



**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ**

RAPORT DE CERCETARE NR.1

Studiu bibliografic: prescripții tehnice, normative, standarde naționale și internaționale privind exploatarea în siguranță a rețelelor de metrou. Cercetări privind soluții eficiente de sisteme de ventilare și sisteme PSD/PED pentru rețele de metrou în diferite situații de urgență

Student doctorand,
Ing. Vladimir KUBINYECH

Coordonator științific,
Conf. univ. dr. ing. Cătălin TEODOSIU

**BUCUREȘTI
2019**

Cuprins

Cuprins	2
Lista de figuri	3
Lista de tabele	3
1. Introducere	4
2. Standarde privind exploatarea în siguranță a rețelelor de metrou	6
2.1 Standarde naționale	6
2.1.1 Normativul NP 071-02 (2002)	6
2.1.2 Normelor de prevenire și stingere a incendiilor, de dotare cu mijloace tehnice de prevenire și stingere a incendiilor și salvare a persoanelor, specifice Societății Comerciale de Transport cu Metroul București METROREX - S.A. (2006)	8
2.2 Standarde internaționale	9
2.2.1 Decretul de aprobare a reglementărilor tehnice pentru prevenirea incendiilor în proiectarea, construcția și operarea liniilor ferate metropolitane – ITALIA (2015)	9
2.2.2.1 Instrucțiuni tehnice interministeriale privind siguranța în tunelurile feroviare nr.98 300 din 8 iulie 1998 - FRANȚA.....	12
2.2.2.2 Ordinul comun din 20 februarie 1983 de aprobare a normelor de securitate și a procedurilor de control aplicabile spațiilor accesibile publicului, situate pe calea ferată publică și strict esențiale pentru funcționarea acestora (2008) - FRANȚA.....	12
2.2.3 Standardul de siguranță la foc în sistemele de tranzit rapid – SINGAPORE (2012).....	13
2.2.4 Standardul de siguranță la foc pentru sisteme fixe de tranzit și sisteme feroviare pentru pasageri, NFPA 130 – SUA (2010)	16
2.2.5 Standardul tehnic privind liniile ferate din Japonia (2012).....	20
3. Studiu documentar privind soluțiile eficiente de ventilare în situații de urgență în stații și tuneluri de metrou	28
3.1 Articole studiate	28
3.2 Sinteză și concluzii	40
4. Studiu documentar privind evacuarea fumului din stații de metrou echipate cu uși de siguranță (PSDs/PEDs)	42
4.1 Articole studiate	42
4.2 Sinteză și concluzii	45
5. Concluzii și perspective	47
6. Referințe bibliografice	49

Lista de figuri

Fig. 1 Platformă cu un singur tunel de metrou	22
Fig. 2 Platformă insulă cu tunel dublu	22
Fig. 3 Platforme opuse cu două tuneluri.....	23

Lista de tabele

Tab. 1 Timp maxim de expunere	19
Tab. 2 Scenarii de incendiu	21
Tab. 3 Tabel comparativ cu normativele prezentate anterior	26
Tab. 4 Tabel centralizator al studiului documentar privind soluțiile eficiente de ventilare în situații de urgență în stații și tuneluri de metrou.....	41
Tab. 5 Tabel centralizator al studiului documentar privind evacuarea fumului din stații de metrou echipate cu uși de siguranță (PSDs/PEDs)	46

1. Introducere

Având în vedere tendința demografică universală de transfer a populației din mediul rural în mediul urban, marile orașe devin mai aglomerate în fiecare an. Una din marile probleme urbanistice legată strict de acest aflux mare de persoane este transportul intern, care nu se dezvoltă în același ritm cu numărul de călători. Prin urmare, mijloacele de transport în comun se aglomerează constant și devin din ce în ce mai apăsătoare problemele legate de siguranța călătorilor.

În acest context, cel mai rapid mijloc de transport urban rămâne metroul, ceea ce justifică dezvoltarea continuă a rețelilor de metrou la nivel mondial. Astfel, de la prima linie de metrou construită la Londra în anul 1863 (locomotivele de atunci fiind propulsate de motoare cu abur, iar tunelurile de metrou erau prevăzute cu ventilatoare puternice, care scoteau fumul rezultat din arderea cărbunilor și aburul direct în oraș) s-a ajuns la sfârșitul anului 2017, conform datelor oficiale UITP – “L’Union internationale des transports publics” (International Association of Public Transport) la sisteme de metrou în 178 de orașe din 56 de țări, transportând în medie 168.000.000 de persoane într-o singură zi [1]. Dezvoltarea accelerată a rețelilor de metrou din ultimii ani este evidențiată cel mai bine prin următoarele date: începând cu anul 2000 au devenit operaționale 75 de noi rețele de metrou, ceea ce înseamnă o creștere de 70% [1]. Practic, la 31 decembrie 2017, cele 178 rețele de metrou aveau 642 de linii, cu o lungime totală de 13.903 km, deservind 11.084 de stații [1]. Trebuie precizat de asemenea faptul că există în prezent orașe cu sisteme de metrou ce depășesc 2.000.000.000 de pasageri pe an (Tokyo: 3.463.000.000; Moscova: 2.369.000.000; Shanghai: 2.044.000.000) sau se apropie de acest număr (Beijing: 1.988.000.000; Seul: 1.885.000.000; New York: 1.806.000.000) [1].

