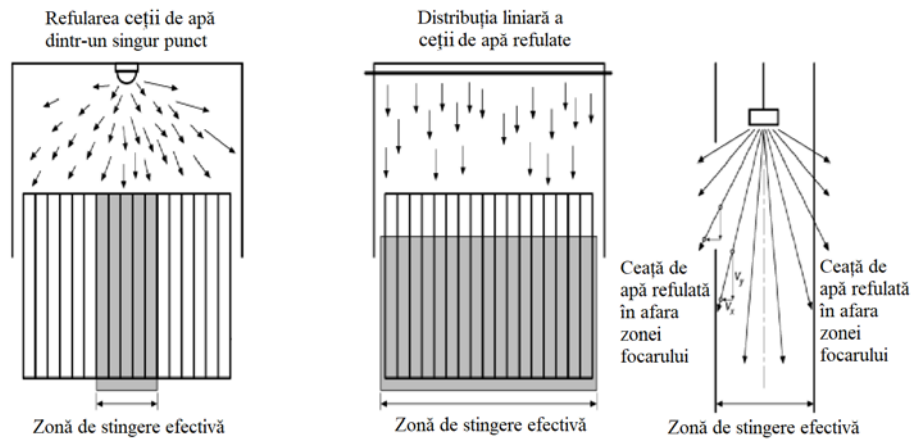


Figura 16 Représentarea comparativă a zonelor de stingere eficiente în cazul utilizării uneia sau mai multor duze de refulare [8]

Conform figurii 16, controlul direcției de refulare sau al impulsului jetului poate fi mai important decât distribuția dimensiunii picăturilor de apă sau debitul masic al acestuia [8]. Astfel, în cazul utilizării unei singure duze de refulare, zona efectivă de stingere este mai mică decât în cazul utilizării mai multor duze, în acest caz, distribuția ceții de apă fiind liniară.











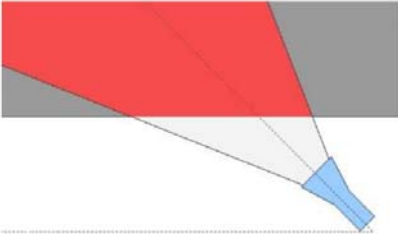
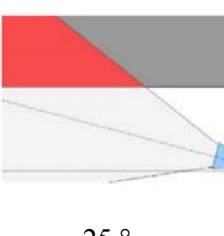
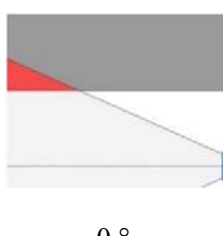
6. Influența altor parametri asupra eficienței stingerii incendiilor

Dimensiunea picăturilor apei refulate este un parametru deosebit de important. Este necesar ca picăturile de apă să poată să pătrundă prin flăcări și să ajungă pe suprafața materialului fierbinte care arde, în vederea răcirii acestuia și întreruperii procesului de ardere. Cu cât dimensiunea picăturilor de apă este mai mică, cu atât cantitatea de energie termică absorbită de la incendiu este mai mare, fiind astfel utilizat un volum mai mic de apă. Conform unui studiu efectuat [25], absorbția a 30 % până la 60 % din energia termică totală degajată de un incendiu poate fi suficientă pentru stingerea acestuia. În urma unor calcule efectuate [8] s-a constatat că diametrul optim al unei picături de apă se află în intervalul 0,3 mm – 1 mm. Astfel, nivelul cel mai ridicat al eficienței stingerii se obține în situația în care picăturile sunt destul de uniforme în dimensiune.

De asemenea, tehnica de refulare reprezentată de modul de manevrare al țevii de refulare, de unghiul conic al jetului și unghiul de înclinare al țevii față de planul orizontal, au o mare importanță asupra eficienței răcirii stratului de fum și gaze fierbinți, așa cum se poate observa în tabelul 1. Prin răcirea gazelor fierbinți se realizează reducerea temperaturii în interiorul încăperii în scopul pătrunderii cât mai rapide a echipajelor de intervenție și a refulării apei direct asupra focarului. Dacă țeava este orientată astfel încât picăturile de apă lovesc rapid tavanul, efectul de răcire va fi diminuat. Cu cât traiectoria picăturilor de apă este mai mare în interiorul stratului de fum, cu atât efectul de răcire va fi mai mare.

