

STUDIUL PREVENIRII ȘI STINGERII INCENDIILOR PRIN CUNOAȘTEREA CARACTERISTICILOR DE DECLANȘARE, EVOLUȚIE ȘI FUNCȚIONARE A MIJLOACELOR DE STINGERE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIE CIVILĂ ȘI INSTALAȚII
de către

Ing. Bogdan-Grigore Brănișteanu-Albulescu

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Adrian Retezan
prof.univ.dr.ing. Raul Zaharia
prof.univ.dr.ing. Theodor Mateescu
conf.univ.dr.ing. Daniela Teodorescu

Ziua susținerii tezei: 24.10.2018

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 2. Chimie | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 3. Energetică | 12. Ingineria sistemelor |
| 4. Ingineria Chimică | 13. Inginerie energetică |
| 5. Inginerie Civilă | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 6. Inginerie Electrică | 15. Ingineria materialelor |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management |
| 8. Inginerie Industrială | 17. Arhitectură |
| 9. Inginerie Mecanică | 18. Inginerie civilă și instalații |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2018

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
Tel./fax 0256 403823
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Inginerie Civilă și Instalații al Universității Politehnica Timișoara.

Lucrarea se adresează personalului implicat în proiectarea și executarea construcțiilor civile și industriale în vederea îndeplinirii cerinței esențiale securitate la incendiu. De asemenea, oferă informații cu privire la metode de cercetare în domeniul ingineriei securității la incendiu, precum și despre modele matematice ce stau la baza programelor de simulare privind dinamica fluidelor.

Nu în ultimul rând, sunt prezentate noțiuni privind dinamica fluidelor ce trebuie determinate atunci când sunt utilizate metodele ingineriei securității la incendiu. Modele analitice, precum și experimentale pentru determinarea ratei de căldură degajată se regăsesc în cuprinsul prezentei lucrări.

Totodată, lucrarea de doctorat prezintă un suport științific pentru activitățile viitoare de cercetare din domeniu, având în vedere că sunt evidențiate interacțiuni dintre diferitele sisteme de protecție împotriva incendiilor și parametri ce determină timpul de activare al instalațiilor de stingere de tip sprinkler.

Timișoara, Octombrie 2018

Brănișteanu-Albulescu Bogdan-Grigore

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat, domnul prof. dr. ing. RETEZAN Adrian pentru toată susținerea și coordonarea de care am beneficiat pe întreaga durată de desfășurare a proiectului doctoral.

Îi adresez, pe această cale, sincere mulțumiri, domnului col. (r) dr. ing. PIETREANU Costel-Marian care m-a susținut în mod constant în elaborarea proiectului de cercetare, oferindu-mi sfaturi și sugestii în ceea ce privește abordarea soluțiilor tehnice. Totodată, în calitate de conducător al Serviciului Avizare-Autorizare și Reglementări din cadrul Inspectoratului General pentru Situații de Urgență, mi-a oferit posibilitatea să particip activ la procesul de armonizare a legislației naționale, precum și la identificarea tuturor aspectelor de interes din domeniul securității la incendiu.

De asemenea, îi mulțumesc domnului lt. col. lect. univ. dr. ing. Anghel Ion pentru sprijinul acordat în realizarea încercărilor experimentale, precum și pentru colaborarea fructuoasă în întocmirea articolelor științifice rezultate în urma activității de cercetare.

Nu în ultimul rând, doresc să prezint mulțumiri părinților și soției mele, Brănișteanu-Albulescu Victoria, care m-au sprijinit atât moral, cât și financiar în vederea realizării obiectivelor aferente lucrării de cercetare.

Brănișteanu Albulescu, Bogdan Grigore

Studiul prevenirii și stingerii incendiilor prin cunoașterea caracteristicilor de declanșare, evoluție și funcționare a mijloacelor de stingere

Teze de doctorat ale UPT, Seria 18, Nr. 6, Editura Politehnica, 2018, 118 pagini, 69 figuri, 11 tabele.

ISSN:2393-4816

ISSN-L:2393-4816

ISBN:978-606-35-0241-5

Cuvinte cheie: sprinkler, indicele timpului de activare, camera standard ISO, rata de căldură degajată

Rezumat,

Teza prin conținutul său, răspunde la probleme majore de prevenire și stingere a incendiilor prin utilizarea instalațiilor de stingere cu sprinklere. Problemele legate de incendiile din clădiri și modul de limitare și stingere al acestora, evitând pierderea de vieți omenești și de pagube materiale sunt de actualitate în zilele noastre.

Abordarea analitică și experimentală în studiul prevenirii și stingerii incendiilor, particularizat la instalațiile de sprinklere, folosind cunoștințe teoretice fundamentale, programe specializate de calcul și un program experimental conceput de doctorand au condus la rezultate semnificative privind determinarea timpului de răspuns al sprinklerelor în funcție de o multitudine de parametri, precum și propunerile practice utile proiectanților sunt valoroase.

CUPRINS

Cuvânt înainte	3
1 INGINERIA SECURITĂȚII LA INCENDIU ÎN CONTEXTUL ACTUAL.....	10
1.1 Noțiuni generale.....	10
1.2 Necesitatea utilizării ingineriei securității la incendiu	11
1.3 Conceptul ingineriei securității la incendiu	13
1.3.1 Definierea nivelului minim de performanță	14
1.3.2 Îndeplinirea nivelurilor minime de performanță	15
1.4 Concluzii	18
2 Instalațiile de stingere de tip sprinkler – caracteristici de declanșare, funcționare și stingere	20
2.1 Noțiuni generale.....	20
2.2 Tipuri de instalații de stingere cu sprinklere	21
2.2.1 Instalații de stingere în sistem apă-apă	21
2.2.2 Instalații de stingere în sistem apă-aer	22
2.2.3 Instalații de stingere cu preacționare.....	22
2.2.4 Instalații de stingere cu deversare	23
2.3 Tipuri de capete sprinkler	23
2.3.1 Clasificare după tipul dispozitivului de declanșare.....	23
2.3.2 Clasificare după temperatura de declanșare	25
2.4 Parametri ce influențează timpul de răspuns al sprinklerelor	26
2.4.1 Indicele timpului de răspuns (RTI)	26
2.4.2 Coeficientul de transfer termic prin conducție C	29
2.5 Modele analitice de calcul pentru timpul de răspuns al sprinklerelor	30
2.5.1 Modelul Alpert	31
2.5.2 Modelul Evans – Stroup	33
2.5.3 Modelul Heskestad – Delichatsios.....	34
2.6 Concluzii	36
3 Programe computerizate de simulare a incendiilor.....	38
3.1 Noțiuni generale.....	38
3.2 Descrierea programelor de simulare privind dinamica fluidelor (CFD).....	39
3.2.1 Elementele ce alcătuiesc procesul de simulare	39
3.2.2 Reprezentarea ecuațiilor ce stau la baza acestor programe de simulare .	40
3.3 Reprezentarea turbulenței în programele de simulare privind dinamica fluidelor	50
3.4 Modelul de calcul pentru timpul de activare al sprinklerelor implementat în programul de simulare Fire Dynamics Simulator (FDS)	56
4 DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TIMPULUI DE ACTIVARE AL SPRINKLERELOR ÎN CAMERA STANDARD ISO	58
4.1 Obiectivele studiului	58
4.2 Descrierea experimentului	59
4.2.1 Prezentarea camerei standard ISO utilizate	59
4.2.2 Prezentarea aparatelor de măsură și a echipamentelor utilizate	61
4.3 Metoda Froude de reducere la scară	63
4.4 Procedura de lucru	65
4.5 Rezultatele experimentelor	66
4.5.1 Determinarea ratei de căldură degajate cu metoda consumului de oxigen ..	66
4.5.2 Determinarea ratei de căldură degajate cu metoda pierderii de masă	70

6-Cuprins

4.5.3	Determinarea ratei de căldură degajate cu ajutorul metodelor analitice .	73
4.5.4	Temperaturile înregistrate în interiorul compartimentului de incendiu pe perioada desfășurării experimentelor.....	74
4.5.5	Determinarea parametrilor asociați incendiului cu ajutorul metodelor de simulare	76
4.5.6	Determinarea ratei de căldură degajate cu ajutorul programului de simulare Fire Dynamic Simulator	77
4.5.7	Determinarea temperaturilor cu ajutorul programului de simulare Fire Dynamic Simulator.....	79
4.5.8	Determinarea timpului de activare al sprinklerelor.....	80
4.6	Interpretarea rezultatelor.....	81
4.7	Concluzii	82
5	Determinarea timpului de activare al sprinklerelor în interiorul tunelurilor rutiere	85
5.1	Particularități ale incendiilor în tunelurile rutiere.....	85
5.2	Obiectivele studiului	87
5.3	Alegerea ratei de căldură degajată	88
5.4	Prezentarea echipamentelor utilizate	89
5.5	Descrierea experimentului	92
5.6	Rezultate și discuții.....	94
5.6.1	Rezultatele încercărilor experimentale prin utilizarea alcoolului etilic.....	94
5.6.2	Rezultatele încercărilor experimentale prin utilizarea motorinei	96
5.6.3	Rezultatele încercărilor experimentale prin utilizarea benzinei	98
5.6.4	Evaluarea timpului de răspuns al sprinklerelor	100
5.7	Concluzii	101
6	Concluzii și contribuții personale	103
6.1	Concluzii generale	103
6.2	Contribuții personale	105
6.3	Direcții viitoare de cercetare	106
ANEXE	108
Bibliografie.....	113

LISTĂ FIGURI

Figura 1. Imagini din timpul incendiului produs la hotelul The Address Downtown .	12
Figura 2. Diferențe între curba standard ISO 834 și temperaturile unui incendiu ...	16
Figura 3. Reprezentarea schematică a metodologiei de calcul a timpului disponibil, respectiv a timpului necesar pentru evacuare în situații de urgență	17
Figura 4. Efectul instalațiilor de tip sprinkler asupra ratei de căldură degajată	21
Figura 5. Sprinkler cu element fuzibil	24
Figura 6. Sprinkler cu bulb de sticlă	24
Figura 7. Reprezentarea constantei de timp τ	27
Figura 8. Aparat de testare prin imersie	28
Figura 9. Clasificarea sprinklerelor în funcție de timpul de răspuns	30
Figura 10. Fenomenul de formare a jetului de gaze fierbinți în zona plafonului.....	32
Figura 11. Capacitatea calculatoarelor pentru rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes .	41
Figura 12. Reprezentarea sistemului de referință Lagrangian	42
Figura 13. Modalități de reprezentare a sistemelor de referință	43
Figura 14. Volum finit fix în spațiu prin care are loc curgerea unui lichid	43
Figura 15. Forma diferențială a ecuației de continuitate	45
Figura 16. Tensiunea aplicată fluidului	46
Figura 17. Formarea structurilor turbulente în cazul unui incendiu	50
Figura 18. Procesul de formare al structurilor turbulente	51
Figura 19. Ecuația de transport caracteristică vorticității	52
Figura 20. Rezolvarea turbulenței în RANS	53
Figura 21. Rezolvarea turbulenței în LES	55
Figura 22. Prezentarea schematică a camerei standard ISO	59
Figura 23. Vedere de ansamblu a camerei standard ISO	60
Figura 24. Dimensiunile camerei standard ISO la scara 1/3	60
Figura 25. Fotografie a recipientului de stocare a combustibilului lichid	61
Figura 26. Modul de amplasare a echipamentelor și instrumentelor de măsură	62
Figura 27. Fotografie din timpul calibrării echipamentelor de măsură	63
Figura 28. Colectarea gazelor fierbinți pentru determinarea ratei de căldură degajate	66
Figura 29. Exemplificarea procedurii de calcul a ratei de căldură degajate	67
Figura 30. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat în centrul camerei ...	69
Figura 31. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă peretele camerei	69
Figura 32. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă colțul camerei	70
Figura 33. Fotografie ce indică modul de amplasare al balanței electronice	70
Figura 34. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat în centrul camerei ...	71
Figura 35. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă peretele camerei	72
Figura 36. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă colțul camerei	72
Figura 37. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat în centrul camerei ...	73
Figura 38. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă peretele camerei	74
Figura 39. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă colțul camerei	74
Figura 40. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat în centrul camerei	75
Figura 41. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă peretele camerei	75
Figura 42. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă colțul camerei ...	76
Figura 43. Prezentarea modelului utilizat în FDS	77

8 – Listă figuri

Figura 44. Rata de căldură degajată în centrul camerei ISO	77
Figura 45. Rata de căldură degajată lângă peretele camerei ISO.....	78
Figura 46. Rata de căldură degajată lângă colțul camerei ISO.....	78
Figura 47. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat în centrul camerei	79
Figura 48. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă peretele camerei	79
Figura 49. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă colțul camerei ...	80
Figura 50. Efectul aerului exterior asupra incendiului în FDS.....	81
Figura 51. Timpul de activare în funcție de poziția focarului.....	82
Figura 52. Valoarea medie a ratei de căldură degajată în urma încercărilor experimentale	88
Figura 53. Fotografie din partea stângă a machetei experimentale	89
Figura 54. Anemometru AF210 în partea stângă și RS 327 în dreapta	90
Figura 55. Fotografie de prezentare a balanței electronice tip Kern.....	91
Figura 56. Unitate de stocare a datelor de tip VR-18 BrainChild	91
Figura 57. Modul de amplasare a termocuplurilor în interiorul machetei tunel	92
Figura 58. Valorile ratei de căldură degajată calculată cu pierderea de masă	93
Figura 59. Temperaturile rezultate în urma arderii alcoolului etilic în condiții de ventilare normală.....	94
Figura 60. Temperaturile rezultate în urma arderii alcoolului etilic în condiții de ventilare forțată.....	95
Figura 61. Fotografie pe parcursul arderii alcoolului etilic cu aparat foto în stânga și cameră cu termoviziune în dreapta	96
Figura 62. Temperaturile rezultate în urma arderii motorinei în condiții de ventilare normală.....	96
Figura 63. Temperaturile rezultate în urma arderii motorinei în condiții de ventilare forțată.....	97
Figura 64. Temperaturile rezultate în urma arderii benzinei în condiții de ventilare normală.....	98
Figura 65. Temperaturile rezultate în urma arderii benzinei în condiții de ventilare forțată.....	99
Figura 66. Temperaturile înregistrate în partea superioară a machetei de termocuplul 1	99
Figura 67. Focar amplasat în centrul încăperii.....	108
Figura 68. Focar amplasat lângă peretele încăperii	108
Figura 69. Focar amplasat lângă colțul încăperii	109

LISTĂ TABELE

Tabel 1. Clasificarea sprinklerelor în funcție de timpul de răspuns	12
Tabel 2. Criterii minime de proiectare în Suedia	14
Tabel 3. Temperaturi de declanșare și codul culorilor.....	25
Tabel 4. Temperaturi de declanșare pentru bulbi de sticlă	25
Tabel 5. Proprietățile caracteristice unui sistem asociat fluidelor	44
Tabel 6. Procedura de reducere la scară a principalilor parametri studiați	64
Tabel 7. Rezultatele timpului de activare al sprinklerelor.....	80
Table 8. Valori ale ratei de căldură degajată în tuneluri rutiere	87
Tabel 9. Parametri de calcul pentru lichidele combustibile utilizate	93
Tabel 10. Dimensiunile tăvilor și cantitățile de lichide utilizate	94
Tabel 11. Valorile timpului de activare al sprinklerelor	100

1 INGINERIA SECURITĂȚII LA INCENDIU ÎN CONTEXTUL ACTUAL

1.1 Noțiuni generale

În trecut majoritatea statelor membre ale Uniunii Europene utilizau metode de proiectare specifice domeniului securității la incendiu bazate pe cerințele legilor și normativelor prescriptive. În mod tradițional aceste norme au rezistat de-a lungul timpului, fie datorită modului facil de implementare, fie datorită lipsei specialiștilor în domeniu. Mai mult, cerințele prescriptive permit oferirea unor soluții rapide ce asigură în același timp un grad ridicat de control.

Prin natura lor normativele prescriptive reprezintă o barieră în dezvoltarea unor noi soluții de proiectare, dar și în utilizarea unor noi materiale sau tehnologii de construcție. De multe ori, acestea se dovedesc a fi prea rigide în procesul de proiectare deoarece nu sunt revizuite periodic pentru a cuprinde noile metodologii de calcul sau inovații în domeniul construcțiilor [1]. Totodată, cerințele impuse pentru echiparea clădirilor cu instalații de protecție împotriva incendiilor este mult prea restrictivă, conducând la costuri suplimentare pe parcursul investițiilor.

O alternativă viabilă în rezolvarea problemelor generate de normativele prescriptive o reprezintă ingineria securității la incendiu care vine atât în sprijinul proiectanților prin oferirea unor soluții alternative de calcul, precum și pentru arhitecți și investitori în vederea folosirii unor noi materiale de construcție și clădiri de forme diferite.

Impulsionată de dezvoltarea socio-economică la nivel european din anii '80, ingineria securității la incendiu a crescut în popularitate și complexitate în ultimii ani, fiind recunoscută ca o metodă inovativă și economică pentru determinarea măsurilor de securitate la incendiu aferente construcțiilor. Limitările și gradul redus de flexibilitate al normelor prescriptive coroborate cu noile dimensiuni și tehnologii în construcții au determinat intensificarea activităților de cercetare în domeniul securității la incendiu. Prin dezvoltarea continuă a ingineriei securității la incendiu se urmărește oferirea unor soluții pentru proiectele cu caracter unicat, precum și măsuri alternative de proiectare care să conducă la obținerea unui nivel ridicat al securității la incendiu pentru ocupanții clădirilor și societății, în general.

Prin urmare, metodele ingineriei securității la incendiu sunt destinate obținerii unei proiectări de înaltă calitate ce ar trebui să aducă un beneficiu societății prin realizarea unui echilibru între costurile de investiție și nivelul de securitate asigurat. Cu toate acestea, la o analiză atentă a principiilor ingineriei securității la incendiu se ridică semne de întrebare în ceea ce privește realizarea unui compromis între noile tehnologii și cerințele legislației naționale în vigoare. Dat fiind gradul ridicat de flexibilitate oferit proiectantului se impune stabilirea unor niveluri minime pentru îndeplinirea cerinței esențiale securitate la incendiu. Fie că sunt reglementate prin documente specifice securității la incendiu sau sunt regăsite în diferite standarde cu caracter de recomandare, alegerea acestor parametri definește calitatea procesului de proiectare aferent securității la incendiu.

Un alt aspect important legat de ingineria securității la incendiu este reprezentat de provocarea ce o impune realizarea nivelurilor minime de performanță privind securitatea la incendiu. Modul în care proiectul este realizat, executat și

evaluat de către proiectant, dar și de autoritățile competente, precum și responsabilitățile acestora sunt un deziderat important în îndeplinirea obiectivelor procesului de proiectare.

1.2 Necesitatea utilizării ingineriei securității la incendiu

Tendențele actuale pe piața imobiliară conduc către construirea unor clădiri cu aspect sofisticat și în același timp inovativ. Lipsa spațiului și costurile ridicate ale terenurilor în marile metropole impun construirea pe verticală, iar ca rezultat aceste clădiri înalte prezintă o provocare pentru proiectant. Deoarece normativele prescriptive impun limite în ceea ce privește înălțimea maximă sau aria construită, metodele ingineriei securității la incendiu sunt tot mai des utilizate.

Prin ingineria securității la incendiu se înțelege conceptul de proiectare utilizat în realizarea clădirilor pentru îndeplinirea cerinței esențiale securitate la incendiu ce are la bază folosirea unor metode și modele de calcul ingineresti, precum și programe computerizate de calcul sau încercări experimentale ce realizează un nivel de securitate acceptabil prin asigurarea condițiilor de evacuare a utilizatorilor, stabilitatea construcțiilor și protecția echipajelor profesionale de intervenție.

Principalele avantaje ale acestei metode sunt următoarele [2]:

- asigurarea unor soluții noi de proiectare care asigură îndeplinirea nivelului minim de performanță privind securitatea la incendiu;
- stabilirea clară a obiectivelor privind securitatea la incendiu și metodele care conduc la îndeplinirea acestora;
- eliminarea barierelor comerciale în ceea ce privește utilizarea unor materiale sau tehnologii noi de construcție;
- permite armonizarea sistemelor legislative internaționale;
- asigură reducerea costurilor de investiție prin flexibilitate în proiectare;
- permite introducerea rapidă a noilor produse cu rol în securitate la incendiu pe piață;
- elimină gradul ridicat de complexitate impus de normativele prescriptive.

Fie că este vorba de construcții noi pentru aeroporturi, intervenții la monumente istorice existente sau centrale nucleare, ingineria securității la incendiu reprezintă o soluție viabilă în realizarea măsurilor de securitate la incendiu.

În majoritatea situațiilor, montarea instalațiilor de protecție împotriva incendiilor contribuie la scăderea riscului de incendiu, creșterea nivelului de securitate și îndeplinirea cerințelor minime impuse prin legislația în vigoare. La proiectarea instalațiilor de stingere cu sprinklere sunt adesea folosite regulile prescriptive deoarece de-a lungul timpului s-au dovedit a fi un element sigur în îndeplinirea obiectivelor, dar și pentru ușurința cu care acestea pot fi implementate.

Normativul privind securitatea la incendiu a construcțiilor, Partea a II-a – Instalații de stingere, indicativ P 118/2-2013, în vigoare pe teritoriul României pentru proiectarea instalațiilor cu sprinklere, amintește de timpul de răspuns al sprinklerelor, însă fără a stabili criterii clare de calcul sau de alegere a acestuia [3].

Potrivit normativului mai sus menționat, sensibilitatea sprinklerelor reprezintă declanșarea acestuia la acțiunea termică produsă de incendiu, iar clasificarea lor se realizează în clase de sensibilitate potrivit tabelului 1 [3].

Alegerea clasei de sensibilitate a sprinklerelor rămâne la latitudinea proiectanților, care se bazează fie pe situații existente sau pe propria experiență.

Incidente petrecute în trecut evidențiază importanța acestui aspect prin modul defectuos de funcționare al instalațiilor cu sprinklere.

Tabel 1. Clasificarea sprinklerelor în funcție de timpul de răspuns

Sensibilitatea termică nominală	Sprinkler de raft	Sprinklere de tavan, deasupra sprinklerelor de raft	Sisteme tip apă-aer cu preacționare tip A	Toate celelalte
Standard A	NU	DA	DA	DA
Special	NU	DA	DA	DA
Rapid	DA	DA	DA	DA

NOTĂ: Când sprinklerele noi sunt adăugate unei instalații de sprinklere existente, poate fi necesară luarea în considerare a efectului pe care le pot avea diferențele de sensibilitate pentru a evita declanșarea accidentală.

Unul din incidentele recente ce amintesc de eșecul instalațiilor de stingere este incendiul izbucnit în data de 31 decembrie 2015 în incinta hotelului The Address Downtown din Dubai. Focul produs la etajul 20 al acestei clădiri foarte înalte s-a propagat cu rapiditate de la etajul incendiat către fațadă, intrând cu repeziciune către etajele imediat superioare conform fotografiei din figura 1 [4].



Figura 1. Imagini din timpul incendiului produs la hotelul The Address Downtown

Potrivit declarațiilor martorilor și ale reprezentanților Protecției Civile din Dubai rezerva de apă aferentă instalațiilor de sprinklere a asigurat funcționarea acestora pe o perioadă de maximum 15 minute. Din declarația lui Matt Bright, evaluator de risc în cadrul Protecției Civile din Dubai, se desprind următoarele aspecte: "Sistemul de sprinklere a funcționat la parametri proiectați, însă dimensiunile acestui incendiu au fost mult prea mari".

Sprinklerelor au acționat la izbucnirea incendiului, însă timpul de declanșare a fost mult prea ridicat pentru a evita propagarea incendiului către exterior. Materialele din interiorul și din alcătuirea clădirii au dezvoltat viteze mari de ardere înlesnind propagarea incendiului în intervalul de timp scurs până la declanșarea instalației de stingere.

Deși oferă un grad ridicat de flexibilitate în proiectare, ingineria securității la incendiu prezintă în același timp o evaluare riguroasă a parametrilor asociați incendiului. Astfel, pentru evitarea unor evenimente similare, la proiectarea și alegerea tipului de cap sprinkler se impune identificarea cu exactitate a tuturor scenariilor posibile ce pot contribui la determinarea timpului de răspuns.

1.3 Conceptul ingineriei securității la incendiu

Ingineria securității la incendiu include toate metodele analitice, computerizate și experimentale existente ce pot contribui la îndeplinirea performanțelor privind securitatea la incendiu în toate stadiile unei construcții.

Obiectivele principale specifice acestui concept de proiectare sunt următoarele [5]:

- protejarea și salvarea vieții utilizatorilor;
- protejarea bunurilor și a proprietății;
- continuitatea operațiilor post-incident;
- protecția mediului înconjurător;
- conservarea monumentelor istorice.

Pornind de la aceste obiective, orice proiectant trebuie să aleagă o strategie adecvată de lucru pentru a asigura realizarea acestora. La nivel mondial sunt în mod valabil recunoscute trei metode de lucru, după cum urmează:

1. Proiectarea folosind metode de comparație calitativă cu cerințele prescriptive existente. Prin această metodă sunt acceptate schimbări minore față de normativele și legile în vigoare. Spre exemplu, se poate introduce un nou tip de detector de incendiu care utilizează tehnologii noi de funcționare, diferite față de cele prevăzute în legislație și care se poate dovedi eficient în detectarea unui incendiu.
2. Utilizarea scenariului cel mai defavorabil – această metodă este și cea mai des întâlnită întrucât nu necesită evaluarea probabilităților de apariție a altor scenarii. Nivelul minim de securitate este demonstrat prin indicarea consecințelor unui eveniment astfel încât să nu fie depășite criteriile de performanță impuse.
3. Evaluarea cantitativă a riscului de incendiu ce implică identificarea tuturor scenariilor de incendiu posibile și evaluarea probabilităților și consecințelor acestora. Nivelul minim de securitate este demonstrat prin calcularea nivelului de risc și încadrarea acestuia în limitele acceptabile societății.

În stabilirea criteriilor minime de performanță privind cerința fundamentală securitate la incendiu sunt trei aspecte de interes: se stabilesc de către proiectant prin consultare cu părțile implicate și autoritățile competente, sunt considerate criteriile minime impuse prin normativele prescriptive sau sunt respectate cele existente în standardele din domeniul securității la incendiu. Țări cu experiență îndelungată în aplicarea ingineriei securității la incendiu, precum Suedia și Noua Zeelandă furnizează criterii minime de securitate specifice ingineriei securității la incendiu.

Criteriile minime impuse în Suedia la aplicarea metodei ingineriei securității la incendiu sunt prezentate în tabelul 2 [6].

Tabel 2. Criterii minime de proiectare în Suedia

Parametrul specific incendiului	Valoarea impusă
Flux termic radiant	60 kJ/m ²
Flux termic radiant (10 min)	2,5 kW/m ²
Flux termic radiant (termen lung)	1 kW/m ²
Înălțimea stratului de fum	1,6±(0,1h) m
Vizibilitate	10 m / 5 m
Temperatura maximă	80 ⁰ C

Pentru simplificarea procesului de proiectare, seria de standarde ISO/TR 13387 propune împărțirea acestuia în cinci părți componente, după cum urmează [7]:

SS1 – inițierea și dezvoltarea incendiului, precum și degajarea produșilor de ardere. Acest sistem prezintă un cadru de lucru pentru identificarea și evaluarea potențialelor surse de incendiu, de dezvoltare a acestuia și formarea produșilor de ardere. Totodată, oferă un instrument de evaluare a eficienței mijloacelor de protecție menite să reducă probabilitatea inițierii incendiului, adevărat control al dezvoltării și reducere a acumulării de căldură, fum și produse toxice în interiorul compartimentului de incendiu.

SS2 – mișcarea fumului și gazelor fierbinți. Cea de-a doua componentă indică metode ingineresti de evaluare a propagării flăcărilor, fumului și gazelor fierbinți prin interiorul golurilor existente. De asemenea, sunt evaluate mijloacele și elementele menite să reducă eventualele efecte produse prin propagarea efluenților incendiului.

SS3 – stabilitatea structurală și propagarea incendiului către vecinătăți. Această componentă implică folosirea unor metode analitice, computerizate sau încercări experimentale pentru evaluarea stabilității structurale în timpul unui incendiu și posibilitățile de propagare către vecinătăți.

SS4 – sisteme de detectare, declanșare și stingere – cuprinde metode ingineresti de calcul al timpului de detectare al fumului sau flăcărilor în timpul unui incendiu, incluzând timpul de răspuns al instalațiilor de stingere. Sunt prezentate metode de calcul pentru timpul necesar, după detectarea incendiului, la activarea diverselor dispozitive de protecție la foc.

SS5 – Siguranța utilizatorilor: comportamentul uman, localizarea și starea fizică a utilizatorilor. Ultima componentă descrie instrumentele de proiectare necesare evaluării și determinării locației și condiției fizice a utilizatorilor clădirii pe timpul evoluției unui incendiu.

Evaluarea timpului de răspuns aferent instalațiilor de sprinklere este cuprins în cadrul sistemului SS4, iar calcularea acestuia poate fi obținută cu ajutorul unor modele de calcul analitice, a unor programe de simulare sau prin încercări experimentale. Prezentarea procedurilor de calcul aferente va face obiectul capitolelor viitoare.

1.3.1 Definierea nivelului minim de performanță

Obiectivul privind îndeplinirea cerinței esențiale securitate la incendiu este transpus în mod implicit în normativele prescriptive care impun asigurarea unor măsuri de securitate dinainte definite. Deși acest nivel minim nu este clar stabilit în

cuprinsul acestor norme, proiectanții sunt obligați să asigure implementarea cerințelor acestora. În mod aproape similar, nivelul minim de performanță este și mai vag definit în cadrul standardelor privind ingineria securității la incendiu. Acest lucru complică și mai mult procesul de avizare și autorizare al proiectelor bazate pe metodele ingineriei securității la incendiu.

În Marea Britanie, metodele alternative pentru asigurarea criteriilor minime prevăzute de normativele în construcții sunt specificate în cuprinsul altor documente subsecvente. Cu toate acestea, nivelurile minime de performanță nu sunt în mod obiectiv definite. Sintagme precum „timp de evacuare satisfăcător” sau „limitarea adecvată a propagării focului și fumului” [8] sunt supuse unor îndelungi interpretări atât din partea proiectanților, dar și a autorităților competente. Fără impunerea unor criterii de performanță clare ce pot fi în mod direct evaluate se pot produce ambiguități în procesul de proiectare și executare al construcțiilor.

International Building Code (IBC) este un document reprezentativ pe teritoriul Statelor Unite care a demonstrat că prin comparația calitativă cu cerințele prescriptive se poate demonstra eficacitatea ingineriei securității la incendiu. Acest normativ în domeniul securității la incendiu este adoptat pe scară largă datorită flexibilității crescute, dar și a scăderii numărului de victime rezultate în urma incendiilor. Pentru eliminarea oricăror interpretări, în cuprinsul acestui document este stabilit ca “orice material, proiect sau metodă, precum și echipamente noi utilizate în construcții trebuie să fie aprobate de către autoritățile competente în condițiile în care se dovedește că specificația tehnică sau proiectul propus respectă cerințele prezentului normativ” [9].

O altă provocare este definirea nivelului de performanță prin comparație cu normativele prescriptive ale căror măsuri de securitate sunt fundamentate prin translatare la evenimente petrecute în trecut sau prin preluare din normativele altor țări cu tradiție în domeniu. Prin urmare, stabilirea nivelurilor minime de performanță prin raportarea la evenimente din trecut sau la legislația altor țări nu reprezintă cea mai fericită soluție dat fiind că echivalarea cu acestea se dovedește a fi nefondată și irelevantă. Totodată, procesul invers de determinare a criteriilor prescriptive și formularea nivelurilor de performanță potrivit acestora complică și mai mult procesul și așa complex de definire a măsurilor minime de siguranță.

Ingineria securității la incendiu promovează în mod cert soluții și proiecte cu caracter unicat, însă consistența procesului de proiectare depinde de definirea riguroasă a criteriilor și nivelurilor minime de performanță. Lipsa unor criterii clare și concise pot crea dificultăți în evaluarea proiectelor de către autoritățile competente.

1.3.2 Îndeplinirea nivelurilor minime de performanță

Chiar dacă nivelul minim de performanță poate fi cuantificat în mod ipotetic este necesar ca metodele ce duc la îndeplinirea acestuia să fie pe deplin înțelese și demonstrate. Un imbold în îndeplinirea acestui deziderat este adus prin multitudinea de programe de simulare folosite în modelarea diferitelor probleme caracteristice unui incendiu. Aceste programe reprezintă un instrument viabil în îndeplinirea obiectivelor de proiectare și demonstrarea nivelurilor minime de performanță. Încercările experimentale standardizate sunt în același timp un alt instrument ce contribuie la oferirea unor date credibile pentru procesul de proiectare specific ingineriei securității la incendiu. Multitudinea de informații utilizate, precum și prezentarea realistă a programelor de vizualizare conexe celor de simulare pot crea o imagine falsă în îndeplinirea nivelurilor de performanță atribuite securității la incendiu.

Încercările standardizate presupun plasarea produselor pentru construcții în interiorul unui cuptor în care sunt create condiții de temperatură potrivit curbei standard ISO 834 [10]. Deși nu se pune la îndoială acuratețea metodelor de testare, se pune întrebarea dacă aceste temperaturi sunt o reproducere la scară reală a celor dezvoltate în timpul unui incendiu. Graficul din figura 2 [11] reliefează diferențe elocvente între încercările standardizate și incendiile naturale. Acestea din urmă pot produce temperaturi mult mai ridicate în faza de dezvoltare a incendiului, după care prezintă o scădere exponențială invers celor produse în cuptor.

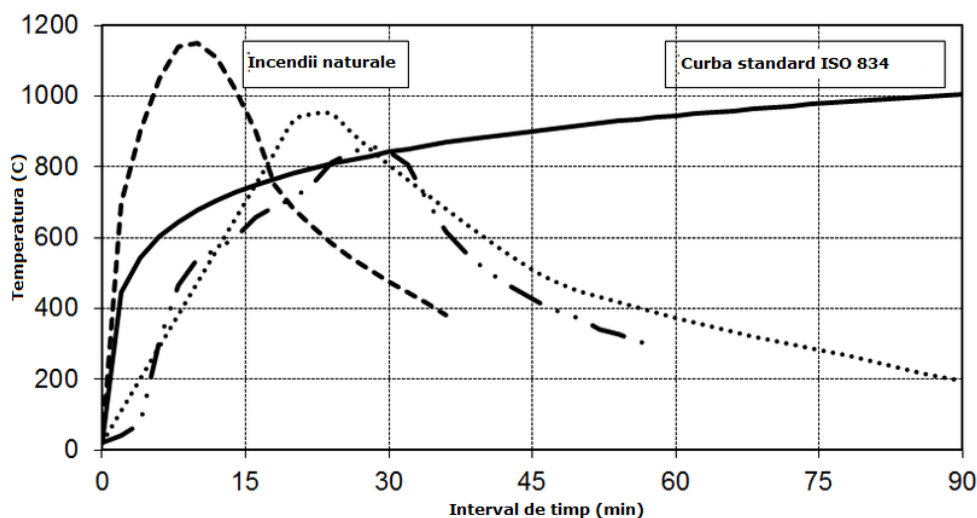


Figura 2. Diferențe între curba standard ISO 834 și temperaturile unui incendiu

Rezultatele furnizate de către programele de simulare sunt supuse în egală măsură unor erori. Limitările acestor programe depind de gradul de cunoștințe al utilizatorului și de capacitatea de procesare a calculatorului [12].

Prin urmare, fiabilitatea acestor instrumente depinde de modul în care este asigurată justificarea tehnică a îndeplinirii obiectivelor fixate. Pentru aceasta este necesar ca părțile implicate în procesul de proiectare să dețină cunoștințele necesare interpretării, măsurării și asumării limitărilor și erorilor incluse în aceste modele.

Cea mai utilizată metodă în demonstrarea îndeplinirii nivelurilor minime de performanță este realizată prin compararea timpului disponibil de evacuare (ASET) cu timpul necesar pentru evacuare în condiții de siguranță (RSET).

Timpul disponibil de evacuare reprezintă intervalul de timp până la care sunt atinse valorile condițiilor critice pentru utilizatorii clădirii, pe când timpul necesar pentru evacuare în condiții de siguranță definește perioada de timp ce se scurge de la izbucnirea unui incendiu până în momentul în care utilizatorii reușesc să ajungă într-o zonă de siguranță [13]. Principiul de bază al acestei metode constă în demonstrarea faptului că utilizatorii se pot evacua într-un timp redus celui în care sunt atinse condițiile critice în interiorul clădirii, iar reprezentarea schematică a procesului este ilustrată în figura 3 [12].

Punctul de pornire în determinarea timpului disponibil de evacuare este stabilirea ratei de căldură aferente incendiului și a scenariilor de incendiu. Cu toate că proiectanții folosesc valori supradimensionate pentru obținerea unor margini de siguranță, nu sunt puține cazurile în care acestea se dovedesc insuficiente. Așa este

1.3. – Conceptul ingineriei securității la incendiu 17

și cazul incendiului din interiorul clubului american The Station Nightclub din Rhode Island, unde datorită montării pe pereții interiori ai clădirii a unor materiale fonoizolante s-a produs o propagare rapidă a incendiului rezultând decesul a 100 de persoane și rănirea a altor 230 [14]. Chiar dacă s-a asigurat realizarea unui număr suficient de căi de evacuare, intensitatea incendiului a fost mult prea mare față de valorile proiectate prin prisma faptului că materialele combustibile folosite în placarea pereților clădirii au dezvoltat viteze mari de ardere contribuind în mod direct la producerea fenomenului de flashover.

Acesta este unul din multitudinea de evenimente care demonstrează că metodele ingineriei securității la incendiu sunt supuse unor erori ce pot da naștere unor consecințe cu urmări ireversibile.

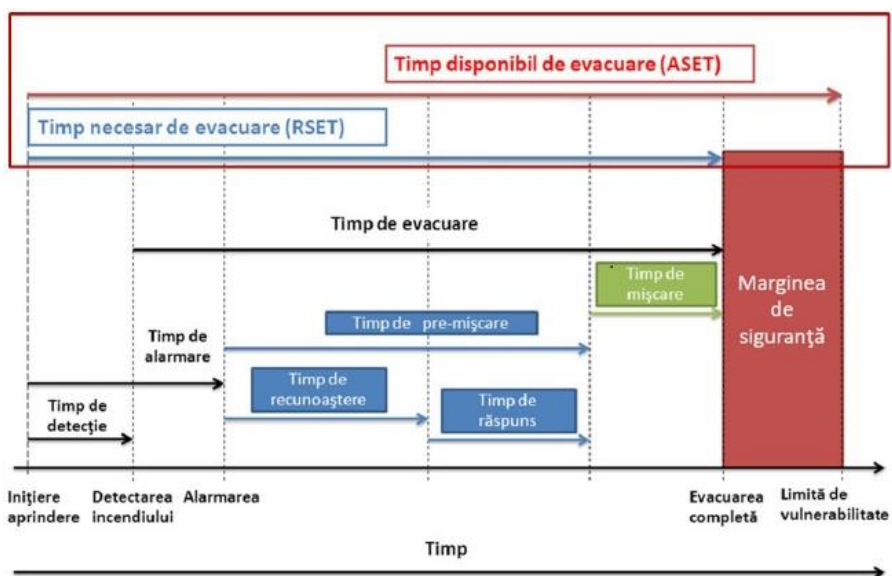


Figura 3. Reprezentarea schematică a metodologiei de calcul a timpului disponibil, respectiv a timpului necesar pentru evacuare în situații de urgență

Parte a timpului de detecție, procesul de răspuns al instalațiilor de stingere contribuie la declanșarea acestor instalații în vederea îmbunătățirii condițiilor de evacuare. În funcție de eficiența instalațiilor de stingere sunt determinate condițiile critice la care sunt supuse persoanele surprinse în interiorul clădirilor de un eventual incendiu. Prin asigurarea limitării propagării focului sau chiar a stingerii incendiului, instalațiile automate cu sprinklere cresc șansele ca utilizatorii să ajungă în locuri sigure și ajută la înlesnirea condițiilor de intervenție pentru echipajele profesionale ale pompierilor.