Pe de altă parte, această densitate mare a călătorilor din stațiile și trenurile de metrou se traduce prin probleme deosebite în ceea ce privește asigurarea siguranței acestora. În general, există trei mari categorii de incidente grave în rețelele de metrou ce pot avea consecințe dramatice: probleme tehnice sau legate de managementul traficului (ce se pot solda de exemplu cu accidente între trenuri de metrou), persoane căzute din diferite motive pe șinele de tren și incendii/explozii provocate de probleme tehnice, respectiv de acte intenționate (teroriste).

O statistică generală la nivel mondial care să repertorieze de o manieră exhaustivă toate evenimentele de acest fel ce au loc în rețelele de metrou este foarte greu de efectuat. Totuși, în ceea ce privește numărul de incidente de la metroul din București, se poate stabili un bilanț pentru perioada 2010–2017, din care reiese că au avut loc 27 de evenimente, după cum urmează: 9 accidente cu oameni căzuți pe șinele de tren dintre care 3 s-au soldat cu decesul persoanelor, 8 sinucideri, 7 tentative de suicid, 1 crimă, 1 tentativă de crimă și 1 avarie la un tren oprit de urgență între 2 stații de metrou [2]. De asemenea, conform datelor centralizate de către operatorul metroului din New York, reiese că numărul total de persoane accidentate a fost de 172 (dintre care 58 de persoane decedate) în 2015, respectiv 168 (48 de decese) în 2016 [3].

În fine, la nivel internațional, în ultimii 10 de ani s-au înregistrat numeroase atacuri teroriste în sistemele de metrou din întreaga lume, evenimente în urma cărora au murit aproape 90 de oameni și au fost răniți aproximativ 600 [4].

În acest context, trebuie să se precizeze faptul că în cazul rețelelor de metrou cele mai grave probleme legate de siguranța călătorilor rămân în continuare cele legate de evacuarea fumului provocat de incendii (indiferent de natura acestora) sau a unor compuși toxici (de natură chimică sau biologică). Chen et al. [5] prezintă de altfel o centralizare a unui număr de 14 incendii izbucnite la mai multe rețele de metrou, a căror sursă de aprindere variază: frânele încinse ale garniturilor de tren, echipamente electrice defecte, transformatoare, construcții de pe platforma de așteptare, scări rulante defecte, cabluri electrice etc. După cum se observă, incendiile de natură electrică pot avea numeroase surse, consecințele fiind foarte grave, exemplul cel mai elocvent fiind tragedia survenită la metroul din Baku (Azerbaidjan) în 1995, unde aproape 300 de persoane și-au pierdut viața [6]. De asemenea, incendiile provocate intenționat pot avea consecințe dramatice, fiind cunoscut cazul incendiatorului trenului de metrou oprit în stația Jungangno din Daegu (Coreea de Sud) în 2003, soldat cu aproape 200 de victime și peste 150 de răniți [7]. Atacurile cu substanțe toxice reprezintă o altă amenințare gravă în cazul rețelelor de metrou, exemplul cel mai mediatizat fiind atacul cu gaz sarin în 3 linii de metrou din Tokyo (1995), în urma căruia au murit peste 10 persoane, alte aproximativ 1000 fiind rănite (din care peste 50 foarte grav) [8].

Practic, expunerea directă la foc nu reprezintă principalul pericol pentru viața pasagerilor din rețelele de metrou în cazul unor incendii, ci inhalarea de substanțe toxice conținute de fumul rezultat în urma acestor incendii. S-a demonstrat că în cazul incendiilor din metrou (trenuri, tunele sau stații) există o mulțime de gaze toxice eliberate datorită arderii incomplete a diferitelor materiale [9].

În aceste condiții, există la ora actuală foarte multe cercetări privind implementarea de soluții prin care să se reducă cât mai mult posibil numărul victimelor în cazul unor evenimente nefericite în rețelele de metrou. Se menționează că studiile efectuate se concentrează pe îmbunătățirea eficienței sistemelor de ventilare existente în caz de urgență, precum și pe propunerea de soluții de sisteme de ventilare inovative, cu performanțe ridicate. De asemenea, se cercetează modalitățile prin care aceste sisteme de ventilare în caz de urgență pot fi cuplate cu alte sisteme care să conducă la creșterea gradului de siguranță în ceea ce privește exploatarea rețelelor de metrou. Un astfel de sistem, ce permite reducerea numărului de accidente și îmbunătățirea condițiilor de evacuare în caz de incendiu, constă în instalarea ușilor automate de protecție, cunoscute în literatura de specialitate sub denumirea de PSD – platform screen doors sau PED – platform edge doors, în funcție de tipul constructiv (sistemul PED este asemănător cu sistemul PSD, doar că nu se ajunge ca înălțime până la nivelul tavanului). Aceste sisteme creează o barieră fizică între peronul stației de metrou și liniile de tren, scăzând astfel riscul accidentărilor prin contactul direct al călătorilor cu trenul, precum și pătrunderea diverselor obiecte pe liniile de tren. De asemenea, prin punerea la punct de strategii/scenarii de funcționare pentru aceste sisteme, cuplate cu ventilarea (scenarii ce țin cont de poziționarea focarului de incendiu), se poate controla propagarea fumului și evacuarea corectă a acestuia, pentru a limita numărul de persoane afectate și a facilita în același timp intervenția echipelor de salvare.