Tabel 1

Influența unor parametri diferiți asupra eficienței răcirii fumului și gazelor fierbinți prin refularea apei sub formă de impulsuri scurte [26]

Criteriile de răcire ale stratului de fum și gaze fierbinți prin refularea apei sub formă de impulsuri scurte	Gradul de eficiența a apei de răcire a fumului și gazelor fierbinți (procentul de transformare a apei din stare lichidă în stare gazoasă)			
	Eficient Peste 75 %	Adecvat Între 75 % și 50 %	Ineficient Între 50 % și 25 %	Mediocr Sub 25 %
Diametrul mediu al picăturii [mm]	 0,3 mm	 0,2 mm sau 0,4 mm	 0,1 mm sau 0,5 mm	 < 0,1 mm sau > decât 0,5 mm
Unghiul conic al jetului 	 45 °	 30 °	 90 °	 120 °
Înclinarea țevii de refulare față de planul orizontal 	 Peste 45 °	 25 °	 0 °	

Conform tabelului 2, eficientizarea stingerii incendiilor este influențată și de ajutajele țevilor de refulare, utilizarea acestora conducând la obținerea unor valori diferite ale absorbției de căldură.

Tabel 2

Capacitatea de absorbție a căldurii a diferitelor ajutaje [27]

Echipament	Absorbție maximă de căldură [MJ/kg]	Debit masic al apei [kg/s]	Capacitatea absorbției de căldură [MW]
Ajutaj standard (7mm)	2,6	1,3	1,4
Ajutaj standard (14mm)	2,6	4,6	5
Ajutaj standard (22mm)	2,6	9,2	7,2
Ajutaj de capacitate mare	2,6	16,7	13
Lance cu ceață de apă	3,6	1,2	2,6
Ajutaj ce produce ceață de apă	3,6	5	11

Analiza comparativă a influenței principalilor parametri asupra eficientizării stingerii cu apă a incendiilor

Viteza ventilației longitudinale și poziția materialelor combustibile care ard, și anume o stivă de lemne în cazul studiului efectuat [28], față de duza de refulare a unei instalații de stingere cu ceață de apă influențează eficiența stingerii. Astfel, așa cum se poate vedea în figura 18, se poate atinge o viteză a ventilației longitudinale optime pentru stingerea incendiului într-un timp cât mai scurt, însă, după atingerea acestei valori, odată cu creșterea vitezei aerului se mărește și timpul de stingere a incendiului. De asemenea, cu cât distanța dintre stivă și duza de refulare este mai mică, cu atât timpul necesar stingerii este mai mic.