Un alt aspect major în proiectare îl reprezintă estimarea timpului necesar pentru evacuare în condiții de siguranță. Informații cu privire la timpul de mișcare și a celui de pre-mișcare s-au determinat cu ajutorul încercărilor experimentale. Aceste date au fost introduse în cuprinsul ghidurilor de proiectare pentru a servi ca mărimi de intrare în modelele de evacuare propuse la stadiul de proiectare.

Rezultatele furnizate de către programele de simulare oferă adesea un proces de mișcare idealist care nu ține cont de comportamentul uman în situații de urgență. Aceste programe de simulare a evacuării umane folosesc algoritmi de

mișcare ce reproduc procesul de mișcare asemenea curgerii unui fluid, fără a intui comportamentul uneori imprevizibil al utilizatorilor pe timpul unui incendiu.

Procesul decizional uneori confuz al persoanelor de a se îndrepta către focarul de incendiu nu poate fi simulat. Cu toate că normativele includ recomandări cu privire la timpul de pre-mișcare al persoanelor în situații de urgență, acesta nu poate fi generalizat în toate situațiile.

Toate aceste probleme identificate evidențiază vulnerabilități în procesul de proiectare utilizând ingineria securității la incendiu. Deși modele similare sunt aplicate cu succes în ingineria civilă la proiectarea structurilor de rezistență a clădirilor, acestea nu pot furniza un exemplu concret în ingineria securității la incendiu. Acest lucru este datorat riscului de incendiu care reprezintă o mărime intrinsecă ce depinde în mod direct de rata de căldură degajată, sarcina termică, configurația și gradul de ocupare al clădirii. Acești parametri de proiectare aferenți incendiului sunt supuși unor ipoteze de lucru ce necesită responsabilitate și un grad ridicat de pregătire din partea celor implicați în realizarea construcțiilor. Probabilitatea ca proiectantul să aleagă condiții mai puțin stringente la definirea riscului de incendiu este mare, lucru ce poate conduce la diminuarea gradului de securitate al utilizatorilor. Nu sunt puține acele situații în care se optează pentru alegerea unor parametri de risc diferiți de realitate în scopul reducerii costurilor globale ale investiției.

Soluția acestor probleme poate fi reglementarea criteriilor minime de performanță prin cuprinderea lor în ghiduri și proceduri de proiectare, precum și avizarea soluțiilor tehnice de către autorități competente. Ținând cont că modelele ingineriei securității la incendiu conțin o serie de ipoteze de lucru este necesar ca personalul autorităților competente în domeniu să dovedească un nivel ridicat al cunoștințelor pentru identificarea și înțelegerea acestora.

1.4 Concluzii

Adoptarea metodelor ingineriei securității la incendiu reprezintă un proces extrem de complex, iar introducerea sa fără stabilirea unor criterii clare poate conduce la scăderea nivelului de securitate. Un sistem legislativ bazat pe evaluarea continuă a proiectelor de către autoritățile competente este imperios necesar pentru evitarea oricărui derapaj în stabilirea scenariilor și criteriilor minime de performanță de trebuie îndeplinite.

Cu toate că tendința generală conduce către o individualizare a soluțiilor de proiectare generată de complexitatea ingineriei securității la incendiu și diferențele de cunoștințe dintre practicienii din domeniu și personalul autorităților competente, verificarea și avizarea proiectelor este încă necesară dat fiind nivelul de dezvoltare scăzut al cercetării în acest domeniu.

Deși metodele ingineriei securității la incendiu se bazează pe o multitudine de ipoteze de lucru ce pot conduce la surse evidente de erori, implementarea acestui sistem nou de proiectare este necesar pe teritoriul României. Adoptarea sa poate produce efecte pozitive în liberalizarea pieței construcțiilor și eliminarea barierelor în proiectare datorate diferențelor de abordare existente în rândul statelor membre ale Uniunii Europene și nu numai. Cheia succesului în impelmentarea ingineriei securității la incendiu o reprezintă implicarea continuă a autorităților competente și a proiectanților în dezvoltarea cadrului legislativ actual pentru obținerea unor documente riguroase care să asigure nivelul minim de securitate necesar societății.

O comunitate de profesioniști în rândul proiectanților, a autorităților competente și a cercetătorilor în domeniu focalizată către formarea și dezvoltarea ingineriei securității la incendiu ca disciplină de sine stătătoare poate produce impulsionarea introducerii sale ca nouă metodă de proiectare ce poate servi ca un instrument în asigurarea nivelului de securitate perceput de către societate.

Totodată, ingineria securității la incendiu ar permite creșterea și deschiderea pieței construcțiilor prin operaționalizarea unor noi tehnici, soluții și materiale de construcții. Realizarea proiectelor cu caracter unicat, precum cele din domeniul nuclear sau al transporturilor ar putea rezulta în creșteri economice semnificative. De asemenea, proiectele cu arhitectură inovativă sau soluțiile tehnice propuse în cazul clădirilor existente pot fi adoptate cu succes prin înlăturarea restricțiilor impuse de normele prescriptive.

2 Instalațiile de stingere de tip sprinkler – caracteristici de declanșare, funcționare și stingere

2.1 Noțiuni generale

Sistemele automate de stingere de tip sprinkler sunt recunoscute ca fiind una din cele mai eficiente instalații de protecție împotriva incendiilor. Acestea contribuie simultan la detectarea incendiului, transmiterea alarmei și limitarea propagării flăcărilor, asigurând astfel evacuarea utilizatorilor, protecția proprietății, precum și siguranța echipelor de intervenție.

Sprinklerele sunt dispozitive automate ce conțin un element termosensibil care declanșează la o temperatură prestabilită constând în refularea unei cantități de apă sub forma unui con de diferite dimensiuni asupra ariei protejate. Alimentarea cu apă a acestor capete sprinkler se realizează printr-un sistem de conducte amplasate la partea superioară a clădirii. Montarea capetelor sprinkler se realizează la intervale calculate, de-a lungul conductelor de alimentare, astfel încât să nu existe suprafețe la nivelul pardoselii care să nu fie protejate de cantitățile de apă refulate.

Majoritatea sistemelor de stingere cu sprinklere sunt proiectate în așa fel încât fiecare sprinkler să acționeze la temperaturile generate în timpul unui incendiu și să distribuie cantitățile de apă necesare asupra focarului de incendiu (asigurând intensitățile de stingere necesare).

În funcție de obiectivele stabilite la nivel de proiectare sau impuse prin reglementările în vigoare, se disting două categorii importante:

- protecția vieții utilizatorilor;
- protejarea proprietății și a echipelor de intervenție.

Aceste obiective sunt strâns legate de faza în care se află incendiul, precum și de parametri ce caracterizează dezvoltarea acestuia. Atunci când obiectivul securității la incendiu este reprezentat de protecția proprietății și/sau a echipelor de intervenție, faza de post-flashover trebuie considerată. Parametri de calcul vor avea în vedere densitatea de sarcină termică și curba standard temperatură-timp pentru caracterizarea stadiului de ardere generalizată. Pentru atingerea acestui obiectiv, în general, instalațiile de stingere cu sprinklere sunt proiectate pentru a asigura limitarea propagării incendiului, iar pentru anumite tipuri speciale de sprinklere stingerea poate reprezenta un principiu viabil. Prin limitarea propagării incendiului se înțelege localizarea focarului de incendiu la dimensiuni cât mai reduse prin reducerea ratei de căldură degajate și stropirea materialelor combustibile adiacente pentru a preîntâmpina aprinderea acestora, în același timp cu controlul temperaturii stratului superior de fum și gaze fierbinți asigurând stabilitatea structurală a construcției.

Efectul de stingere poate fi obținut cu ajutorul instalațiilor de sprinklere atunci când se realizează o reducere bruscă a cantității de căldură eliberate până la un punct în care reaprinderea nu mai este posibilă datorită cantităților însemnate de apă refulate asupra focarului de incendiu.

Pe de altă parte, dacă principalul obiectiv al securității la incendiu este protecția utilizatorilor, atunci faza de dezvoltare a incendiului devine importantă pentru procesul de proiectare, unde parametri ce trebuie calculați este necesar să includă rata de căldură degajată, precum și rata de creștere a incendiului.

În figura 4 [15] se poate observa efectul instalațiilor de sprinklere asupra curbei caracteristice ratei de căldură degajată în timpul unui incendiu.

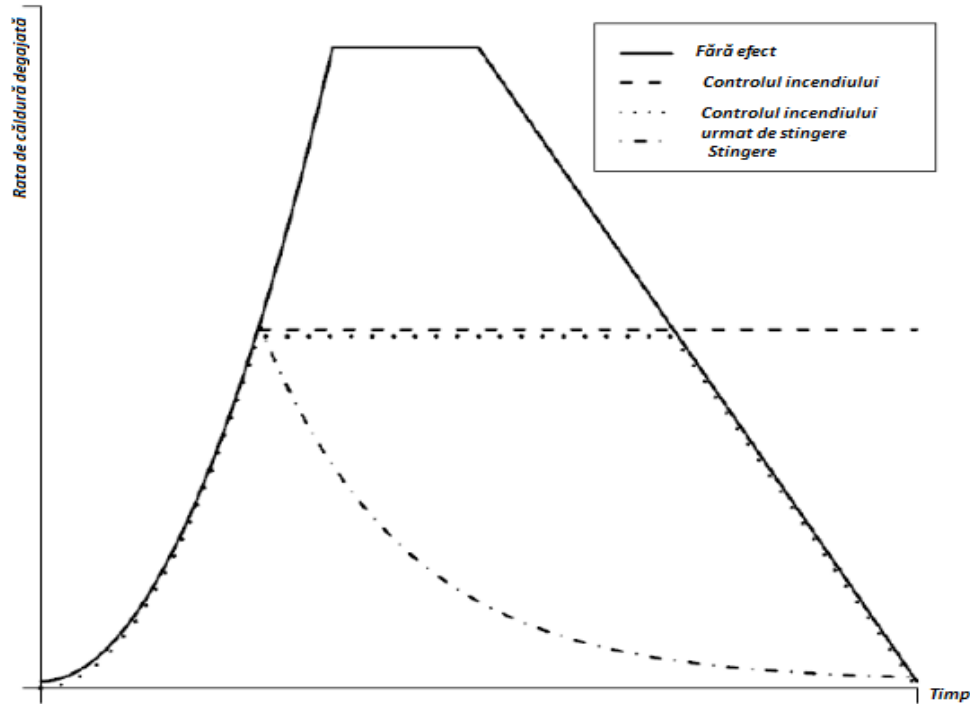


Figura 4. Efectul instalațiilor de tip sprinkler asupra ratei de căldură degajată

Deși în cazul multor incendii se poate obține stingerea direct de la instalațiile de sprinklere, nu sunt puține acele situații în care cu toate că aceste instalații sunt funcționale, este necesară intervenția ulterioară a echipelor specializate de intervenție pentru lichidarea incendiului. Astfel, la proiectarea acestor instalații este necesar a se avea în vedere tipul sprinklerelor, timpul de răspuns al acestora, natura materialelor combustibile din spațiul protejat, precum și debitul de apă refulat.

2.2 Tipuri de instalații de stingere cu sprinklere

2.2.1 Instalații de stingere în sistem apă-apă

Instalațiile cu sprinklere în sistem apă-apă trebuie montate numai în spații în care se asigură o temperatură a mediului ambiant de minimum 4°C , precum și unde aceasta nu depășește 95°C . Pentru sistemele interconectate și închise trebuie utilizate numai instalații apă-apă [16].

Acest tip de instalație este cel mai des întâlnit deoarece este ușor de proiectat și instalat, precum și simplu de întreținut. Sistemul apă-apă conține apă

sub presiune în toate componentele instalației, iar la apariția unui incendiu care produce o cantitate suficientă de căldură pentru activarea unuia sau mai multor capete sprinkler, apa este refulată către locul incendiului prin intermediul sprinklerelor deschise. Majoritatea reglementărilor tehnice în vigoare pe plan mondial recomandă alegerea acestui tip de sistem ca primă opțiune datorită eficienței sale ridicate, precum și costurilor reduse de întreținere [17].

2.2.2 Instalații de stingere în sistem apă-aer

Acest tip de instalație este recomandat a se monta atunci când o parte din sistemele componente sau întreg sistemul de stingere sunt expuse unor temperaturi scăzute de sub 4^o C pentru a se evita pericolul de îngheț.

Instalațiile cu sprinklere în sistem apă-aer sunt încărcate în mod normal cu aer sau azot sub presiune în aval de supapa de control și semnalizare, având apă în amonte de aceasta. Instalarea sistemului apă-aer trebuie să fie realizată numai în configurație ramificată.[16]

Datorită amestecului de aer cu apă aceste instalații sunt supuse unui proces intensificat de coroziune față de sistemele apă-apă, fiind astfel necesară o întreținere permanentă a acestui tip de instalație rezultând în costuri suplimentare, precum și risc ridicat de defecțiune.

Majoritatea supapelor de control și semnalizare specifice sistemelor apă-aer funcționează pe principiul presiunii diferențiale, unde dimensiunile membranei către partea cu aer este mai mare decât cea către partea cu apă.

În cazul izbucnirii unui incendiu care produce o cantitate suficientă de căldură care să declanșeze unul sau mai multe sprinklere, o cădere de presiune are loc în instalație, care la atingerea unui anumit nivel stabilit produce deschiderea membranei ce permite curgerea apei către rețeaua de conducte și refularea acesteia către focarul de incendiu. Deoarece instalația de tip apă-aer necesită un sistem de alimentare cu aer, timpul de răspuns al instalației este ridicat față de cel al sistemului apă-apă, iar riscul de defecțiune este, de asemenea, considerabil ridicat.

2.2.3 Instalații de stingere cu preacționare

Sistemele de stingere tip sprinkler cu preacționare funcționează pe principiul sistemului apă-aer în care apa nu este prezentă în rețeaua de conducte. Diferența dintre aceste sisteme constă în faptul că apa este reținută în amonte sub presiune de către o supapă de control acționată electric prin intermediul instalației de detectare în caz de incendiu. Supapa de control poate fi acționată prin montarea unor detectoare de fum, flacără, căldură sau multicriteriale, în funcție de caracteristicile materialelor combustibile aflate în spațiul protejat.

Până la refularea apei asupra focarului de incendiu sunt necesare două etape distincte. În primul rând, este necesar ca sistemul de detectare să identifice incendiul și să acționeze supapa electrică pentru deschiderea membranei ce permite curgerea apei către rețeaua de conducte. Odată ce rețeaua de conducte conține apă sub presiune, este necesar ca unul sau mai multe capete sprinkler să declanșeze pentru a permite refularea apei către focar.

La proiectarea acestui tip de instalație este necesar a se stabili un timp de răspuns rapid pentru detectoarele de incendiu, astfel încât să se evite declanșarea ambelor dispozitive simultan. Deoarece funcționarea sistemului este condiționată de declanșarea a două dispozitive diferite, acest tip de instalație este preferat pentru

protejarea spațiilor care adăpostesc bunuri cu valoare ridicată, precum și acolo unde refularea accidentală a apei nu este de dorit.

Deși principiul de funcționare al sistemului nu necesită prezența permanentă a aerului sub presiune în aval de supapa de control, totuși utilizarea aerului este realizată pentru controlul integrității rețelei de conducte pentru alimentare care, la fel ca și în cazul sistemului apă-aer, sunt supuse unui proces continuu de coroziune.

2.2.4 Instalații de stingere cu deversare

Sistemul de stingere cu sprinklere prin deversare asigură refularea unor cantități însemnate de apă asupra ariei protejate într-un interval scurt de timp. Similar instalațiilor cu reacționare, acestea sunt acționate prin intermediul sistemului de detectare în caz de incendiu care declanșează supapa electrică de control asigurând curgerea apei către sistemul de conducte și refularea rapidă către focar. Diferența între aceste două sisteme constă în faptul că sistemele de deversare prezintă un singur sistem de acționare, prin detectoarele de incendiu, iar capetele sprinkler sunt permanent deschise permițând trecerea apei imediat după acționarea supapei electrice de control.

O altă caracteristică specifică acestui tip de instalație îl reprezintă capetele de sprinkler deschise, care în cazul acționării instalației permit deversarea apei pe întreaga suprafață protejată din interiorul clădirii. Având în vedere aceste caracteristici, instalarea sistemelor de deversare se recomandă pentru spațiile cu risc ridicat de incendiu, unde refularea cu viteze ridicate este necesară pentru limitarea propagării rapide a incendiului.

Sistemele de deversare sunt destinate, în general, pentru protejarea spațiilor cu pericol special de incendiu care necesită cantități însemnate de apă pentru răcirea și limitarea dezvoltării incendiului sau a propagării rapide către spațiile învecinate. De obicei, acestea sunt regăsite în spații cu risc de incendiu ce conțin lichide inflamabile sau materiale combustibile ce prezintă viteze mari de propagare a flăcărilor. Totodată, sistemele de deversare pot fi montate în spații unde pierderea capacității portante a elementelor constructive poate fi generată în scurt timp datorită temperaturilor ridicate dezvoltate pe timpul unui incendiu.

2.3 Tipuri de capete sprinkler

2.3.1 Clasificare după tipul dispozitivului de declanșare

Ținând cont de tipul dispozitivului de declanșare al capetelor sprinkler, acestea pot fi cu element fuzibil sau cu bulb de sticlă.

Sprinklerul cu element fuzibil prezentat în figura 5 [18], declanșează atunci când un element realizat din aliaj metalic se topește la o anumită temperatură prestabilită și eliberează orificiul de curgere al apei de la baza acestuia. Elementul de aliaj este compus din două plăcuțe metalice care sunt sudate între ele printr-un element fuzibil care la temperaturi ridicate se topește. Pentru a diminua timpul de răspuns al acestor sprinklere, plăcuțele de metal și aliaj utilizate trebuie să fie în cantități cât mai mici în așa fel încât inerția termică corespunzătoare să fie cât mai redusă.

Sprinklerul cu bulb de sticlă are în componență un lichid pe bază de glicerină sau acid acetic, precum și o bulă de aer, care atunci când valoarea temperaturii ambiante este crescută, este comprimată și absorbită în lichid. În momentul când

24 Instalații de stingere de tip sprinkler- 2

cantitatea de aer din bulbul de sticlă a dispărut, presiunea interioară crește, iar bulbul se sparge, eliberând astfel orificiul de curgere al apei de la baza sprinklerului.

La fel ca și în cazul sprinklerului cu element fuzibil, timpul de răspuns este controlat în funcție de cantitatea de lichid și aer din interiorului bulbului de sticlă.

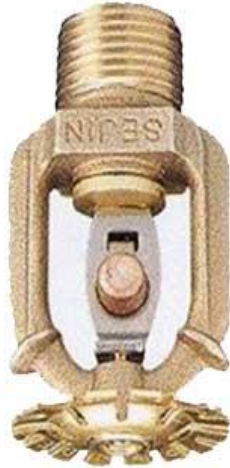


Figura 5. Sprinkler cu element fuzibil

În figura 6 [19] se regăsește un sprinkler cu bulb de sticlă care declanșează atunci când temperatura mediului ambiant atinge valori mai mari de 68° C. Elementele componente ale celor două tipuri de sprinklere constau în deflector, ce asigură forma conică a jetului de apă, corpul metalic cu filet pentru montarea pe conducta de apă, supapa de oprire a apei, precum și elementul termosensibil ce face legătura între deflector și supapa de oprire a apei.



Figura 6. Sprinkler cu bulb de sticlă

2.3.2 Clasificare după temperatura de declanșare

Deși în majoritatea cazurilor sprinklerele ce declanșează la o temperatură de 68° C sunt cel mai des utilizate, industria de profil produce diverse tipuri de elemente de declanșare atât pentru sprinklerele cu element fuzibil, cât și pentru cele cu bulb de sticlă.

Tabel 3. Temperaturi de declanșare și codul culorilor

Sprinkler cu bulb de sticlă		Sprinkler cu element fuzibil	
Temperatura nominală de declanșare	Codul culorilor lichidului	Temperatura nominală de declanșare	Codul culorilor cadrului
57	Portocaliu	57-77	Fără culoare
68	Roșu	80-107	Alb
79	Galben	121-149	Albastru
93	Verde	163-191	Roșu
100	Verde	204-246	Verde
121	Albastru	260-302	Portocaliu
141	Albastru	320-346	Negru
163	Violet		
182	Violet		
204	Negru		
227	Negru		
260	Negru		
286	Negru		
343	negru		

Tabel 4. Temperaturi de declanșare pentru bulbi de sticlă

Temperatura de declanșare	Temperatura de declanșare cea mai scăzută	Temperatura la care sau sub care cel puțin		Temperatura de declanșare cea mai ridicată
		25 din 50 eșantioane declanșează	40 din 50 eșantioane declanșează	
57	54	63	68	74
68	65	74	79	86
79	76	87	92	99
93	90	101	106	113
100	97	108	113	120
121	118	129	134	141
141	138	149	155	163
163	160	171	177	186
182	179	190	196	206
204	201	212	218	228
227	224	235	242	252
260	257	268	275	286
286	283	294	301	313
343		351	359	372

Acolo unde temperatura mediului ambiant atinge adesea valori ridicate, sprinklere cu temperaturi ridicate de declanșare sunt preferate celor standard (vezi figura 9). În acest sens, la nivel European, există o clasificare a capetelor sprinkler

în funcție de temperatura nominală de declanșare, iar pentru fiecare valoare a acestei temperaturi este prevăzut un cod al culorilor ce simplifică identificarea acestora. Pentru sprinklerele cu bulb de sticlă sunt prevăzute diferite culori ale lichidului din interiorul bulbului, iar pentru cele cu element fuzibil s-a optat pentru vopsirea în culori specifice a cadrului sprinklerului, așa cum reiese din tabelul nr. 3 [20].

Temperaturile nominale de declanșare prevăzute în tabelul nr. 3 stau la baza încercărilor standardizate pentru fiecare sprinkler, iar pentru fiecare dispozitiv de declanșare sunt prevăzute intervale de tolerabilitate, după cum urmează:

- a) Sprinklerele cu element fuzibil, încercate potrivit standardelor în vigoare trebuie să declanșeze în intervalul $[t \pm (0,035t + 0,62)]^0 \text{ C}$, în care t reprezintă temperatura nominală de declanșare;
- b) Sprinklerele cu bulb de sticlă trebuie să declanșeze la temperaturi aflate în intervalul precizat în tabelul nr. 4 [20].

2.4 Parametri ce influențează timpul de răspuns al sprinklerelor

2.4.1 Indicele timpului de răspuns (RTI)

Deși instalațiile de stingere de tip sprinkler pot fi acționate și prin intermediul unor sisteme de detectare a incendiului, așa cum este cazul celor cu deversare, în majoritatea cazurilor elementele termosensibile sunt cele care stau la baza declanșării și funcționării acestor instalații.

Pentru determinarea timpului de răspuns al acestui tip de instalație de stingere este important a se cunoaște aspecte ce țin de dinamica incendiilor ce caracterizează producerea de căldură, precum și mișcarea panii de fum și a flăcărilor pe timpul unui incendiu.

Având în vedere că metodele de proiectare privind ingineria securității la incendiu au început să fie tot mai des utilizate la nivel mondial, eforturi intense au fost depuse în vederea cercetării și elaborării unor metode analitice pentru calculul timpului de răspuns al sprinklerelor. În acest sens, în anul 1976, după intense studii și cercetării, Heskestad a stabilit că timpul de răspuns al sprinklerelor depinde de temperatura nominală de declanșare, temperatura efectivă de declanșare, constanta de timp, precum și indicele de răspuns (RTI) [21].

Constanta de timp τ , reprezintă o măsură a răspunsului termic a unui corp solid și poate fi definită printr-o ecuație de echilibru termic:

$$mc \frac{d\theta_c}{dt} = h_c A (\Delta\theta_g - \Delta\theta_d) \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{mc}{h_c A} \quad (2.2)$$

unde m , c , h_c , A sunt masa, căldura specifică, coeficientul de transfer termic prin convecție și aria elementului termosensibil al sprinklerului. De asemenea, θ_g , θ_d și θ_c reprezintă temperatura gazelor rezultate în urma incendiului, temperatura de declanșare, respectiv temperatura inițială a elementului termosensibil.

Având în vedere că această constantă de timp depinde de coeficientul de transfer termic prin convecție, precum și de viteza gazelor fierbinți, Heskestad a dezvoltat un model simplificat pentru determinarea acestei constante cu ajutorul așa-numitului test prin imersie, considerând:

2.5. – Modele analitice de calcul pentru timpul de răspuns al sprinklerelor 27

$$\frac{d\theta_d}{dt} = \frac{\Delta\theta_g - \Delta\theta_d}{\tau} \quad (2.3)$$

prin integrare

$$\int \frac{d(\Delta\theta_d)}{(\Delta\theta_g - \Delta\theta_d)} = \int_0^t \frac{dt}{\tau} \quad (2.4)$$

rezultă

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(1 - \frac{\Delta\theta_d}{\Delta\theta_g}\right)} \quad (2.5)$$

unde $\Delta\theta_d = \theta_{nom} - \theta_d(0)$.

Utilizarea testului prin imersie contribuie la determinarea acestei constante de timp prin generarea a două valori diferite. Prima valoare reprezintă temperatura mediului ambiant la care elementul de declanșare al sprinklerului se află, iar cea de-a doua valoare este temperatura nominală de activare la momentul t . În condiții normale de testare, la o temperatură ambiantă constantă, constanta de timp reprezintă intervalul de timp necesar elementului termosensibil pentru a realiza o creștere în temperatură cu 62,8 % față de temperatura mediului ambiant. Într-un mediu în care temperatura este în continuă creștere, constanta de timp reprezintă perioada de întârziere în care elementul termosensibil atinge temperatura mediului său ambiant. Reprezentarea constantei de timp în funcție de creșterea temperaturii se regăsește în figura 7.

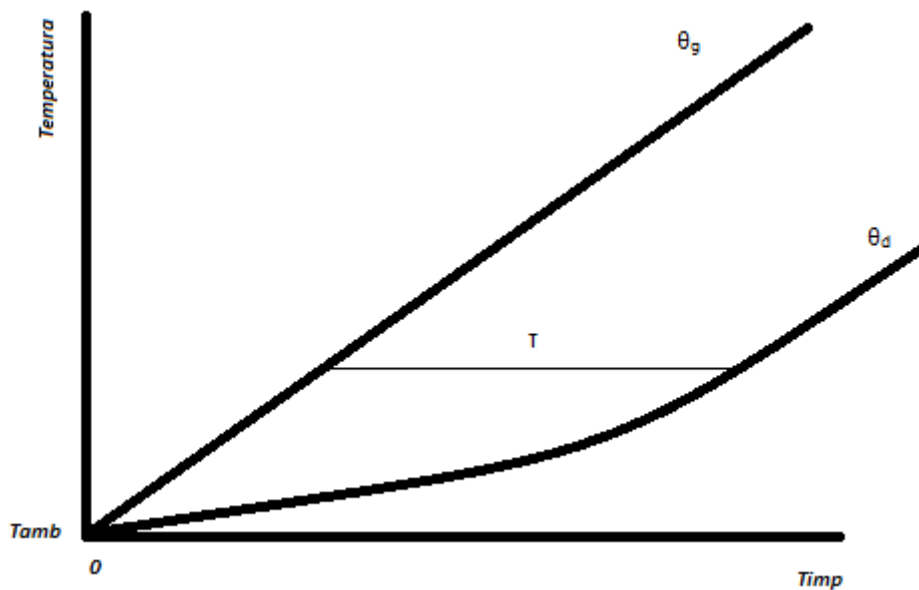


Figura 7. Reprezentarea constantei de timp τ

Datorită faptului că această constantă de timp este proporțională cu viteza aerului sau gazelor la care este măsurată, ea nu reprezintă o măsură ce poate fi utilizată în calculul temperaturii de activare a sprinklerelor [22]. În acest sens, a fost introdus un alt parametru pentru caracterizarea timpului de răspuns. În condiții de

28 Instalații de stingere de tip sprinkler- 2

regim laminar al mișcării coeficientul de transfer termic prin convecție este proporțional cu numărul Reynolds, $h \approx Re^{1/2}$, iar $h \approx u^{1/2}$ și $\tau \approx u^{-1/2}$. Indicele timpului de răspuns a fost introdus de același Heskestad care pe lângă acești parametri a conceput aparatul prezentat în figura 8 [23], în care sprinklerelor sunt imersate, pentru determinarea elementelor de declanșare caracteristice elementelor termosensibile.



Figura 8. Aparat de testare prin imersie

Pentru determinarea indicelui timpului de răspuns caracteristic capetelor sprinkler, acestea sunt imersate într-un jet continuu de aer, a cărui temperatură T_0 și viteză u_0 sunt cunoscute, rezultând:

$$RTI = \tau_0 u_0^{1/2} \quad (2.6)$$

unde τ_0 este constanta de timp determinată în urma încercărilor standardizate, iar u_0 reprezintă viteza jetului de aer cald. Utilizarea indicelui timpului de răspuns RTI ca o măsură a transferului termic este o simplificare deoarece la determinarea acestuia este utilizată o ipoteză de simplificare a calculelor ce presupune ca și coeficientul de transfer termic prin convecție să fie proporțional cu pătratul vitezei jetului de aer, indiferent de mărimea acestuia. Procesul de transfer termic prin convecție este unul complicat atât pentru aplicații ce presupun obiecte sferice sau cilindrice, cât și pentru forme neregulate ca cele ale detectoarelor de incendiu sau ale sprinklerelor. De aceea, utilizarea unei formule de calcul simplificate pare a conduce la surse importante de erori de care inginerii proiectanți trebuie să fie conștienți.

Cu toate acestea, Hollman a demonstrat că există o relație între coeficientul de transferul termic prin convecție și numărul Reynolds ridicat la puterea n ,

coeficient care poate varia între 0,33 și 0,805 în funcție de valorile numărului Reynolds. Pentru valori ale numărului Reynolds cuprinse între 40 și 4000, acolo unde majoritatea problemelor legate de dinamica incendiilor se află, valoarea parametrului n este aproximativ 0,466 [24].

2.4.2 Coeficientul de transfer termic prin conducție C

Dat fiind că modelul de transfer termic ce utilizează indicele timpului de răspuns propune anumite simplificări, în ultima perioadă diverși cercetători au arătat că există o altă sursă ce produce erori în calculul timpului de răspuns care este reprezentată de coeficientul de transfer termic prin conducție de la elementul termosensibil către cadrul sprinklerului, fittinguri și apa din conducte. Importanța acestui parametru a fost descoperită pentru prima dată în anul 1986, atunci când în urma unor multiple teste ce comparau declanșarea unor diferite capete sprinkler s-a observat că indicii timpului de răspuns prezintă valori ridicate pentru viteze scăzute datorate conductivității mărite dintre dispozitivul de declanșare și materialele din alcătuirea corpului sprinklerului [25]. Acesta poate fi cazul incendiilor mocnite sau cu o dezvoltare lentă, unde elementul termosensibil al sprinklerului este încălzit într-un interval de timp mărit, iar pierderile de căldură prin conducție reprezintă un element important în stabilirea timpului de răspuns.

Un alt model simplificat a fost introdus de către Heskestad și Bill [26] pentru analizarea pierderilor de căldură prin conducție. Aceste pierderi sunt proporționale cu diferența de temperatură dintre elementul termosensibil și cadrul sprinklerului, presupunând că temperatura materialului din alcătuirea sprinklerului rămâne neschimbată. Astfel, s-a propus următoarea relație:

$$C = \frac{C \cdot RTI}{mc} \quad (2.7)$$

unde C^l este o constantă caracteristică materialului din alcătuirea sprinklerului.

$$\frac{d(\Delta T_d)}{dt} = \frac{u^{1/2}}{RTI} [\Delta T_g - (1 + \frac{C}{u^{1/2}}) \Delta T_d] \quad (2.8)$$

Prin urmare, ecuația 2.6. conține doi parametri ce caracterizează timpul de răspuns al sprinklerelor, iar unitățile de măsură pentru RTI și C sunt $(\text{lungime timp})^{1/2}$, respectiv $(\text{lungime/timp})^{1/2}$.

Pentru situațiile în care viteza gazelor fierbinți este constantă sau nu se schimbă suficient de mult în timp, ecuația 2.8. poate fi scrisă sub următoarea formă:

$$\frac{d(\Delta T_{dv})}{dt} = \frac{u^{1/2}}{RTI} [\Delta T_g - \Delta T_{dv}] \quad (2.9)$$

$$\Delta T_{dv} = (1 + \frac{C}{u^{1/2}}) \Delta T_d \quad (2.10)$$

$$RTI_v = RTI / (1 + \frac{C}{u^{1/2}}) \quad (2.11)$$

$$\frac{RTI}{1 + \frac{C}{u^{1/2}}} = \frac{-t_r u^{1/2}}{\ln[1 - \Delta T_{dv} (1 + \frac{C}{u^{1/2}}) \Delta T_g]} \quad (2.12)$$

unde ΔT_{dv} reprezintă creșterea virtuală de temperatură în elementul termosensibil, iar RTI_v este indicele timpului de răspuns virtual.

30 Instalații de stingere de tip sprinkler- 2

Pentru obținerea unui timp scăzut de răspuns în cazul incendiilor cu dezvoltare rapidă, este necesar a se utiliza sprinklere cu răspuns rapid. În funcție de indicele timpului de răspuns (RTI) și coeficientul de transfer termic prin conducție sprinklerele sunt clasificate ca fiind cu răspuns standard (1;2), cu răspuns special (3) și cu răspuns rapid (4) așa cum reiese din figura 9 [20].

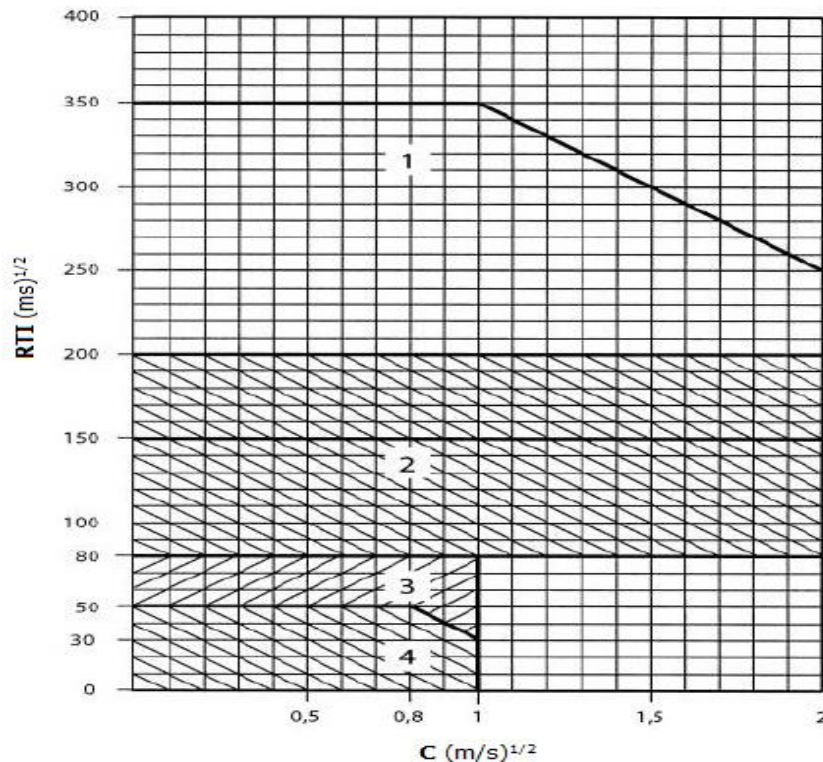


Figura 9. Clasificarea sprinklerelor în funcție de timpul de răspuns

Este foarte important ca la alegerea capetelor sprinkler să se consulte cu atenție diagrama prezentată în figura 9 pentru a se asigura un timp cât mai scurt de răspuns astfel încât rata de degajare de căldură să nu ajungă la valori în care eficiența acestor instalații este cu mult diminuată sau chiar redusă la minim.

Spre exemplu, picături de apă cu diametru mai mic de 2 mm nu pot penetra în plan vertical pana de fum și flăcările generate de un incendiu cu o rată de degajare de căldură mai mare de 4 MW. Deși efectul picăturilor de apă poate contribui la răcirea gazelor de ardere și al flăcărilor, contribuția la limitarea propagării unui incendiu cu o rată de creștere ridicată este nesemnificativ [27].

2.5 Modele analitice de calcul pentru timpul de răspuns al sprinklerelor

Una din problemele importante în domeniul ingineriei securității la incendiu este reprezentată de detectarea cât mai rapidă a unui incendiu în faza sa incipientă astfel încât limitarea propagării sale să fie realizată cu eficiență sau să poată fi stins

2.5. – Modele analitice de calcul pentru timpul de răspuns al sprinklerelor 31

cu ușurință. În majoritatea cazurilor, după aprindere, incendiile manifestă o scurtă perioadă de creștere constantă, atunci când arderea este influențată de materialele combustibile disponibile. Dacă incendiul nu este detectat cu eficiență la valori ale ratei de căldură degajate de până în 500 kW, atunci perioada constantă de creștere este urmată de o dezvoltare rapidă însoțită de propagarea flăcărilor la materialele combustibile învecinate. Faza de ardere generalizată prezintă, de asemenea, o rată a căldurii degajate constantă, însă care poate fi suficient de mare pentru a afecta stabilitatea construcției chiar și în cazul în care instalația de stingere cu sprinklere a fost activată.

2.5.1 Modelul Alpert

Alpert a dezvoltat corelații pentru jetul de gaze din zona plafonului în vederea determinării timpului de răspuns al elementelor termosensibile din alcătuirea detectoarelor de incendiu, precum și al instalațiilor de stingere de tip sprinkler. Pentru realizarea acestor formule matematice, Alpert a realizat o serie de teste în clădiri cu înălțimi cuprinse între 4,5 și 16 m, în care nu au fost plasate obstacole orizontale, iar pereții s-au aflat la distanțe suficient de mari încât nu s-a permis formarea unui strat superior de fum și gaze fierbinți.

Totodată, sursa de căldură a fost reprezentată de către un arzător circular pe bază de heptan la care au fost realizate diferite rate ale căldurii degajate și care au fost menținute la un nivel constant pe întreaga desfășurare a testelor, se ajunge la [28, 29]:

$$a) \quad T_g - T_a = \frac{\left[5.38 \left(\frac{\dot{Q}}{r} \right) \right]^{2/3}}{H} \quad (2.13)$$

pentru $r/H > 0.18$, și

$$T_g - T_a = \frac{\left[16.9 \left(\frac{\dot{Q}}{r} \right) \right]^{2/3}}{H} \quad (2.14)$$

pentru $r/H \leq 0.18$.

$$b) \quad u = \frac{\left(0.20 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2} \right)}{r^{5/6}} \quad (2.15)$$

pentru $r/H > 0.15$, și

$$u = 0.95 \left(\frac{\dot{Q}}{H} \right)^{1/3} \quad (2.16)$$

pentru $r/H \leq 0.15$, în care:

T_g – temperatura gazelor de ardere [$^{\circ}\text{C}$];

32 Instalații de stingere de tip sprinkler- 2

T_a – temperatura mediului ambiant [$^{\circ}\text{C}$];
 Q – rata totală de căldură degajată [kW];
 r – distanța orizontală măsurată de la central paneei de fum până la sprinkler;
 H – înălțimea de la focarul de incendiu până la sprinkler;
 u – viteza gazelor de ardere în zona plafonului.

Gazele fierbinți produse în cazul unui incendiu sunt ridicate la nivelul plafonului datorită fenomenului de flotabilitate, iar prin amestecul cu aerul ambiant formează așa-numita pană de fum care se deplasează radial la nivelul plafonului către extremități așa cum este prezentat în figura 10 [30].