2. Standarde privind exploatarea în siguranță a rețelelor de metrou

2.1 Standarde naționale

În România, cadrul legislativ care reglementează siguranța la incendiu a construcțiilor este format din *Legea nr. 307/2006 privind apărarea împotriva incendiilor* [10] și *Ordinul ministrului Administrației și Internelor nr.163 din 28 februarie 2007 pentru aprobarea Normelor generale de apărare împotriva incendiilor* [11]. Acestora li se adaugă mai multe reglementărilor tehnice și măsuri de apărare împotriva incendiilor specifice diferitelor domenii de activitate.

În ceea ce privește siguranța la foc în stațiile și tunelurile de metrou, aceasta este reglementată prin *Ordinul Ministrului Lucrărilor Publice, Transporturilor și Locuinței nr. 1065 din 30.07.2002 pentru aprobarea reglementărilor tehnice "Normativ pentru proiectarea construcțiilor și instalațiilor specifice de metrou privind prevenirea și stingerea incendiilor", indicativ NP 071-02* [12] și *Ordinul Ministrului Transporturilor, Construcțiilor și Turismului nr. 1287 din 10.08.2006 pentru aprobarea Normelor de prevenire și stingere a incendiilor, de dotare cu mijloace tehnice de prevenire și stingere a incendiilor și salvare a persoanelor, specifice Societății Comerciale de Transport cu Metroul București METROREX - S.A.* [13]

2.1.1 Normativul NP 071-02 (2002)

Acest normativ stabilește performanțele și nivelurile de performanță privind siguranța la foc a construcțiilor și instalațiilor subterane ale metroului și este destinat proiectanților, executanților și verficatorilor de proiecte, experților tehnici și responsabililor tehnici cu execuția, proprietarului și utilizatorului construcțiilor, precum și organelor administrației publice, potrivit obligațiilor și răspunderilor ce le revin în conformitate cu legislația în vigoare.

Normativul reglementează criteriile de performanță și condițiile generale de performanță ale construcțiilor subterane de metrou, modalitățile de limitare a propagării incendiilor, evacuarea fumului, conformarea la foc a construcțiilor, căile de evacuare, acces și intervenție, precum și condițiile minime de siguranță în proiectarea și exploatarea instalațiilor electrice, instalațiilor de stingere a incendiilor și instalațiilor de semnalizare a incendiilor.

În ceea ce privește instalațiile de evacuare a fumului (desfumare), normativul precizează că în spațiile subterane aferente construcțiilor metroului, evacuarea fumului și a gazelor fierbinți se realizează cu instalații de ventilație mecanică în depresiune, aerul de compensare fiind asigurat prin goluri prevăzute cu rame cu jaluzele fixe și rame cu plasă de sârmă.

În cazul unui incendiu în tuneluri sau galerii de metrou, evacuarea fumului se face în sens invers deplasării pasagerilor pe drumul cel mai scurt, în așa fel încât aceștia să aibă în față aer proaspăt.

Echipamentele care intră în alcătuirea centralelor de ventilare se dispun în încăperi special destinate, separate de restul construcției conform prevederilor referitoare la rezistența la foc minimă a pereților.

Centralele de ventilare se dispun obligatoriu astfel:

- minimum o centrală de ventilare la fiecare stație;

- o centrală de ventilare la fiecare interstație, amplasată în funcție de condițiile concrete din teren; de preferință, la jumătatea fiecărui tronson de tunel cuprins între două stații (interstație);

- minimum o centrală pentru fiecare spațiu de garare sau depou.

Atunci când spațiile de garare se amenajează în stațiile de metrou, desfumarea spațiilor respective se poate realiza fie independent, fie prin centrala de ventilație aferentă stației.

Centralele de ventilație aferente stațiilor și interstațiilor se prevăd cu câte două ventilatoare cu funcționare alternativă și cu posibilități de rezervare reciprocă.

Dimensionarea sistemelor de ventilare, modul de dispunere a gurilor de refulare și de evacuare, precum și schemele de funcționare ce se adoptă trebuie să asigure următoarele condiții:

- densitatea fumului să permită o vizibilitate bună pe căile de evacuare a persoanelor (densitatea fumului nu trebuie să depășească 10% până la înălțimea de 2 m față de pardoselile pietonale);

- vitezele curenților de aer în vestibule să înlăture efectul de coș al ieșirilor în exterior, la supratean;

- introducerile de aer proaspăt și dirijarea fumului să se facă în sens invers celui de deplasare a fluxurilor de evacuare a persoanelor (evacuarea persoanelor să se facă în contracurent de aer proaspăt);

- să se elimine posibilitatea inundării cu fum a unor porțiuni din căile de evacuare.

Desfumarea stațiilor de metrou, precum și a ansamblurilor stație – interstație se asigură cu ventilatoare axiale, prevăzute cu posibilități de schimbare a sensului de rotire într-un interval de timp de **până la 3 minute**.

În funcție de numărul și debitul ventilatoarelor prevăzute și de raportul între debitul de aer evacuat și cel introdus, ventilatoarele de desfumare trebuie să fie realizate astfel încât să poată funcționa la **temperaturi ale gazelor de ardere cuprinse între 200° C și 400° C**, cel puțin o perioadă de timp egală cu timpul de intervenție.

Valoarea de 200° C a temperaturii fumului și gazelor de ardere se poate alege atunci când ventilatoarele asigură debite de evacuare și de introducere mai mari de 100.000 m³/h și sunt prevăzute cu ventilatoare de rezervă.