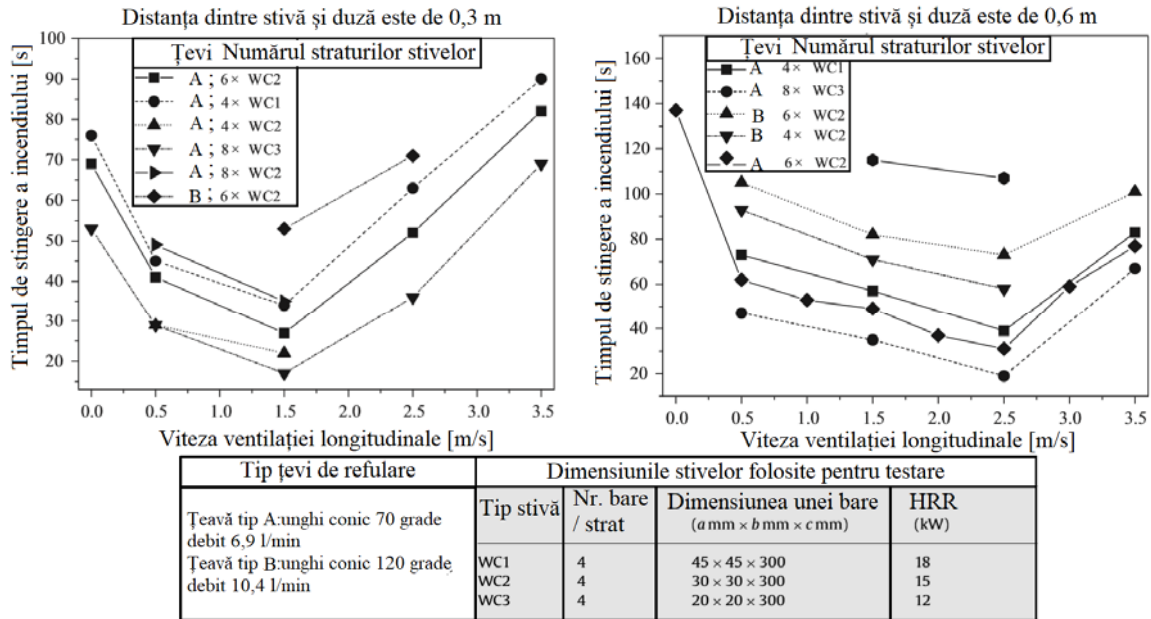


Figura 18 Variația timpului de stingere a incendiului, care se manifestă la trei tipuri diferite de stive, cu viteza longitudinală a vântului, în cazul utilizării a două tipuri de duze de refulare [28]

De asemenea, debitul de refulare are un rol important în eficientizarea stingerii.

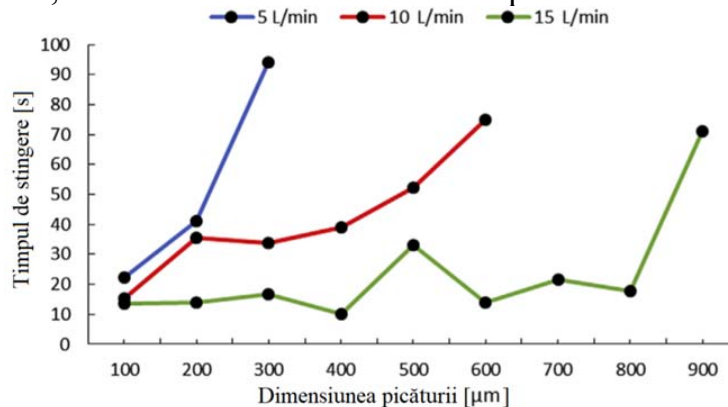


Figura 19 Variația timpului stingerii incendiului în funcție de dimensiunea picăturilor de apă, pentru debite diferite de refulare [29]

Conform figurii 19, cu cât debitul de refulare este mai mare, iar dimensiunea picăturii este mai mică, cu atât timpul necesar stingerii incendiului scade, ceea ce conduce la o creștere a eficienței stingerii incendiilor.

7. Concluzii

Eficiența stingerii incendiilor reprezintă un obiectiv de realizat foarte important, pe de o parte, în vederea reducerii costurilor, iar pe de altă parte, pentru limitarea pagubelor provocate construcțiilor afectate de incendiu sau a celor adiacente acestora, din cauza volumului de apă refulat în exces.

Apa este agentul de stingere a incendiilor utilizat la scara largă. Stingerea incendiilor se poate realiza în diferite moduri, în acest studiu fiind analizată, de exemplu, stingerea manuală, prin utilizarea țevelor de refulare și automată, prin utilizarea instalațiilor fixe de stingere cu sprinklere și ceață de apă. Astfel, în funcție de modul în care se realizează lichidarea incendiilor, apa dezvoltă diferite mecanisme generale de stingere a acestora.

Astfel, în tabelul 3 sunt prezentate mecanismele generale de stingere a incendiilor în urma refulării apei, manual, folosind țevele de refulare și automat, folosind instalațiile fixe de stingere cu sprinklere și ceață de apă.

Tabelul 3

Mecanismele de stingere a incendiilor în urma utilizării apei

Nr. crt.	Modul de stingere a incendiilor		Mecanismele apei de stingere a incendiilor	
1.	Manual	Prin utilizarea țevelor de refulare	Absorbția căldurii degajate de incendiu de către apă	
			Reducerea concentrației de oxigen	
			Efectul de răcire / ecranarea suprafeței	
			Reducerea radiației termice	
			Efectul de suflare	
2.		Prin utilizarea instalației de sprinklere	Efectul de răcire	
			Efectul de „înăbușire” a incendiului	
3.	Automat	Prin utilizarea instalației de ceață de apă	Mecanisme de stingere primare	Absorbția căldurii / Răcire
				Reducerea concentrației de oxigen
				Blocarea radiației termice
			Mecanisme de stingere secundare	Diluarea amestecului de vapori combustibili și aer
				Efectele cinetice ale ceței de apă asupra flăcărilor