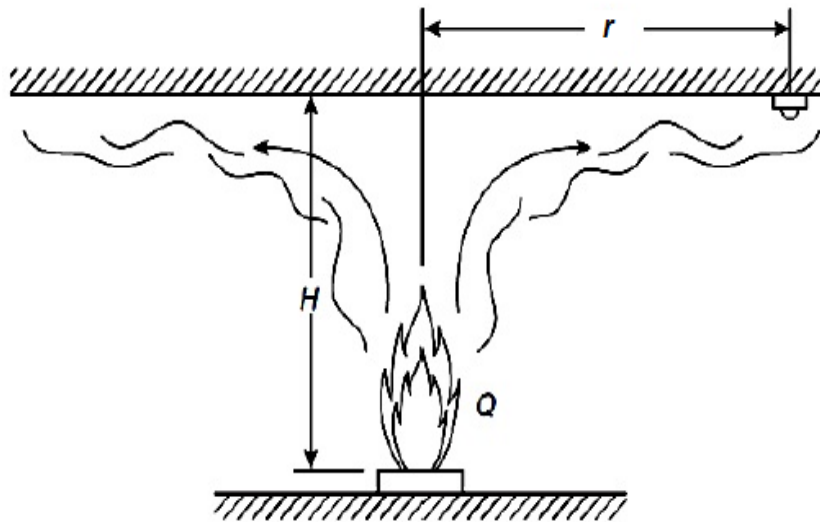


Figura 10. Fenomenul de formare a jetului de gaze fierbinți în zona plafonului

Urmare acestor teste, s-a decoperit faptul că grosimea acestui jet de gaze fierbinți variază între 5 și 12 % din înălțimea deasupra focarului de incendiu până la plafon, iar temperaturile și vitezele maxime corespunzătoare sunt atinse la o distanță de 1 % măsurată pe verticală între plafon și focarul de incendiu.

Cu toate că aceste corelații oferă un model de calcul al timpului de răspuns, ele au la bază anumite ipoteze și simplificări pe care inginerii proiectanți trebuie să le cunoască în momentul utilizării lor:

- elementul termosensibil este încălzit ca urmare a procesului de transfer termic prin convecție forțată;
- pierderile prin conducție de la elementul termosensibil către fittinguri și conducte sunt neglijate. (Ținând cont că elementul termosensibil are inerția termică cea mai mică comparativ cu celelalte elemente ale capului sprinkler, se poate concluziona că transferul termic prin conducție este neglijabil);
- pierderile de căldură prin radiație sunt neglijate. Având în vedere că focarul de incendiu este format din heptan la care procentul de pierderi prin radiație reprezintă 10 % din totalul ratei de căldură degajate, se poate concluziona că pierderile de căldură prin radiație sunt mici în raport cu cele prin convecție;
- elementul termosensibil este încălzit în mod uniform pe întreaga sa suprafață;

- obstrucțiile orizontale de la nivelul plafonului nu sunt mai mari de 1 % din înălțimea măsurată deasupra focarului;
- rata de degajare a căldurii este constantă, focarul fiind plasat sub plafoane netede cu o lungime nelimitată;
- modelul nu include timpul de transport de la focar până la plafon, asumând că transportul de căldură se realizează instantaneu;
- focarele de incendiu plasate în apropierea pereților sau a colțurilor încăperilor nu sunt luate în considerare.

2.5.2 Modelul Evans – Stroup

Acest model se bazează pe corelațiile descoperite de către Alpert, singura diferență fiind reprezentată de rata de creștere a căldurii, care în ecuațiile prezentate de Evans – Stroup urmează o creștere exponențială până la un moment în care starea de echilibru este obținută. La cererea Autorității de Reglementare în Domeniul Nuclear din Statele Unite ale Americii, cei doi cercetători au realizat un nou set de ecuații pentru implementarea unui program computerizat menit să calculeze timpul de răspuns al elementelor de detectare specifice instalațiilor de protecție împotriva incendiilor.

Programul dezvoltat de către aceștia se numește DETACT-QS și necesită introducerea următorilor parametri pentru determinarea timpului de răspuns: înălțimea plafonului, H , temperatura mediului ambiant, T_a , distanța orizontală de la centrul focarului de incendiu la elementul termosensibil al sprinklerului, r , temperatura de activare a sprinklerului T_d și indicele timpului de răspuns RTI. De asemenea, rata de creștere a căldurii trebuie calculată potrivit proprietăților fiecărui material combustibil astfel încât rata de creștere a acestuia să corespundă cu pierderea de masă specifică [30].

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{u^{1/2}}{RTI} [T_g - T_d] = \frac{T_g - T_d}{\tau} \quad (2.17)$$

$$\Delta T_d = T_{d,n} - T_{d,n-1} = \frac{u^{1/2}}{RTI} [T_{g,n} - T_{d,n-1}] \Delta t \quad (2.18)$$

$$T_{d,n} = T_{d,n-1} + \left[\frac{u^{1/2}}{RTI} (T_{g,n} - T_{d,n-1}) \Delta t \right] \quad (2.19)$$

La momentul inițial t_0 elementul termosensibil nu este expus la temperatura gazelor fierbinți, având temperatura egală cu cea a mediului ambiant. Pentru primul interval de timp temperatura elementului termosensibil se schimbă în funcție de cea a mediului ambiant și poate fi calculată cu relația:

$$T_{d,1} = T_{d,0} + \left[\frac{u^{1/2}}{RTI} (T_{g,1} - T_{d,0}) \Delta t \right] \quad (2.20)$$

Pentru simplificarea calculelor se pot utiliza documente de tip Excel sau programul mai sus menționat, care nu numai că reduc timpul de lucru, ci și elimină posibilitatea unor erori de calcul.

Pe lângă potențialele surse de erori introduse de modelul dezvoltat de Alpert, ecuațiile lui Evans și Stroup pot prezenta anumite surse de incertitudine referitoare la determinarea ratei de creștere a căldurii dezvoltate de incendiu, precum și momentul în care aceasta atinge starea de echilibru.

2.5.3 Modelul Heskestad – Delichatsios

Heskestad și Delichatsios au realizat un set de ecuații utilizate în programele de modelare a incendiilor prin care este prezentată o relație funcțională între temperatura și viteza gazelor de ardere și rata de creștere a incendiilor potrivit principiului de ridicare la putere. Aceștia au demonstrat că majoritatea incendiilor prezintă o creștere exponențială ce respectă următoarea ecuație [31]:

$$\dot{Q} = at^p \quad (2.21)$$

unde:

a – constantă specifică materialelor combustibile ce descrie rata de creștere a unui incendiu [kW/s^2];

t – timp [s];

p – număr pozitiv specific tipului de incendiu (în funcție de materialul combustibil);

Q – rata căldurii degajate [kW].

Pentru calcularea temperaturii, respectiv a vitezei gazelor de ardere, în anexa B din NFPA 72 este utilizată o constantă denumită "timpul de creștere a incendiului", t_g , care împreună cu a descrie intensitatea incendiului. Rata de creștere a incendiului este definită ca perioada de timp în care incendiile ce prezintă o creștere exponențială ating o rată a căldurii degajate de 1055 kW [32].

$$\dot{Q} = \left(\frac{1055}{t_g^2}\right)t^p = at^p \quad (2.22)$$

De asemenea, pentru determinarea parametrilor mai sus menționați au fost utilizate mărimi adimensionale pentru temperatura și viteza jetului de fum și gaze fierbinți, după cum urmează:

$$U_p^* = \frac{u}{A^{1/(3+p)} a^{1/(3+p)} H^{(p-1)/(3+p)}} = f\left(t_p^*, \frac{r}{H}\right) \quad (2.23)$$

$$\Delta T_p^* = \frac{\Delta T}{A^{2/(3+p)} \left(\frac{T_a}{g}\right) a^{2/(3+p)} H^{-(5-p)/(3+p)}} = g\left(t_p^*, \frac{r}{H}\right) \quad (2.24)$$

unde $t_p^* = \frac{u}{A^{-1/(3+p)} a^{-1/(3+p)} H^{4/(3+p)}} \quad (2.25)$

$$A = \frac{g}{c_p T_a \rho_0} \quad (2.26)$$

Deoarece marea majoritate a materialelor combustibile prezintă o creștere exponențială în care $p=2$, un nou set de ecuații a fost dezvoltat de către aceeași autori în vederea simplificării calculului timpului de răspuns al sprinklerelor, precum și al detectoarelor de incendiu, presupunând [33]:

$$t_{2f}^* = 0,861\left(1 + \frac{r}{H}\right) \quad (2.27)$$

În condițiile în care $t_2^* < t_{2f}^*$, atunci frontul de căldură nu a ajuns la elementul termosensibil al sprinklerului și, prin urmare, $\Delta T_p^* = 0$.

Prin urmare, rata de creștere a temperatură ce rezultă în urma ipotezelor prezentate este:

$$\Delta T_2^* = \left(\frac{t_2^* - t_{2f}^*}{0,146 + 0,242r/H} \right)^{4/3} \quad (2.28)$$

$$\frac{u_2^*}{(\Delta T_2^*)^{1/2}} = 0,59 \left(\frac{r}{H} \right)^{-0,63} \quad (2.29)$$

Dacă aceste corelații pentru temperatură și viteză sunt introduse în relația 2.17. ce descrie transferul termic în elementul termosensibil, atunci, timpul de răspuns al sprinklerului este următorul:

$$T_d(t) - T_d(0) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2^*} \right) \Delta T_2^* \left[\frac{1 - (1 - e^{-Y})}{Y} \right] \quad (2.30)$$

derivând în funcție de timp și aranjând termenii se obține:

$$\frac{dT_d(t)}{dt} = \frac{\left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2^*} \right) (\Delta T_2^*)^{1/4} (1 - e^{-Y})}{\left(\frac{t}{t_2^*} \right)^D} \quad (2.31)$$

unde

$$Y = \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{u}{u_2^*} \right)^{1/2} \left(\frac{u_2^*}{\Delta T_2^*} \right)^{1/2} \left(\frac{\Delta T_2^*}{RTI} \right) \left(\frac{t}{t_2^*} \right)^D \quad (2.32)$$

și

$$D = 0,146 + 0,242r/H \quad (2.33)$$

în care:

A – aria (m²);

C_p – căldura specifică a aerului (kJ/kgK);

Δt – rata de creștere a timpului (s);

ΔT – rata de creștere a temperaturii gazelor fierbinți (°C);

g – accelerație gravitațională (9.81 m/sec²);

r – distanța radială față de centrul panii de fum (m);

ρ₀ = densitatea aerului ambiant (kg/m³);

RTI = response time index (m^{1/2} sec^{1/2});

t – timp (s);

t_c – timp critic în care rata de căldură degajată atinge valoarea de 1055 kW (s);

t_g – perioada de dezvoltare a incendiului la care atinge valoarea de 1055 kW (s);

t_{2f} – timpul în care cantitatea de căldură degajată de incendiu (pentru p = 2) ajunge în punctul r/H (s);

t_p^{*} – perioada de întârziere (s);

T – temperatura (°C);

T_a – temperatura mediului ambiant (°C);

T_c – temperatura măsurată în centrul panii de fum (°C);

T_d – temperatura elementului de detectare (°C);

T_g – temperatura gazelor fierbinți (°C);

T_s – temperatura de declanșare a sprinklerului (°C);

u₀ – viteza instantanee a gazelor fierbinți (m/s);

u – viteza (m/s);

u_c – viteza critică a jetului de gaze fierbinți (m/s);

U_p^* - viteza gazelor fierbinți (mărimă adimensională).

La fel ca și celelalte modele, aceasta din urmă introduce anumite surse de erori care pot conduce la valori eronate ale timpului de răspuns. Creșterea de temperatură în interiorul elementului de declanșare a sprinklerului poate avea deviații de până la 50 % față de valorile calculate. Diferența maximă apare atunci când raportul dintre distanță radială față de centrul focarului și înălțimea încăperii depășește 0,37.

Schimbarea temperaturii în interiorul elementului fuzibil sau a bulbului de sticlă prezintă erori de 5 până la 10^0 C, iar valorile maxime înregistrate sunt întâlnite la spații cu tavan amplasat la înălțimi reduse coroborat cu incendii ce prezintă rate ridicate de creștere a căldurii degajate [33].

Erorile specifice vitezei de mișcare a fumului și gazelor fierbinți sunt proporționale cu temperatura, potrivit relației 2.29. Atât în situația existenței pereților în apropierea focarului, precum și în lipsa acestora, viteza gazelor pare a nu fi afectată de transferul termic către plafon; în schimb se constată o scădere a vitezei cu 10 până la 20 % în momentul formării stratului superior de fum.

Alpert a folosit datele experimentale rezultate în urma unor serii de încercări la scară naturală pentru a elabora ecuații în cazul compartimentelor cu pereți existenți în apropierea focarului. Relația adimensională a vitezei gazelor de ardere este următoarea [34]:

$$u^* = \frac{u}{Q^{*1/3}(gH)^{1/2}} = f(r/H) \quad (2.34)$$

unde u este viteza gazelor (m/s), g este accelerația gravitațională (m/s^2), H este înălțimea spațiului și Q^* este rata de căldură adimensională.

Rata de căldură adimensională se poate calcula cu relația lui Cooper, după cum urmează:

$$Q^* = \frac{(1-\lambda)Q}{\rho c_p T g^{1/2} H^{5/2}} \quad (2.35)$$

unde λ este procentul pierderilor de căldură prin radiație, Q este rata de căldură degajată (kW), ρ este densitatea aerului ambiant (kg/m^3), c_p este căldura specifică a aerului (kJ/kgK), T este temperatura aerului ambiant (K), g este accelerația gravitațională (m/s^2), iar H este înălțimea spațiului analizat.

2.6 Concluzii

Instalațiile de stingere cu sprinklere, indiferent de principiul de funcționare sunt declanșate prin intermediul unor dispozitive de detectare a incendiului. În marea majoritate a cazurilor, aceste dispozitive de declanșare acționează ca urmare a creșterii bruște a temperaturii mediului ambiant. În consecință, temperatura mediului ambiant mărește rata de transfer termic către elementul termosensibil care provoacă acționarea sprinklerului, respectiv micșorează timpul de declanșare al acestuia.

În alte situații, acționarea instalațiilor de stingere se realizează prin intermediul instalațiilor de detectare, alarmare și avertizare în caz de incendiu. Detectoarele de incendiu sunt prezente într-o gamă variată, iar principiul de funcționare diferă față de cel al elementului termosensibil al sprinklerelor. Cu toate acestea ambele dispozitive de declanșare au în comun parametrul denumit indicele timpului de răspuns. Mărimea acestui parametru influențează direct intervalul de

timp de la izbucnirea incendiului până la sesizarea sa și declanșarea instalațiilor de stingere.

Un alt parametru specific elementelor de declanșare asociate sprinklerelor este coeficientul de transfer termic prin conducție. Alături de indicele timpului de răspuns, acest parametru indică sensibilitatea de activare a sprinklerelor pe timpul unui incendiu.

Criteriul principal în alegerea și montarea capetelor sprinkler rămâne temperatura de declanșare a elementului termosensibil, în funcție de condițiile mediului ambiant al spațiului protejat. Alegerea temperaturii de declanșare se face potrivit unui cod de culori indicat în tabele 3 și 4, separat pentru fiecare tip de element de declanșare cu care este echipat fiecare cap sprinkler.

Eficiența de stingere a instalațiilor cu sprinklere este strâns legată de determinarea cu acuratețe a timpului de răspuns.

Capitolul de față prezintă metodele analitice uzuale folosite în domeniul ingineriei securității la incendiu. Alegerea metodei de calcul trebuie să fie atent analizată și fundamentată în funcție de natura și dezvoltarea unui incendiu.

La calcularea timpului de răspuns aferent instalațiilor de sprinklere trebuie evaluate limitările tuturor modelelor disponibile, iar la sfârșitul procesului de proiectare aceste limitări trebuie cuprinse în documentația tehnică. Proiectarea ingineriei securității la incendiu presupune introducerea unor ipoteze de lucru și limitări fără de care realizarea proiectului ar fi imposibilă.

Calitatea unui astfel de proiect este determinată de natura ipotezelor de lucru folosite, precum și modul de prezentare al acestora. De aceea, este imperios necesar ca la utilizarea metodelor ingineriei securității la incendiu în determinarea timpului de răspuns caracteristic sprinklerelor să se facă o analiză atentă a tuturor metodelor de lucru, precum și a potențialelor surse de erori asociate acestora.

3 Programe computerizate de simulare a incendiilor

3.1 Noțiuni generale

Utilizarea pe scară largă a metodelor de proiectare privind ingineria securității la incendiu, precum și complexitatea calculului ce stau la baza acestora a condus la apariția mai multor programe de simulare a incendiilor. Menite să ușureze munca inginerilor proiectanți, programele de simulare ajută la micșorarea timpilor ce implică rezolvarea analitică a ecuațiilor ce caracterizează procesele de ardere, precum și la analizarea unor probleme complexe referitoare la incendii.

Cu toate că în ultima perioadă s-a realizat un progres important în ceea ce privește cercetarea în domeniul securității la incendiu, ecuațiile ce stau la baza acestor programe prezintă anumite limitări pe care utilizatorii trebuie să le înțeleagă. Indiferent de nivelul de dificultate al problemei rezolvate, precum și gradul de fidelitate al interfaței de simulare, utilizatorul trebuie să fie întotdeauna familiarizat cu noțiunile caracteristice de dinamica incendiilor specifice proceselor de ardere și să cunoască posibilele surse de erori ce pot apărea pe parcursul unei simulări. În momentul de față există o multitudine de astfel de programe care pot fi accesate contra cost, altele prezintă variante cu acces limitat sau să poată fi accesat în mod liber, așa cum este cazul celui mai popular program din această categorie (Fire Dynamics Simulator).

În funcție de complexitatea modelelor ce necesită a fi simulate, de complexitatea ecuațiilor și de tipul programului de simulare, capacitatea de procesare a computerelor este mai mult sau mai puțin solicitată. Pornind de la simulări de ordinul secundelor și sfârșind cu cele ce durează zile sau săptămâni, este important ca aceste programe să fie utilizate într-un mod cât mai corect, iar utilizatorul să înțeleagă pe deplin modelele de bază ale acestor mijloace de proiectare. În egală măsură este necesar ca la utilizarea lor să fie cunoscut în mod temeinic acuratețea și validitatea rezultatelor obținute.

În general, aceste modele sunt utilizate pe scară largă la proiectarea sistemelor de evacuare a fumului și gazelor fierbinți, la studii pentru evaluarea timpilor de activarea a detectoarelor de incendiu și a sprinklerelor și la investigarea cauzelor de incendii. Utilizarea avansată implică probleme legate de piroliză, propagarea flăcărilor, dezvoltarea incendiilor și stingerea cu apă prin utilizarea instalațiilor de tip sprinkler. În acest sens, Emanuele Gissi sublinia în una din lucrările sale următorul aspect: "La momentul de față utilizatorii ar trebui să evite folosirea programelor de simulare pentru probleme avansate, deoarece acestea sunt supuse unui proces intens de cercetare care încă nu este finalizat" [35], afirmație valabilă și astăzi.

Cele mai utilizate astfel de programe pot fi împărțite în două categorii, în funcție de principiile de funcționare. În prima categorie sunt incluse așa-numitele modele cu două zone, care prezintă cele mai multe simplificări și ipoteze incluse în ecuațiile matematice, iar cea de-a doua categorie mult mai complexă din punct de vedere funcțional, este cea a modelelor de simulare privind dinamica fluidelor (CFD)

care ajută la simularea unor probleme complexe de incendiu. Acestea din urmă solicită computere cu capacitate de procesare ridicată, iar timpul necesar pentru realizarea simulărilor este proporțional cu gradul de complexitate al problemei rezolvate și capacitatea propriilor calculatoare.

Cu toate că programele de simulare a incendiilor cu două zone sunt mult mai simple din punct de vedere al utilizării lor, cele de simulare privind dinamica fluidelor au cunoscut un progres rapid, iar aceasta a dus la utilizarea lor pe scară largă. Dat fiind că modelele de tip CFD au la bază ecuații mult mai complexe, oferă soluții apropiate de modelul real, fiind mult mai exacte decât programele ce au la bază modele cu două zone.

3.2 Descrierea programelor de simulare privind dinamica fluidelor (CFD)

Programele de simulare a incendiilor ce utilizează dinamica fluidelor sunt cele mai complexe din punct de vedere al ecuațiilor ce stau la baza modelului și oferă o soluție completă în trei dimensiuni, ca funcție de timp pentru ecuațiile fundamentale privind legile conservării (masă, moment și energie). Volumul studiat este împărțit într-un număr de diviziuni egale sub forma unor celule de lucru, în care ecuațiile ce guvernează procesele de dinamica fluidelor sunt rezolvate.

În vederea determinării rezultatelor necesare pentru problema simulată, ecuațiile privind legile de conservare a masei, momentului și energiei sunt rezolvate în celulele de calcul. Soluția poate fi obținută fie în centrul celulelor de calcul sau în cele patru colțuri ale acestora.

Atunci când se dorește modelarea unui incendiu, programul trebuie să fie capabil să simuleze fiecare aspect caracteristic acestui amplu fenomen care implică aspecte de mișcare a fumului, radiație, turbulență, căldură degajată, temperatură, propagarea flăcărilor, transfer de căldură etc. Dacă cel puțin unul din aspectele enumerate nu poate fi modelat, atunci simularea nu este completă.

3.2.1 Elementele ce alcătuiesc procesul de simulare

Deși multe astfel de programe de simulare prezintă o interfață interactivă, iar folosirea acestora pare la îndemâna oricărui utilizator, în realitate există anumiți pași ce trebuie respectați pentru obținerea unor rezultate valide și cât mai aproape de realitate. Chiar dacă în momentul de față aceste etape nu sunt publicate sub forma unui document oficial sau al unui standard internațional, ele vin în sprijinul utilizatorului pentru a-l ajuta la identificarea potențialelor surse de erori. Cu toate că lista acestor etape poate fi completată cu alte activități, este important să le menționăm pe cele semnificative dintre acestea:

- a) formularea problemei – în cadrul acestei etape de lucru este important a se identifica obiectivul simulării, precum și determinarea parametrilor sau obiectului fizic ce trebuie modelat. Totodată, în acest stadiu trebuie determinată metoda de lucru potrivită modelului identificat și ecuațiile ce descriu fenomenul simulat;
- b) realizarea geometriei – determinarea formelor geometrice specifice modelului reprezintă un proces important deoarece în funcție de modul de generare al celulelor de lucru depinde implementarea obiectului în program. Astfel, anumite simplificări ale formelor geometrice pot fi necesare, iar validitatea rezultatelor obținute poate fi influențată încă din această etapă;

- c) reprezentarea domeniului de lucru – domeniul de lucru reprezintă volumul împărțit în celule de lucru/calcul în care ecuațiile ce stau la baza programului sunt rezolvate. În funcție de tipul problemei ce trebuie simulată, se stabilesc dimensiunile domeniului, precum și forma acestuia. Spre exemplu, în condițiile în care este necesar a se simula mișcarea fumului și gazelor fierbinți generate în urma unui incendiu în cadrul unui compartiment ce prezintă o ușă deschisă, se impune ca dimensiunea domeniului de lucru să fie extinsă în afara limitelor compartimentului de incendiu astfel încât programul de simulare să fie capabil a modela toți parametri ce influențează procesul de ardere;
- d) generarea celulelor de lucru – această etapă reprezintă împărțirea domeniului de lucru în celule egale ca volum în care ecuațiile ce caracterizează mișcarea fluidelor sunt approximate;
- e) specificarea condițiilor inițiale și a parametrilor de lucru specifici obiectului simulat – în funcție de tipul programului de simulare este necesar a se introduce anumiți parametri pe care modelul nu este capabil să le genereze. De asemenea, caracteristicile materialelor ce intră în alcătuirea obiectului sau diferitelor materiale componente implicate în procesul de ardere este necesar a fi specificate. Este important ca la stabilirea obiectivelor să se specifice în clar prioritatea acestora, iar în funcție de ele să se realizeze scenariile de incendiu specifice;
- f) rularea și monitorizarea simulării – este indicat ca rularea simulărilor să se realizeze în etape astfel încât să se evite consumarea timpului și să se asigure convergența erorilor;
- g) examinarea rezultatelor obținute în urma simulării – implică vizualizarea rezultatelor obținute, precum și determinarea validității acestora prin raportarea la rezultate unor încercări experimentale realizate anterior, prevederi ale reglementărilor în vigoare sau rezultatele unor proiecte similare;
- h) raportarea rezultatelor – un aspect important în generarea rezultatelor finale îl reprezintă analizarea posibilelor surse de erori, precum și includerea acestora în raportul final.

Toate aceste etape pot fi pe scurt reprezentate sub forma unui lanț de activități interdependente, după cum urmează:

- identificarea fizică a problemei de interes;
- simplificarea problemei în părți esențiale;
- reprezentarea matematică a problemei simplificate;
- discretizarea modelului matematic;
- implementarea modelului într-un program de simulare;
- modelarea propriu-zisă;
- procesarea și raportarea rezultatelor finale.

3.2.2 Reprezentarea ecuațiilor ce stau la baza acestor programe de simulare

Fluidele sunt substanțe care în mod continuu se deformează atunci când o forță este aplicată asupra lor. În cadrul procesului de mișcare, fie că este vorba de curgere sau flotabilitate, forțe specifice procesului acționează asupra fluidului, formând un echilibru de forțe. Materia este alcătuită din structuri moleculare, iar în momentul în care se dorește modelarea unui anumit obiect, atunci este necesar ca

programul să dispună de capacitățile necesare pentru simularea mișcării acestor structuri moleculare. În realitate acest lucru nu este posibil deoarece capacitatea calculatoarelor este mult sub valorile necesare pentru rezolvarea ecuațiilor ce stau la baza simulării fluidelor, așa cum reiese din figura 11 [37]. Ținând cont că un litru de aer conține $6,022 \times 10^{23}$ molecule este lesne de înțeles că va fi extrem de dificil să se realizeze simularea celor mai mici structuri existente [36].

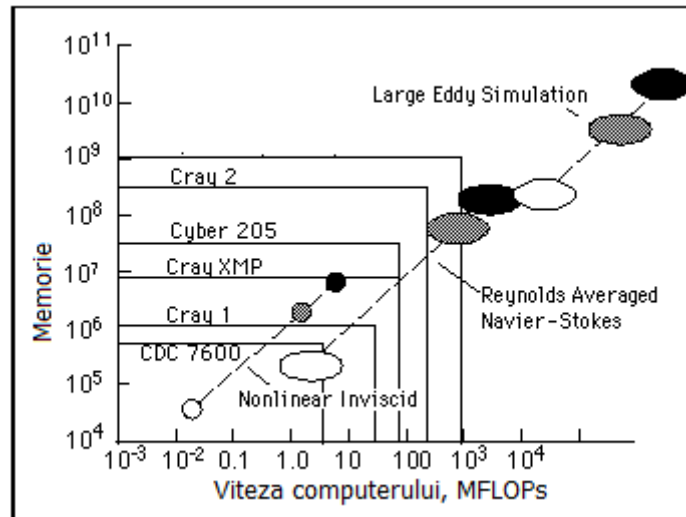


Figura 11. Capacitatea calculatoarelor pentru rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes

În acest sens, reprezentarea moleculelor se realizează ca un mediu continuu, unde proprietățile statistice ale fluidului pot fi derivate. În această reprezentare se asumă faptul că aceste proprietăți există în tot volumul, iar dimensiunile particulelor nu vor coborî la valori atât de mici încât acestea vor dispărea. Pentru a se stabili dacă acest model continuu poate fi aplicat unei simulări, este necesar a se verifica numărul lui Knudsen [38]:

$$kn = \frac{\lambda}{L} \quad (3.1)$$

unde λ este lungimea medie ce descrie mișcarea unei molecule, iar L reprezintă o lungime caracteristică a obiectului analizat sau a mișcării.

În aerul atmosferic la 25°C , lungimea medie ce descrie mișcarea unei molecule este aproximativ 8×10^{-8} m. Majoritatea problemelor practice referitoare la dinamica fluidelor apar la valori reduse ale numărului Knudsen ($Kn \ll 0,1$). În rezolvarea problemelor ce țin de dinamica incendiilor, această lungime caracteristică mișcării moleculelor nu este un factor important deoarece dimensiunile compartimentelor analizate sunt de ordinul unității ajungând până la sute de metri. Pentru ca valorile numărului Knudsen să fie egale cu unitatea este necesar ca fie densitatea fluidului să fie foarte mică, lucru caracteristic spațiului aerian sau ca lungimea caracteristică a obiectului să fie foarte mică (structuri de ordinul nanometrilor – mișcarea fluidelor în interiorul corpului uman). Deoarece în cazul incendiilor niciuna din aceste condiții nu este valabilă, atunci este posibil ca fluidul să fie reprezentat ca un continuu.

Ecuțiile care descriu mișcarea fluidelor sunt cunoscute ca ecuațiile Navier-Stokes, iar modelele matematice utilizate de programele de simulare privind dinamica fluidelor au la bază derivarea acestor formule.

Aceste ecuații sunt folosite la determinarea vectorului de viteză ce se aplică mișcării fluidelor, atunci când condițiile inițiale sunt cunoscute.

Există trei legi principale de conservare aplicate fluidelor:

- legea conservării masei;
- legea conservării momentului;
- legea conservării energiei.

Toate aceste legi ale conservării formează baza modelării fluidelor. Astfel, printr-un singur set de ecuații se poate descrie mișcarea fluidelor, indiferent de natura acestora. În vederea rezolvării acestor ecuații este necesar a se stabili modelul adecvat ce trebuie aplicat fluidului considerat continuu. Două decizii sunt necesare la alegerea acestui model:

1. Alegerea sistemului de referință
 - Lagrangian – specific mișcării particulelor;
 - Eulerian – utilizat pentru reprezentarea domeniului de lucru;
2. Alegerea elementului de bază
 - Volum finit – se consideră un volum definit în spațiu în care ecuațiile ce guvernează mișcarea fluidelor sunt integrate;
 - Element infinitesimal – considerând un element infinitesimal în spațiu asupra căruia ecuațiile sunt reprezentate sub forma unor derivate parțiale.

Pentru majoritatea programelor de simulare privind dinamica fluidelor (CFD), un volum în spațiu tinde să fie reprezentativ deoarece ecuațiile sunt ușor de integrat și devine mult mai natural a utiliza ecuațiile sub forma legilor de conservare.

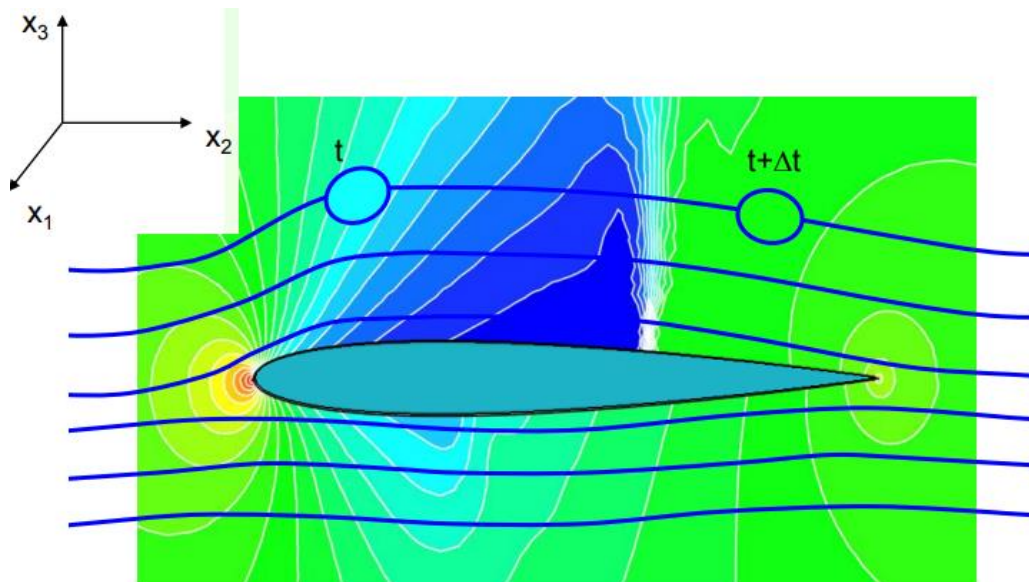


Figura 12. Reprezentarea sistemului de referință Lagrangian

Sistemul de referință Lagrangian poate fi descris prin mișcarea unui volum de aer odată cu curgerea unui lichid. Așa cum se poate observa din figura 12, volumul de aer se mișcă de-a lungul debitului de lichid împreună cu un sistem de

coordonate. La fiecare interval de timp acest volum de aer își schimbă coordonatele, precum și valorile proprietăților caracteristice datorită mișcării moleculelor ce alcătuiesc acest continuum.

Toate proprietățile caracteristice fluidului se schimbă odată cu mișcarea fluidului, schimbându-și poziția în sistemul de coordonate (x, y, z) în funcție de timp. Sistemul Lagrangian reprezintă schimbarea valorii unei proprietăți în timp datorită mișcării unui fluid în spațiu.

În cazul sistemului de referință Eulerian, sistemul de coordonate rămâne fix, iar poziția volumului de aer își va stabili coordonatele raportându-se la valoarea staționară a acestui sistem.

Majoritatea programelor de simulare privind dinamica fluidelor suprapun un sistem fix de celule de lucru peste sistemul de referință Eulerian, iar fluidul se mișcă de-a lungul celulelor de lucru, ecuațiile fiind approximate într-un sistem fix de referință.

Pentru a raporta sistemul de referință Lagrangian la unul Eulerian, programele de simulare utilizează teorema de transport a lui Reynolds, iar reprezentarea schematică a acestui proces se regăsește în figura 13 [39].

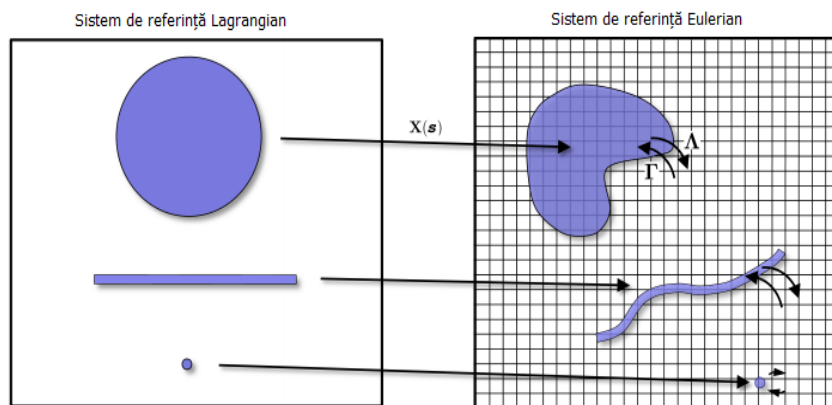


Figura 13. Modalități de reprezentare a sistemelor de referință

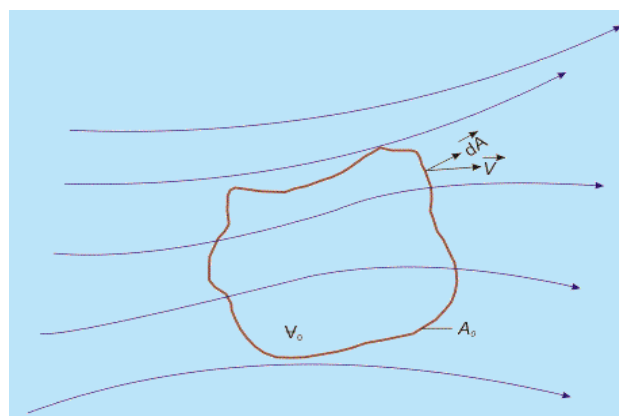


Figura 14. Volum fix în spațiu prin care are loc curgerea unui lichid

Prin volumul fix specificat în figura 14 [40] are loc curgerea unui fluid. Potrivit teoremei de transport a lui Reynolds rata de schimbare a proprietății unui sistem este egală cu suma ratei de schimbare a acelei proprietăți în interiorul volumului fix și debitul net al proprietății prin suprafața ce delimitează acel volum.

$$\frac{dB_{\text{sis}}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho b dV + \int_A \rho \left(\vec{U} \cdot \vec{n} \right) b dA \quad (3.2)$$

unde:

B – cantitate absolută, ce poate reprezenta cantitatea de energie în sistemul termodinamic;

ρ – densitatea;

b – cantitatea absolută per unitatea de masă;

\vec{U}

– vectorul de viteză;

\vec{n}

– direcție perpendiculară pe suprafață;

Ecuția 3.2 va fi aplicată legilor de conservare, iar pentru fiecare astfel de ecuație există un corespondent al proprietății absolute, după cum urmează:

Tabel 5. Proprietățile caracteristice unui sistem asociat fluidelor

Legea conservării	Unitate absolută (B)	Unitate specifică (b)
Masa	$m = \rho V$	1
Moment	$m \vec{U}$	\vec{U}
Energie	E	e

1. Legea conservării masei

$$\left[\begin{array}{l} \text{Rata de schimbare} \\ \text{a masei în} \\ \text{volumul fix} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Fluxul net al} \\ \text{masei prin volumul} \\ \text{fix} \end{array} \right]$$

Masa poate fi acumulată într-un volum prin creșterea densității sau a presiunii. Procesul invers conduce la reducerea masei. Pentru probleme de mișcare a fumului, importante sunt schimbările în presiune datorate modificării densității. Dat fiind că majoritatea programelor de simulare a incendiilor consideră fluidele incompresibile, procesul de schimbare în densitate se realizează prin creșterea temperaturilor.

Ecuția de conservare a masei poate fi exprimată atunci când $b=1$, sub următoarea formă:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_A \rho \left(\vec{U} \cdot \vec{n} \right) dA \quad (3.3)$$

Pentru a reduce ecuația 3.3. la forma diferențială este necesar a considera cubul din figura 15 [41] într-un sistem de coordonate, iar curgerea fluidului are loc printr-o singură față a volumului acestui cub. Masa de lichid ce curge în direcția x este egală cu produsul dintre densitate, vectorul de viteză perpendicular pe acea față și aria acelei suprafețe de curgere.

Dacă acest cub reprezintă un element infinitezimal, atunci pentru a vedea variația proprietății studiate când are loc o mișcare în spațiu se poate realiza prin aplicarea unei serii Taylor.

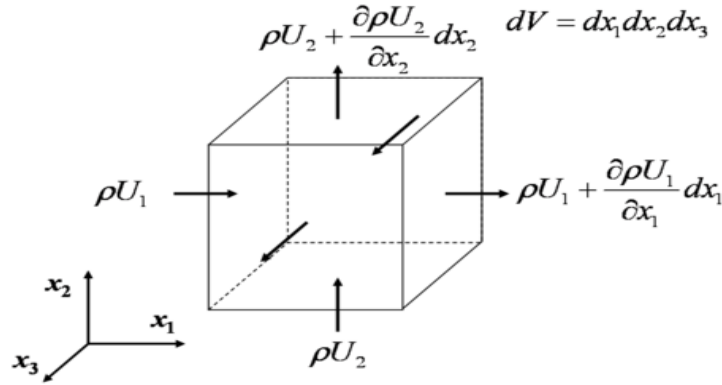


Figura 15. Forma diferențială a ecuației de continuitate

Prin integrarea ecuației 3.3. în volumul cubului $dx_1 dx_2 dx_3$ și aplicarea teoremei de transport a lui Reynolds se obține forma diferențială a ecuației de continuitate.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Rata de schimbare} \\ \text{a masei în} \\ \text{volumul fix} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Fluxul net al} \\ \text{masei prin suprafața} \\ \text{fixă} \end{array} \right] = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_3)}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

2. Legea conservării momentului

$$\left[\begin{array}{l} \text{Rata de schimbare} \\ \text{a momentului în} \\ \text{volumul fix} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Forțele ce acționează} \\ \text{asupra fluidului în} \\ \text{volumul fix} \end{array} \right]$$

Ecuatiile Navier-Stokes folosesc legea a II-a Newtoniană ce descrie faptul că rata de schimbare a momentului în volumul fix este egală cu suma forțelor ce acționează asupra fluidului în același volum.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{U} dV + \int_A \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) \vec{U} dA = - \int_A P dA + \int_A \vec{T} \cdot \vec{n} dA + \rho g \quad (3.5)$$

În problemele de reprezentare a unui incendiu forțele ce acționează asupra fluidului, reprezentate în partea dreaptă a ecuației sunt formate din presiune, vâscozitate și flotabilitate (acelerație gravitațională și densitate).