Pornirea și oprirea ventilatoarelor aferente ventilației generale se face manual, prin comandă locală sau de la distanță, de la dispeceratul central, conform unor scenarii prestabilite. În toate locurile prevăzute cu comenzi se asigură semnalizarea stării de funcționare a ventilatoarelor.

Desfumarea spațiilor comerciale se realizează prin sistemul de ventilare generală a stației.

Desfumarea încăperilor cu cabluri electrice se asigură prin ventilatoare locale, cu evacuare în canalele ventilației generale.

Ventilatoarele locale aferente tunelurilor de cabluri dispuse sub peroane se prevăd cu posibilități de aspirație din zona de staționare a ramelor la peron.

Celelalte aspecte privind proiectare și realizarea sistemelor de ventilare se soluționează în conformitate cu prevederile "Normativului privind proiectarea și executarea instalațiilor de ventilație", indicativ I5.

2.1.2 Normelor de prevenire și stingere a incendiilor, de dotare cu mijloace tehnice de prevenire și stingere a incendiilor și salvare a persoanelor, specifice Societății Comerciale de Transport cu Metroul București METROREX - S.A. (2006)

În aceste norme nu sunt precizate informații referitoare la proiectarea, construcția sau utilizarea sistemelor de ventilare în situații de urgență, în schimb sunt făcute precizări referitoare la acțiunile de executat de personalul Metrorex în cazul în care trenurile prezintă disfuncționalități care duc la izbucnirea incendiilor. Astfel, sunt descrise 3 scenarii posibile și acțiunile de executat în fiecare dintre ele:

- a. Dacă trenul de metrou se află oprit în stație
 - se comandă deschiderea ușilor trenului și se debarcă pasagerii din tren pe platforma de așteptare, apoi pe căile de evacuare spre locurile de siguranță;
 - mecanicul raportează dispeceratului problema apărută și acționează pentru stingerea incendiului sau prevenirea răspândirii lui cu stingătoarele din dotare sau cu furtunurile de apă de la hidranții interiori, dacă sursele de tensiune ale trenurilor și ale șinelor de contact sunt decuplate;
 - în cazul în care incendiul nu poate fi lichidat prin aceste măsuri, mecanicul solicită prin dispecerat alertarea echipei de intervenții din stația de metrou, a formației de intervenție, salvare și prim ajutor sau a serviciilor profesioniste pentru situații de urgență.
- b. Dacă trenul de metrou se află în timpul mersului
 - dacă mecanicul sesizează în timpul mersului producerea unui incendiu sau a unei avarii cu degajare de fum, gaze toxice și temperaturi ridicate la tren, deconectează tracțiunea și încearcă să ajungă în prima stație folosind inerția trenului, comandând din mers coborârea tuturor captatorilor și raportând în dispecerat problema identificată;
 - după oprirea trenului în stație acționează conform prevederilor de la punctul anterior.
- c. Dacă trenul de metrou se află în timpul mersului și se oprește necomandat în tunel
 - dacă mecanicul sesizează în timpul mersului producerea unui incendiu sau a unei avarii cu degajare de fum, gaze toxice și temperaturi ridicate la tren care duce la oprirea necomandată a trenului în tunel, mecanicul se adresează călătorilor folosind sistemul de sonorizare și recomandă păstrarea calmului și interzicerea coborârii din proprie inițiativă în tunel, așteptând intervenția personalului Metrorex;
 - raportează de urgență problema în dispecerat în vederea deconectării de urgență a tensiunii din șina a III-a, aprinderea iluminatului normal din tunel și pornirea instalației de ventilare în regim de evacuare, indicând poziția sa aproximativă și problema constatată;
 - în situația în care nu se poate stabili conexiunea radio cu dispeceratul sau dacă viața călătorilor este pusă în pericol, mecanicul trenului deconectează tensiunea din șina a III-a, de pe tren, prin introducerea scurtcircuitoarelor;

➤ dacă s-a stabilit legătura radio cu dispeceratul și a fost primită confirmarea deconectării tensiunii de pe șina a III-a, după coborârea captatorilor și introducerea scurtcircuitoarelor întregului tren, mecanicul intervine cu stingătoarele din dotare pentru a încerca să stingă incendiul;

➤ dacă avaria poate afecta integritatea călătorilor, mecanicul ajutor ajută la debarcarea călătorilor din tren, începând cu cei aflați în rama avariata și conducerea lor spre cea mai apropiată stație, în sens opus curentului de aer de evacuare, conform reglementărilor în vigoare.

În anexa nr.11 a aceluiași act normativ este prezentată lista punctelor vital-vulnerabile la incendiu din locațiile metroului, în care se regăsește și centrala de ventilație tehnologică.

2.2 Standarde internaționale

Spre deosebire de domeniul tunelurilor auto, unde reglementările privind normele de securitate la incendiu sunt foarte detaliate și puternic armonizate la nivel internațional, în domeniul tunelurilor de metrou aceste aspecte sunt mai puțin tratate și uniformizate. În ceea ce privește instalațiile de ventilare mecanică în special, normele pot să difere în aceeași țară de la proiect la proiect, fiind adaptate uneori la tehnologia disponibilă în momentul construcției [14].