În cadrul studiului a fost realizată o analiză comparativă a influenței principalilor trei parametri ai jetului de apă refulat prin utilizarea țevelor, a instalațiilor fixe cu sprinklere și cu ceață de apă, în vederea eficientizării stingerii incendiilor. Primul parametru analizat a fost distribuția dimensiunii picăturilor de apă refulată, constatându-se că, cu cât dimensiunea picăturilor este mai mică, cu atât suprafața acestora, raportată la volum, este mai mare, fiind astfel absorbită o cantitate mai mare de energie termică. Al doilea parametru caracteristic jetului de apă care influențează eficiența stingerii îl constituie densitatea fluxului apei refulate, existând, de exemplu, în cazul instalației de sprinklere, anumite valori utilizate în funcție de tipul riscului de incendiu aferent construcțiilor cu diferite destinații. Astfel, în funcție de dimensiunea

suprafeței încăperii în care se utilizează instalația de sprinklere, densitatea fluxului apei refulate ia valori în intervalul $2,84 - 4,1 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2$ - în cazul riscului de incendiu scăzut, $4,1 - 8,1 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2$ - în cazul riscului de incendiu moderat, $8,1 - 16,3 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2$ - în cazul riscului de incendiu ridicat. Al treilea parametru analizat a fost valoarea impulsului jetului apei refulate. Astfel, în cazul țevilor de refulare, o valoare ridicată a impulsului picăturilor conduce la mărirea vitezei răcirii gazelor de ardere și a vaporizării picăturilor.

De asemenea, este prezentată și importanța altor parametri care influențează în mod direct eficiența stingerii incendiilor, cum ar fi dimensiunea picăturilor de apă, utilizarea tehnicilor de refulare, dimensiunea ajutorajelor țevilor, viteza ventilației longitudinale, precum și valoarea debitului de refulare.

Astfel, cu cât picăturile de apă au un grad ridicat de uniformitate și o dimensiune mai mică, diametrul optim aflându-se în intervalul $0,3 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$, cu atât crește eficiența stingerii incendiilor.

Utilizarea tehnicilor de refulare este, de asemenea un parametru foarte important, constatându-se că, prin utilizarea unui unghi conic al jetului apei refulate de 45° și a unui unghi de înclinare a țevii față de planul orizontal de peste 45° , procentul eficienței stingerii este de peste 75 %.

Folosirea țevilor de refulare a apei prevăzute cu ajutoraje de dimensiuni mari conduce la creșterea capacității de absorbție de căldură a jetului format.

În cazul utilizării unei anumite viteze a ventilației longitudinale se obține un timp minim de stingere a incendiilor.

De asemenea, reducerea timpului de stingere a incendiilor se mai obține odată cu creșterea valorii debitului de refulare, de la 5 l/min la 15 l/min , concomitent cu refularea unor picături de apă cu dimensiuni cât mai mici, aflate în intervalul $0,1 \text{ mm} - 0,3 \text{ mm}$.

Acknowledgements

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

Referințe

- [1] C. R. Barnett, „Water Supply for Fire Fighting Purposes”, Proceedings of 50th Jubilee Year Conference, Institution of Fire Engineers, New Zealand Branch, 1979.
- [2] C. F. Dale, „Water Supply for Fire Protection”, Prentice-Hall Inc., Englewood, Cliffs, NJ, 1981.
- [3] <http://cfbt-us.com/wordpress/?p=1280>, accesat în data de 06.01.2020, ora 21.55.
- [4] The Society of Fire Protection Engineers (NZ) Technical Publication - Tp 2004/1, „Calculation Methods for Water Flows Used for Fire Fighting Purposes”.
- [5] S. Sårdqvist, „Water and other extinguishing agents”, Karlstad, Sweden: Räddnings Verket, 2002.
- [6] J. Gsell, „Assessment of Fire Suppression Capabilities of Water Mist – Fighting Compartment Fires with the Cutting Extinguisher”, Pg. Dip. Msc. Fire Safety Engineering, Academic year 2009 / 2010.
- [7] <http://cfbt-us.com/wordpress/?p=1299>, accesat în data de 06.01.2020, ora 22.15.