Forțele ce acționează asupra fluidului creează accelerația sau decelerația acestuia. Fie că este presiune sau flotabilitate, ce contribuie la accelerația fluidului sau vâscozitatea ce reduce viteza de curgere a acestuia, suma tuturor acestor forțe echilibrează rata de schimbare a momentului în volumul studiat.

$$m \cdot \vec{a} = \sum F, \quad (3.6)$$

respectiv:

$$m \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \sum F \quad (3.7)$$

Considerând componenta x a axelor de coordonate și $m = \rho dx dy dz$, iar vectorul de viteză $\vec{U} = (u, v, w)$, atunci ecuația 3.6. devine:

$$\rho dx dy dz \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \sum F_{x,corp} + \sum F_{x,sup\ rafat\ a} \quad (3.8)$$

Ecuația ce descrie mișcarea fluidelor depinde de două elemente, și anume, tensiunea din fluid și alte forțe externe.

Această tensiune ce are loc în procesul de mișcare a fluidului este reprezentată sub forma unui tensor ce reprezintă un concept de generalizare a unei cantități. Spre exemplu, un vector este reprezentat printr-un tensor de gradul 1, o matrice printr-un tensor de gradul 2, iar o matrice 3D printr-un tensor de gradul 3.

Tensorul de tensiune este denumit σ , iar componentele sale conform figurii 16 [42] sunt o reprezentare a sumei presiunilor și vâscozității ce acționează asupra volumului.

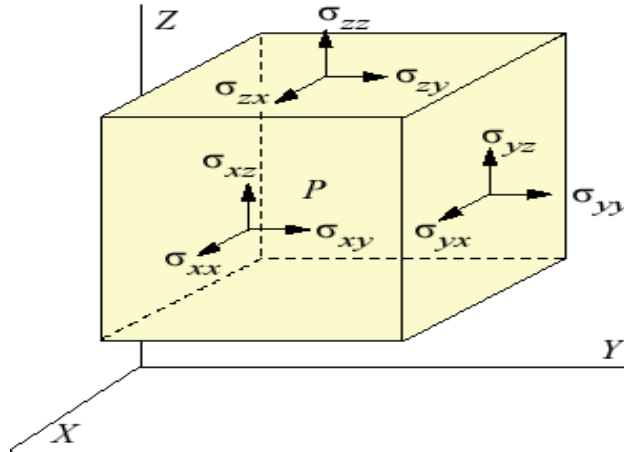


Figura 16. Tensiunea aplicată fluidului

$$\sigma_{ij} = -P + \tau_{ij} \quad (3.9)$$

unde P este presiunea care acționează perpendicular pe fața volumului, iar τ reprezintă vâscozitatea.

Tensorul de tensiune se scrie sub următoarea formă:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Tensorul de vâscozitate este alcătuit din forțele care acționează asupra tuturor fețelor volumului cubului și sunt reprezentate de două forțe tangențiale suprafeței și una perpendiculară acesteia.

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Vectorul de tensiune ce acționează în fiecare direcție a axelor de coordonate

se definește ca: $\vec{T}_x = (\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz})$, $\vec{T}_y = (\sigma_{yx}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz})$, $\vec{T}_z = (\sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz})$.

Forțele ce acționează în direcția x a axelor de coordonate asupra tuturor fețelor volumului fix pot fi definite utilizând seria Taylor, după cum urmează:

$$F_1 = -\left(\sigma_{xx} - \frac{dx}{2} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}\right) dydz \quad (3.12)$$

$$F_2 = \left(\sigma_{xx} + \frac{dx}{2} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}\right) dydz \quad (3.13)$$

$$F_3 = -\left(\sigma_{yx} - \frac{dy}{2} \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y}\right) dx dz \quad (3.14)$$

$$F_4 = \left(\sigma_{yx} + \frac{dy}{2} \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y}\right) dx dz \quad (3.15)$$

$$F_5 = -\left(\sigma_{zx} - \frac{dz}{2} \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}\right) dx dy \quad (3.16)$$

$$F_6 = \left(\sigma_{zx} + \frac{dz}{2} \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}\right) dx dy \quad (3.17)$$

Prin urmare, forțele ce acționează asupra suprafețelor fețelor volumului în direcția x, sunt:

$$\sum F_{x, \text{suprafata}} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}\right) dx dy dz \quad (3.18)$$

Considerând că singura forță care acționează asupra materiei este accelerația gravitațională, atunci:

$$\sum F_{x, \text{corp}} = m \cdot g_x = \rho \cdot dx dy dz \cdot g_x \quad (3.19)$$

Ecuatia 3.8. devine:

$$\rho dx dy dz \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}\right) dx dy dz + \rho \cdot dx dy dz \cdot g_x \quad (3.20)$$

Eliminând termenul ce reprezintă volumul atât din partea stângă, cât și cea dreaptă a ecuației, rezultă:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}\right) + \rho g_x \quad (3.21)$$

$$\text{sau } \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}\right) = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}\right) + \rho g_x \quad (3.22)$$

Similar pentru direcția y, respectiv z, ecuațiile se pot scrie sub următoarea formă:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z}\right) + \rho g_y \quad (3.23)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3.24)$$

3. Legea conservării energiei

$$\left[\begin{array}{l} \text{Rata de schimbare} \\ \text{a energiei în} \\ \text{volumul fix} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Fluxul termic prin} \\ \text{suprafata volumului fix} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Perdere netă de} \\ \text{energie} \end{array} \right]$$

Pierderea netă de energie este rezultatul lucrului mecanic sau al transferului termic. Prin pierdere energia nu se distruge, ci apare sub forma unui transfer de energie prin limitele volumului fix. În cazul unui incendiu pierderea de energie are loc sub forma unui transfer termic de-a lungul elementelor ce separă compartimentul de incendiu.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot e \cdot dV + \int_A \rho \left(\vec{U} \cdot \vec{n} \right) e \cdot dA = - \int_A \left(P - \bar{T} \right) \left(\vec{U} \cdot \vec{n} \right) dA + \int_A \vec{q} \cdot \vec{n} dA \quad (3.25)$$

Prin derivarea ecuațiilor a rezultat un sistem cuplat de cinci ecuații pentru:

- densitate, ρ (scalar);
- moment, (vectorial);
- energie, e (scalar);

Acest sistem cuplat de ecuații, cunoscute sub denumirea de ecuațiile Navier-Stokes, este un sistem neliniar, de ordinul 2 ce poate fi aplicat curgerii oricăror fluide ce sunt reprezentate ca un continuu ($Kn \ll 0,1$).

Dat fiind faptul că aceste cinci ecuații conțin 16 necunoscute, este necesar a se aplica anumite simplificări de modelare pentru rezolvarea lor.

a) legea gazelor ideale

Prin această simplificare se consideră că toate gazele pot fi reprezentate conform legii gazului ideal. Aceasta este utilizată pentru a crea o relație între schimbările de presiune și cele în densitate și temperatură. Potrivit ecuației gazelor ideale se poate concluziona că există o relație liniară între modificările de presiune și cele de temperatură sau densitate.

$$pV = nRT \text{ sau } p = \rho RT \quad (3.26)$$

b) fluidele modelate sunt considerate incompresibile

Fluidele incompresibile sunt cele ale căror densitate este constantă, iar modificările acestei proprietăți nu se realizează la schimbări ale presiunii. Deși în realitate densitatea se modifică odată cu schimbări ale presiunii, această ipoteză de lucru se poate aplica în cazul fluidelor ale căror modificări în densitate sunt atât de mici încât ele sunt neglijabile. În cazul curgerii unui fluid la viteze mari de-a lungul unei conducte schimbarea presiunii poate fi atât de importantă încât modificările în densitate nu pot fi ignorate [46]. Pentru problemele ce implică mișcarea fumului și gazelor fierbinți generate de către un incendiu, unde vitezele au valori mai mici de 100 m/s ($Ma < 0,3$), schimbările în densitate sunt nesemnificative.

c) fluidele sunt izotropice

Fluxul termic apare ca diferența de temperatură dintre două puncte exprimat cu ajutorul legii lui Fourier [44].

$$\vec{q} = -k \Delta T \quad (3.27)$$

unde k reprezintă coeficientul de transfer termic prin conducție [W/mK], iar ΔT este diferența de temperatură dintre cele două puncte [$^{\circ}\text{C}$].

Constanta de proporționalitate este coeficientul de transfer termic prin conducție, iar potrivit acestei ipoteze transferul termic prin conducție acționează egal în toate direcțiile.

d) utilizarea fluidelor Newtoniene

Potrivit acestei ipoteze, forța de forfecare este proporțională cu gradientul de viteză, iar constanta de proporționalitate este vâscozitatea (μ).

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), i \neq j \quad (3.28)$$

Tensorul de tensiune este definit cu ajutorul ipotezei lui Stokes pentru tensiuni normale ($i=j$),

$$\tau_{ii} = -\frac{2}{3}\mu \left(\nabla \cdot \vec{U} \right) + 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (3.29)$$

Forțele ce acționează pe suprafața volumului fix în direcția x a axelor de coordonate pot fi exprimate ca suma dintre presiune și vâscozitate.

$$\frac{\sigma_{xx}}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \quad (3.30)$$

$$\frac{\sigma_{yx}}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (3.31)$$

$$\frac{\sigma_{zx}}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.32)$$

Înlocuind în relația 3.23. se obține următoarea relație:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x \quad (3.33)$$

Similar pentru direcția y, respectiv z, ecuațiile se pot scrie sub următoarea formă:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g_y \quad (3.34)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho g_z \quad (3.35)$$

Utilizând legea lui Newton prin care componentele vâscozității sunt exprimate în funcție de gradientul de viteză, atunci:

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.36)$$

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.37)$$

$$\tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (3.38)$$

$$\tau_{xx} = -\frac{2}{3}\mu D + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.39)$$

$$\tau_{yy} = -\frac{2}{3}\mu D + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.40)$$

$$\tau_{zz} = -\frac{2}{3}\mu D + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.41)$$

$$\text{unde} \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.42)$$

Forma simplificată a ecuațiilor Navier-Stokes pentru fluide incompresibile, cu densitate și vâscozitate constantă este următoarea:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.43)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.44)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.45)$$

3.3 Reprezentarea turbulenței în programele de simulare privind dinamica fluidelor

Incendiile sunt fenomene de ardere caracterizate de elemente turbulente care apar datorită instabilităților prezente la mișcarea flăcărilor, precum și a fumului și gazelor fierbinți. Flăcările turbulente conțin structuri de mici dimensiuni care încep să se formeze la baza focarului de incendiu care continuă să crească în dimensiune pe măsură ce se depărtează de acesta.

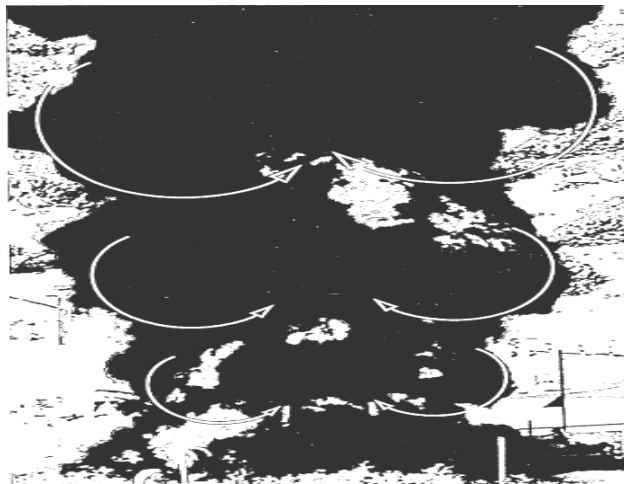


Figura 17. Formarea structurilor turbulente în cazul unui incendiu

În condiții atmosferice fără vânt, formarea structurilor turbulente de mari dimensiuni are loc aproximativ simetric în plan orizontal sub forma unor vârtejuri reprezentate în figura 17 [43]. Dimensiunea caracteristică a acestor vârtejuri este de ordinul razei focarului de incendiu în apropierea acestuia, iar pe măsură ce se depărtează de acesta încep să crească în dimensiuni datorită amestecului cu aerul atmosferic.

Totodată, în condiții atmosferice de vânt, structurile turbulente apar ca și în cazul anterior, de această dată în direcția vântului, având caracteristici similare celor formate în condiții fără vânt [43].

Structurile turbulente verticale ce apar de-a lungul flăcărilor sunt rezultatul forțelor ce acționează în regiunea ce delimitează zona de ardere și aerul exterior. Rezultatul acestor forțe constă în crearea unor vârtejuri ce apar sub forma unor structuri circulare care se rotesc în jurul axei.

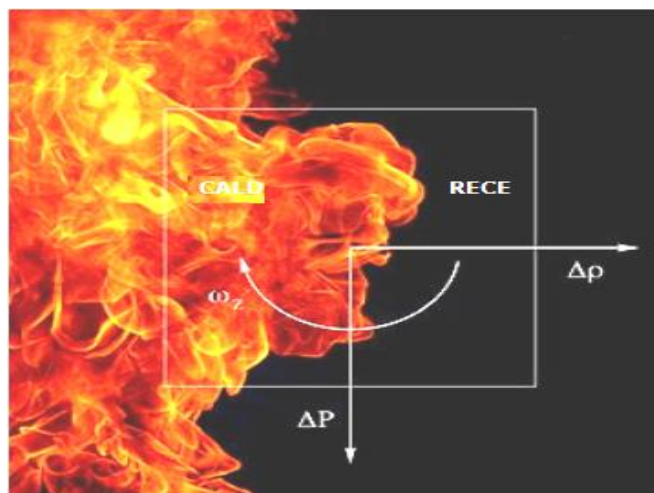


Figura 18. Procesul de formare al structurilor turbulente

Flăcările având o temperatură ridicată față de aerul exterior, se ridică datorită flotabilității către partea superioară, în timp ce aerul rece având o densitate mai mare produce o mișcare de rotație în regiunea ce delimitează zonele cu densități diferite, potrivit schemei din figura 18 [45].

Conceptul fundamental ce stă la baza acestui proces este caracterizat de fenomenul fizic denumit vorticitate. Vorticitatea este definită ca dublul vitezei unghiulare de rotație și este caracterizată de vectorul vitezei de rotație [43]:

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \nabla \times U \quad (3.46)$$

Spre exemplu, componenta vectorului de rotație în direcția z a axelor de coordonate este definită ca:

$$\omega_z = \left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (3.47)$$

unde V este componenta vitezei în direcția y a axelor de coordonate, iar U este componenta vitezei în direcția x a axelor de coordonate.

Pentru a determina procesul de producere și transport al mișcării de rotație al structurilor turbulente este necesar a transforma ecuațiile Navier-Stokes în ecuații de transport caracteristice vorticității.

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + \left(\vec{U} \nabla \right) \vec{\omega} = \vec{\omega} \left(\nabla \cdot \vec{U} \right) - \left(\vec{\omega} \nabla \right) \vec{U} + \frac{\nabla \rho}{\rho} \times \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right) + \nu \nabla^2 \vec{\omega} \quad (3.48)$$

unde ω este vectorul de vorticitate, U este vectorul de viteză, ρ reprezintă densitatea, ν este vâscozitatea, iar P este presiunea.

Termenul din stânga ecuației reprezintă rata de schimbare în timp a vorticității, în timp ce primul termen din dreapta egalului constituie alungirea vârtejului. Cel de-al doilea termen din dreapta exprimă creșterea volumetrică, iar ce de-al treilea termen se referă la generarea baroclinică a vorticității. Ultimul termen din ecuație descrie difuzivitatea vorticității în intervalul de timp. Descrierea termenilor ecuației de transport caracteristice vorticității apare și în figura 19 [43].

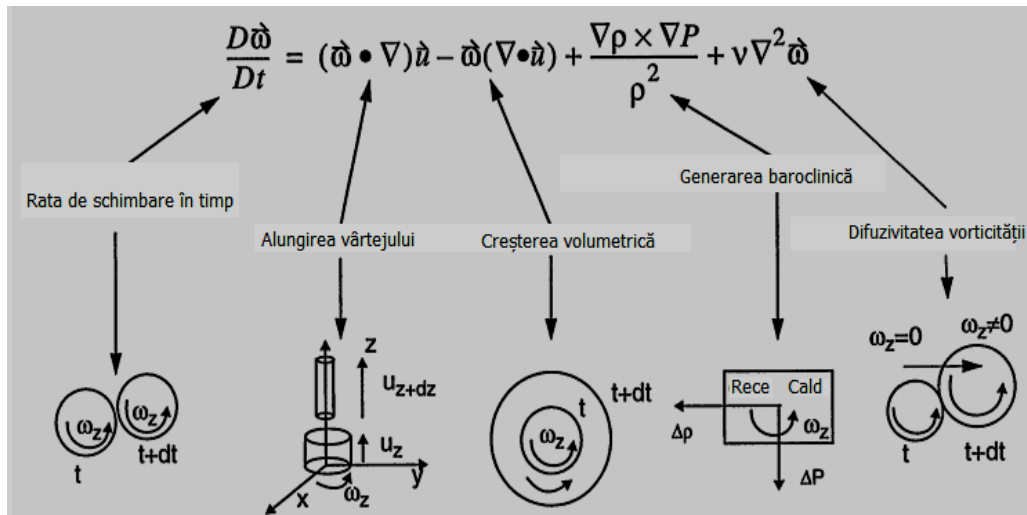


Figura 19. Ecuația de transport caracteristică vorticității

Termenul ce descrie generarea baroclinică a vorticității este responsabil pentru formarea structurilor turbulente în cazul unui incendiu. În momentul în care apare formarea gradientilor de temperatură în direcții diferite față de verticală, atunci apare formarea gradientilor de densitate în direcție laterală. Odată cu apariția acestor gradienti de densitate, termenul caracteristic generării baroclinice a vorticității are valoare pozitivă ceea ce conduce la formarea vârtejurilor turbulente în interiorul flăcărilor și a panii de fum în timpul unui incendiu.

Atunci când densitatea are un gradient spațial și nu este în aceeași direcție cu presiunea, fluidul este supus unei accelerații inegale, iar diferența de viteză rezultată conduce la imprimarea mișcării de rotație specifică vorticității.

Structurile turbulente formate în timpul unui incendiu sunt consecința unei combinații de procese:

- generarea baroclinică a vorticității ce produce mișcarea de rotație a structurilor turbulente de mici dimensiuni;
- amalgamarea sau unificarea structurilor de mici dimensiuni care produce formarea structurilor turbulente de mari dimensiuni;
- transferul energiei în cascadă de la structurile turbulente de mari dimensiuni la cele de mici dimensiuni.

Curgerile turbulente sunt caracterizate prin câmpuri de viteze fluctuante stocastic. Structurile turbulente de mari dimensiuni sunt caracterizate prin frecvență redusă și lungimi de undă ridicate, iar mărimea fluctuațiilor este descrisă cu ajutorul macro scării lui Taylor, l_0 . Dimensiunea caracteristică, l_0 reprezintă distanța dintre două puncte în spațiu unde încetează a mai exista corelații între fluctuațiile vitezelor fluidului înregistrate între aceste puncte.

Pentru descrierea structurilor turbulente de mici dimensiuni se utilizează micro scara lui Kolmogorov, l_k , definită de relația:

$$l_k = \frac{\mu Re}{\rho V} \quad (3.49)$$

unde V este viteza (m/s), ρ este densitatea (kg/m^3), μ este vâscozitatea cinematică (kg/ms), iar Re este numărul lui Reynolds.

Prin urmare, la simularea unui fluid caracterizat de structuri turbulente de mari dimensiuni, numărul de noduri în care sunt calculate ecuațiile Navier-Stokes este de ordinul:

$$N_{nod} \approx \left(\frac{l_0}{l_k}\right)^3 \approx Re l_0^{9/4} \quad (3.50)$$

Ținând cont că memoria și viteza de procesare a calculatoarelor este încă redusă față de solicitările programelor de simulare, structurile turbulente de mici dimensiuni nu pot fi rezolvate. În acest sens, simplificări de modelare sunt propuse pentru rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes.

1. Media Reynolds pentru ecuațiile Navier-Stokes (RANS)

Deoarece capacitățile existente ale calculatoarelor nu permit rezolvarea structurilor turbulente de mici dimensiuni, abordarea ce stă la baza RANS contribuie la rezolvarea gradientilor de viteză.

În situația unui incendiu detaliile structurilor de mici dimensiuni nu pot fi rezolvate, însă o reprezentare a mediei fluctuațiilor în timp este posibilă.

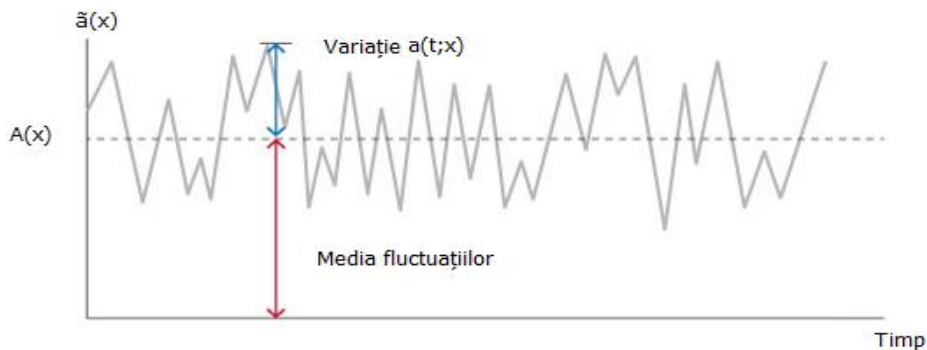


Figura 20. Rezolvarea turbulenței în RANS

Graficul prezentat în figura 20 reprezintă fluctuațiile în timp ale unei proprietăți asociate fluidelor. Fie că este vorba de temperatură, presiune sau viteză, prin utilizarea metodei RANS, valoarea fluctuațiilor este redusă la o valoare medie în timp. Cantitatea medie în timp presupune că fluctuațiile instantanee reduse la o valoare medie în timp rezultă într-o singură mărime denumită valoare statistică staționară, notată cu $\bar{a}(t;x)$.

$$\bar{a}(t;x) = A(x) + a(t;x) \quad (3.51)$$

unde $\bar{a}(t;x)$ reprezintă valoarea instantanee a proprietății analizate, $A(x)$ este cantitatea medie în timp, iar $a(t;x)$ reprezintă magnitudinea fluctuațiilor față de valoarea medie.

În consecință, turbulența este reprezentată în modelele RANS sub forma unei valori medii în care fluctuațiile turbulente sunt suprapuse peste această valoare. Această tehnică de descompunere a valorii instantanee în valoarea medie și cea a fluctuațiilor poartă denumirea de descompunerea lui Reynolds. Pentru

reducerea timpului necesar în rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes, metoda de descompunere propusă de Reynolds presupune ca viteza fluidului la momentul t într-un punct oarecare x să fie egală cu suma dintre valoarea vitezei medii în timp și componenta fluctuantă a acesteia.

$$\tilde{u} = U_j + u_j \quad (3.52)$$

Substituind aceste valori în ecuațiile Navier-Stokes se obține:

a) ecuația de conservare a masei

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho}(U_j + u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (3.54)$$

Valoarea medie a ecuației în timp va avea următoarea formă:

$$\overline{\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho}(U_j + u_j)}{\partial x_j}} = 0 \quad (3.55)$$

Deoarece valoarea medie în timp a vitezei este egală cu valoarea constantă a acestei proprietăți, neavând schimbări în timp, $\bar{U}_i = U_i$, iar valoarea fluctuațiilor prin definiție este egală cu 0 deoarece o mărime oarecare fluctuează în timp în proporții egale atât deasupra, cât și sub valoarea medie, $\bar{u}_i = 0$.

Prin urmare valoarea medie a ecuației de continuitate sau conservare a masei în timp, va fi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x_j} = 0 \quad (3.56)$$

b) ecuația de conservare a momentului

$$\frac{\partial(\rho U_k U_j)}{\partial x_k} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \rho \bar{u}_k \bar{u}_j \right] \quad (3.57)$$

Spre deosebire de ecuația de continuitate unde rezultatul este exprimat în termeni de viteză, pentru ecuația de conservare a momentului sunt termeni care implică variații ale propriilor componente.

Tensiunile Reynolds conțin trei componente perpendiculare pe suprafață și alte trei tangențiale care fac imposibilă rezolvarea matematică a ecuațiilor.

$$\rho \bar{u}_k \bar{u}_j \equiv \rho \begin{bmatrix} u_1 u_1 & u_2 u_1 & u_3 u_1 \\ u_1 u_2 & u_2 u_2 & u_3 u_2 \\ u_1 u_3 & u_2 u_3 & u_3 u_3 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Pentru rezolvarea acestor tensiuni de tip Reynolds este utilizat un model empiric ce implică anumite ipoteze de lucru. Prima astfel de ipoteză presupune rezolvarea tensiunilor de forfecare cu ajutorul gradientilor vitezei medii, iar constanta de proporționalitate este vâscozitatea cinematică, exprimată ca însăși funcție a curgerii fluidului și nu o proprietate a acesteia.

Această ipoteză poartă denumirea cercetătorului Boussinesq și permite determinarea tensiunilor de forfecare, însă vâscozitatea cinematică reprezintă o nouă necunoscută pentru care o altă ipoteză este necesar a fi introdusă.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.59)$$

iar prin analogie tensiunile Reynolds pot fi exprimate sub următoarea formă:

$$-\rho \bar{u}_k \bar{u}_i = \mu_T \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.60)$$

Prandtl a propus ipoteza lungimii de amestec care include exprimarea raportului dintre vâscozitatea cinematică și densitate sub forma produsului dintre viteză și lungimea caracteristică.

$$\frac{\mu_T}{\rho} \propto \langle \text{viteză} \rangle \langle \text{lungime} \rangle \quad (3.61)$$

$$\langle \text{viteză} \rangle \propto l_m \left| \frac{dU}{dy} \right| \quad (3.62)$$

unde l_m reprezintă distanța caracteristică pe care pachete de fluid sunt transportate ca efect al turbulenței, iar dU/dy este media gradientului de viteză.

$$\mu_T = \rho l_m^2 \left| \frac{dU}{dy} \right| \quad (3.63)$$

2. Simularea structurilor turbulente de mari dimensiuni (LES)

Spre deosebire de prima abordare, în LES valoarea proprietăților caracteristice fluidului sunt filtrate în spațiu. Deoarece cantitatea de energie specifică turbulenței este conținută în structurile de mari dimensiuni, această tehnică de modelare se bazează pe rezolvarea a cât mai multor astfel de structuri.

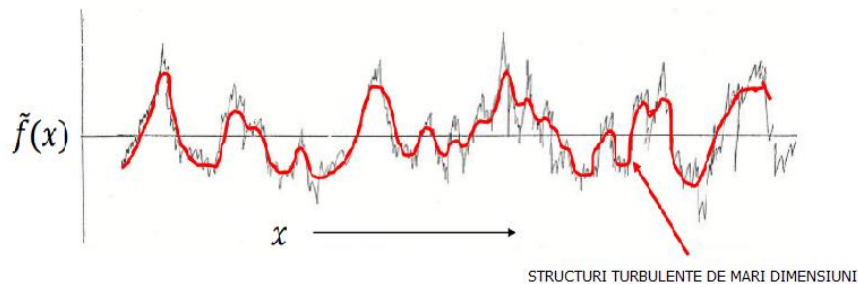


Figura 21. Rezolvarea turbulenței în LES

Potrivit figurii 21 [44], valoarea instantanee este descompusă în valoarea filtrată și diferența dintre valoarea instantanee și această valoare filtrată. Calitatea informației modelate depinde de dimensiunile filtrului aplicat. În cazul programelor de simulare filtrul corespunde dimensiunii celulelor de lucru stabilite de către utilizator. Pe măsură ce valoarea instantanee este filtrată se pierde din informațiile cu frecvență înaltă corespunzătoare structurilor turbulente de mici dimensiuni. Pe măsură ce dimensiunile filtrului sunt mărite, se pierde din informație, iar calitatea rezultatelor simulării poate conduce la anumite erori.

$$\tilde{f}(x) = \langle f(x) \rangle + f'(x) \quad (3.64)$$

unde $\langle f(x) \rangle$ reprezintă valoarea filtrată, iar $f'(x)$ este diferența dintre valoarea filtrată și cea instantanee.

Aplicând un filtru în spațiu pentru viteza caracteristică fluidul rezultă:

$$\tilde{U} \equiv \langle U \rangle + u' \quad (3.65)$$

Înlocuind această expresie în ecuația de conservare a momentului se obțin ecuațiile Navier-Stokes filtrate în spațiu:

$$\frac{\partial(\rho\langle U_i \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\langle U_k \rangle \langle U_i \rangle)}{\partial x_k} = -\frac{\partial\langle P \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_k} - \rho \tau_{ij} \right] \quad (3.66)$$

Deoarece τ_{ij} – tensorul de tensiune SGS nu poate fi rezolvat se impune utilizarea unui model empiric pentru modelarea ecuațiilor. Unul din cele mai populare modele pentru rezolvarea tensorului de tensiune SGS are la bază utilizarea vâscozității cinematice SGS (din englezescul "sub grid scale"). Potrivit acestui model partea deviatoare a tensorului SGS depinde liniar de tensorul vitezelor de deformare S_{ij} , asociat câmpului vitezelor filtrate \bar{u} [43], adică:

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = 2\mu_{SGS} \langle S_{ij} \rangle = -\mu_{SGS} \left[\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right] \quad (3.67)$$

$$\langle S_{ij} \rangle = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right] \quad (3.68)$$

Pentru determinarea vâscozității cinematice SGS, Smagorinsky a propus un model în care similar abordării propuse de Prandtl există o relație de proporționalitate între lungimea caracteristică și viteză.

$$\mu_{SGS} = \rho C^2 \Delta^2 \langle S_{ij} \rangle \langle S_{ij} \rangle \quad (3.69)$$

unde ρ este densitatea, C este constanta lui Smagorinsky și are valoarea de 0,2, Δ este dimensiunea filtrului, iar S_{ij} este tensorul vitezelor de deformare.

Unul din dezavantajele acestui model îl reprezintă însăși constanta lui Smagorinsky care necesită modelare.

În acest sens, Deardorff a realizat un model dinamic în care constanta C este determinată direct din condițiile locale de curgere, conform relației:

$$\mu_{SGS} = \rho C_v A \sqrt{k_{SGS}} \quad (3.70)$$

unde C_v este constanta lui Deardorff, iar k_{SGS} reprezintă energia cinetică SGS.

Diferența dintre metoda de tip LES și cea RANS constă în faptul că lungimea caracteristică în LES este egală cu cea a celulelor de lucru, iar vâscozitatea cinematică este proporțională cu aceasta.

3. Simularea numerică directă (DNS)

Pentru realizarea unei astfel de abordări este necesar ca dimensiunea filtrului să fie atât de mică încât vâscozitatea cinematică să tindă către 0. Acest lucru este posibil numai în condițiile în care dimensiunea celulelor de lucru este suficient de mică astfel încât programul de simulare este capabil să rezolve acele structuri turbulente caracterizate prin frecvență înaltă și lungimi de undă scurte.

Deoarece capacitățile computerizate disponibile în momentul de față sunt considerabil reduse, pentru a rezolva întregul spectru al scărilor turbulente prezente în procesul de curgere al fluidelor, fac ca timpul necesar pentru obținerea unei simulări numerice directe să fie atât de mare, încât o astfel de abordare să fie impracticabilă pentru rezolvarea problemelor curente ingineresti.

3.4 Modelul de calcul pentru timpul de activare al sprinklerelor implementat în programul de simulare Fire Dynamics Simulator (FDS)

Fire Dynamics Simulator este un program de simulare dedicat problemelor specifice incendiilor.

3.4. – Modelul de calcul în programul de simulare Fire Dynamics Simulator 57

Potrivit manualului de utilizare al acestui program, rezidă faptul că el poate fi folosit în mod efectiv la rezolvarea aplicațiilor ingineresti ce implică transportul la viteze reduse ($Mach < 0,3$) a căldurii și produșilor de combustie rezultate în urma unui incendiu, la transferul termic prin radiație și convecție dintre un gaz și suprafețe solide, precum și la determinarea timpului de activare al sprinklerelor și detectoarelor de incendiu.

Temperatura de activare a elementului termosensibil al unui cap sprinkler este calculată cu ajutorul ecuației diferențiale dezvoltate de Heskestad și Bill, la care este adăugat un termen ce ia în considerare efectul de răcire al elementului fuzibil provocat de picăturile de apă provenite de la activarea anterioară a altui cap sprinkler învecinat, folosind relația:

$$\frac{dT_I}{dt} = \frac{\sqrt{|u|}}{RTI} (T_g - T_I) - \frac{C}{RTI} (T_I - T_m) - \frac{C_2}{RTI} \beta |u| \quad (3.71)$$

unde u este viteza gazelor de ardere, RTI este indicele timpului de răspuns caracteristic elementului termosensibil, T_I este temperatura elementului termosensibil, T_g este temperatura gazelor de ardere din vecinătatea sprinklerului, T_m este temperatura inițială a sprinklerului, β reprezintă volumul de apă prezent în gazele fierbinți. Factorul C reprezintă coeficientul de transfer termic prin conducție de la elementul termosensibil către celelalte elemente din alcătuirea sprinklerului. C_2 este o constantă determinată empiric de către DiMarzo care are valoarea $6 \times 10^6 \text{ K}/(\text{m/s})^{1/2}$.

Este de subliniat faptul că temperatură inițială a sprinklerului este egală cu cea a mediului ambiant, iar valorile factorului C , respectiv al indicelui timpului de răspuns (RTI) sunt determinate experimental pentru fiecare tip de sprinkler, iar definirea acestor mărimi este atributul utilizatorului pentru fiecare simulare și situație specifică [47].

4 DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TIMPULUI DE ACTIVARE AL SPRINKLERELOR ÎN CAMERA STANDARD ISO

4.1 Obiectivele studiului

Timpul de răspuns al instalațiilor de tip sprinkler este parametrul ce poate influența într-un mod esențial eficacitatea de stingere a acestui tip de instalații, și nu numai. Fie că este vorba de instalațiile de detectare, semnalizare și avertizare în caz de incendiu sau de instalațiile de protecție împotriva incendiilor, în general, timpul de răspuns reprezintă parametrul ce poate conduce la limitarea și stingerea incendiului în limitele unui compartiment de incendiu sau poate rezulta în propagarea acestuia la încăperile învecinate, generând pagube atât umane, cât și materiale. Având în vedere faptul că de cele multe ori detectarea rapidă a unui incendiu determină timpul de răspuns al instalațiilor de stingere, este important ca la alegerea dispozitivelor de activare să se țină cont de toți parametri ce ar putea influența funcționarea acestora.

Dat fiind faptul că majoritatea studiilor și ecuațiilor rezultate în urma acestora au la bază focare de incendiu formate din lichide combustibile plasate în centrul compartimentului de incendiu, este important a se studia influența poziției materialelor combustibile asupra timpului de răspuns al instalațiilor de stingere cu sprinklere. În urma unor serii de experimente conduse de către Takahashi [48] s-a constatat faptul că la amplasarea unui focar de incendiu în colțul încăperii, identic cu cel folosit în centrul acesteia, se obțin valori ridicate ale temperaturilor, precum și ale ratei de căldură degajate. Acest fenomen este explicat prin faptul că flăcările aderă suprafeței pereților învecinați, împiedicând astfel intrarea aerului în zona de combustie. În consecință, substanțele volatile combustibile din structura flăcărilor înaintază către partea superioară a încăperii acolo unde vor avea aerul necesar arderii, rezultând în înălțimi mai mari ale flăcărilor comparativ cu focarele plasate în centrul încăperii. Similar, pentru focarele plasate lângă pereții încăperilor se poate observa același fenomen, cu excepția faptului că în această situație intrarea aerului este blocată doar de către un perete, spre deosebire de colțul încăperii atunci când este blocată de doi dintre pereții compartimentului [49].

Prezentul studiu își propune determinarea timpului de răspuns al sprinklerelor prin amplasarea focarelor de incendiu în diferite părți ale compartimentului de incendiu. În același timp se vor utiliza diferite metode de măsurare și calcul a temperaturilor rezultate, precum și a ratei de căldură degajate. Având în vedere că principala sursă de determinare a parametrilor de calcul asociați unui incendiu, este reprezentată de programele computerizate de simulare, la determinarea acestor timpi se va utiliza programul Fire Dynamics Simulator (FDS), iar rezultatele obținute vor fi verificate cu ajutorul metodelor analitice prevăzute în literatura de specialitate, iar validarea lor se va face prin intermediul unor studii experimentale realizate în camera standard ISO.

Camera standard ISO este utilizată pe scară largă în laboratoarele de testare la foc pentru determinarea caracteristicilor diferitelor produse pentru construcții cu rol în securitatea la incendiu.

Această metodă de încercare standardizată are la bază recomandările prevăzute în cuprinsul ISO 9705 [50] și este utilizată la încercarea materialelor plastice care se topesc, a sistemelor compozite nestandardizate sau a celor ce prezintă suprafețe cu neregularități. Totodată, această metodă este utilizată cu succes în determinarea clasei de reacție la foc a materialelor de construcție folosite pentru pereți și tavane.

Potrivit standardului mai sus menționat dimensiunile compartimentului sunt 3,6 m lungime, 2,4 m lățime și 2,4 m înălțime, iar focarul de incendiu este amplasat în partea dreaptă în colțul îndepărtat intrării, așa cum reiese din figura 22 [51].

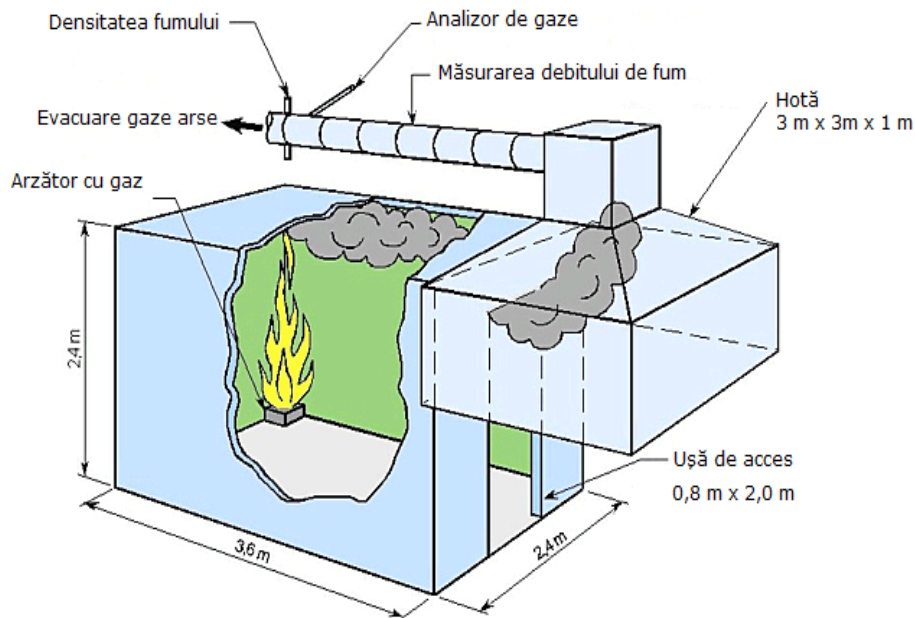


Figura 22. Prezentarea schematică a camerei standard ISO

4.2 Descrierea experimentului

4.2.1 Prezentarea camerei standard ISO utilizate

Dat fiind faptul că utilizarea standurilor experimentale la scară naturală implică folosirea unor cantități însemnate de materiale ce necesită atribuirea unor sume de bani ridicate, adesea la testarea materialelor cu rol în securitate la incendiu se folosește metoda de reducere la scară prin care dimensiunile materialelor sunt micșorate, iar determinarea parametrilor specifici incendiului de realizează potrivit metodei de similitudine a lui Froude. Datorită lipsei de spațiu, precum și a costurilor ridicate s-a optat pentru utilizarea unei camere standard ISO redusă la scara 1/3 față de dimensiunile originale. Astfel, noile dimensiuni ale camerei standard ISO sunt 1,2 m lungime, 0,8 m lățime și 0,8 m înălțime potrivit schemei prezentate în figurile 23 și 24. De asemenea, golul de acces în încăperea a fost redus la aceeași

scară utilizând metoda factorului de deschidere introdus de Kawagoe [52], iar dimensiunile acestui gol sunt 0,36 m lățime și 0,65 m înălțime.