La nivelul Uniunii Europene există o decizie a Comisiei Europene care reglementează construcția și exploatarea în condiții de siguranță a tunelurilor feroviare [15], însă aceasta nu este aplicabilă și tunelurilor de metrou și nici nu există o altă reglementare europeană în acest sens.

Prin urmare, în subcapitolele următoare vor fi prezentate reglementările referitoare la instalațiile de desfumare din țările care au implementat normative specifice pentru securitatea la incendiu a sistemelor de metrou.

2.2.1 Decretul de aprobare a reglementărilor tehnice pentru prevenirea incendiilor în proiectarea, construcția și operarea liniilor ferate metropolitane – ITALIA (2015)

Scopul acestui decret [16] este de a stabili regulile de construcție a liniilor ferate metropolitane, inclusiv a celor de metrou, din punct de vedere al securității la incendiu. Acestea se aplică construcțiilor noi sau modificărilor aduse la construcțiile mai vechi.

Obiectivul primar de protejare a oamenilor trebuie să fie urmărit prin asigurarea condițiilor de supraviețuire a persoanelor din imediata vecinătate a sursei de incendiu, precum și prin protejarea persoanelor care folosesc căile de evacuare spre o zonă sigură.

Cele mai importante scenarii avute în vedere la stabilirea acestor reglementări tehnice sunt:

- Scenariul 1: incendiu la bordul unui tren oprit în stație
- Scenariul 2: incendiu la bordul unui tren oprit în tunel
- Scenariul 3: incendiu la un magazin de pe platforma de așteptare
- Scenariul 4: incendiu într-o încăpere de echipamente.

Sarcina termică minimă pentru incendiile din scenariile 1 și 2, necesară pentru calcularea parametrilor de incendiu cum sunt temperatura, înălțimea flăcării și debitul de fum, este de 7000 kW. Această valoare este maximul care poate fi atins de incendiul respectiv, care se dezvoltă după o funcție de timp ce descrie o dezvoltare a puterii incendiului de 1000 kW în 210 secunde.

Pentru scenariile 3 și 4, sarcina termică minimă este considerată a fi de 3500 kW, reprezentând valoarea maximă ce poate fi atinsă de incendiul respectiv până la intrarea în funcțiune a instalației automate de stingere a incendiilor.

Normativul prevede **valorile critice** ale condițiilor limită la care oamenii ar putea fi expuși în cazul unui incendiu la metrou. Prin proiectarea măsurilor de prevenire și protecție la incendiu nu trebuie să fie atinse următoarele limite:

- Expunerea oamenilor la o radiație termică a stratului de fum mai mare de 2,5 kW/m²;
- Vizibilitate de minim 15 m la o înălțime de 1,8 m de la pardoseală, pentru a putea fi observate semnele de evacuare din clădire;
- Doza efectivă fracționară medie de CO să nu depășească valoarea de 0,3.

Aceste valori nu trebuie să fie atinse pentru o perioadă de timp cel puțin dublă față de timpul necesar evacuării în siguranță a persoanelor.

Condiții sustenabile pentru oameni, care pot fi întâlnite pe rutele de evacuare pentru o perioadă nedefinită de timp sunt:

- Temperatura medie a aerului de maxim 40⁰ C
- Vizibilitate de minim 30 de m în ceea ce privește perceperea semnelor de evacuare
- Doza efectivă fracționară medie de CO să aibă valoarea maximă de 0,1.

Sistemele de ventilare de urgență sunt esențiale pentru siguranța persoanelor din stațiile de metrou, motiv pentru care trebuie să fie proiectate și instalate astfel încât să fie atinse următoarele obiective:

- în cazul unui incendiu la un tren oprit în tunel (scenariul 2), trebuie asigurate condițiile necesare pentru evacuarea călătorilor prin tunel spre cea mai apropiată stație sau ieșire de urgență. Viteza de ventilare a aerului trebuie să fie cel puțin egală cu viteza critică și **nu mai mică de 2 m/s**. Pe timpul evacuării persoanelor din tren nu trebuie să fie depășite limitele condițiilor sustenabile descrise anterior;
- în cazul unui incendiu la un tren oprit în stație (scenariul 1) trebuie asigurate condițiile evacuării în siguranță a călătorilor pe platformă și apoi pe căile de evacuare. Condițiile de sustenabilitate nu trebuie depășite cel puțin 10 minute de la deschiderea ușilor trenului în dreptul platformei.

Normativul prevede că tunelurile care au o **lungime maximă de 300 m** nu necesită instalarea unui sistem de ventilare de urgență sau a unei căi de evacuare paralele cu linia de cale ferată.

Ventilarea de urgență trebuie să asigure introducerea aerului proaspăt **în direcția opusă** realizării evacuării persoanelor.

Un aspect foarte important este că instalațiile de ventilare în situații de urgență trebuie să fie proiectate astfel încât să atingă obiectivele **verificate prin analize CFD**. Vor fi efectuate testări

CFD ale scenariilor ce implică activarea sistemului de ventilare în situații de urgență, pentru a seta referințe de proiectare pentru viitoarele testări în teren.