- [8] C. C. Grant, J. R. Hall, R. E. Solomon, „Fire Protection Handbook”, Twentieth Edition Volume I, 2008.
- [9] M. M. Braidech, J. A. Neale, “The Mechanism of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water”, NBFU Research Report No. 10, Underwriters Laboratories Inc., Chicago, IL, 1955.
- [10] P. Nash, D. J. Rasbash, „The Use of Water in Fire Fighting”, F.R. Note No. 202/1955, Fire Research Station, Borehamwood, UK, 1955.
- [11] D. Drysdale, „An Introduction to Fire Dynamics”, 1st ed., pp. 222-225, John Wiley and Sons, New York, 1985.
- [12] R. Wighus, “Extinguishment of Enclosed Gas Fires with Water Spray”, Proceedings of the Third International Symposium on Fire Safety Science, The University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland, 1991.
- [13] A. M. Kanury, „Ignition of Liquid Fuels,” The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd. ed., DiNunno, P.J., et al., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.
- [14] C. P. Hanauska, G. G. Back, „Halons: Alternative Fire Protection Systems, An Overview of Water Mist Fire Suppression Systems Technology”, Hughes Associates, Inc., Columbia, MD, 1993.
- [15] J. R. Mawhinney, „Water Mist Fire Suppression Systems for Marine Applications: A Case Study”, Proceedings of IMAS 94: Fire Safety on Ships—Developments into the 21st Century, Institute of Marine Engineers, London, UK, May 1994.
- [16] A. Coppalle, D. Nedelka, B. Bauer, „Fire Protection: Water Curtains”, Fire Safety Journal, 20, 1993, pp. 241-255. 23.
- [17] T. E. Ravigururajan, M. P. Beltrav, „A Model for Attenuation of Fire Radiation through Water Droplets”, Fire Safety Journal, 15: 2, 1989, pp. 171-181.
- [18] A. Jones, G. O. Thomas, „The Action of Water Sprays on Fires and Explosions”, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 71: Part B, 41-49, 1993.
- [19] J. R. Mawhinney, „Characteristics of Water Mist for Fire Suppression in Enclosures”, Proceedings of the Halon Alternatives Technical Working Conference, New Mexico Engineering Research Institute (NMERI), Albuquerque, NM, 1993.
- [20] M. A. Kokkala, „Extinction of Liquid Pool Fires with Sprinklers and Water Sprays”, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Statens Teniska Forskningscentral (Technical Research Centre of Finland), Espoo, Finland, 1989.
- [21] NFPA 750, „Water mist fire protection systems”, National Fire Protection Association, USA, 2006.
- [22]<https://www.slideshare.net/bajohnso/basic-guide-to-nfpa-13-occupancy-and-commodity-classifications>.
- [23] <http://www.ultrans.ro/produse-pompieri/cold-cut-cobra.html>, accesat în data de 04.02.2020 la ora 21.00.
- [24] R. Svensson, J. Lindström, R. Ochoterena, M. Försth, „CFD simulations of the Cutting extinguisher”, Fire Research SP Report 2014:43.
- [25] J. R. Mawhinney, B. Z. Dlugogorski, A. K. Kim, „A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist”, Fire Safety Science—Proceedings of the Fourth International Symposium at the Ottawa Congress Centre, Ottawa, Ontario, Canada, Kashiwagi, T., Ph.D., ed., International Association of Fire Safety Science, p. 51, 1994.
- [26] J. McDonough, K. Lambert, „Training with intent – effective hose stream techniques”, International Structural Fire Conference, Ryn, 09-10 June 2014.
- [27] S. Sårdqvist, „An engineering approach to fire-fighting tactics”, Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, 1996.
- [28] L. Chena, W. Zhub, X. Caia, L. Panc, G. Liaoa, „Experimental study of water mist fire suppression in tunnels under longitudinal ventilation”, Building and Environment 44, 446–455, 2009.
- [29] Z. Wang, W. Wang, Q. Wang, „Optimization of water mist droplet size by using CFD modeling for fire suppressions”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 44, 626-632, 2016.