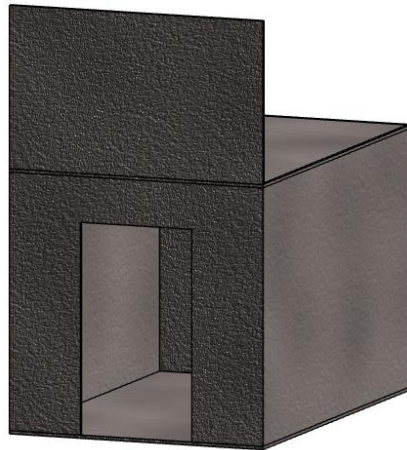


Figura 23. Vedere de ansamblu a camerei standard ISO

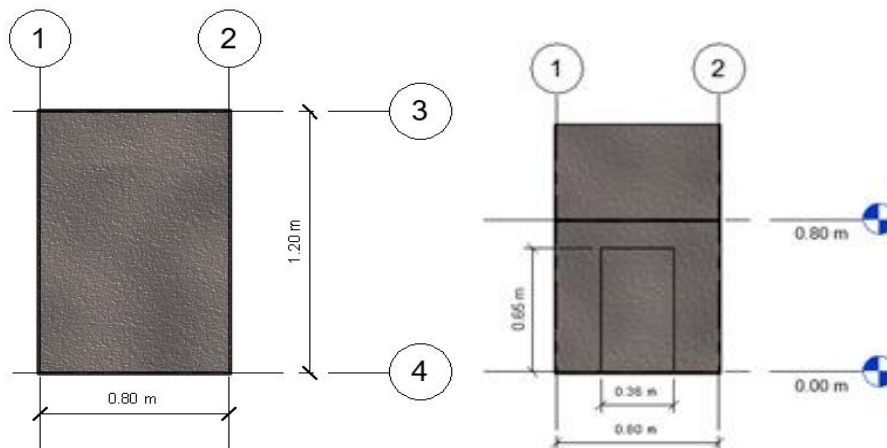


Figura 24. Dimensiunile camerei standard ISO la scara 1/3

Această încăpere la scara redusă a fost amplasată sub hota de colectare a fumului și gazelor fierbinți generate în timpul incendiului. Toate gazele rezultate în urma procesului de ardere sunt introduse în hota cu dimensiunile originale de 3 m x 3 m x 1 m și analizate în interiorul tubulaturii de evacuare a acestora.

Compartimentul de incendiu folosit pe durata experimentelor este construit din plăci de gips carton rezistent la foc de tip PROMATECT-H așezate în strat dublu având grosimea de 30 mm, densitatea de 870 kg/m^3 , căldura specifică de 1130 J/kgK și coeficientul de conductivitate termică de $0,175 \text{ W/mK}$.

4.2.2 Prezentarea aparatelor de măsură și a echipamentelor utilizate

În alcătuirea focarelor de incendiu a fost utilizată o tavă pătrată cu latura de 10 cm în care a fost incendiat combustibilul lichid. Deoarece combustibilii lichizi prezintă o perioadă de ardere constantă după aprindere și perioada de creștere, ei sunt preferați altor substanțe combustibile la realizarea experimentelor pentru determinarea parametrilor unui incendiu. Un alt aspect important îl constituie faptul că rata de căldură degajată poate fi determinată cu ajutorul metodelor analitice descoperite de Babrauskas în urma unor studii experimentale [53]. În acest sens, pentru toate cele trei experimente au fost folosiți câte 150 ml heptan comercial cu o puritate de 99 % prezentat în figura 25.



Figura 25. Fotografie a recipientului de stocare a combustibilului lichid

De asemenea, pentru determinarea timpului de răspuns, s-a operat pentru montarea unor capete sprinkler de tip Victaulic 2727 cu o temperatură de declanșare de 68°C și un timp de răspuns de $80\text{ (ms)}^{1/2}$ corespunzător unui sprinkler cu răspuns standard de $191\text{ (ms)}^{1/2}$ la scară reală.

În toate cele trei teste s-a montat câte un cap sprinkler în mijlocul încăperii la distanța de 0,6 m față de intrare și 0,4 m față de pereții laterali. Prinderea sprinklerelor pe tavanul încăperii s-a realizat cu ajutorul unui adeziv rezistent la foc de tip K 84.

Pentru înregistrarea temperaturilor generate în interiorul compartimentului de incendiu s-a folosit un suport cu 8 termocupluri de tip K de 1 mm, amplasat la 25 de cm față de centrul încăperii. Termocuplurile sunt așezate pe suport la următoarele distanțe față de pardoseala încăperii: 5 cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm, 65 cm și 75 cm.

62 Determinarea experimentală a timpului de activare al sprinklerelor - 4

La înregistrarea pierderii de masă a substanței incendiate s-a utilizat o balanță electronică de tip Kern care a fost legată direct în unitatea de stocare a datelor. De asemenea, pentru înregistrarea presiunii gazelor fierbinți au fost amplasate 4 piezometre diferențiale în partea superioară a golului de ușă la 49 cm, 53,7 cm, 63,5 cm, respectiv 72,5 cm.

Având în vedere temperaturile ridicate din interiorul încăperii, pentru protejarea cablurilor de conexiune dintre termocupluri, piezometrele diferențiale respectiv balanța electronică și unitatea de stocare a datelor, a fost utilizată vată minerală cu densitate mărită.

Pentru determinarea conținutului de oxigen și monoxid de carbon s-a procedat la amplasarea camerei standard ISO sub hota de colectare a gazelor care este conectată prin intermediul unei conducte de evacuare cu diametrul de 400 mm la toate celelalte instrumente de măsură potrivit schemei din figura 26. Aceste instrumente sunt alcătuite dintr-un analizor de gaze (0-25 % O₂ și 0-10 % CO) și un dispozitiv optic pentru determinarea concentrației de fum și gaze fierbinți.

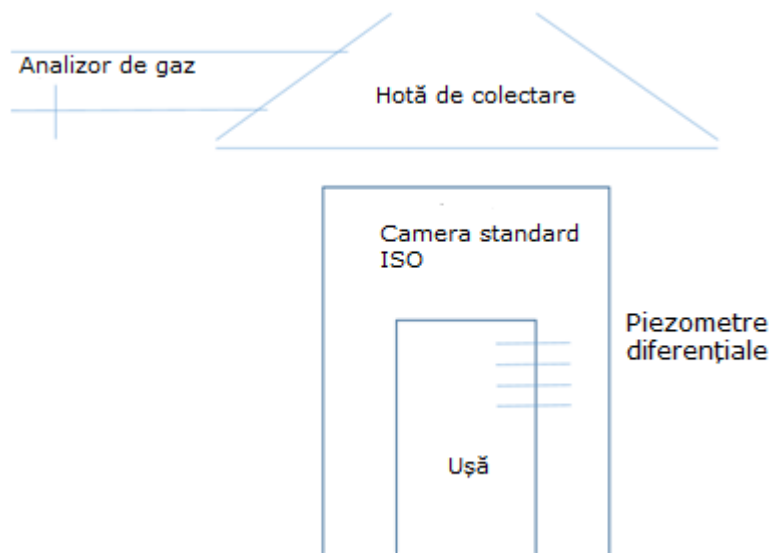


Figura 26. Modul de amplasare a echipamentelor și instrumentelor de măsură

Parametri specifici determinați de-a lungul experimentelor sunt:

- pierderea de masă pentru determinarea ratei de căldură degajate;
- concentrația de oxigen în gazele de ardere pentru determinarea ratei de căldură degajate;
- presiunea gazelor fierbinți pentru determinarea înălțimii planului neutru;
- temperatura în interiorul compartimentului de incendiu pentru compararea cu metodele computerizate;
- determinarea timpului de răspuns al sprinklerelor.

Înregistrarea acestor date s-a realizat într-un sistem centralizat prin conectarea tuturor instrumentelor de măsură la unitatea centrală de stocare a datelor, cu excepția timpului de răspuns al sprinklerelor care s-a determinat atât vizual, cât și auditiv la spargerea bulbului de sticlă, prin cronometrare.

Pentru determinarea eficiență a parametrilor studiați s-au folosit 7 termocupluri și 4 piezometre diferențiale astfel încât la defectarea unui astfel de dispozitiv de măsură să se asigure înregistrarea continuă a datelor. Înregistrarea datelor s-a realizat înainte de aprinderea focarelor pentru a se asigura corectitudinea colectării acestora, precum și determinarea eventualelor echipamente ce necesită a fi calibrate.

Între fiecare test s-a asigurat o pauză suficient de mare pentru răcirea compartimentului de incendiu în așa fel încât să fie eliminate eventualele erori în înregistrarea temperaturilor, precum și a ratei de căldură degajate.



Figura 27. Fotografie din timpul calibrării echipamentelor de măsură

Pentru măsurarea cu acuratețe a datelor de interes la începutul fiecărei sesiuni experimentale s-a realizat calibrarea echipamentelor de măsură cu ajutorul unui alt focar de incendiu plasat în afara camerei standard ISO potrivit figurii 27.

4.3 Metoda Froude de reducere la scară

În mod similar procesului de curgere al fluidelor, flăcările rezultate în urma unui incendiu prezintă două regimuri distincte, după cum urmează: flăcări laminare și flăcări turbulente. În cazul lichidelor combustibile, Babrauskas a descoperit faptul că la diametre ale focarului mai mari de 0,2 m, flăcările au un aspect turbulent generat de diferențele de temperatură față de mediul exterior [54].

Utilizat în problemele de hidraulică pentru descrierea curgerii fluidelor, numărul adimensional Froude poate fi utilizat și pentru caracterizarea flăcărilor rezultate în urma unui incendiu.

64 Determinarea experimentală a timpului de activare al sprinklerelor - 4

$$Fr = \frac{u^2}{g \cdot D} \quad (4.1)$$

unde u este viteza gazelor (m/s), g este accelerația gravitațională (m/s^2) și D este diametrul focarului de incendiu (m).

Tabel 6. Procedura de reducere la scară a principalilor parametri studiați

Parameterul studiat	Relația de similitudine	Număr
Rata de căldură degajată (HRR) (kW)	$\frac{Q_F}{Q_M} = \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^{5/2}$	(4.3)
Debitul volumetric (m^3/s)	$\frac{V_F}{V_M} = \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^{5/2}$	(4.4)
Viteza (m/s)	$\frac{u_F}{u_M} = \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^{1/2}$	(4.5)
Timpul (s)	$\frac{t_F}{t_M} = \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^{1/2}$	(4.6)
Energia (kJ)	$\frac{E_F}{E_M} = \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^3$	(4.7)
Indicele timpului de răspuns ($m^{1/2}s^{1/2}$)	$\frac{RTI_M}{RTI_F} = \left(\frac{l_M}{l_F}\right)^{3/4}$	(4.8)
Temperatura (K)	$T_F = T_M$	(4.9)

Ținând cont că rata de căldură degajată este produsul dintre pierderea de masă și puterea calorifică a materialului combustibil, atunci numărul Froude poate fi exprimat în termeni de căldură degajată:

$$Fr \approx \frac{\dot{Q}^2}{D^5} \quad (4.2)$$

unde Q este rata de căldură degajată (kW), iar D este diametrul focarului (m).

Pornind de la această ecuație în literatura de specialitate sunt prezentate modele de reducere la scară a parametrilor asociați unui incendiu utilizând numărul adimensional Froude.

În tabelul 6 [55] sunt prezentate principalele relații de reducere la scară a parametrilor utilizați pe timpul experimentelor ce studiază procesele specifice incendiilor, unde indicele M reprezintă valoarea asociată modelului la scară redusă, F este valoarea la scară naturală, iar L_F și L_M sunt dimensiunile caracteristice acestora.

Cu toate acestea, modelele la scară redusă au anumite limitări, iar relațiile bazate pe modelul Froude își pierd valabilitatea atunci când vâscozitatea devine importantă, iar flăcările se află în regimul laminar. De aceea, este important ca înainte de începerea oricărui experiment să se calculeze rata de căldură adimensională pentru determinarea regimului flăcărilor, cu următoarea formulă:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho c_p T \sqrt{g D D^2}} \quad (4.10)$$

unde Q^* este rata de căldură adimensională, Q este rata de căldură degajată (kW), ρ este densitatea (kg/m^3), c_p este căldura specifică (J/K), g este accelerația gravitațională (m/s^2), T este temperatura (K), iar D este diametrul focarului de incendiu (m).

4.4 Procedura de lucru

La executarea celor trei experimente s-a respectat aceeași procedură de lucru, cu excepția locului de amplasare al focarului de incendiu. Pentru primul experiment acesta a fost plasat în centrul camerei standard ISO la o distanță de 0,6 m față de golul de intrare și 0,4 m față de pereții laterali. În cel de-al doilea experiment același focar a fost plasat lipit de peretele din stânga compartimentului, iar la ultimul test focarul a fost amplasat lipit de colțul din stânga opus golului de acces în încăpere.

Procedura de lucru presupune următoarele etape:

- amenajarea laboratorului de testare și utilizarea indicatoarelor de securitate corespunzătoare;
- amplasarea standului experimental în perimetrul hotei de colectare a gazelor;
- calibrarea echipamentelor de măsură;
- plasarea capetelor sprinkler în centrul încăperii;
- aplasarea termocupurilor și a balanței electronice în interiorul compartimentului;
- plasarea focarului de incendiu deasupra balanței electronice;
- măsurarea cantității de combustibil lichid cu cilindrul gradat;
- introducerea heptanului în tava de ardere;
- pornirea echipamentelor de înregistrare a datelor;
- analizarea parametrilor specifici aerului ambiant;
- aprinderea focarului cu ajutorul unui arzător portabil;
- supravegherea procesului de ardere și înregistrarea manuală a datelor de interes;
- după arderea completă a combustibilului lichid se scoate focarul în exteriorul încăperii și se răcește cu apă rece;
- răcirea compartimentului de incendiu timp de 30 de minute;
- repetarea testelor.

4.5 Rezultatele experimentelor

4.5.1 Determinarea ratei de căldură degajate cu metoda consumului de oxigen

Această metodă este recunoscută ca fiind una din cele mai eficiente pentru determinarea ratei de căldură degajate în timpul incendiilor. Principiul ce stă la baza acestei metode constă în faptul că materialele combustibile în timpul procesului de ardere produc o cantitate de energie proporțională cu oxigenul consumat. Energia produsă reprezintă aproximativ 13100 kJ per kilogram oxigen consumat, iar această valoare este constantă pentru majoritatea materialelor, cu excepția hidrocarburilor unde au fost constatate erori de $\pm 5\%$ [56].

Gazele rezultate în urma procesului de ardere se ridică la partea superioară a încăperii datorită diferențelor de temperatură și densitate, după care părăsesc compartimentul de incendiu ridicându-se către hota de colectare potrivit figurii 28. Din hota de colectare sunt direcționate către tubulatura de evacuare unde este analizată concentrația de oxigen necesară determinării ratei de căldură degajate.



Figura 28. Colectarea gazelor fierbinți pentru determinarea ratei de căldură degajate

Pentru determinarea ratei de căldură degajate cu ajutorul metodei consumului de oxigen este necesar a se calcula cantitatea de aer ce intră în compartimentul de incendiu, precum și cantitatea de gaze evacuate prin hota de colectare către exterior.

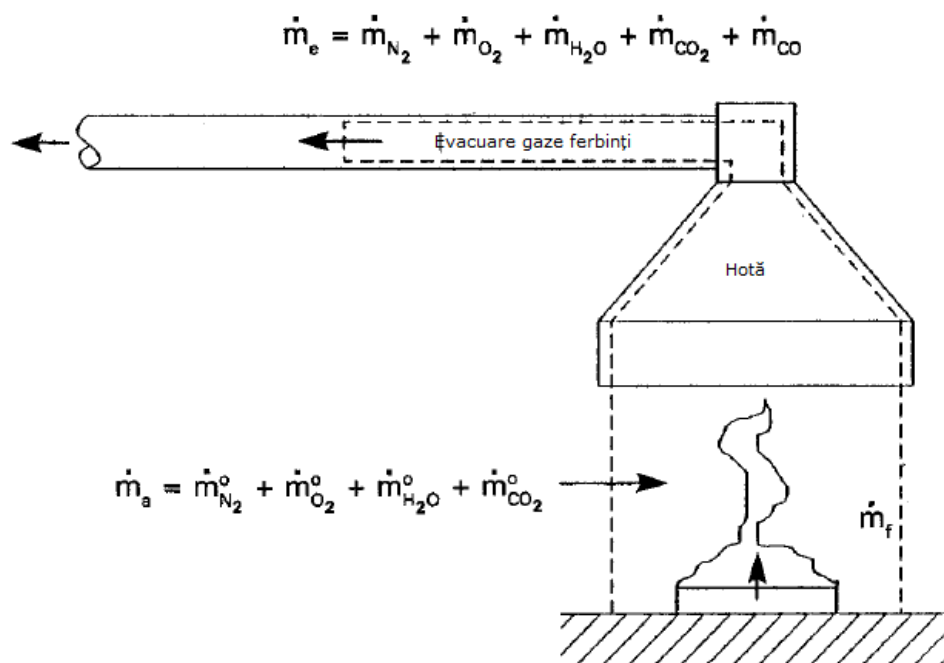


Figura 29. Exemplificarea procedurii de calcul a ratei de căldură degajate

Potrivit schemei prezentate în figura 29, cantitatea de aer ce alimentează focarul de incendiu este notată cu \dot{m}_a , iar gazele rezultate în urma arderii sunt notate cu \dot{m}_e .

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{N_2}^o + \dot{m}_{O_2}^o + \dot{m}_{H_2O}^o + \dot{m}_{CO_2}^o \quad (4.11)$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{CO_2} \quad (4.12)$$

unde m_{N_2} , m_{O_2} , m_{H_2O} , m_{CO_2} reprezintă masa molară de N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 în aerul exterior, precum și în gazele fierbinți. Având în vedere că picăturile de apă rezultate în urma procesului de ardere sunt filtrate în sistemul de analizare a gazelor, masa molară corespunzătoare este egală cu 0.

Debitul masic de gaze fierbinți evacuat din compartimentul de incendiu către tubulatura de evacuare este calculat cu următoarea formulă:

$$\dot{m}_e = A \cdot \rho \cdot v = \pi \frac{D^2}{4} \rho \frac{\sqrt{2\Delta P}}{k_p} = \pi \frac{D^2}{4} \frac{353}{T} \frac{\sqrt{2\Delta P / (353/T)}}{k_p} \quad (4.13)$$

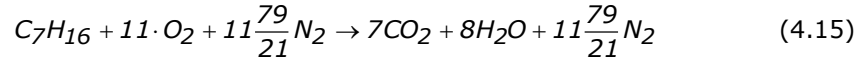
unde A este aria golului de ușă (m^2), ρ este densitatea gazelor fierbinți (kg/m^3), v este viteza gazelor fierbinți, D este diametrul focarului de incendiu (m), ΔP este diferența de presiune măsurată cu piezometrele diferențiale (Pa), T este temperatura gazelor fierbinți (K), iar k_p este o constantă caracteristică instrumentelor de măsură egală cu 1,08.

Debitul masic de aer ce intră în compartimentul de incendiu se calculează utilizând următoarea relație:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_e}{1 + \Phi \cdot (1 - a)} \quad (4.14)$$

unde m_e reprezintă debitul masic de gaze fierbinți (kg/s), a este rata volumetrică de creștere, iar Φ este factorul specific consumului de oxigen.

Rata volumetrică de creștere în cazul heptanului se poate calcula astfel:



$$a = \frac{M_{produs}}{M_{reactant}} = \frac{56,38}{53,38} = 1,056 \quad (4.16)$$

Factorul specific consumului de oxigen Φ se determină cu următoarea ecuație:

$$\Phi = \frac{X^{A^0}_{O_2}(1 - X^A_{CO_2})X^A_{O_2}(1 - X^{A^0}_{CO_2})}{(1 - X^A_{O_2} - X^A_{CO_2})X^{A^0}_{O_2}} \quad (4.17)$$

unde $X^{A^0}_{O_2}$ reprezintă valoarea inițială măsurată a concentrației de oxigen în aerul exterior;

$X^{A^0}_{CO_2}$ - reprezintă valoarea inițială măsurată a dioxidului de carbon în aerul exterior;

$X^A_{O_2}$ - reprezintă valoarea măsurată a concentrației de oxigen pe parcursul experimentului;

$X^A_{CO_2}$ - reprezintă valoarea măsurată a concentrației de dioxid de carbon pe parcursul experimentului;

La calculul ratei căldurii degajate în interiorul compartimentului de incendiu s-a utilizat următoarea formulă:

$$\dot{Q} = E \frac{\Phi}{1 + \Phi \cdot (a - 1)} \dot{m}_e \frac{M_{O_2}}{M_a} X^{A^0}_{O_2} (1 - X^{A^0}_{H_2O} - X^{A^0}_{CO_2}) \quad (4.18)$$

unde E reprezintă puterea calorică per unitatea de oxigen consumat (13,1 MJ/kg O_2);

M_{O_2} - masa moleculară a oxigenului (32 g/mol);

M_a - masa moleculară a aerului (28,97 g/mol).

$X^{A^0}_{H_2O}$ - reprezintă valoarea inițială măsurată a picăturilor de apă în aerul exterior;

În acest sens, folosind informațiile înregistrate în unitatea de stocare a datelor, în care sunt conectate toate instrumentele de măsură, s-a calculat rata de căldură degajată totală (HRR de la englezescul "heat release rate"), pe timpul celor trei experimente.

Valorile determinate în urma încercărilor experimentale și calculate cu ajutorul formulelor mai sus menționate sunt prezentate în figurile 30, 31 și 32.

Din aceste grafice se poate observa că incendiul prezintă o perioadă de creștere, după care apare o perioadă de ardere constantă, specifică lichidelor combustibile, iar către sfârșit este o curbă de scădere până în momentul în care materialul combustibil a fost ars în totalitate.

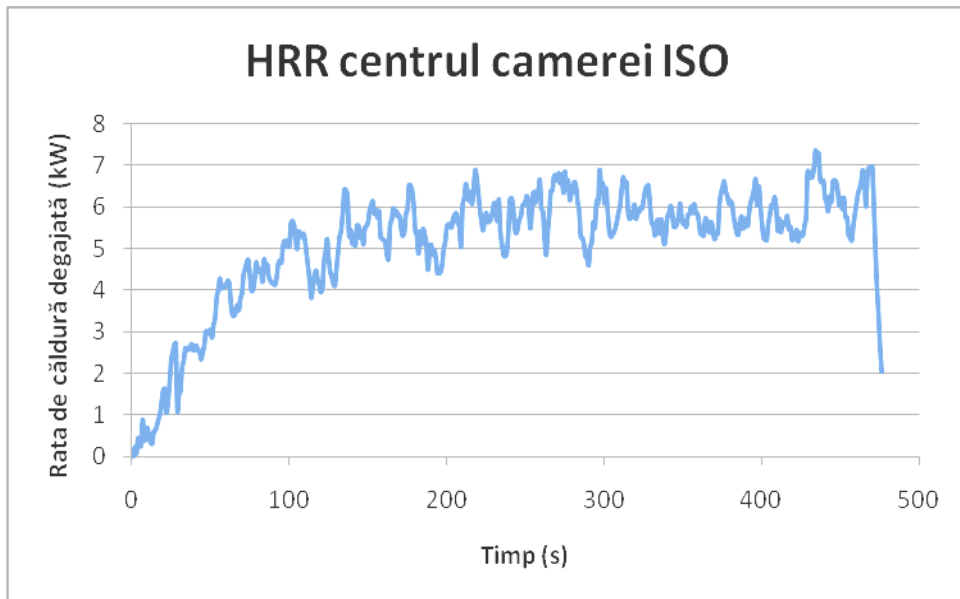


Figura 30. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat în centrul camerei

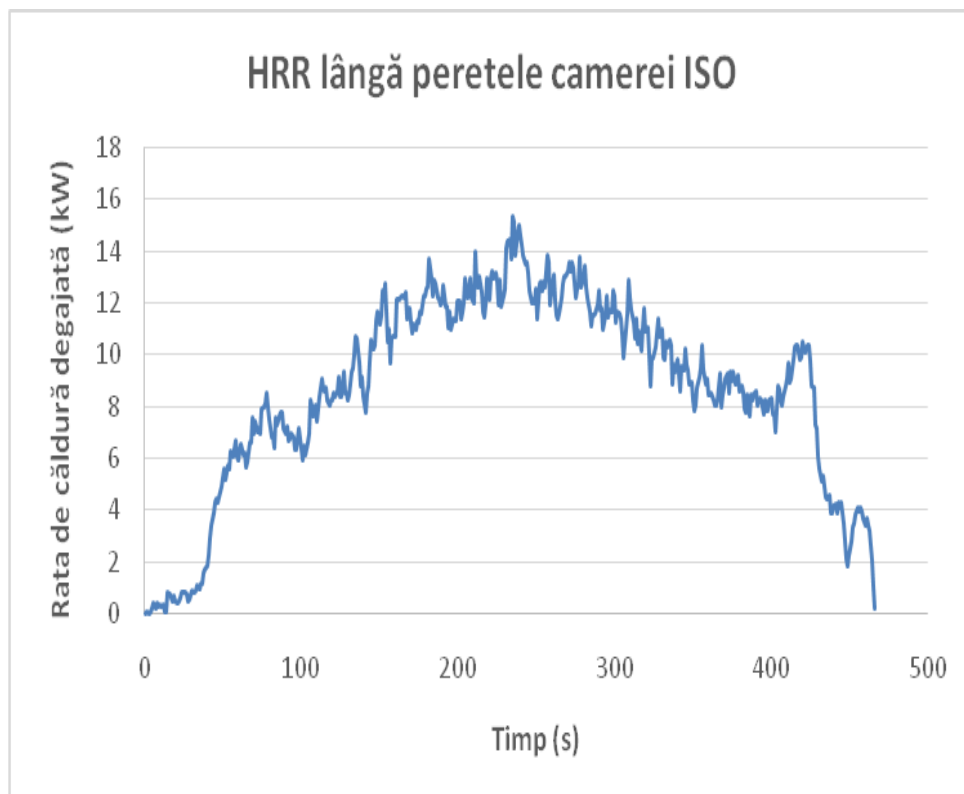


Figura 31. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă peretele camerei

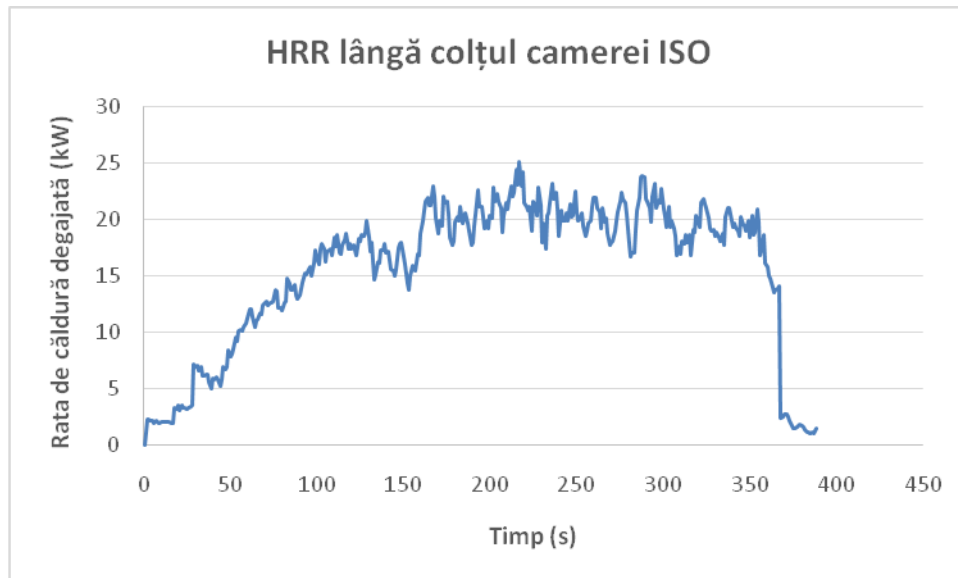


Figura 32. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă colțul camerei

4.5.2 Determinarea ratei de căldură degajate cu metoda pierderii de masă

O altă metodă adesea folosită în măsurarea ratei de căldură degajată este cea a pierderii de masă. Avantajul acestei metode constă în faptul că echipamentele utilizate sunt mai puțin costisitoare, iar interpretarea și calcularea valorilor nu sunt la fel de laborioase ca cele necesare metodei consumului de oxigen.

În acest caz, este suficientă amplasarea unui dispozitiv de cântărire de înaltă precizie sub focarul de incendiu și înregistrarea valorilor pierderii de masă pe parcursul procesului de ardere conform fotografiei din figura 33.



Figura 33. Fotografie ce indică modul de amplasare al balanței electronice

Pe timpul desfășurării celor trei experimente s-a optat pentru amplasarea unei balanțe electronice de tip Kern sub focarul de incendiu și înregistrarea automată a datelor în unitatea de stocare din camera de control. Este de subliniat că prin introducerea acestui dispozitiv de măsurare, toate cele trei focare au fost ridicate către partea superioară a încăperii cu 90 mm.

Pentru determinarea ratei de căldură degajate s-a utilizat următoarea relație matematică:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H_{ef} \quad (4.19)$$

unde \dot{m} este pierderea de masă înregistrată pe timpul procesului de ardere (kg/s), iar ΔH_{ef} este puterea calorică inferioară a materialului combustibil (kJ/kg).

Este necesar a se face o diferențiere clară între puterea calorică inferioară și puterea calorică totală a materialului. Prima caracteristică reprezintă cantitatea de energie degajată în urma procesului de ardere și este influențată de oxigenul disponibil în interiorul compartimentului de incendiu, iar cea de-a doua mărime reprezintă cantitatea totală de energie ce poate fi degajată în urma procesului de ardere și este determinată prin intermediul calorimetrului într-o atmosferă în care oxigenul este injectat sub presiune.

Valoarea puterii calorifice specifice heptanului este considerată 44,6 MJ/kg conform literaturii de specialitate [57], iar eficacitatea procesului de combustie pentru majoritatea hidrocarburilor este 0,7.

Rezultatele determinate în urma încercărilor experimentale și calculate cu ajutorul ecuației mai sus menționate sunt prezentate în figurile 34, 35 și 36.

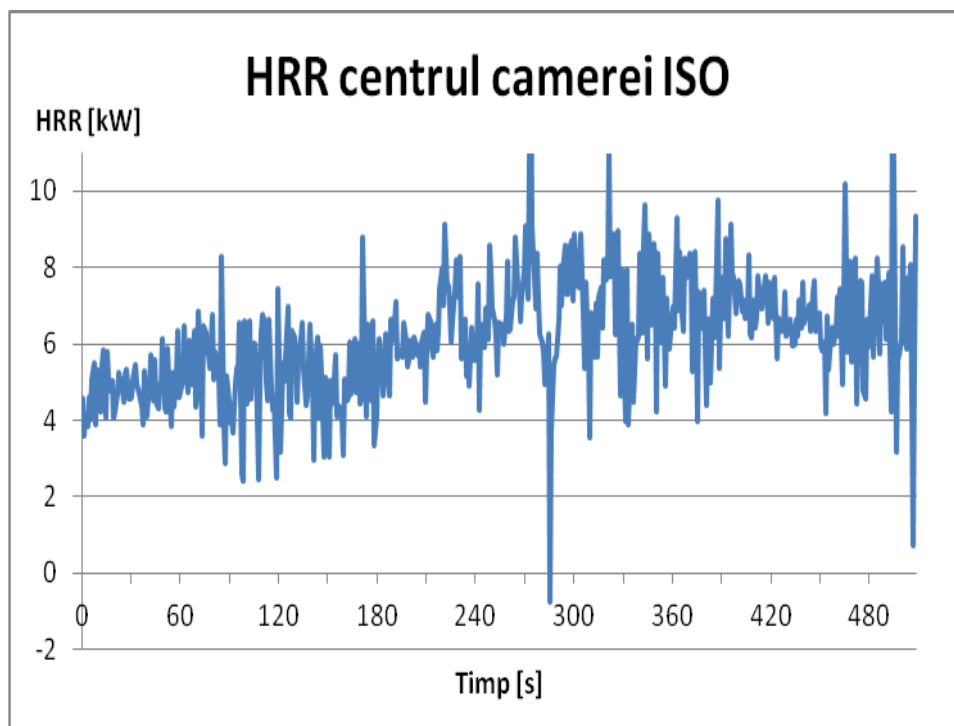


Figura 34. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat în centrul camerei

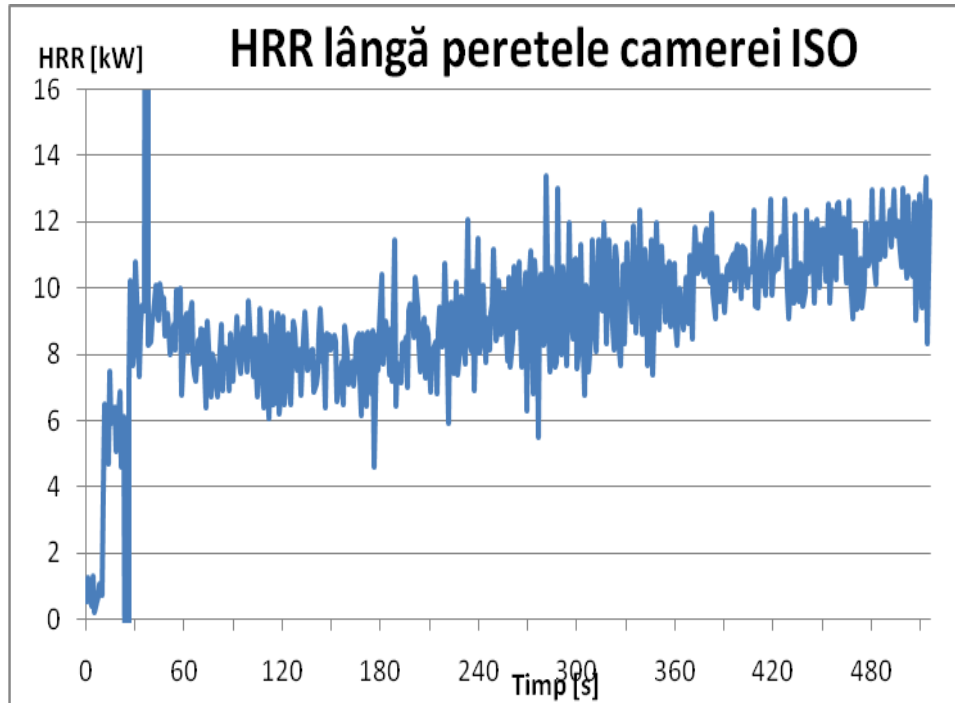


Figura 35. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă peretele camerei

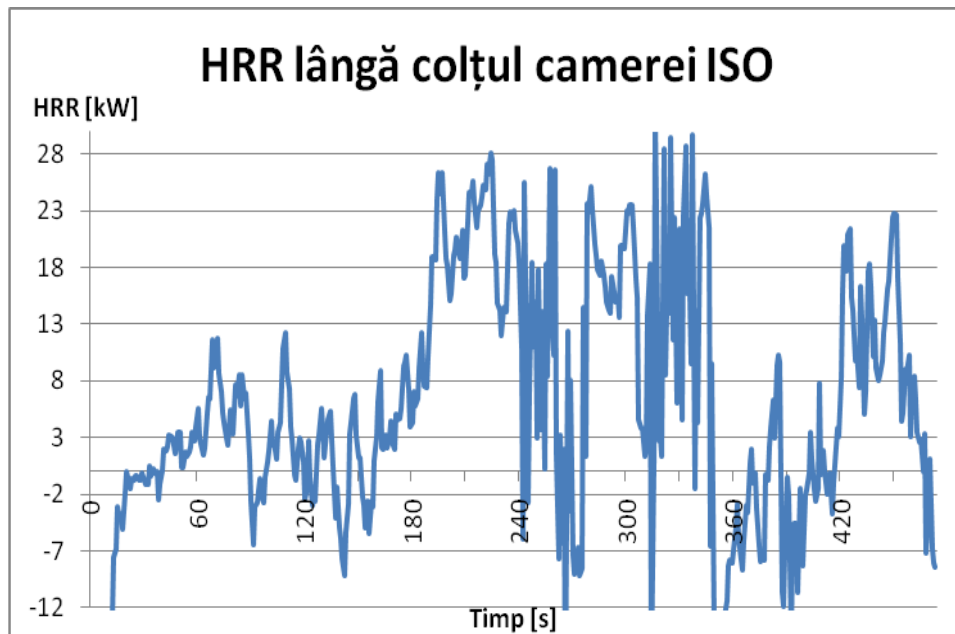


Figura 36. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă colțul camerei

4.5.3 Determinarea ratei de căldură degajate cu ajutorul metodelor analitice

Rata de căldură degajată poate fi determinată cu ajutorul ecuațiilor dezvoltate de către Babrauskas [53]. Aceste relații matematice au fost rezultatul unor serii de experimente în care diverse lichide combustibile au fost incendiate în aer liber, fără a fi luate în considerare eventualele efecte ale compartimentelor asupra procesului de ardere. Rata de căldură degajată se calculează cu următoarea relație:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' \cdot A \cdot \chi \cdot \Delta H_c \quad (4.20)$$

unde \dot{m} este pierderea de masă (kg/s), A este aria focarului de incendiu (m^2), χ reprezintă eficiența procesului de combustie, ΔH_c este puterea calorică totală (kJ/kg).

$$\dot{m}'' = \dot{m}_\infty'' (1 - e^{-k\beta D}) \quad (4.21)$$

unde \dot{m}_∞ pierderea de masă cu variație asimptotică (kg/m²s), k este coeficientul de absorbție al flăcărilor, β reprezintă factorul de corecție, iar D este diametrul focarului (m).

Deoarece aceste ecuații descriu valoarea maximă a ratei de căldură ce poate fi eliberată de către un lichid combustibil în urma unui incendiu, pentru identificarea perioadei de creștere a incendiului s-a utilizat un coeficient de creștere α egal cu 0,5 kW/s² corespunzător unui incendiu ultra rapid potrivit anexelor din NFPA 204M [58].

Majoritatea incendiilor manifestă imediat după aprindere o perioadă de creștere ce influențează rata căldurii degajate. Cu excepția arderilor mocnite, precum și a altor situații speciale de ardere, s-a descoperit că incendiile prezintă o rată de creștere proporțională cu rata căldurii degajată în funcție de timp.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (4.22)$$

unde α este coeficient de creștere a incendiului (kW/s²), iar t reprezintă perioada de timp necesară atingerii valorii maxime a ratei de căldură degajate (s).