În ceea ce privește puțurile de extragere a fumului și de acces în situații de urgență, acestea trebuie să respecte următoarele condiții:

1. Fiecare secțiune de tunel mai lungă de 300 m trebuie să fie echipată cu sistem de ventilare de urgență.
2. În general, aspirația aerului se face prin mijlocul secțiunii tunelului pentru a facilita deplasarea persoanelor care se evacuează spre stația cea mai apropiată și accesul personalului de intervenție în caz de incendiu.
3. În cazul tunelurilor individuale deservite de un singur puț, acesta trebuie să fie partiționat vertical pentru a nu permite recircularea fumului între tuneluri.
4. În cazul secțiunilor de tunel mai lungi de 750 m, cel puțin un puț de ventilare trebuie să servească ca și acces de urgență pentru pompieri.
5. În cazul în care puțurile de ventilare sunt folosite și ca puțuri de acces de urgență, acestea trebuie să fie construite astfel încât puțul folosit de salvatori să fie independent de rutele de introducere a aerului proaspăt sau de evacuare a fumului.
6. Puțurile menționate la punctul anterior trebuie să fie prevăzute cu scară cu un gradient de maxim 70° și locuri de odihnă la fiecare 8 m, astfel încât salvatorii echipați cu echipament de protecție să poată accesa tunelul de la suprafață.
7. Grilajele puțurilor de evacuare a fumului sau de introducere a aerului proaspăt trebuie să nu permită introducerea accidentală a substanțelor periculoase în tunel de la nivelul solului. și să nu fie amplasate pe drumuri sau în zone în care publicul are acces ușor.

De asemenea, normativul impune condiții pentru ventilarea căilor de evacuare, astfel:

1. În stațiile subterane, compartimentarea aerului pe căile de evacuare se realizează folosind perdele de aer suplimentate cu sisteme de ventilare care să introducă suficient aer în stație încât să genereze suprapresiune pe rutele de evacuare față de zona incendiului.
2. Pot fi folosite perdele de fum, în special la scări și trasee sub-verticale.
3. În cazul stațiilor subterane formate dintr-o singură încăpere, pot fi folosite sisteme de extragere a fumului și a căldurii care să respecte standardul UNI 9494-2.
4. Perdelele de aer amplasate între stația subterană și căile de evacuare care folosesc surse locale de aer sunt interzise. Sursa de aer trebuie să fie exterioară, dintr-o zonă situată **la cel puțin 25 m de stație**.
5. Viteza aerului introdus de perdelele de aer trebuie să fie suficient de mare încât să asigure sigilarea pneumatică față de fumul și gazele fierbinți generate de incendiu. Cu toate acestea, viteza aerului nu trebuie să îngreuneze trecerea persoanelor sau să genereze panică în rândul acestora.
6. Viteza aerului de pe căile de evacuare în suprapresiune trebuie să fie cuprinsă **între 1 și 6 m/s**, măsurată în secțiunea rutei protejate cea mai apropiată de platformă.

Alegerea ventilatoarelor din sistemul de evacuare a fumului se va face în funcție de temperatura estimată a fumului. Clasele de ventilatoare folosite în sistemele dedicate extragerii fumului din incendiu nu trebuie să aibă o rezistență la foc mai mică de **F400/90 min**.

Operarea sistemelor de ventilare de urgență a unei rețele de metrou trebuie să fie supravegheată dintr-un centru de control dedicat, unde sunt centralizate toate informațiile referitoare la operațiile ordinare și de urgență.

2.2.2.1 Instrucțiuni tehnice interministeriale privind siguranța în tunelurile feroviare nr.98 300 din 8 iulie 1998 - FRANȚA

În Franța, securitatea la incendiu a sistemelor de metrou este bine reglementată prin acte legislative specifice care acoperă întreg spectrul acestui domeniu.

Prezentele instrucțiuni interministeriale [17] se aplică tunelurilor nou construite cu o lungime cuprinsă între 400 și 10 000 de m (inclusiv tunelurile de metrou). Aici sunt clasificate tunelurile în funcție de tipurile de căi ferate pe care le deserveșc, sunt indicate standardele minime de rezistență și reacție la foc pe care trebuie să le respecte aceste tipuri de construcții, sunt descrise instalațiile de protecție la incendiu, precum și căile de evacuare în situații de urgență.

În ceea ce privește instalațiile de desfumare, acestea sunt obligatorii în următoarele cazuri:

- În cazul tunelurilor care deserveșc liniile feroviare de transport urban;
- Tuneluri cu lungime mai mare de 5 km în prin care se transportă materiale periculoase.

Viteza de circulare a aerului nu trebuie să fie **mai mică de 1,5 m/s**, puterea instalației de desfumare fiind adaptată la condițiile meteorologice locale cele mai frecvente.

Desfumarea este asigurată de un grup de **două motoare reversibile** alimentate din două surse electrice diferite.

Ventilatoarele trebuie să reziste la o temperatură de cel puțin **200° C timp de 2 ore**.

În fiecare stație trebuie să existe dispozitiv de activare manuală a sistemului de desfumare, pentru a facilita intervenția pompierilor în caz de incendiu.

2.2.2.2 Ordinul comun din 20 februarie 1983 de aprobare a normelor de securitate și a procedurilor de control aplicabile spațiilor accesibile publicului, situate pe calea ferată publică și strict esențiale pentru funcționarea acestora (2008) - FRANȚA

Acest regulament [18] aduce clarificări în ceea ce privește condițiile obligatorii de implementat pentru stațiile supraterane și subterane (inclusiv stațiile de metrou).

În ceea ce privește desfumarea stațiilor subterane, regulamentul prevede că aceasta se poate realiza natural sau mecanic, dacă stația are un singur nivel subteran, și obligatoriu mecanic dacă are mai multe niveluri subterane.