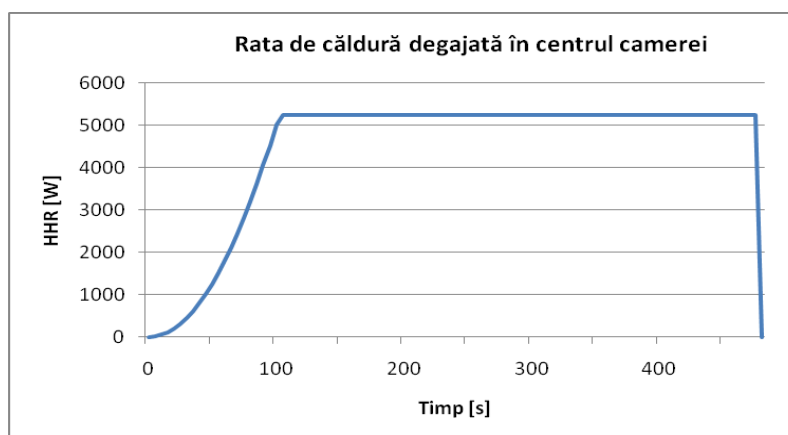


Figura 37. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat în centrul camerei

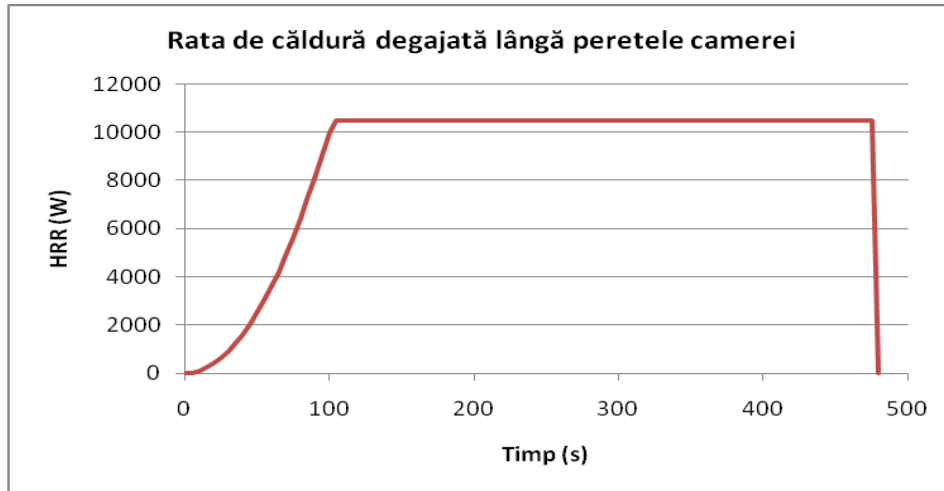


Figura 38. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă peretele camerei

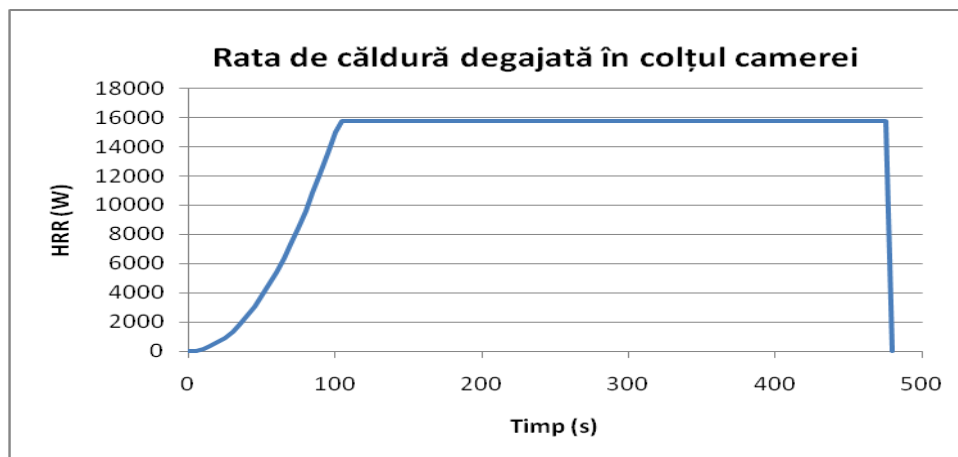


Figura 39. Rata de căldură degajată pentru focarul amplasat lângă colțul camerei

Figurile 37, 38 și 39 ilustrează valorile ratei de căldură degajată prin utilizarea metodelor de calcul analitice, pentru fiecare dintre situațiile corespunzătoare modului de amplasare al focarelor de incendiu.

4.5.4 Temperaturile înregistrate în interiorul compartimentului de incendiu pe perioada desfășurării experimentelor

Acuratețea cu care este măsurată temperatura, în timpul experimentelor, pentru determinarea parametrilor specifici unui incendiu, depinde de alegerea aparatelor și instrumentelor de măsură.

În cadrul acestor teste s-au ales termocupluri de tip K cu cap sferic, cu diametrul de 1 mm pentru a se diminua erorile de înregistrare prin reducerea valorii inerției termice specifice.

4.5. Rezultatele experimentelor 75

Temperaturile rezultate în urma încercărilor experimentale sunt prezentate în figurile 40, 41 și 42.

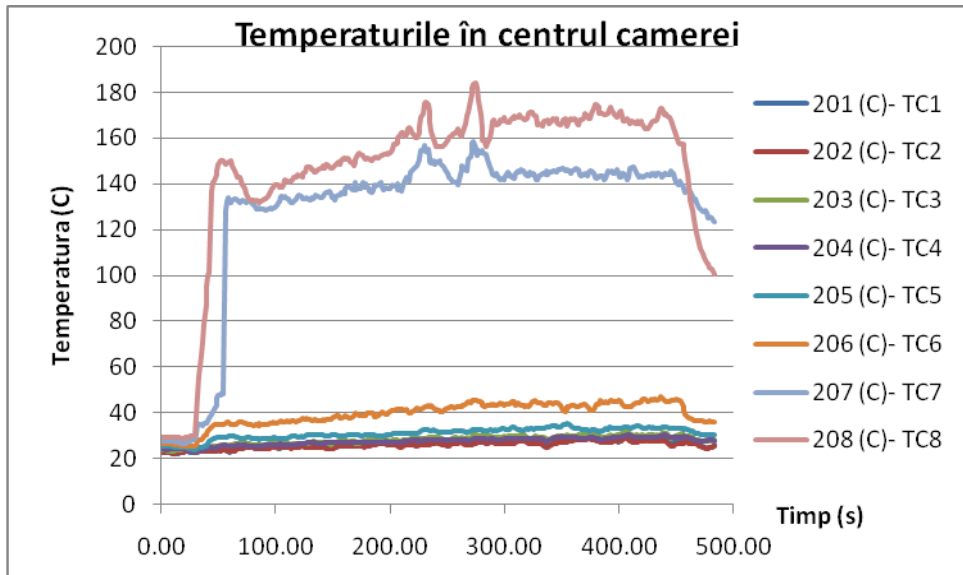


Figura 40. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat în centrul camerei

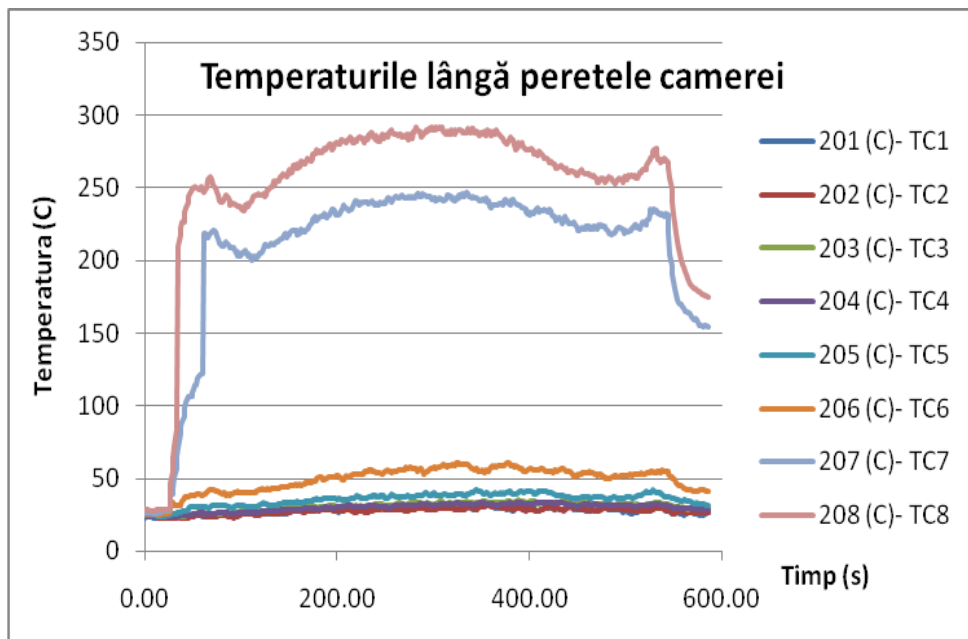


Figura 41. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă peretele camerei

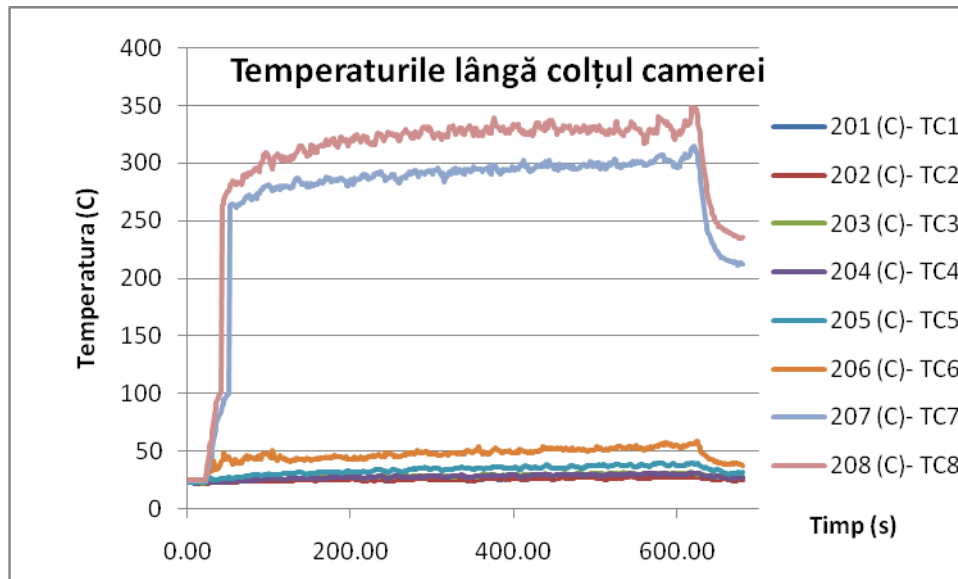


Figura 42. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă colțul camerei

4.5.5 Determinarea parametrilor asociați incendiului cu ajutorul metodelor de simulare

Deși programele de simulare oferă o sursă alternativă pentru calcularea parametrilor de incendiu, acestea pot fi adesea o sursă de erori datorită limitărilor acestor programe. Cu toate acestea ele sunt preferate metodelor analitice pentru timpul relativ scurt de rezolvare a obiectivelor de proiectare. Pentru validarea acestor programe sunt utilizate date experimentale rezultate în urma unor teste realizate atât la scară naturală, cât și la scară redusă.

La determinarea ratei de căldură degajate, a temperaturilor în interiorul compartimentului de incendiu, precum și a timpului de activare a sprinklerelor a fost utilizat un model cu aceleași caracteristici ca a celui utilizat pe parcursul determinărilor experimentale potrivit fotografiei din figura 43.

Determinarea parametrilor menționați s-a realizat cu ajutorul programului de simulare Fire Dynamics Simulator (FDS) care are la bază principiile de modelare specifice dinamicii fluidelor (CFD).

La generarea domeniului de lucru s-a avut în vedere efectul aerului exterior ce intră în încăpere prin golul de ușă pentru obținerea unui incendiu ventilat în care aportul de oxigen este suficient pentru întreținerea arderii, iar parametri incendiului sunt influențați de cantitatea de materiale combustibile disponibile. În acest sens, a fost realizat un domeniu de calcul cu dimensiunile de 1,5 x 0,8 x 0,8 m, iar dimensiunea celulelor de lucru este de 5 cm.

Temperaturile au fost înregistrate cu ajutorul unor termocupluri montate în interiorul domeniului. Aceste termocupluri au fost plasate în direcție verticală în fiecare celulă de lucru, la o distanță de 25 cm față de centrul virtual al încăperii. La amplasarea termocuplurilor s-a avut în vedere metoda de calcul utilizată de către programul de simulare în așa fel încât să se asigure înregistrarea cu acuratețe a temperaturilor dezvoltate în timpul incendiului.

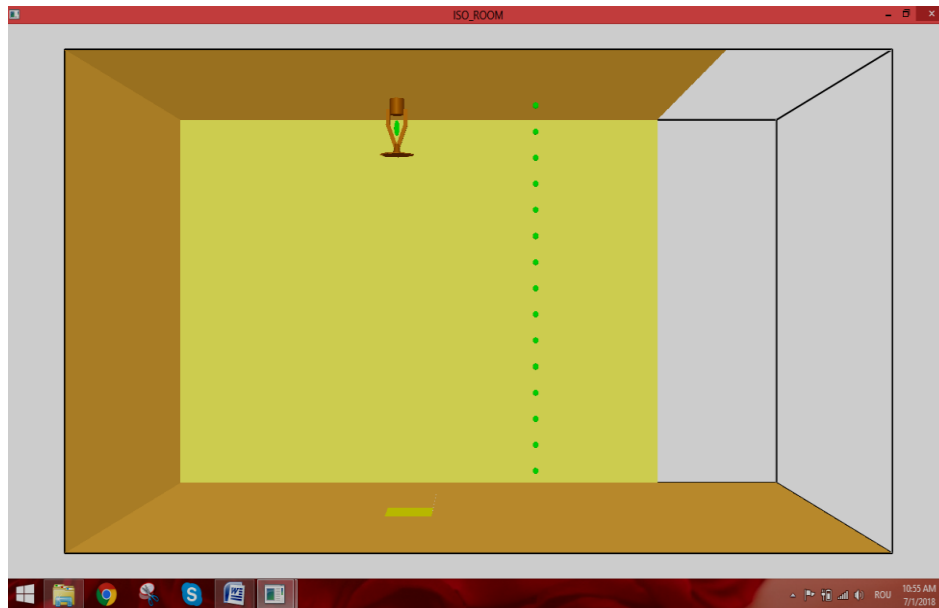


Figura 43. Prezentarea modelului utilizat în FDS

4.5.6 Determinarea ratei de căldură degajate cu ajutorul programului de simulare Fire Dynamic Simulator

Rata de căldură degajată

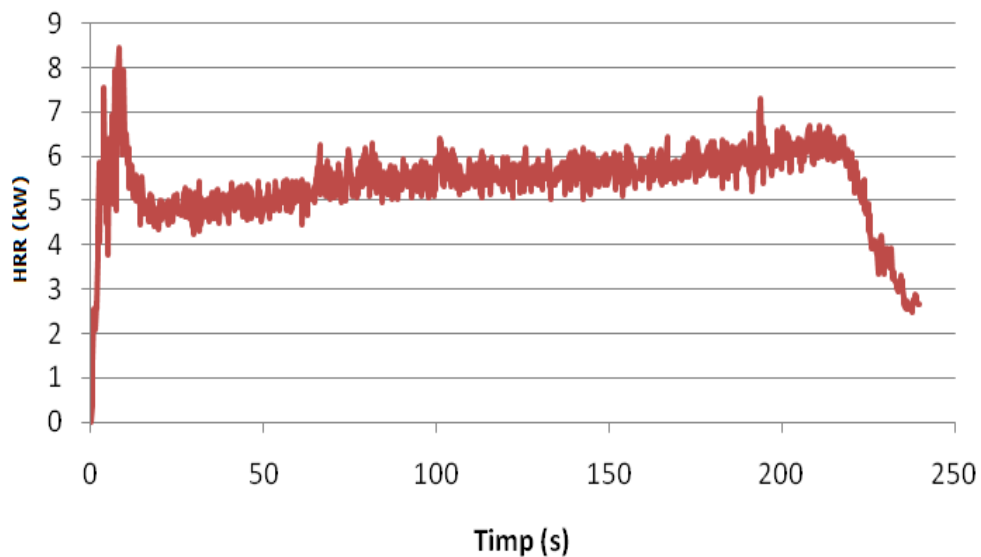


Figura 44. Rata de căldură degajată în centrul camerei ISO

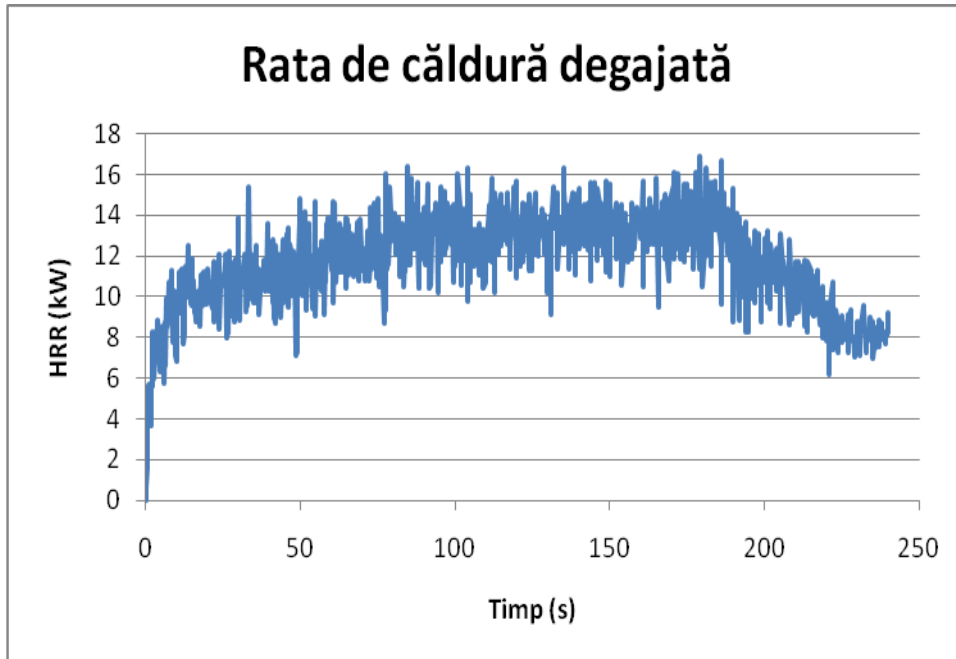


Figura 45. Rata de căldură degajată lângă peretele camerei ISO

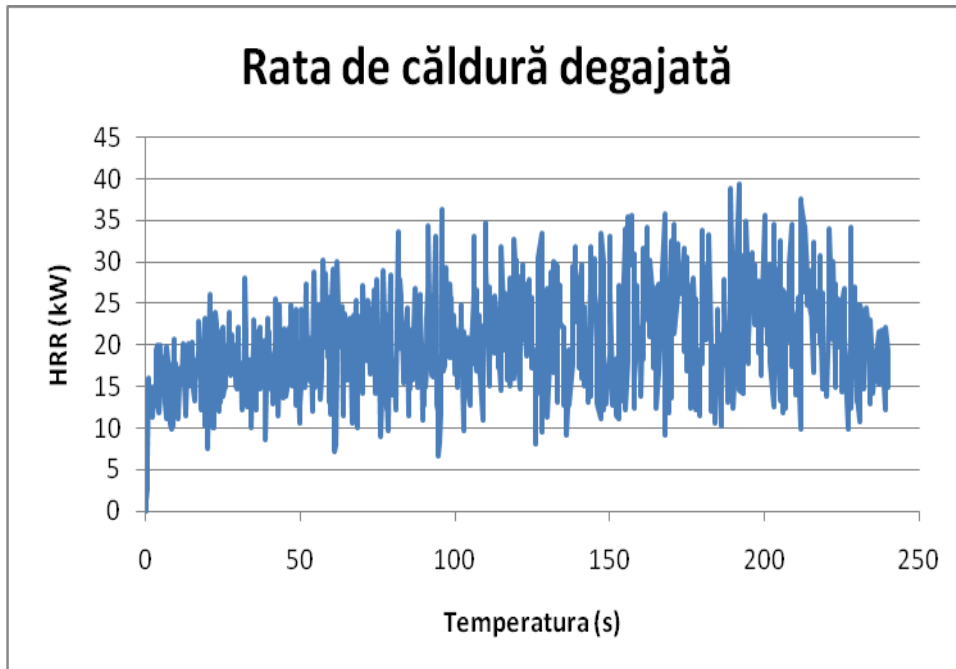


Figura 46. Rata de căldură degajată lângă colțul camerei ISO

4.5.7 Determinarea temperaturilor cu ajutorul programului de simulare Fire Dynamic Simulator

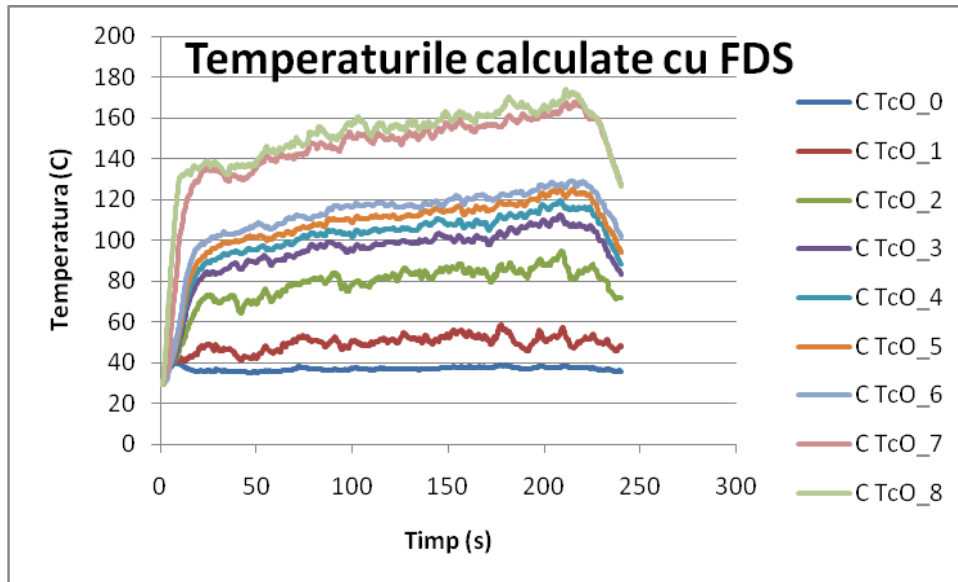


Figura 47. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat în centrul camerei

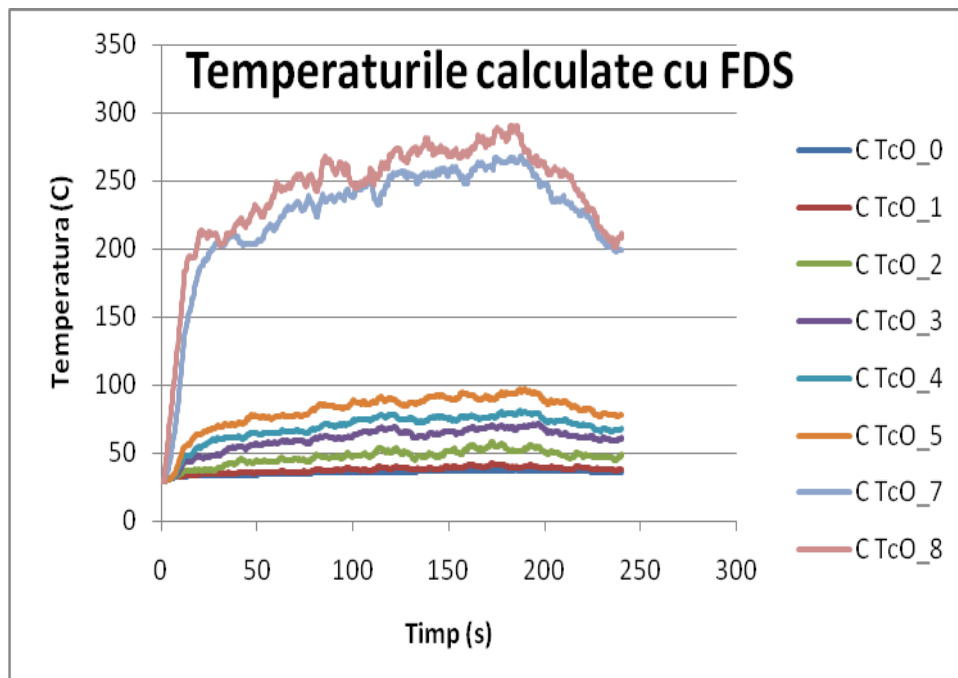


Figura 48. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă peretele camerei

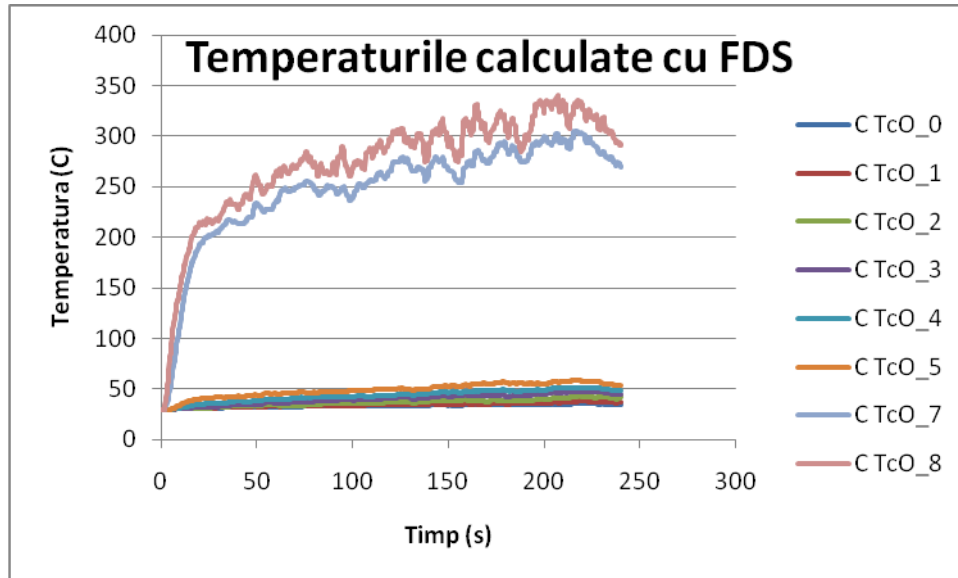


Figura 49. Temperaturile înregistrate pentru focarul plasat lângă colțul camerei

4.5.8 Determinarea timpului de activare al sprinklerelor

Pentru evaluarea timpului de răspuns al instalațiilor de stingere cu sprinklere se pot folosi atât metode de simulare computerizate, dar și metode matematice obținute în urma unor corelații experimentale. În cuprinsul capitolului 3 au fost prezentate atât metodele matematice de determinare a acestui parametru, cât și cele ce sunt incluse în programul de modelare Fire Dynamic Simulator. Pentru verificarea și validarea rezultatelor computerizate s-au folosit modelele analitice propuse de către Evans-Stroup, respectiv rezultatele experimentale obținute în camera standard ISO. La implementarea modelelor matematice propuse de Evans – Stroup s-a utilizat o rată de căldură degajată ce urmează o perioadă de creștere de 100 secunde cu un coeficient corespunzător incendiilor ultra rapide.

Tabel 7. Rezultatele timpului de activare al sprinklerelor

Poziția focarului	Timp de activare cap sprinkler		
	FDS	Analitic	Experimental
Centru	72	88	76
Perete	40	85	51
Colț	57	83	62

Activarea primului sprinkler influențează performanțele întregii instalații de stingere, iar o activare rapidă poate limita propagarea incendiului în perimetrul focarului de incendiu. Indiferent de cantitatea de materiale aflate în interiorul compartimentului de incendiu, timpul de răspuns este influențat în mod primordial de rata de căldură degajată, precum și de configurația focarului de incendiu. Deoarece corelațiile matematice utilizate au la bază experimente în care focarele de incendiu au fost plasate în centrul spațiului analizat, prin prezenta teză sunt

analizate focare de incendiu plasate în diverse locații ale camerei standard ISO 9705.

4.6 Interpretarea rezultatelor

Întregul capitol are ca scop oferirea unei proceduri de lucru pentru calcularea timpului de răspuns al instalațiilor de stingere cu sprinklere utilizând metodele ingineriei securității la incendiu. Folosind același material combustibil s-a analizat atât timpul de răspuns, precum și parametri ce influențează valoarea acestuia.

Temperaturile maxime înregistrate pe parcursul încercărilor experimentale au atins valori de aproximativ 340 °C în situația în care tava cu heptan a fost amplasată în colțul camerei standard ISO. De asemenea, temperaturile din figura 20 arată valori maxime de 290 °C, fiind cu 42 % mai mari decât cele înregistrate în centrul compartimentului de incendiu.

Pentru determinarea ratei de căldură degajată s-au folosit două metode experimentale, precum și modele matematice prezentate în literatura de specialitate.

Din datele experimentale se poate observa că valoarea medie a ratei de căldură degajată este aproximativ 6 kW pentru focarul de incendiu plasat în centrul încăperii, 11 kW pentru cel montat lângă perete și 20 kW în colțul încăperii. Aceste valori înregistrate nu diferă cu mult față de metodele analitice propuse, prezentând diferențe de până la 15 %.

La realizarea modelului implementat în programul de simulare Fire Dynamics Simulator s-a ținut cont de parametri atmosferici existenți la momentul realizării testelor la scară redusă, totodată fiind asigurat aportul necesar de oxigen prin introducerea naturală a aerului în încăperea așa cum reiese din figura 50.

Atât valorile temperaturilor calculate cu ajutorul FDS, precum și rata de căldură degajată arată valori similare cu cele experimentale și analitice utilizate.

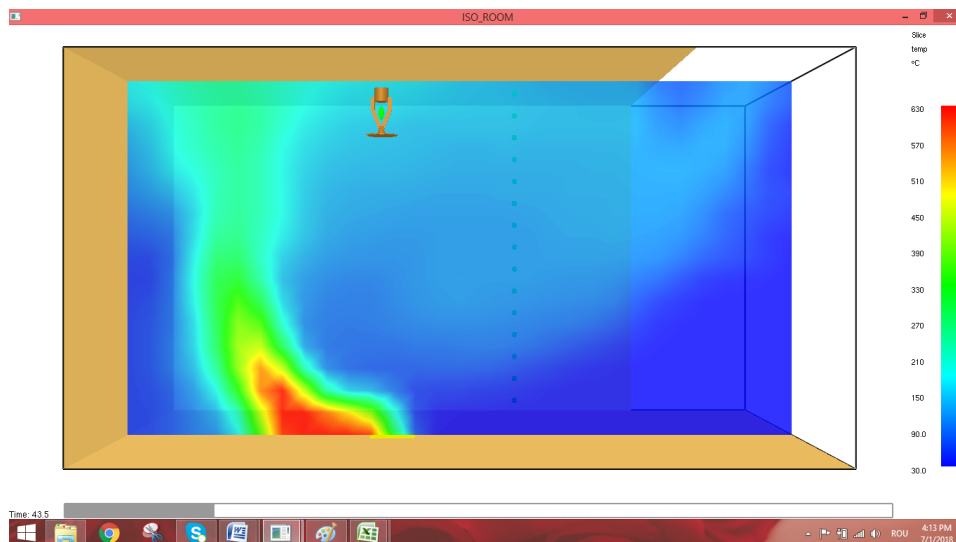


Figura 50. Efectul aerului exterior asupra incendiului în FDS

Se poate observa din graficele aferente ratei de căldură degajată, rezultate în urma simulărilor, că spre deosebire de valorile experimentale perioada de creștere a incendiului este relativ scurtă ajungând până la 20-30 secunde. Deși valorile maxime tind către mărimi egale, modelul de radiație implementat în programul de simulare conduce la intensificarea procesului de ardere în fața inițială. Aceasta se datorează faptului că programul FDS are la bază ecuații separate pentru rezolvarea radiației, iar valoarea inițială a radiației este de 35 % din totalul ratei de căldură degajată.

Pentru evaluarea timpului de răspuns s-a montat un cap sprinkler cu răspuns standard, cu o temperatură de activare de 68°C . Coeficientul de transfer termic prin conducție poate fi considerat neglijabil pentru studiul de față deoarece sprinklerul a fost montat în contact direct cu pereții camerei standard ISO care au fost realizați din plăci de gips carton rezistent la foc ce asigură o conductivitate termică redusă.

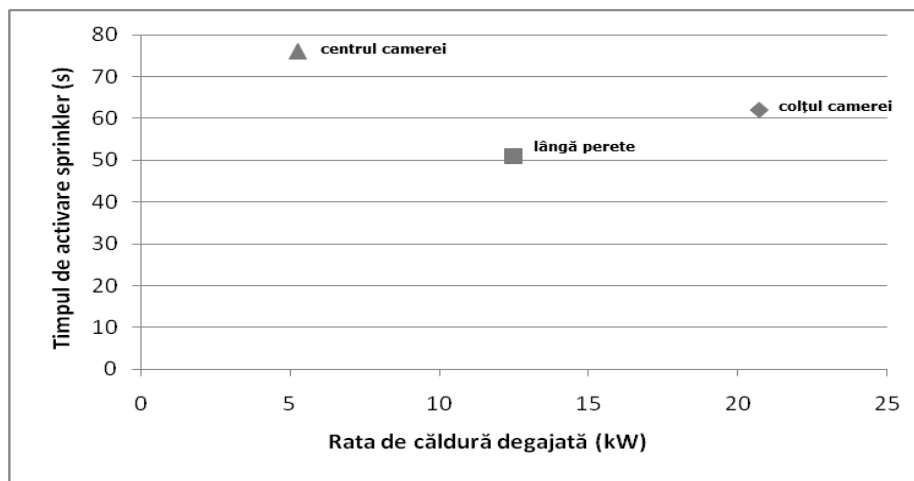


Figura 51. Timpul de activare în funcție de poziția focarului

Valoarea cea mai scăzută a timpului de activare a fost obținută pentru focarul montat lângă peretele compartimentului de incendiu conform figurii 51. Dacă în urma simulării incendiului lângă perete s-a obținut un timp de activare de 40 secunde, pe timpul experimentelor această valoare a fost cu 22 % mai mare, sprinklerul activându-se după aproximativ 51 de secunde. Ca și în cazul temperaturilor și al ratei de căldură degajată, modelul de radiație introdus în FDS produce efecte asupra parametrilor importanți în determinarea timpului de răspuns. În urma determinărilor analitice s-au constatat deviații ale timpilor de activare cuprinse între 25 – 50 % pentru focarele montate lângă perete și în colțul încăperii. Cu toate acestea, în situația focarului montat în centrul încăperii, timpul de răspuns al sprinklerelor tinde către valori apropiate cu diferențe de 16, respectiv 19 %.

4.7 Concluzii

Prezentul capitol prezintă metodologia de calcul specifică ingineriei securității la incendiu pentru determinarea timpului de activare a instalațiilor de

stingere cu sprinklere. Pentru aceasta au fost utilizate programe de simulare privind dinamica fluidelor și calcule matematice rezultate în urma unor încercări experimentale, iar la validarea lor s-au realizat încercări experimentale cu focare de incendiu având aceleași caracteristici, amplasate în poziții diferite în interiorul camerei standard ISO.

Pe lângă evidențierea metodelor de calcul disponibile în domeniul securității la incendiu, s-a evidențiat faptul că poziția focarului în încăpere prezintă un rol deosebit de important în determinarea timpului de activare al instalațiilor de stingere. Similar instalațiilor de stingere, dispozitivele de activarea ale instalațiilor de detectare, activare și alarmare în caz de incendiu au la bază aceleași principii de activare, iar prin similitudine rezultatele obținute în urma acestei teze pot fi aplicate cu succes în cazul ambelor sisteme.

Prin plasarea tăvii cu heptan în mijlocul compartimentului de incendiu au fost obținute valori medii ale ratei de căldură degajate de aproximativ 6 kW atât prin metoda consumului de oxigen, dar și prin pierderea de masă. Aceste valori prezintă diferențe de maximum 12 % comparativ cu metodele analitice, ceea ce întărește ideea că focarele alcătuite din lichide combustibile asigură un grad înalt de acuratețe în cercetarea incendiilor. Este de evidențiat faptul că metodele analitice prezentate în literatura de specialitate au anumite limitări în ceea ce privește determinarea cu exactitate a ratei de căldură degajată prin faptul că acestea au fost realizate în urma unor serii de încercări experimentale realizate în aer liber. Prin plasarea unui focar de incendiu într-o încăpere apar anumite aspecte specifice fenomenului de ardere generate de formarea stratului de fum și, în același timp, de materialele din alcătuirea pereților ce pot contribui la intensificarea pierderii de masă și implicit la creșterea ratei de căldură degajată. Totodată, metodele analitice contribuie la calcularea unor valori maxime ale acestui parametru, care în cele mai multe cazuri prezintă o perioadă de creștere, după care datorită turbulențelor existente poate avea valori cuprinse într-un interval oarecare așa cum reiese din figurile 11 și 15.

Valorile maxime ale ratei de căldură degajate sunt obținute pentru focarele amplasate în colțul încăperilor deoarece flăcările generate în timpul incendiului sunt mărginite de pereții compartimentului care împiedică intrarea aerului exterior pe toate laturile rezultând în efectul de împingere a substanțelor volatile generate de către focar și arderea lor către partea superioară a spațiului. De asemenea, efectul de răcire al aerului exterior asupra flăcărilor este evidențiat în centrul, dar și lângă perețele încăperii unde sunt înregistrate valori mai mici ale temperaturilor, iar rata de căldură degajată este cu două, respectiv trei ordine de mărime mai scăzută.

Este evident din rezultatele obținute că timpul de activare este strâns legat de poziția focarului de incendiu și implicit de rata de căldură degajată. Deși rata de căldură degajată este un parametru esențial în dezvoltarea unui incendiu, la determinarea timpului de activare este necesar a se avea în vedere și distanța orizontală de la centrul focarului până la locul de amplasare al sprinklerelor.

Metodele analitice de calcul pentru timpul de răspuns oferă rezultate valide doar pentru focarul montat în centrul încăperii, întrucât toate ecuațiile matematice au fost descoperite în urma unor teste la scară naturală unde dimensiunile spațiului au fost suficient de mari încât fumul degajat de incendiu să nu formeze un strat la partea superioară. Cu toate că în majoritatea situațiilor sprinklerele sunt montate la înălțimi apreciabile deasupra focarului de incendiu, iar modul de transfer al căldurii către elementul termosensibil se realizează implicit prin convecție, sunt cazuri în care, în faza de creștere a procesului de ardere, radiația reprezintă principalul mod de transfer al căldurii. De aceea, este util ca la aplicarea metodelor ingineriei de calcul specifice securității la incendiu să se realizeze o evaluare clară a tuturor

scenariilor de incendiu existente prin identificarea modalităților de propagare și transfer a căldurii.

Cu toate că poziția focarului în colțul, respectiv lângă peretele încăperii influențează în mod evident rata căldurii degajate și timpul de răspuns al dispozitivelor de detectare ale diverselor sisteme de protecție împotriva incendiilor, este imperios necesar a se avea în vedere distanța orizontală de la locul incendiului până la poziția de amplasare a capetelor sprinkler.

De asemenea, trebuie ținut cont de faptul că efectul de creștere al ratei de căldură degajată în apropierea pereților spațiilor analizate se obțin doar în situația în care flăcările generate de incendiu sunt în contact direct cu suprafața acestora.

Programele de simulare disponibile pot oferi o alternativă viabilă pentru metodele analitice prin prisma faptului că generează rezultate apropiate încercărilor experimentale pentru toate cele trei cazuri analizate, însă folosirea acestora este necesar a se realiza cu responsabilitate privind limitările și erorile introduse. Este deosebit de important ca la raportarea rezultatelor obținute în urma simulărilor computerizate să se întocmească un raport detaliat cu privire la potențialele erori generate, precum și implicațiile acestora asupra întregului proces de proiectare.

5 Determinarea timpului de activare al sprinklerelor în interiorul tunelurilor rutiere

5.1 Particularități ale incendiilor în tunelurile rutiere

Tunelurile rutiere reprezintă un important mod de comunicație și acces către și dinspre zonele montane, acolo unde datorită condițiilor de relief se impune realizarea unor astfel de infrastructuri. Având lungimi cuprinse între câțiva zeci de metri până la ordinul zecilor de kilometri, tunelurile rutiere prezintă particularități aparte în ceea ce privește dinamica incendiilor, precum și a materialelor combustibile implicate.

Utilizarea pe scară largă a diferitelor lichide combustibile în alimentarea autovehiculelor generează o provocare importantă în timpul procesului de proiectare. Dat fiind că rata de căldură degajată este parametrul asociat incendiilor care influențează în mod covârșitor utilizarea metodelor de calcul specifice ingineriei securității la incendiu, este important ca la alegerea acestuia să se realizeze o analiză documentată a tuturor informațiilor disponibile.

De asemenea, un aspect important îl reprezintă natura materialelor transportate de către autovehiculele de mare tonaj care au un aport deosebit în determinarea ratei de căldură degajată. Astfel, în anul 1999, 39 de persoane au decedat în timpul unui incendiu produs la un camion ce transporta margarină și făină, în interiorul tunelului Mont Blanc de pe teritoriul Franței. Intensitatea incendiului a fost atât de mare încât autoritățile franceze de reglementare în domeniu, dar și proiectanții au fost luați prin surprindere deoarece la acea dată materialele implicate erau clasificate ca fiind cu risc mic de incendiu. Acest lucru s-a datorat faptului că la clasificarea acestor materiale s-a ținut cont de criteriul privind temperatura de aprindere și nu de clasa de combustibilitate a acestora. Deși aceste materiale se aprind cu greutate, odată aprinse pot arde cu o intensitate comparabilă cu cea a unui rezervor încărcat cu combustibili lichizi [59]. Pe lângă aspect aspect, situația a fost și mai mult agravată din cauza funcționării defectuoase a sistemului de evacuare a fumului și gazelor fierbinți. Prin urmare, calitatea procesului de proiectare este strâns legată de calitatea parametrilor specifici incendiului, precum și de limitările modelelor utilizate.

Un alt aspect îl reprezintă numărul mare de autovehicule care pot fi implicate simultan într-un incendiu. Fie datorită traficului intens din interiorul tunelului sau a scurgerilor de lichide combustibile, focul se poate propaga cu rapiditate de la un vehicul la altul producând imense pagube umane, dar și materiale. Accidentele rutiere reprezintă încă un factor negativ în propagarea și incendiului.

Evacuarea utilizatorilor este un pas important în procesul de proiectare având în vedere particularitățile ce le impune cu privire la lungimile de evacuare și condițiile din interiorul tunelurilor rutiere. Lungimile mari de parcurs combinate cu temperaturile ridicate și fumul degajat în timpul incendiului conduc la creșterea gradului de risc la care sunt supuși utilizatorii.

Deși România nu dispune de o rețea importantă de tuneluri rutiere, trebuie menționat faptul că cele existente nu conțin elemente de protecție la foc necesare pentru asigurarea nivelului de securitate al utilizatorilor. Dezvoltarea economică din ultimii ani, precum și proiectele de autostrăzi și drumuri impun construirea unor noi infrastructuri rutiere ce presupun realizarea unor tuneluri în zonele montane.

Normativele de proiectare în domeniul securității la incendiu în vigoare cuprind măsuri specifice ce pot fi aplicate clădirilor publice civile, în general, nefiind aplicabile tunelurilor rutiere dat fiind particularitățile incendiilor manifestate în interiorul acestor construcții. Metoda alternativă pentru realizarea și asigurarea criteriilor de performanță privind securitatea la incendiu o reprezintă ingineria securității la incendiu care prezintă metode de calcul matematice pentru determinarea parametrilor asociați unui incendiu.

Cercetarea intensă din ultima perioadă în domeniul securității la incendiu în cazul tunelurilor a condus la obținerea unor rezultate notabile în ceea ce privește dinamica incendiilor. Toate aceste studii oferă date importante pentru proiectarea tunelurilor rutiere, precum și metode matematice în aplicarea ingineriei securității la incendiu.

NFPA 502 este documentul specific de proiectare utilizat în Statele Unite ale Americii în realizarea tunelurilor rutiere. El oferă modele specifice ingineriei securității la incendiu prin prezentarea tuturor stadiilor de proiectare, după cum urmează [60]:

- identificarea utilizatorilor acestor construcții;
- identificarea căilor de evacuare în caz de incendiu și locurile cu acces limitat pentru vehicule;
- clasificarea situațiilor de urgență;
- izbucnirea a unuia sau mai multor incendii simultan în interiorul sau în vecinătatea tunelului;
- incendii izbucnite la distanțe apreciabile față de sistemele de protecție disponibile;
- gradul de expunere la temperaturi ridicate a sistemelor de protecție și a structurii de rezistență a tunelului;
- sisteme de control ale traficului în perioade de vârf și pe timpul situațiilor de urgență;
- sisteme de protecție împotriva incendiilor: instalații de detectare și alarmare în caz de incendiu, coloane uscate, sisteme de stingere cu apă, sisteme de ventilare și evacuare gaze fierbinți, sisteme de comunicație în caz de incendiu.
- instalații utilitare ce echipează tunelurile;
- căi de evacuare și salvare în caz de incendiu;
- timpul de răspuns al echipajelor specializate;
- puncte de acces pentru autospecialele de intervenție;
- caracteristicile vehiculelor și ale bunurilor transportate în interiorul tunelului;
- localizarea spațială a tunelului în mediul urban sau rural;
- configurația geometrică și dimensiunile tunelului;
- factori atmosferici ce ar putea influența un incendiu;
- eventualele transporturi de mărfuri periculoase;
- impactul asupra construcțiilor învecinate și a mediului înconjurător;
- modul de dispunere al căilor rutiere (unisens, reversibil, în două direcții).

Cu toate că instalațiile de stingere cu sprinklere nu asigură stingerea completă a incendiilor izbucnite în interiorul autoturismelor, ele contribuie la limitarea propagării acestuia către posibilele autoturisme aflate în apropiere și, totodată, asigură

creerea unor condiții de vizibilitate ridicată prin diluarea efluenților incendiului contribuind la evacuarea în siguranță a utilizatorilor [61].

Fie că sunt sisteme de sprinklere cu deversare sau cu elemente termosensibile, eficacitatea acestor sisteme este strâns legată de timpul de activare și rata de creștere a căldurii degajate.

Datorită costurilor ridicate ce implică testarea unor modele la scară naturală, evaluarea timpului de răspuns al sprinklerelor s-a realizat într-un tunel la scară redusă unde dimensiunile geometrice au fost de zece ori micșorate față de modelul real, iar mărimile specifice incendiului au fost corelate cu ajutorul metodei de reducere la scară introdusă de Froude și prezentată în cuprinsul capitolului 4.

5.2 Obiectivele studiului

Principalul obiectiv al acestui studiu îl reprezintă determinarea timpului de răspuns al instalațiilor de stingere cu sprinklere montate în interiorul tunelurilor rutiere. Pentru obținerea rezultatelor s-a recurs la realizarea unor încercări experimentale la scară redusă în incinta laboratorului de foc al Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Construcții, Urbanism și Dezvoltare Teritorială Durabilă.

Deoarece intensitatea unui incendiu este caracterizată în faza inițială prin rata de căldură degajată s-a recurs la studierea literaturii de specialitate pentru alegerea unor valori apropiate caracteristice acestui parametru. Rata de căldură degajată este influențată de mărimea obiectelor incendiate, precum și de rata de creștere a incendiului. Prin prezentul studiu s-a realizat simularea unui incendiu la un autovehicul cu dimensiuni reduse corespunzător studiilor experimentale existente.

Una din limitările importante ale studiului de față o prezintă lipsa datelor privind rata de căldură degajată, care în cazul vehiculelor este dificil de măsurat cu metodele și instrumentele existente. Cu toate acestea, diverși autori au prezentat rezultatele unor studii experimentale și probabilistice referitoare la rata de căldură degajată în urma incendiilor produse în cadrul tunelurilor rutiere.

Din analiza acestor studii și publicații disponibile rezultă următoarele valori caracteristice ratei de căldură degajate conform tabelului 8 [62]:

Table 8. Valori ale ratei de căldură degajată în tuneluri rutiere

Tipul autovehiculului	Valoarea maximă a ratei de căldură degajată (kW)
Autoturism	5-10
Microbuz	15
Autobuz	20
Camioane de transport marfă de până la 25 tone	30-50
Camioane grele de transport marfă între 25 – 50 tone	70-150
Cisterne de transport lichide combustibile	200-300

Dat fiind că în cuprinsul capitolului 4 s-a demonstrat faptul că timpul de activare al instalațiilor de stingere cu sprinklere este influențat de valoarea ratei de căldură degajată, în prezentul studiu s-a utilizat aceeași rată de căldură pentru toate încercările.

Un alt obiectiv al încercărilor experimentale constă în evaluarea impactului diferitelor lichide combustibile asupra timpului de activare. În același timp s-a evidențiat interacțiunea dintre sistemele de ventilare și evacuare gaze fierbinți și instalațiile de stingere cu sprinklere, precum și influența vitezei aerului introdus asupra parametrului studiat.

5.3 Alegerea ratei de căldură degajată

Deoarece rata de căldură degajată este un parametru important în calcularea timpului de răspuns al sprinklerelor este necesar ca la alegerea acestuia să se utilizeze rezultatele unor încercări experimentale ce oferă valori cât mai credibile.

Institutul Japonez de Cercetare în Construcții a realizat în anul 1980 o serie de 16 teste la scară naturală în interiorul unei galerii subterane de 700 m lungime și alte opt într-un tunel rutier cu o lungime de 3,3 km. Focarele de incendiu încercate au fost alcătuite din 12 tăvi cu lichide combustibile, șase autoturisme de mici dimensiuni și șase autobuze. În urma acestor teste au rezultat următoarele concluzii [63]:

- efectul de stratificare al fumului și gazelor fierbinți este influențat la o viteză longitudinală a aerului de 1 m/s, iar la 2 m/s acesta dispăre în totalitate;
- rata de căldură degajată pentru autovehiculele de mici dimensiune este cuprinsă între 1,33 și 8,5 MW;
- creșterea de temperatură în interiorul tunelului este înregistrată doar în apropierea focarului;
- sprinklerele montate nu au asigurat stingerea în totalitate a focarelor, însă a condus la diminuarea ratei de căldură degajată.

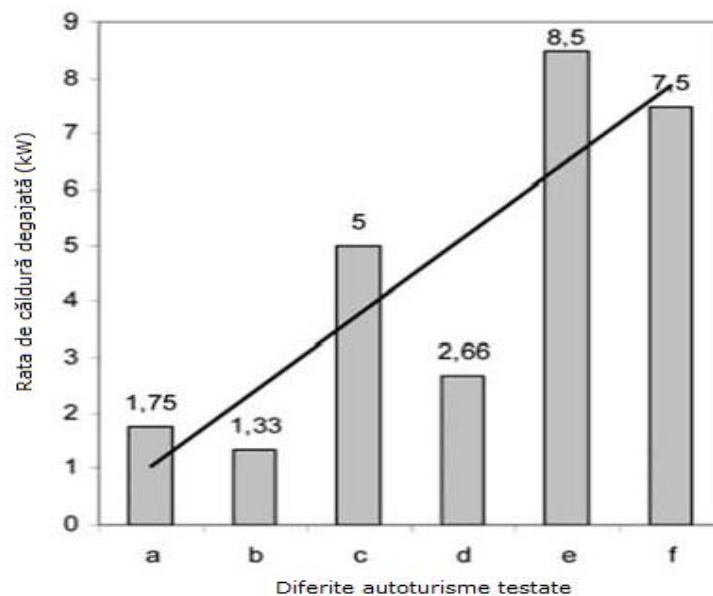


Figura 52. Valoarea medie a ratei de căldură degajată în urma încercărilor experiment

La alegerea ratei de căldură utilizate pe durata încercărilor experimentale s-a avut în vedere valoarea medie a testelor la scară naturală realizate de către cercetătorii japonezi. Astfel, potrivit graficului din figura 52, valoarea medie a ratei de căldură degajată pentru un autoturism de mici dimensiuni este de 5 MW.

Această valoare corespunde unui autoturism de tip Citroen Sedan 550 cc care are următoarele caracteristici [64]:

- masă totală: 1380 kg;
- timpul necesar aprinderii: 12,2 minute;
- sfârșitul perioadei de ardere: 59,7 minute;
- perioada de creștere până la atingerea valorii maxime a ratei de căldură degajată: 38,3 minute;
- energia totală eliberată: 6144 MJ;
- pierderea de masă totală: 192 kg.

5.4 Prezentarea echipamentelor utilizate

Macheta experimentală la scara 1/10 pentru reproducerea unui tunel cu dimensiunile de 70 x 6,4 x 5,6 m a fost realizată din plăci de gips carton de tip Promatect H 500 cu grosimea de 15 mm. Potrivit fișei tehnice aferente plăcilor din gips carton, acestea prezintă o densitate de 870 kg/m³, o căldură specifică de 1130 J/kgK și un coeficient de conductivitate termică de 0,175 W/mK [65].

Pe întreaga lungime de 7 m a machetei au fost îmbinate trei tronsoane realizate din 12 plăci de gips carton. Primele două tronsoane au avut lungimea de 2,5 m, iar ultimul de 2 m, fiind îmbinate cu un adeziv special rezistent la foc și prin capsare cu un dispozitiv cu aer comprimat. De asemenea, pe latura din partea stângă au fost montate două suprafețe vitrate rezistente la foc cu suprafața de 500 cm² și o grosime de 5 mm pentru vizualizarea focarului de incendiu și a sprinklerelor montate în partea superioară a modelului conform fotografiei din figura 53.



Figura 53. Fotografie din partea stângă a machetei experimentale

90 Determinarea timpului de activare al sprinklerelor în interiorul tunelurilor - 5

Pentru înregistrarea temperaturilor din interiorul machetei tunel s-au montat un număr de 12 termocupluri de tip K cu cap sferic din aliaj de crom-aluminiu și interval de măsurare cuprins între 0-1200⁰ C.

O altă sursă alternativă în determinarea temperaturilor din interiorul tunelului o reprezintă camera cu termoviziune FLIR seria T420 cu un interval de măsurare de -20⁰ - 650⁰ C. Această cameră a fost montată la una din intrările în tunel pentru înregistrarea temperaturilor generate în zona focarului de incendiu. Deși este adesea folosită în intervențiile echipelor specializate ale pompierilor, această cameră prezintă opțiuni de extindere a procesului de măsurare până la temperaturi de 1200⁰ C.

Determinarea vitezei aerului introdus longitudinal în machetă s-a realizat cu ajutorul a două anemometre portabile. Primul anemometru folosit este de tipul RS 327-0640 cu un interval de măsurare cuprins între 0,2 - 20 m/s, iar cele de-al doilea este de tipul AF 210 cu un interval de măsurare cuprins între 0,1 - 10 m/s. Ambele instrumente funcționează la temperaturi cuprinse între -20⁰ - 80⁰ C cu o precizie de ±2 % în funcție de temperatura mediului ambiant. Ambele instrumente sunt prezentate în figura 54.



Figura 54. Anemometru AF210 în partea stângă și RS 327 în dreapta

Pentru măsurarea pierderii de masă specifice materialului incendiat s-a utilizat o balanță electronică de tip Kern 150K2D cu un interval de măsurare cuprins între 0 - 60 kg și o precizie de 0,2 %, reprezentată în figura 55. Avantajul utilizării acestui instrument îl reprezintă afișajul electronic ce poate fi amplasat separat de platforma de măsurare astfel încât să nu fie deteriorat de temperaturile ridicate generate în timpul procesului de ardere. Pentru protejarea cablului de legătură dintre afișajul electronic și platforma de măsurare s-a realizat o barieră termică din vată minerală de înaltă densitate.

5.4. – Prezentarea echipamentelor utilizate 91

Verificarea preciziei balanței electronice s-a executat înainte de începerea experimentului într-un laborator autorizat RENAR care a emis un certificat de verificare metrologică în acest sens.



Figura 55. Fotografie de prezentare a balanței electronice tip Kern

Înregistrarea datelor furnizate de către termocupurile montate în interiorul machetei s-a realizat cu ajutorul unei unități de stocare a datelor de tip VR-18 BRAINCHILD cu afișaj având rezoluția de 640 x 480 pixeli. Această unitate de stocare a datelor are o memorie de 16 MB, cu maximum 18 canale și o precizie de $\pm 0,5\%$, indiferent de tipul de termocuplu conectat, conform fotografiei din figura 56.

Centralizarea și prelucrarea datelor furnizate de către unitatea de stocare s-a realizat prin intermediul unui laptop tip DELL Inspiron 1000 amplasat în camera de control și supraveghere a laboratorului.



Figura 56. Unitate de stocare a datelor de tip VR-18 BrainChild

Adițional s-au mai folosit două camere video pentru înregistrarea experimentelor și un aparat foto de înaltă rezoluție.

Introducerea aerului în direcție longitudinală în interiorul machetei s-a obținut cu ajutorul unui ventilator de tubulatură de tip Blauberg Turbo 100 cu viteză variabilă. Acesta are o putere instalată de 145 W și un debit maxim de 2230 m³/h.

5.5 Descrierea experimentului

Principalul obiectiv al experimentului a constat în determinarea timpului de activare al instalațiilor de stingere de tip sprinkler montate în interiorul tunelurilor rutiere. Pentru aceasta s-a ales o cantitate de căldură de 5 MW corespunzătoare unui autoturism de mici dimensiuni de tip Citroen Sedan 550 cc, iar prin reducerea la scară conform metodei lui Froude a rezultat o rată de căldură degajată de 15 kW.

Spre deosebire de încercările experimentale din interiorul camerei standard ISO, în acest caz s-a folosit aceeași rată de căldură degajată, însă s-au utilizat lichide combustibile diferite. Focarele de incendiu au fost alcătuite din alcool etilic comercial, benzină și motorină amplasate în tăvi metalice special dimensionate în așa fel încât să rezulte o rată de căldură degajată de 15 kW. Pentru dimensionarea acestor tăvi au fost utilizate metode de calcul analitice disponibile în literatura de specialitate.

Cele 12 termocupluri necesare măsurării temperaturilor din interiorul tunelului au fost montate pe direcție verticală în axul focarului de incendiu, precum și în direcție orizontală în planul superior al machetei conform schiței din figura 57.

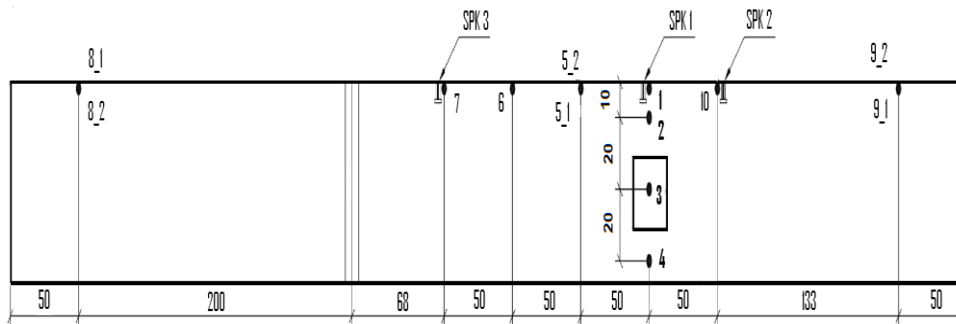


Figura 57. Modul de amplasare a termocuplurilor în interiorul machetei tunel

De asemenea, s-au montat trei capete sprinkler prin lipire cu adeziv rezistent la foc tip K94 în plafonul machetei. Primul sprinkler a fost lipit deasupra focarului de incendiu, iar cel de-al doilea la 50 mm către direcția din partea dreaptă a acestuia. Cel de-al treilea sprinkler s-a montat la o distanță orizontală de 150 mm în partea stângă colinear cu celelalte două capete sprinkler. Timpul de activare al sprinklerelor s-a determinat prin utilizarea unui cronometru electronic la sesizarea vizuală sau auditivă a spargerii bulbului de sticlă. Totodată, datorită stratului de fum degajat în timpul incendiului s-a folosit un sistem cu contragreutate legat printr-un fir metalic de bulbul de sticlă care în momentul declanșării să elibereze greutatea de la partea inferioară a machetei în vederea determinării parametrului studiat.

Dimensionarea tăvilor pentru focarele de incendiu are la bază modelele matematice propuse de către Babrauskas [66], după cum urmează:

$$\dot{Q} = m'' \cdot A \cdot \chi \cdot \Delta H_C \quad (5.1)$$

unde \dot{m} este pierderea de masă (kg/s), A este aria focarului de incendiu (m^2), χ reprezintă eficiența procesului de combustie, ΔH_c este puterea calorică totală (kJ/kg).

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' (1 - e^{-k\beta D}) \quad (5.2)$$

unde \dot{m}_{∞} pierderea de masă asimptotică (kg/m^2s), k este coeficientul de absorbție al flăcărilor, β reprezintă factorul de corecție, iar D este diametrul focarului (m).

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5.3)$$

Valorile necesare calculării ratei de căldură degajată pentru fiecare combustibil sunt prezentate în tabelul 9.

Tabel 9. Parametri de calcul pentru lichidele combustibile utilizate

Materialul combustibil	Densitatea (kg/m^3)	\dot{m}_{∞}'' (kg/m^2s)	ΔH_c (MJ/kg)	$k\beta$ (m^{-1})
Alcool etilic	794	0,015	26,8	100
Benzină	740	0,048	44,7	3,6
Motorină	740	0,055	43,7	2,1

Datorită condițiilor de lucru s-a decis ca măsurarea ratei de căldură degajată degajată să analizeze premergător fiecărui experiment prin amplasarea tăvilor metalice deasupra balanței electronice și măsurarea pierderii de masă, iar valorile medii și cele instantanee calculate sunt prezentate în figura 58 [67].

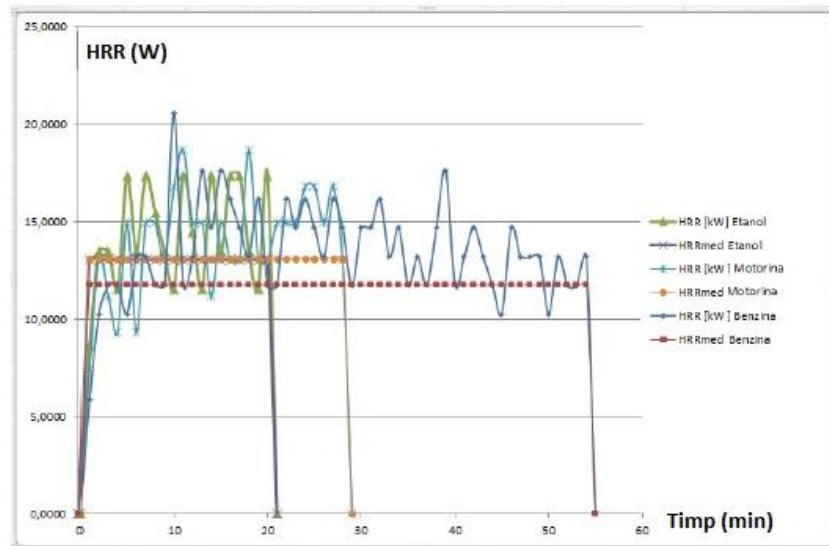


Figura 58. Valorile ratei de căldură degajată calculată cu pierderea de masă

Potrivit valorilor calculate din figura 58, au fost dimensionate tăvile dreptunghiulare pentru fiecare lichid combustibil din alcătuirea focarelor de incendiu, testate pe timpul experimentului, conform tabelului 10.

Tabel 10. Dimensiunile tăvilor și cantitățile de lichide utilizate

Material combustibil	Dimensiunile tăvilor			Cantitate combustibil utilizat (l)
	Lungime (m)	Lățime (m)	Înălțime (m)	
Alcool etilic	37	10	10	0,9
Motorină	25	10	10	1,5
Benzină	17	10	10	1,3

Focarele de incendiu corespunzător valorilor calculate prin metoda reversibilă au fost amplasate la o distanță de 4,55 m față de intrarea din stânga machetei tunel prezentată în figura 6.

Întregul experiment s-a desfășurat pe durata a trei zile și a constat în efectuarea a nouă teste prin arderea combustibililor în condiții de ventilare normală, precum și cu ventilare forțată cu viteze ale aerului de 3 m/s, respectiv 6 m/s.

5.6 Rezultate și discuții

5.6.1 Rezultatele încercărilor experimentale prin utilizarea alcoolului etilic

În cadrul primului test s-a folosit alcool etilic comercial cu o puritate de 99 % în cantitate de 900 ml într-o tavă dreptunghiulară cu lungimea de 37 cm, lățimea de 10 cm, respectiv înălțimea de 10 cm.

Temperaturile înregistrate în condiții de ventilare normală sunt prezentate în cadrul graficului din figura 59.

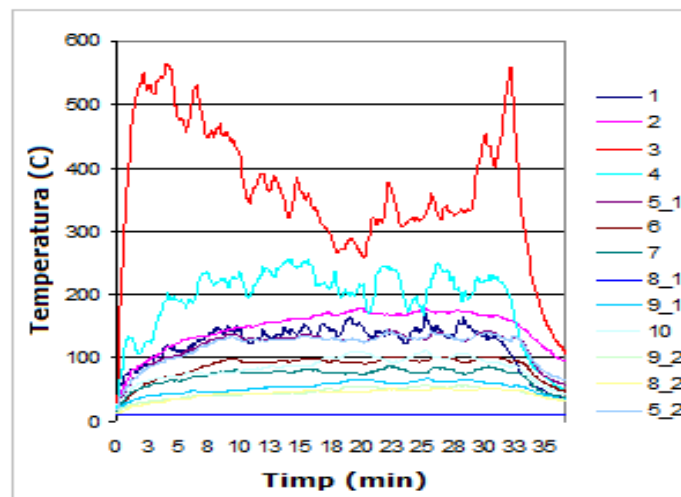


Figura 59. Temperaturile rezultate în urma arderii alcoolului etilic în condiții de ventilare normală

Temperaturile maxime înregistrate pe parcursul acestui test tind către 580⁰ C la termocuplul 3. Cu toate acestea, temperaturile ce influențează declanșarea sprinklerelor sunt cele de la nivelul superior al machetei. Analizând cu atenție graficul din figura 8 se pot evidenția temperaturi de 160⁰ C în apropierea primului sprinkler amplasat în vecinătatea focarului.

Pentru cel de-al doilea test au fost schimbate condițiile de ventilare prin folosirea ventilatorului axial cu două viteze. În acest sens a fost introdus forțat aer la o viteză de 3 m/s în axul central pe direcția longitudinală a tunelului.

Temperaturile înregistrate în condiții de ventilare forțată sunt prezentate în cadrul graficului din figura 60.

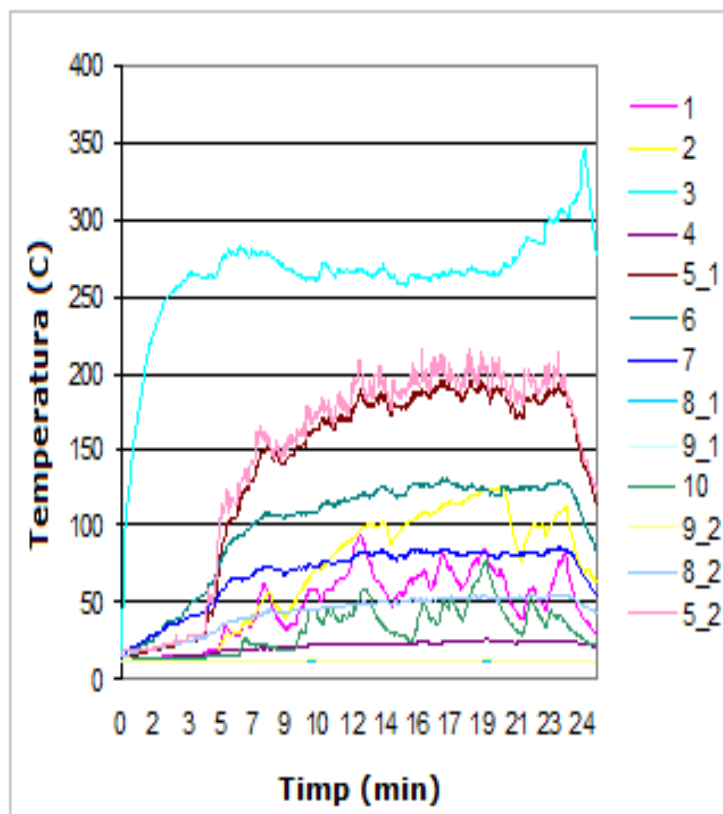


Figura 60. Temperaturile rezultate în urma arderii alcoolului etilic în condiții de ventilare forțată

Prin introducerea aerului în secțiunea transversală a machetei tunel se obține o scădere a temperaturilor atât în zona flăcărilor, dar și la partea superioară în zona sprinklerelor. Acest efect de răcire se datorează amestecului dintre compoziția flăcărilor și aerul exterior. Deși se obține o scădere evidentă a temperaturilor de la partea superioară de până la 90°C , aerul introdus intensifică procesul de ardere prin accelerarea reacțiilor chimice specifice combustiei și prin creșterea procentului de pierdere de masă. Comparativ cu arderea în condiții normale rezultă o scădere totală a timpului de ardere cu aproximativ 12 minute, ceea ce reprezintă o scădere cu un procent de 12 % la introducerea aerului în tunel.

La apropierea arderii totale a lichidului sunt înregistrate valori maxime ale temperaturilor în interiorul flăcărilor. Acest lucru se datorează faptului că tăvile sunt realizate din materiale metalice de culoare închisă, iar către finalul arderii acestea contribuie la intensificarea transferului termic prin radiație datorită factorului de emisivitate ridicat.

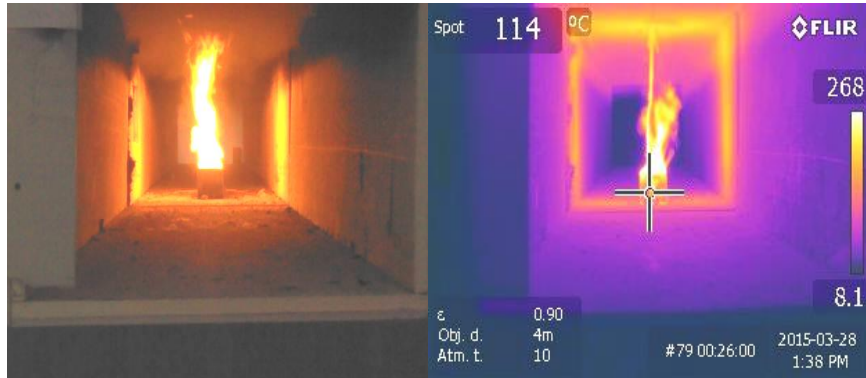


Figura 61. Fotografie pe parcursul arderii alcoolului etilic cu aparat foto în stânga și cameră cu termoviziune în dreapta

După cum se poate observa din figura 61, alcoolul etilic este un lichid care prin ardere nu formează un strat de fum la partea superioară a machetei. Acest fenomen se explică printr-un procent ridicat al procesului de combustie ce conduce la formarea unor cantități reduse de reziduuri și efluenți pe durata procesului de ardere.

5.6.2 Rezultatele încercărilor experimentale prin utilizarea motorinei

Pentru evitarea producerii anumitor erori, motorinele incendiate în cadrul experimentelor au fost procurate din același eșantion de la stații publice de distribuție a carburanților.

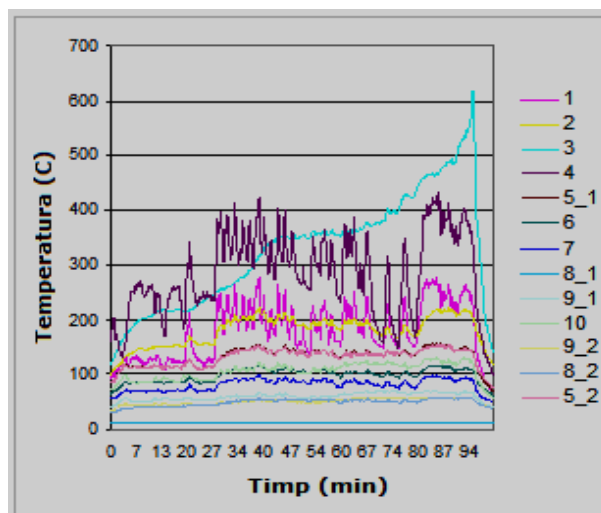


Figura 62. Temperaturile rezultate în urma arderii motorinei în condiții de ventilare normală

Acestea au fost introduse în cantitate de 1,5 litri în tăvi dreptunghiulare cu lungimea de 25 cm, lățimea de 10 cm, respectiv înălțimea de 10 cm. La testul numărul trei arderea s-a desfășurat în condiții de ventilare normală cu o temperatură atmosferică de 6^o C.

Temperaturile înregistrate în condiții de ventilare normală la arderea motorinei sunt prezentate în cadrul graficului din figura 62. Rezultatele arată că motorina produce temperaturi aproximativ egale în interiorul flăcărilor unde au fost înregistrate valori cu puțin peste 600^o C. O diferență importantă de temperaturi este evidențiată în zona superioară a tunelului în care temperaturile ajung la 280^o C, cu 42 % mai mari decât cele generate la arderea alcoolului etilic. Deși tavile au fost dimensionate pentru a degaja cantități de căldură egale, în cazul motorinei se formează un strat gros de fum la partea superioară a compartimentului de incendiu datorită arderii incomplete. Acest strat de fum ce conține particule de diferite dimensiuni contribuie la intensificarea transferului termic prin radiație către focar și, implicit, la creșterea temperaturilor degajate în timpul arderii motorinei. Se poate observa același efect ca și în cazul alcoolului etilic, care spre finelul procesului de ardere prezintă un maxim al temperaturilor, generate de efectul termic al materialului din alcătuirea tăvilor.

În cel de-al patrulea test se repetă cantitățile de motorină utilizată, precum și dimensiunile tăvii, cu excepția vitezei aerului din interiorul tunelului. Folosind același ventilator axial s-a introdus aer forțat la o viteză de 3 m/s.

Temperaturile înregistrate în condiții de ventilare forțată sunt prezentate în cadrul graficului din figura 63.

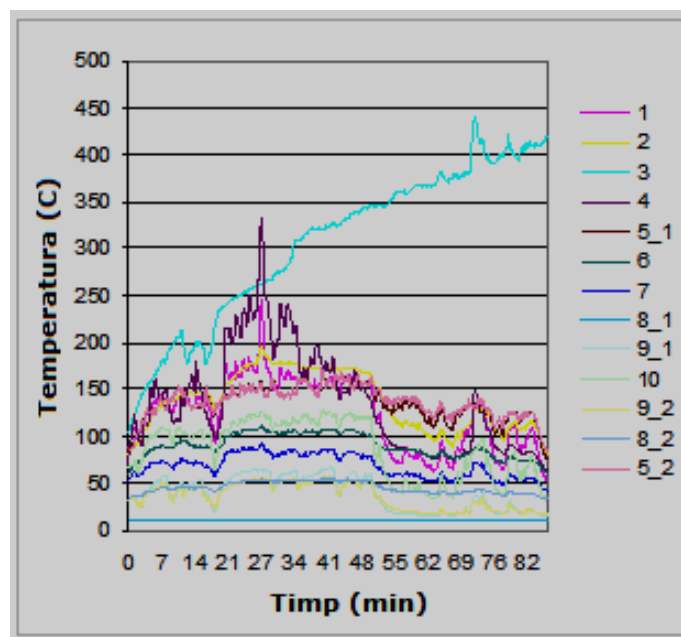


Figura 63. Temperaturile rezultate în urma arderii motorinei în condiții de ventilare forțată

Efectul de răcire al aerului introdus produce o scădere a temperaturilor stratului superior de fum până la aproximativ 200^o C, cu 80^o mai puțin decât în cazul utilizării condițiilor de ventilare normală. Cu toate acestea produsele de ardere

rezultate la incendierea motorinei generează temperaturi ridicate la partea superioară a compartimentului, comparativ cu alcoolul etilic.

5.6.3 Rezultatele încercărilor experimentale prin utilizarea benzinei

În mod similar motorinei, benzina a fost achiziționată din același lot livrat în cadrul stațiilor de distribuție carburanți. Arderea benzinelor s-a realizat în tăvi dreptunghiulare cu lungimea de 17 cm, lățimea de 10 cm, respectiv înălțimea de 10 cm. Temperaturile înregistrate în condiții de ventilare normală la testarea benzinei sunt prezentate în cadrul graficului din figura 64.

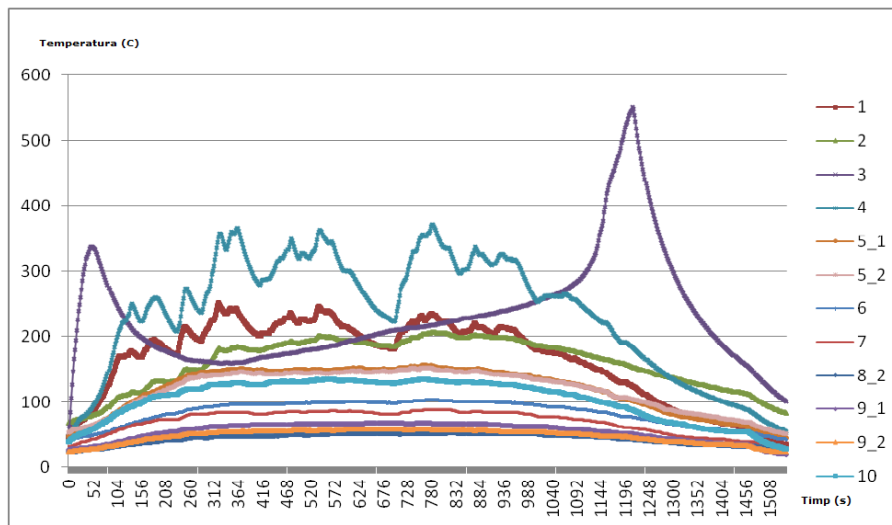


Figura 64. Temperaturile rezultate în urma arderii benzinei în condiții de ventilare normală

Având caracteristici similare motorinei, benzina a dezvoltat temperaturi maxime de aproximativ 550°C în interiorul flăcărilor și 260°C la partea superioară a tunelului. Diferența dintre cele două lichide este făcută de parafinele conținute de motorină care în timpul procesului de ardere degajă compuși și reziduuri de mari dimensiuni ce contribuie la intensificarea pierderii de masă.

Temperaturile din regiunea superioară înregistrate de termocuplurile 6,7 și 10 montate în apropierea sprinklerului 2 și 3 prezintă valori relativ egale ce variază între 70°C și 100°C în funcție de condițiile de ventilare existente.

La introducerea ventilatorului în interiorul tunelului și crearea curenților de aer se obține o răcire evidentă a zonei din imediata apropiere a focarului, însă temperaturile de la partea superioară a machetei sunt reduse cu până la 20°C . Flăcările sunt direcționate în sensul de mișcare a aerului introdus ceea ce poate conduce la propagarea unui eventual incendiu către materialele combustibile aflate în apropierea focarului.

În cazul celui de-al șaselea test au fost păstrate condiții identice cu testul numărul cinci, diferența fiind făcută de condițiile de ventilare. Prin schimbarea vitezei ventilatorului s-a obținut o valoare de 3 m/s pentru aerul introdus în direcție longitudinală în interiorul tunelului.

Temperaturile înregistrate în condiții de ventilare forțată la testarea benzinei sunt prezentate în cadrul graficului din figura 65.

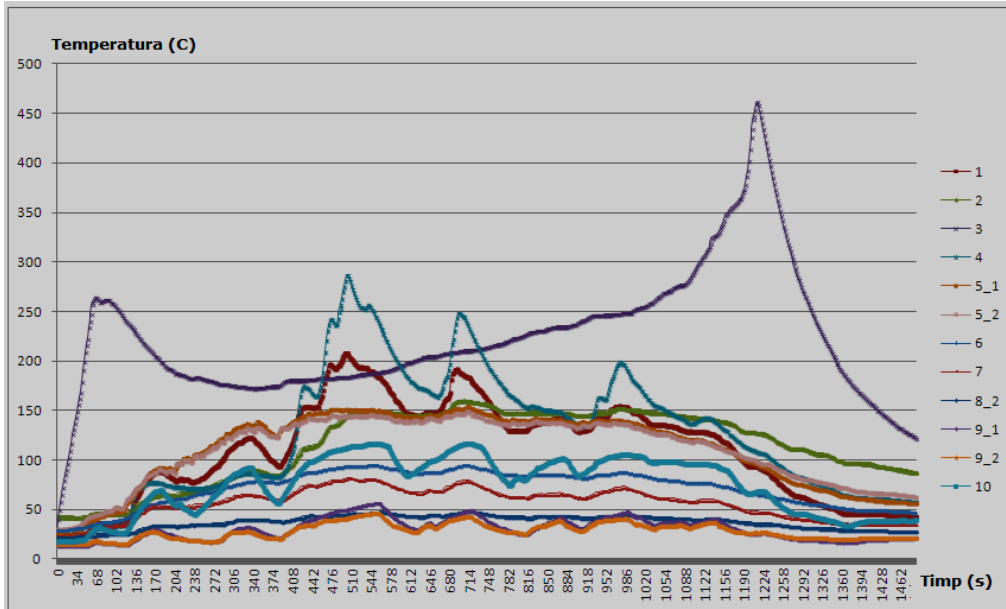


Figura 65. Temperaturile rezultate în urma arderii benzinei în condiții de ventilare forțată

Atât în cazul benzinei, dar mai ales a alcoolului etilic se pot observa creșteri bruște ale temperaturilor în perioada incipientă a incendiului, dar și în faza de regresie a acestuia datorate efectelor radiației care în cazul motorinei nu este atât de pregnantă prin faptul că particulele emise în urma combustiei blochează transferul căldurii prin radiație către termocupluri.