Desfumarea naturală trebuie să aibă mai multe legături cu exteriorul, în afara deschiderilor utilizate de pasageri, cu o suprafață totală cel puțin egală cu a 50-a parte a suprafeței subterane,

gurile de ventilare nefiind concentrate în aceeași zonă. În acest caz, conductele de extracție a fumului trebuie să respecte următoarele condiții:

- Secțiunea lor trebuie să fie cel puțin egală cu suprafața liberă a gurilor de ventilare pe care le deservesc
- Raportul secțiunii celei mai mari și celei mai mici trebuie să fie mai mic sau egal cu 2
- Conductele trebuie să fie realizate din materiale incombustibile și să aibă o rezistență la foc de cel puțin 15 minute. Dacă acestea traversează spații cu rezistență la foc mai mare de atât, trebuie să respecte și ele gradul respectiv de rezistență la foc.
- Conductele colectoare de evacuare (verticale) nu trebuie să aibă mai mult de 2 abateri de 20°
- Racordurile orizontale ale conductelor de ventilare nu trebuie să aibă o lungime mai mare de 2 m pentru un tiraj eficient (calculul a fost realizat pentru o temperatură a fumului de 70° C și o temperatură exterioară de 15° C, fără vânt).

Desfumarea mecanică este realizată pe zone definite în funcție de construcția stației subterane. Pentru fiecare astfel de zonă debitul minim de împropățare trebuie să asigure **minim 15 schimburi pe oră**. În plus, fiecare zonă trebuie să fie echipată cu un ansamblu de ventilație independent (aspirație și refulare), astfel încât în caz de incendiu în zona respectivă să fie creată o subpresiune și în zonele adiacente suprapresiune.

Ventilatoarele de desfumare trebuie să funcționeze la temperaturi ale fumului de **400° C pentru o oră**. Acestea trebuie să fie alimentate din **două surse electrice independente**.

Sistemul de desfumare trebuie să poată fi activat atât manual cât și automat. Debitul de extragere a fumului trebuie să fie **de 1 m³/s** pentru fiecare 100 m² de suprafață ventilată.

2.2.3 Standardul de siguranță la foc în sistemele de tranzit rapid – SINGAPORE (2012)

Acest standard [19] prevede cerințele de protecție la incendiu și siguranță a vieții pentru sistemele de tranzit rapid subterane, de suprafață sau supraterrane. Acesta prevede măsuri pasive și active de protecție la incendiu, măsuri de protecție a căilor de evacuare, de intervenție a serviciilor profesionale pentru situații de urgență și alte aspecte din domeniul securității la incendiu a construcțiilor.

Secțiunea referitoare la controlul fumului în stații și sisteme de ventilație mecanică are următoarele obiective principale:

- Menținerea condițiilor de siguranță pentru evacuarea călătorilor
- Gestionarea fumului în stație pentru desfășurarea operațiunilor de stingere

Țevile din PVC sunt interzise în stațiile subterane, cu excepția manșoanelor de țevi și a țevelor de scurgere a condensatului pentru unitățile de aer condiționat.

Aerul proaspăt/fumul din sistemul de control a fumului și de ventilare mecanică poate fi aspirat/refulat prin puțurile de introducere/evacuare a aerului din exteriorul stației.

Puțurile de aer proaspăt/fum trebuie să fie poziționate astfel încât să prevină recircularea fumului în sistem prin gurile de aspirație, intrările în stație sau alte deschideri de la suprafață.

În cazul în care aerul de schimb este aspirat prin deschiderile ușilor de la intrarea în stație, trebuie încorporate dispozitive care să permită înlocuirea aerului la activarea sistemului de ventilare de urgență și în situația în care ușile stației sunt închise în afara orelor de program pentru călători.

SISTEME DE AER CONDIȚIONAT ȘI DE VENTILARE MECANICĂ

În cazul în care pentru ventilarea în situații de urgență este prevăzut a se folosi instalațiile de aer condiționat în locul celor de ventilare mecanică, toate cerințele prezentului standard se aplică sistemului de aer condiționat.

Sistemul de ventilare mecanică pentru presurizarea stațiilor și a caselor de scări trebuie să respecte prevederile *Codului de practici pentru ventilare mecanică și aer condiționat în clădiri - SS553*, cu excepția cazului în care sunt prevăzute modificări în prezentul standard.

- Ventilarea mecanică de pe scara de pompieri trebuie să genereze o presiune pozitivă față de încăperile adiacente.

- Manșoanele de protecție ale tubulaturilor, căptușeala conductelor și conexiunile flexibile trebuie să fie realizate din materiale incombustibile. Dacă este necesar să fie utilizate materiale combustibile, acestea trebuie să aibă o rată de propagare a flăcării la suprafață cel puțin de clasă 0.

- Camerele care nu au altă destinație decât să protejeze echipamentul de ventilare a aerului și dispozitivele electrice aferente nu sunt considerate ca și zone cu risc înalt de incendiu.

- În cazul în care conducta de alimentare cu aer care deservește casa scării trebuie să străpungă peretele și să iasă în exterior, porțiunea de conductă din afara casei scării trebuie să fie încastrată în zidărie cu cel puțin aceeași rezistență la foc ca și elementele structurii și nu trebuie să fie prevăzută cu clapete de incendiu.

- Camerele de baterii trebuie să fie ventilate pentru a menține concentrația volumetrică medie de hidrogen din cameră sub 2%.