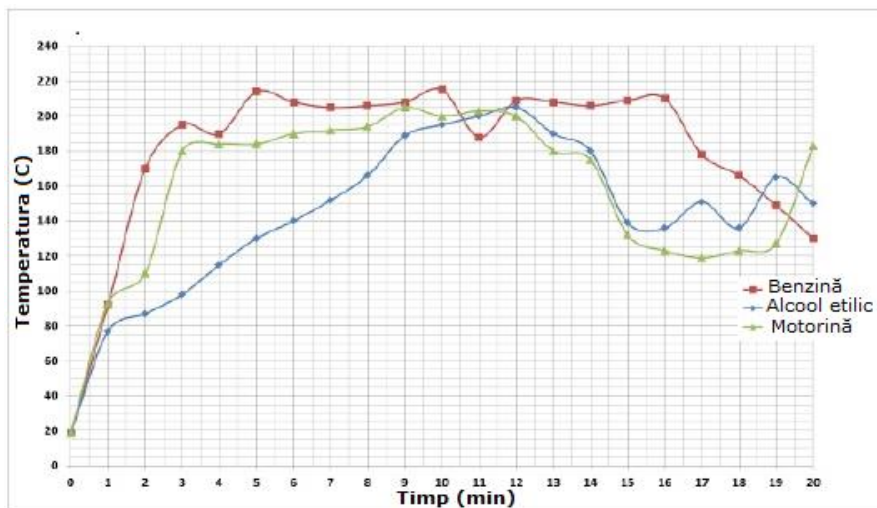


Figura 66. Temperaturile înregistrate în partea superioară a machetei de termocuplul 1

Temperaturile cele mai ridicate înregistrate la partea superioară a plafonului machetei sunt înregistrate în cazul benzinei care are o putere calorică net superioară celorlalte două lichide încercate.

Este de evidențiat faptul că temperaturile înregistrate în imediate apropiere a focarului din stratul superior tind către valori aproximativ egale cu cele ale încercărilor la scară naturală. Maximul înregistrat se apropie de 210⁰ C conform graficului din figura 66, valoare apropiată celor măsurate pe parcursul testelor realizate sub denumirea de Second Benelux [68].

5.6.4 Evaluarea timpului de răspuns al sprinklerelor

Sprinklerile montate în tunel sunt de tipul Viking MX3 din alamă cromată cu răspuns rapid și temperatură de declanșare de 68⁰ C. Acestea au un dispozitiv de declanșare cu bulb de sticlă cu un diametru de 3 mm și un indice al timpului de răspuns RTI de 34 m^{1/2}s^{1/2}.

Potrivit criteriilor de reducere la scară un sprinkler cu RTI de 34 m^{1/2}s^{1/2} la scara 1/10 corespunde unuia cu răspuns standard cu RTI de 191 m^{1/2}s^{1/2} la scară reală.

Rezultatele obținute în urma tuturor testelor sunt prezentate în tabelul 11, prezentat mai jos:

Tabel 11. Valorile timpului de activare al sprinklerelor

Timp de activare (s)	Viteza aerului (m/s)					
	1,2			3		
	Materialul combustibil încercat					
	Alcool etilic	Benzină	Motorină	Alcool etilic	Benzină	Motorină
Sprinkler 1	43	37	39	116	102	105
Sprinkler 2	102	89	93	270	236	242
Sprinkler 3	156	134	141	263	241	314

Primul sprinkler activat a fost în toate cazurile cel montat în apropierea focarului cu valori cuprinse între 37 și 43 de secunde în condiții de ventilare normală. Benzina este lichidul combustibil în urma căruia s-a înregistrat răspunsul cel mai rapid al sprinklerelor atât în condiții de ventilare naturală, cât și de ventilare forțată. Acest lucru este explicat prin faptul că benzina are o putere calorică superioară celorlalte două lichide, dar și prin faptul că prin formarea stratului de fum la partea superioară a machetei s-a intensificat procesul de ardere prin transferul căldurii în urma radiației. Diferențele în activarea primului sprinkler în condiții normale sunt de 5 % față de motorină și 14 % față de alcoolul etilic.

Declanșarea celui de-al doilea cap sprinkler s-a realizat într-un interval de timp aproape dublu față de primul sprinkler pentru toate cele trei lichide combustibile. Timpul de activare pentru cel de-al treilea sprinkler tinde către valori proporționale cu precedentul. De aici se desprinde concluzia că valoarea timpului de activare crește proporțional cu distanța orizontală măsurată de la centrul focarului până la locul de amplasare al sprinklerelor.

La introducerea ventilației forțate în interiorul tunelului se produce o scădere bruscă a temperaturilor în zona focarului de ardere, dar și partea superioară a machetei ceea ce conduce la creșterea timpului de răspuns al sprinklerelor. Primul sprinkler activat aflat în apropierea focarului are timpi de răspuns ce variază între 102 și 116 secunde. Deși răcirea temperaturilor stratului superior de către aerul introdus prezintă o scădere de doar 20⁰ C, timpul de activare ridicat de poate

explica și prin prisma faptului că transferul căldurii către lichidul din interiorul bulbului de sticlă este cu mult întârziat.

La viteze ale aerului de 6 m/s în interiorul tunelului elementele de declanșare ale sprinklerelor nu acționează în cazul producerii unui incendiu. În această situație niciunul din capetele sprinkler montate în machetă nu a acționat.

Deși este folosită aceeași valoare a ratei de căldură degajată în toate încercările experimentale se constată timpi de activare diferiți în funcție de natura materialului din alcătuirea focarului de incendiu. Energia eliberată în timpul unui incendiu depinde de puterea calorifică specifică elementului combustibil, precum și de procesele de transfer termic din interiorul compartimentului de incendiu. De aceea se constată timpi de activare scăzuți în cazul benzinei și a motorinei, dat fiind că acestea au puteri calorifice ridicate, iar în timpul arderii produc fum și gaze fierbinți ce conțin particule de mari dimensiuni care conduc la intensificarea incendiului.

5.7 Concluzii

Primul sprinkler activat pe durata tuturor încercărilor experimentale a fost cel amplasat în vecinătatea sursei de ardere, indiferent de natura materialelor utilizate. Se constată diferențe ale timpilor de activare în funcție de caracteristicile materialului combustibil. La valori egale ale ratei de căldură degajată diferențele sunt generate de puterea calorifică specifică materialului, precum și de eficiența procesului de combustie.

De asemenea, se constată o creștere proporțională a timpului de activare al sprinklerelor cu mărirea distanței orizontale dintre focarul de incendiu și locul de amplasare al elementului termosensibil.

La depășirea vitezei de 6 m/s a aerului introdus de către ventilator, temperaturile la partea superioară a machetei sunt răcite suficient încât să împiedice activarea sistemelor de stingere cu sprinklere. Dacă vitezele aerului nu depășesc 3 m/s timpul de activare este întârziat datorită efectului de răcire al stratului superior și al încetării transferului termic către elementul de declanșare al sprinklerului. Dacă prin strategia de proiectare se stabilește pornirea ventilatoarelor de evacuare a fumului și gazelor fierbinți după activarea primului cap sprinkler, este necesar ca la stabilirea vitezei de introducere a aerului să nu fie afectată activarea celorlalte sprinklere.

Aportul de oxigen generat odată cu introducerea aerului produce încensificarea procesului de ardere prin accelerarea procentului de pierdere de masă. Flăcările sunt înclinate în direcția de mișcare a aerului mărind astfel probabilitatea de propagare a incendiului către materialele combustibile învecinate. La incendierea mai multor autoturisme aflate în interiorul unui tunel este foarte dificil să se execute operațiunile de salvare și stingere de către echipajele specializate ale pompierilor. În cazul unui astfel de scenariu sunt eliberate cantități însemnate de fum, iar temperaturile pot ajunge la valori cu mult peste 1000⁰ C, condiții ce pot pune în pericol viața utilizatorilor și a pompierilor deopotrivă.

Prin urmare, la proiectarea instalațiilor de stingere cu sprinklere este necesar a se alege cu atenție temperatura de activare a sprinklerului în funcție de mediul în care este montat, dar și indicele timpului de activare RTI specific elementului termosensibil. De asemenea, se impune o analiză riguroasă a tuturor scenariilor și a eventualelor materiale combustibile ce pot fi implicate într-un incendiu.

102 Determinarea timpului de activare al sprinklerelor în interiorul tunelurilor - 5

Rezultatele experimentale la scară redusă oferă informații similare încercărilor la scară reală în ceea ce privește temperaturile eliberate și timpul de activare al sprinklerelor.

Dat fiind faptul că pe timpul incendiilor produse în interiorul tunelurilor sunt implicate diverse materiale combustibile aflate în configurații diferite, este greu de anticipat timpul de activare al sprinklerelor. Cu toate acestea, încercările la scară redusă oferă date importante cu privire la principalele elemente ce influențează acest parametru și contribuie activ la îmbunătățirea procesului de proiectare și al activităților de cercetare din domeniu.

6 Concluzii și contribuții personale

6.1 Concluzii generale

Atât la nivelul României, cât și în celelalte țări membre ale Uniunii Europene se cunoaște o dezvoltare economică ce impulsionează piața construcțiilor, rezultând în clădiri cu forme și dimensiuni atipice la a căror proiectare în domeniul securității la incendiu apar o serie de provocări. În cele mai multe cazuri, normativele prescriptive nu pot fi aplicate deoarece impun anumite limitări în ceea ce privește arii construite, înălțimi maxime sau lungimi ale căilor de evacuare. De aceea, majoritatea țărilor dezvoltate au adoptat o nouă metodă de proiectare privind securitatea la incendiu care se bazează pe calcule și metode analitice privind dezvoltarea și propagarea incendiilor în interiorul sau exteriorul clădirilor.

Această metodă de proiectare, intitulată ingineria securității la incendiu, permite introducerea pe piața construcțiilor a unor noi metode de proiectare și realizare a construcțiilor, ajutând la simplificarea procesului anevoios de avizare. Totodată, prin ingineria securității la incendiu sunt eliminate barierele impuse de normativele prescriptive ale căror prevederi sunt diferite de la un stat membru la altul datorită specificului național reminiscent de-a lungul timpului.

Deși armonizarea legislației naționale cu reglementările comunitare a reprezentat un obiectiv major încă de la aderarea țării noastre la structurile Uniunii Europene, normativele în domeniul securității la incendiu își regăsesc bazele în trecutul post decembrist. Vechimea acestor acte normative conduce la blocaje majore în piața europeană a construcțiilor și la reducerea nivelului de securitate al noilor investiții bazate pe tehnologii inovative de construcție și pe utilizarea unor materiale ce adesea se regăsesc în afara prevederilor legislative.

Normativele prescriptive, precum și metodele ingineriei securității la incendiu impun folosirea instalațiilor de stingere cu sprinklere pentru reducerea nivelului de risc estimat în cazul construcțiilor. Aceste instalații contribuie în mod activ la limitarea sau chiar stingerea unui incendiu izbucnit în interiorul clădirilor protejate. Funcționarea eficientă a sprinklerelor ce echipează diferitele construcții depinde de îndeplinirea tuturor parametrilor de proiectare și funcționare caracteristici. Dacă la stadiul de proiectare este important a se identifica nivelurile minime de performanță necesare instalației, la stadiul de funcționare este necesară îndeplinirea parametrilor proiectați. Așadar, timpul de răspuns al instalațiilor de stingere cu sprinklere reprezintă parametrul principal în declanșarea și funcționarea instalațiilor de stingere cu sprinklere.

Prezentul studiu de cercetare urmărește realizarea unor încercări experimentale pentru determinarea timpului de activare al instalațiilor de stingere cu sprinklere și a parametrilor specifici necesari pentru calcularea acestuia.

În România există normative prescriptive care oferă recomandări cu privire la sensibilitatea elementelor de declanșare aferente capetelor sprinkler, însă fără a trasa linii clare în alegerea și folosirea acestora. Studiul de față propune recomandarea și implementarea unor metode de calcul analitice și modele de simulare pentru estimarea timpului de răspuns.

Rezultatele modelelor de calcul și ale programelor de simulare au fost comparate cu valori determinate în urma unor încercări experimentale standardizate. Pentru primul set de încercări s-a utilizat camera standard ISO 9705

redușă la scara 1/3 conform regulilor lui Froude. S-a demonstrat că ecuațiile matematice și programele de simulare oferă valori similare celor standardizate. Există și excepții în cazul metodelor analitice, când datorită limitărilor acestora, la poziționarea focarelor de incendiu în colțul, respectiv lângă peretele compartimentului de incendiu se obțin valori ridicate comparativ cu cele experimentale.

Poziția de amplasare a focarului determină o creștere substanțială a ratei de căldură degajată, care la rândul său contribuie la scăderea timpului de activare caracteristic sprinklerelor. Acest fenomen este observat numai în condițiile în care focarul este amplasat lângă peretele sau pereții camerei standard ISO, iar flăcările sunt în contact direct cu suprafața acestora.

Din graficele temperaturilor rezultate în urma proceselor de simulare cu ajutorul programului Fire Dynamics Simulator se observă diferențe în cazul termocupurilor amplasate la mijlocul suportului pentru situația focarului din centrul compartimentului de incendiu. Efectul observat se datorează radiației flăcărilor, care transportă căldura în mod direct către dispozitivele de înregistrare a termocupurilor. De aceea, este important ca la implementarea modelelor în cadrul programelor computerizate de simulare să se țină cont de toate scenariile posibile în cazul unui incendiu, precum și de dinamica proceselor de transfer termic din timpul acestuia.

Cel de-al doilea set de încercări experimentale vizează estimarea timpului de răspuns în cadrul tunelurilor rutiere. Este bine cunoscut faptul că diversele incidente rutiere pot provoca incendii devastatoare în interiorul tunelurilor. În urma unor studii de cercetare s-a arătat că sprinklerelor contribuie la îmbunătățirea condițiilor din timpul unui incendiu și la înlesnirea procesului de evacuare a utilizatorilor.

Materialele combustibile implicate în incendiile petrecute de-a lungul timpului demonstrează că proiectarea unei astfel de infrastructuri prezintă un grad ridicat de dificultate. Programul experimental a presupus testarea unor capete sprinkler amplasate în interiorul unui tunel la scara 1/10 în condiții de ventilație naturală și forțată. De asemenea, s-au folosit lichide combustibile diferite în alcătuirea focarelor de incendiu pentru evaluarea influenței acestui parametru în determinarea timpului de răspuns.

Rezultatele obținute au scos în evidență o corelare bună între temperaturile existente la nivelul plafonului machetei experimentale cu cele obținute în urma încercărilor la scară naturală executate în tuneluri rutiere existente. Este evidențiat faptul că prin dimensionarea focarului la aceeași valoare a ratei de căldură degajată, timpul de răspuns al capetelor sprinkler diferă în funcție de natura materialului combustibil incendiat. De aici și concluzia că nu numai rata de căldură degajată poate influența acest parametru, ci și puterea calorică specifică materialului din alcătuirea focarului.

Primul sprinkler activat în toate situațiile a fost cel amplasat în apropierea focarului de incendiu, urmat de celelalte două sprinklere la un interval de timp proporțional cu distanța de amplasare a acestora. Distanța de amplasare a sprinklerelor s-a dovedit a fi un parametru important nu numai în cazul acestui set de încercări, ci și în cazul camerei standard ISO, unde timpul de răspuns cel mai scăzut s-a înregistrat la amplasarea focarului lângă peretele încăperii. Efectul maxim este obținut prin creșterea ratei de căldură degajată și determinarea unui optim al distanței orizontale de amplasare a sprinklerului față de focar.

Rezultatele experimentale obținute conduc către obținerea unor soluții tehnice cu caracter unicat pentru îndeplinirea cerinței esențiale securitate la incendiu. Deoarece îndeplinirea acestei cerințe presupune realizarea unor măsuri specifice subsecvente domeniului general al construcțiilor, tema de cercetare

propusă contribuie la armonizarea și eficientizarea acestui domeniu atât datorită elementului de noutate propus, cât și prin sporirea gradului de securitate existent.

6.2 Contribuții personale

Pe tot parcursul elaborării acestui studiu de cercetare s-a depus un efort intens în formularea și dezvoltarea unor contribuții personale cu caracter original pe linie teoretică, experimentală și de modelare ce au ca scop îmbunătățirea domeniului prevenirii și stingerii incendiilor. Contribuțiile personale au fost axate pe determinarea timpului de răspuns și evidențierea acestui parametru atât de important în declanșarea, funcționarea și stingerea unui incendiu cu ajutorul instalațiilor de tip sprinkler. Principalele aspecte cu caracter original propuse prin intermediul acestui program de cercetare sunt următoarele:

- identificarea timpului de răspuns ca parametru important în domeniul securității la incendiu și contribuția acestuia în eficiența de stingere a instalațiilor cu sprinklere;
- prezentarea principiilor de bază specifice ingineriei securității la incendiu ca parte a procesului de proiectare a unei construcții;
- realizarea unei analize comparative între metodele ingineriei securității la incendiu și normativele prescriptive și identificarea barierelor generate pe piața construcțiilor;
- evidențierea lacunelor aferente legislației prescriptive prin exemplificarea prevederilor normative în vigoare și prezentarea unor incendii ce au contribuit la determinarea importanței timpului de răspuns;
- identificarea tuturor vulnerabilităților proceselor de proiectare aferente ingineriei securității la incendiu și propunerea unor soluții viabile în vederea implementării acestei metode pe teritoriul României;
- prezentarea instalațiilor de stingere cu sprinklere cu accent pe particularitățile elementelor termosensibile ce contribuie la declanșarea acestora;
- realizarea unei analize aprofundate a tuturor metodelor disponibile în determinarea timpului de răspuns caracteristic instalațiilor cu sprinklere;
- identificarea caracteristicilor și mărimilor termice specifice elementelor termosensibile de declanșare a sprinklerelor;
- identificarea și exemplificarea tuturor limitărilor incluse în modelele analitice de calcul a timpului de răspuns al sprinklerelor;
- prezentarea principiilor de funcționare a programelor de simulare privind dinamica fluidelor prin detalierea ecuațiilor ce stau la baza acestora;
- identificarea mecanismelor de modelare a proceselor de turbulență specifice incendiilor și exemplificarea modelelor matematice utilizate de către programele de simulare;
- evidențierea ecuațiilor matematice folosite la estimarea timpului de răspuns cu ajutorul programelor de simulare computerizate;
- propunerea și realizarea unor încercări experimentale standardizate cu ajutorul camerei standard ISO în vederea determinării timpului de răspuns al sprinklerelor;
- prezentarea și calcularea ratei de căldură degajată în timpul unui incendiu cu ajutorul a două metode experimentale diferite. Utilizarea metodei de determinare cu ajutorul concentrației de oxigen reprezintă un element unicat în ingineria securității la incendiu din România, cu atât mai mult cu

- cât cercetarea acestui parametru are loc doar în câteva locații la nivel mondial;
- prezentarea unui model teoretic, experimental și computerizat pentru determinarea timpului de răspuns al sprinklerelor;
 - identificarea tuturor limitărilor acestor modele de calcul, precum și determinarea parametrilor ce influențează declanșarea instalațiilor de sprinklere;
 - realizarea și implementarea unui model, similar celui experimental, prin utilizarea programului de simulare Fire Dynamics Simulator;
 - identificarea modelelor și parametrilor incluși în modele de simulare specifice programului Fire Dynamics Simulator;
 - evidențierea efectului poziției de amplasare a focarului asupra ratei de căldură degajată în timpul incendiului și modificarea timpului de răspuns odată cu creșterea ratei de căldură degajată;
 - identificarea influenței procesului de transfer termic prin radiație asupra temperaturilor din apropierea focarului și posibilele efecte ale acestui fenomen în estimarea timpului de răspuns;
 - propunerea și realizarea unui stand experimental ce reproduce elementele unui tunel rutier la scara 1/10 și reducerea la scară a tuturor parametrilor specifice incendiului potrivit metodei lui Froude;
 - dimensionarea corespunzătoare a focarelor de incendiu pentru obținerea unei rate de căldură degajată echivalentă cu 5 MW specifică valorilor obținute pe timpul experimentelor la scară naturală;
 - montarea în interiorul machetei tunel a tuturor echipamentelor de măsurare și înregistrare a temperaturilor unui incendiu;
 - evaluarea principalelor particularități în proiectarea tunelurilor rutiere folosind metodele ingineriei securității la incendiu;
 - determinarea timpilor de răspuns în interiorul unui tunel rutier și identificarea influențelor generate de schimbarea materialului combustibil din alcătuirea focarului;
 - evidențierea interdependențelor manifestate pe timpul unui incendiu dintre posibilitatea de declanșare a sprinklerelor și activarea instalațiilor de evacuare a fumului și gazelor fierbinți;
 - stabilirea pragului de 3 m/s pentru viteza necesară evacuării fumului și gazelor fierbinți astfel încât să se asigure funcționalitatea la parametri normali pentru instalațiile de stingere cu sprinklere;
 - identificarea efectului de răcire produs de către ventilatorul de evacuare a fumului și gazelor fierbinți, precum și posibilitatea de propagare a incendiului către vecinătăți;
 - oferirea unor recomandări pentru alegerea scenariilor de incendiu la proiectarea tunelurilor rutiere.

6.3 Direcții viitoare de cercetare

Montarea unor instalații de stingere cu sprinklere în interiorul clădirilor contribuie în cele mai multe cazuri la limitarea sau propagarea unui incendiu. Cu toate acestea sunt incendii petrecute în trecut care au demonstrat faptul că utilizarea acestor instalații nu este suficientă.

Acest lucru este datorat fie unei întrețineri defectuoase pe perioada de exploatare a acestor instalații, fie datorită unor erori de proiectare. Alegerea tipului de sprinkler se dovedește a fi un element extrem de important în asigurarea

declanșării, funcționării și stingerii unui incendiu. La momentul actual există elemente de cercetare pentru determinarea timpului de răspuns al sprinklerelor, însă rămân anumiți parametri importanți neexploatați. Viteza gazelor de ardere este un astfel de exemplu, pentru care este necesar a se determina un model matematic simplificat în cazul incendiilor ultra rapide.

De asemenea, se impune îmbunătățirea metodelor de calcul pentru timpul de răspuns la amplasarea focarelor de incendiu în vecinătatea pereților sau a colțului încăperilor având în vedere limitarea aportului de aer necesar arderii și efectul accentuat în creșterea ratei de căldură degajată.

ANEXE

Anexa nr. 1 Rezultatele timpului de activare al sprinklerelor amplasate în camera standard ISO prin utilizarea metodelor analitice

Timp	Q	Qconv	v	T_gaz	T_bulb	Delta_T
84	3.53	2.47	1.56	472.15	355.26	1.74
85	3.61	2.53	1.57	475.00	357.00	1.76
86	3.70	2.59	1.58	477.86	358.76	1.78
87	3.78	2.65	1.59	480.73	360.54	1.81
88	3.87	2.71	1.61	483.61	362.35	1.83
89	3.96	2.77	1.62	486.51	364.18	1.85
90	4.05	2.84	1.63	489.41	366.03	1.88
91	4.14	2.90	1.64	492.33	367.91	1.90
92	4.23	2.96	1.66	495.25	369.81	1.92
93	4.32	3.03	1.67	498.19	371.73	1.94
94	4.42	3.09	1.68	501.14	373.67	1.97
95	4.51	3.16	1.69	504.09	375.64	1.99

Figura 67. Focar amplasat în centrul încăperii

Timp	Q	Qconv	v	T_gaz	T_bulb	Delta_T
81	6.56	4.59	1.92	463.67	355.28	1.79
82	6.72	4.71	1.93	466.48	357.06	1.81
83	6.89	4.82	1.95	469.31	358.87	1.83
84	7.06	4.94	1.96	472.15	360.71	1.86
85	7.23	5.06	1.98	475.00	362.57	1.88
86	7.40	5.18	1.99	477.86	364.45	1.91
87	7.57	5.30	2.01	480.73	366.35	1.93
88	7.74	5.42	2.02	483.61	368.28	1.95
89	7.92	5.54	2.04	486.51	370.24	1.98
90	8.10	5.67	2.06	489.41	372.22	2.00
91	8.28	5.80	2.07	492.33	374.22	2.02
92	8.46	5.92	2.09	495.25	376.24	2.05

Figura 68. Focar amplasat lângă peretele încăperii

Timp	Q	Qconv	v	T_gaz	T_bulb	Delta_T
79	9.36	6.55	2.16	458.07	354.72	1.81
80	9.60	6.72	2.17	460.87	356.53	1.83
81	9.84	6.89	2.19	463.67	358.36	1.86
82	10.09	7.06	2.21	466.48	360.22	1.88
83	10.33	7.23	2.23	469.31	362.10	1.91
84	10.48	7.34	2.24	470.97	364.01	1.91
85	10.48	7.34	2.24	470.97	365.91	1.87
86	10.48	7.34	2.24	470.97	367.78	1.84
87	10.48	7.34	2.24	470.97	369.62	1.81
88	10.48	7.34	2.24	470.97	371.43	1.77

Figura 69. Focar amplasat lângă colțul încăperii

Anexa nr. 2 Implementarea modelului de simulare în programul Fire Dynamics Simulator

&HEAD CHID='ISO_ROOM', TITLE='CORNER'/

&MESH IJK=30,16,16, XB=0.0,1.5,0.0,0.8,0.0,0.8/

&TIME T_END=240.0/

&MISC TMPA=29.0/

&DUMP DT_DEVC=0.25/

&REAC FUEL = 'N-HEPTANE',
FYI = 'Heptane, C_7 H_16',
C = 7.0,
H = 16.0,
CO_YIELD = 0.008,
SOOT_YIELD = 0.015,
HEAT_OF_COMBUSTION = 44600.0,
IDEAL=.TRUE./

&MATL ID = 'HEPTANE LIQUID'
EMISSIVITY = 1.0
NU_SPEC = 0.97
SPEC_ID = 'N-HEPTANE'
HEAT_OF_REACTION = 316.6
BOILING_TEMPERATURE = 98.5
CONDUCTIVITY = 0.14
SPECIFIC_HEAT = 2.2464
DENSITY = 684.
ABSORPTION_COEFFICIENT = 187.5 /

&SURF ID = 'HEPTANE POOL'
MATL_ID = 'HEPTANE LIQUID'
COLOR = 'YELLOW'
SPEC_ID(1)='N-HEPTANE'
THICKNESS = 0.02 /

&MATL ID = 'STEEL'
EMISSIVITY = 1.0
DENSITY = 7850.
CONDUCTIVITY = 45.8
SPECIFIC_HEAT = 0.46 /

&SURF ID = 'STEEL SHEET'
COLOR = 'BLACK'
MATL_ID = 'STEEL'
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.003 /

```
&OBST XB= 0.016,0.122, 0.016,0.122, 0.001,0.019, SURF_IDS='HEPTANE
POOL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' /
&OBST XB= 0.016,0.122, 0.016,0.019, 0.001,0.019, SURF_ID='STEEL SHEET'
/FRONT
&OBST XB= 0.016,0.122, 0.119,0.122, 0.001,0.019, SURF_ID='STEEL SHEET'
/BACK
&OBST XB= 0.016,0.019, 0.016,0.122, 0.001,0.019, SURF_ID='STEEL SHEET'
/LEFT
&OBST XB= 0.119,0.122, 0.016,0.122, 0.001,0.019, SURF_ID='STEEL SHEET'
/RIGHT
&OBST XB= 0.016,0.122, 0.016,0.122, 0.001,0.004, SURF_ID='STEEL SHEET',
OVERLAY=.FALSE. /DOWN

&VENT XB=0.019,0.119, 0.019,0.119, 0.019,0.019, COLOR='RED',
SURF_ID='HEPTANE POOL' /

&MATL ID = 'PROMATECT',
CONDUCTIVITY =0.21,
SPECIFIC_HEAT =0.92,
DENSITY =870.0/

&SURF ID='WALLS',
MATL_ID='PROMATECT',
COLOR='INVISIBLE',
THICKNESS=0.015,
BACKING='EXPOSED',
EMISSIVITY=1.0/

&VENT XB=1.2,1.5,0.0,0.0,0.0,0.8,SURF_ID='OPEN'/Side
&VENT XB=1.2,1.5,0.8,0.8,0.0,0.8,SURF_ID='OPEN'/Side
&VENT XB=1.5,1.5,0.0,0.8,0.0,0.8,SURF_ID='OPEN'/Side
&VENT XB=1.2,1.5,0.0,0.8,0.8,0.8,SURF_ID='OPEN'/Ceiling

&OBST XB=0.0,0.0,0.0,0.8,0.0,0.8,SURF_ID='WALLS'/LEFT SIDE
&OBST XB=1.2,1.2,0.0,0.8,0.0,0.8,SURF_ID='WALLS'/RIGHT SIDE
&OBST XB=0.0,1.2,0.0,0.0,0.0,0.8,SURF_ID='WALLS'/FRONT SIDE
&OBST XB=0.0,1.2,0.8,0.8,0.0,0.8,SURF_ID='WALLS'/BACK SIDE
&OBST XB=0.0,1.2,0.0,0.8,0.0,0.0,SURF_ID='WALLS'/Floor
&OBST XB=0.0,1.2,0.0,0.8,0.8,0.8,SURF_ID='WALLS'/Ceiling

&HOLE XB=1.15,1.25,0.22,0.58,0.0,0.65, COLOR='BLUE'/DOOR

&DEVC ID='TcO_0',XYZ=0.875,0.425,0.075,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_1',XYZ=0.875,0.425,0.125,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_2',XYZ=0.875,0.425,0.175,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_3',XYZ=0.875,0.425,0.225,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_4',XYZ=0.875,0.425,0.275,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_5',XYZ=0.875,0.425,0.325,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_6',XYZ=0.875,0.425,0.375,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_7',XYZ=0.875,0.425,0.425,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
```

&DEVC ID='TcO_8',XYZ=0.875,0.425,0.475,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_9',XYZ=0.875,0.425,0.525,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_10',XYZ=0.875,0.425,0.575,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_11',XYZ=0.875,0.425,0.625,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_12',XYZ=0.875,0.425,0.675,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_13',XYZ=0.875,0.425,0.725,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='TcO_14',XYZ=0.875,0.425,0.775,QUANTITY='THERMOCOUPLE'/

&PROP ID='STANDARD SPRINKLER RESPONSE',
QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE',
ACTIVATION_TEMPERATURE=68.0,
RTI=84.0,
C_FACTOR=0.65,
OFFSET=0.2,
FLOW_RATE=57.0,
DROPLET_VELOCITY=7.47,
SPRAY_ANGLE=23.0,72.625/

&DEVC ID='SPRINKLER1', PROP_ID='STANDARD SPRINKLER RESPONSE',
XYZ=0.575,0.375,0.725/

&SLCF PBY=0.4,QUANTITY='TEMPERATURE'/

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='RADIOMETER'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&TAIL/

Bibliografie

1. <https://www.bca.gov.sg/PerformanceBased/others/ProfTeh.pdf>;
2. Hadjisophocleous, G., V., Benichou, N., Development of performance-based codes, performance criteria and fire safety engineering methods, International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, vol. 2, no. 4, 2000;
3. http://www.mdrap.ro/userfiles/reglementari/Domeniul_XXVIII/28_15_P118_2_2_013.pdf;
4. <http://www.source-fire.com/news/address-hotel-fire-sprinklers-ran-out-after-15-minutes/>;
5. ISO 23932: Fire Safety Engineering – General principles;
6. BFS 2002:19 Swedish Building Code – Performance-based design guidelines;
7. ISO/TR 13387-1:1999 Fire Safety engineering – Part 1: Application of fire performance concepts to design objectives;
8. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/441669/BR_PDF_AD_B2_2013.pdf;
9. International Building Code (IBC) - <https://www.iccsafe.org/codes-tech-support/codes/2018-i-codes/ibc/>;
10. ISO 834-11:2014 – Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 11: Specific requirements for assessment of fire protection to structural steel elements;
11. Lyzwa, J., Zehfuss, J., Thermal material properties of concrete in the cooling phase, ASFE Conference, 2017;
12. Weigard, J., Jiang, J., Performance-based design for structure in fire – modelling and validation project, NIST, 2013;
13. Anghel, I., Popa, C., Ingineria securității la incendiu, Subsistemul 6 – Procesul de evacuare: comportamentul, localizarea și starea fizică a utilizatorilor;
14. https://en.wikipedia.org/wiki/The_Station_nightclub_fire;
15. Frank, K., Spearpoint, M.J., Fleischmann, C.M., and Wade C.A. (2012) – Modelling the activation of multiple sprinklers with a risk-informed design tool. Hong Kong: 9th International Conference on Performance-based codes and fire safety design;
16. Ordin nr. 2463 din 08.08.2013 pentru aprobarea reglementării tehnice "Normativ privind securitatea la incendiu a construcțiilor, Partea a II-a – Instalații de stingere", indicative P 118/2-2013;
17. Enciclopedia tehnică de instalații. Manualul de instalații. Instalații sanitare, ediția a II-a, editura ARTECNO, 2010;
18. <http://www.aj-fireprotection.com/Fire-Sprinkler-Heads-Replacment-Parts.php>;
19. <http://varuse.com/blog/redesigning-your-restroom-how-you-could-pay-for-it/>;
20. SR EN 12259-1+A1:2004/A2:2004 Protecția împotriva incendiilor. Sisteme fixe de luptă împotriva incendiilor. Componentele sistemelor de tip sprinkler și cu apă pulverizată. Partea 1: Sprinklere;
21. Heskestad, G., Smith, H. F., Investigation of a new sprinkler sensitivity approval test: The Plunge Test, FMRC, No. 22485, Factory Mutual Research, 1976;
22. Heskestad, G., The sprinkler response time index (RTI), Technical Conference on Residential Sprinkler Systems, Factory Mutual Research, 1981;
23. http://www.archerenterprises.com.au/news/archer_dominates_global_product_accreditation_market/;
24. Hollman, J. P., Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1976;
25. Pepli, J. S., Design characteristics of quick response sprinklers, Grinnell Fire Protection Company, Rhode Island, 1986;
26. Heskestad, G., Bill, R. G., Conduction heat loss effects on thermal response of automatic sprinklers, Factory Mutual Research Corporation, 1987;

27. Yao, C., Development of large-drop sprinklers, FMRC Technical report no. 22476, Factory Mutual Research Corporation, 1976;
28. Alpert, R. L., Calculation of response time of ceiling mounted fire detectors, Fire Tech, 1972;
29. Brănișteanu, B., Șerban, D., M., Solomon, D., Analysis of predicted sprinkler activation time in automated car parkings, Proceedings of International Scientific Conference CIBv Brașov, 2014;
30. Evans, D., Stroup, D., Methods to calculate the response time of heat and smoke detectors installed below large unobstructed ceilings, NBSIR 85-3167, U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 1985;
31. Heskestad, G., Delichatsios, M. A., Environments of fire detectors – Phase I: Effect of fire size, ceiling height and material, National Technical Information Service, 1977;
32. NFPA 72:2016 – National Fire Alarm and Signaling Code, 2016 Edition;
33. Schifiliti, R., Use of fire plume theory in the design and analysis of fire detector and sprinkler response, Worcester Polytechnic Institute, 1986;
34. Motevalli, V., Riccini, C., Characterization of the confined ceiling jet in the presence of an upper layer in transient and steady-state conditions, NIST-GCR-92-613, 1992.
35. Gissi, E., An introduction to fire simulation with FDS and Smokeview, www.emanuelegissi.eu (2009);
36. https://ro.wikipedia.org/wiki/Legea_lui_Avogadro;
37. Peterson, V. L., Supercomputer requirements for selected disciplines important to aerospace, Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 7, 1989;
38. Atzberger, P., Simulation of complex fluids and soft materials using stochastic Eulerian-Lagrangian methods with shear boundary conditions, University of California, 2009;
39. http://nptel.ac.in/courses/112104118/lecture-25/25-1_gen_nav.htm;
40. https://en.wikiversity.org/wiki/Fluid_Mechanics_for_MAP/Differential_Analysis_of_Fluid_Flow;
41. http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/stress.cfm;
42. http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_10_15167_6015.pdf;
43. Tieszen, S. R., Nicolette, V. F., Gritz, L. A., Vortical structures in pool fires, Observations, Speculation and Simulation. Sandia Laboratories, SAND96-2607;
44. Teodorescu, D., Simularea numerică a mișcării turbulente a aerului în încăperi izoterme, Conferința a VII-a. Eficiență, confort, conservarea energiei și protecția mediului, BIRAC, 2000;
45. Rubini, P. A., Simulation of Fires in Enclosures, University of Hull, 2018;
46. Bostan, V., Simularea computațională a curgerilor turbulente în rotoarele eoliene, Științe Inginerești, 2/2015;
47. FDS Technical reference Guide, Volume 1: Mathematical model, Sixth Edition, April 2013;
48. Takahashi, W., Tanaka, H., Sugawa, O., Ohtake, M., Flame and plume behaviour in and near a corner of walls, Fire Safety Science, 5, 1997;
49. Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition, John Wiley and Sons, 2011;
50. ISO 9705-1:2016 Reaction to fire tests – Room corner test for wall and ceiling lining products – Part 1: Test method for a small room configuration;
51. https://www.sp.se/en/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADding/ISO_9705_Room_corner_test/Sidor/default.aspx;
52. Kawagoe, K., Fire Behaviour in Rooms, report no. 27, Building Research Institute, Tokyo, 1958;
53. Babrauskas, V., Greyson, S., Heat Release in Fires, E & F. N. Spon, London, 1992;
54. Babrauskas, V., Burning Rates, NFPA, Quincy, MA, 1995;
55. HELLER V., Scale effects in physical hydraulic engineering models, Journal of Hydraulic Research, 2011;

56. Huggett, C., Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements, *Fire and Materials*, 1980;
57. Tewarson, A., *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Third Edition, NFPA, Quincy, MA, 1995;
58. NFPA 204M Standard for Smoke and Heat Venting, 2018 Edition;
59. Brannigan, V. M., *The Regulation of Technological Innovation: The Special problem of Fire Safety Standards*, Fire Seat, 2008;
60. NFPA 502:Standard for road tunnels, bridges and other limited acces highways, 2017;
61. van den Broecke, D., *Study on the Effectiveness of Sprinklers in Tunnels*, Australian Tunneling Society, 2016;
62. Tarada, F., Fires in tunnels-can the risk be designed out?, *Fire Safety Tunnels*, vol. 9, issue 4, 2011;
63. Maidl, B., Thewes, M., Maidl, U., *Handbook of Tunnel Engineering*, vol. II, Wiley and Sons, 2014;
64. Lalu, O., Brănișteanu, B., Codescu, S., Popescu, D., Panaitescu, V., Anghel, I., Popa, C., Enache, F., Implementarea corectă a HRR de la incendii de autoturisme în vederea simulării computerizate, Conferința internațională profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești, Sebeș, 2015;
65. Brănișteanu, B., Retezan, A., Anghel, I., Sprinkler activation time in a reduced scale car road tunnel, *Proceedings of the Romanian Academy, Series A*, 2016;
66. Karlsson, B., Quintiere, J., *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, 2000;
67. Anghel, I., Lalu, O., Codescu, S., Pesic, D., Brănișteanu, B., Popa, C., Experimental investigation on the characteristics of fires in a reduced 1/10 scale road tunnel using different liquid pools, *Acta Technica Napocensis*, vol. 60, 2017;
68. Lemaire, T., Kenyon, Y., Large scale fire tests in the Second Benelux tunnel, *Fire Technology*, vol. 4, 2006.