Clapetele de incendiu nu trebuie folosite în următoarele locații:

- Deschideri în zidurile puțurilor de ventilație pentru tubulatura sistemului de ventilație de urgență.

- Oriunde într-un sistem de presurizare a aerului.

Puțul liftului trebuie să fie ventilat conform *SS 550 Codul de practici pentru instalații, operații și mentenanța lifturilor de pasageri și materiale*. Deschiderile de ventilare trebuie poziționate astfel încât să inducă evacuarea aerului din puț. În cazul în care nu pot fi practicate deschideri din cauza poziționării puțului, poate fi instalată o conductă de ventilare. Dacă conducta nu este rezistentă la foc, trebuie instalate clapete de foc la nivelul zidului puțului.

Dacă puțul de lift nu este protejat, acesta trebuie ventilat la partea superioară printr-o deschidere permanentă cu o suprafață de minim 0,1 m² pentru fiecare lift.

SISTEM DE CONTROL A FUMULUI

Este un sistem dedicat ce trebuie prevăzut în spațiile comerciale de la subsol și trebuie să respecte *SS 553 - Codul de practici pentru ventilare mecanică și aer condiționat în clădiri*.

În locul detectoarelor de fum pot fi folosiți detectori liniari de temperatură de tipul fibrei optice, care să activeze sistemele de control a fumului în zonele nedestinate publicului.

SISTEME DE FILTRARE A FUMULUI

Acestea trebuie să fie prevăzute în următoarele spații:

- i. Stații spații publice
- ii. Coridoarele spațiilor auxiliare din subsol

Cu excepția:

iii. Coridoarelor care deserveșc doar camerele aparatelor de taxat, birourile personalului, toaletele, spațiile de curățenie și nu mia mult de o încăpere tehnică.

- iv. Coridoarele din zonele tampon.

Pentru stații subterane cu zone închise nedestinate publicului deasupra solului, sistemul de filtrare a fumului trebuie extins în aceste zone.

Sistemul de filtrare a fumului trebuie să respecte următoarele cerințe:

i. Trebuie prevăzute cel puțin 2 seturi de ventilatoare de filtrare a fumului. Fiecare dintre ele trebuie să fie capabil să ventileze cel puțin 50% din debitul de aer proiectat.

- ii. Viteza aerului la nivelul ușilor și a culoarelor **nu trebuie să depășească 5 m/s**.

iii. Gurile de extragere a fumului trebuie distribuite astfel încât să nu rămână nici o zonă neacoperită.

iv. Conductele acestor instalații care străbat alte compartimente de incendiu de clasă superioară trebuie să fie construite astfel încât să respecte cerințele clasei respective.

v. Ventilatoarele de aspirație și de refulare trebuie să fie interconectate astfel încât oprirea/defectarea ventilatorului de refulare să ducă automat la oprirea ventilatorului de admisie corespunzător.

- vi. Rata de filtrare a fumului trebuie să fie de **minimum 9 schimburi pe oră**.

vii. Sistemul de filtrare a aerului trebuie să fie activat automat de sistem de alarmare la incendiu. În plus, trebuie să fie montat un comutator manual care să permită activarea sistemului din centrul de comandă sau dintr-un panou de comandă instalat la primul etaj.

- viii. Conductele orizontale trebuie să fie fabricate din oțel de 1,2 mm grosime.

ix. Ventilatorul de extragere trebuie să poată funcționa în parametri normali la **250⁰ C pentru 2 ore** și să aibă **o sursă alternativă** de alimentare electrică.

Sistemul de filtrare a fumului nu trebuie să fie unul dedicat. În cazul în care sunt folosite clapete pentru dirijarea fumului spre sistemul de filtrare, acestea trebuie să fie dotate cu motor.

Magazinele nu trebuie să fie dotate cu sistem de control al fumului.

Spațiile publice din afara spațiilor comerciale trebuie să fie dotate cu sistem de filtrare a fumului.

Sistemul de filtrare a fumului din spațiul public al stației trebuie să fie activat automat de detectoare amplasate în spațiile publice ale stației.

SISTEMUL DE VENTILARE DE URGENȚĂ AL STAȚIILOR SUBTERANE ȘI ÎNCHISE

Sistemul de ventilare de urgență al stațiilor subterane trebuie să fie construit astfel încât să îndeplinească următoarele condiții:

- Să asigure condiții de siguranță pe calea de evacuare de la locul incendiului spre zona de siguranță
- Să fie capabil să ajungă la parametrii operaționali în **cel mult 120 de secunde**.
- Sistemul de ventilare de urgență trebuie să fie conceput astfel încât dacă un ventilator se defectează celelalte să fie capabile să îi preia funcțiile.
- Viteza maximă a aerului proaspăt refulat în sensul invers al direcției de evacuare nu trebuie să depășească 5 m/s.

Proiectarea sistemului de ventilare de urgență trebuie să țină cont de următorii parametri:

- Rata de eliberare a căldurii specifică garniturilor de tren și a materialelor combustibile pe care le pot transporta
- Rata de dezvoltare a incendiului
- Geometria stațiilor și a tunelurilor
- Ventilatoare, conducte, puțuri și dispozitive utilizate pentru vehicularea aerului
- Proceduri operaționale de acțiune în caz de incendiu pentru asigurarea unui răspuns prompt și eficient.

Ventilatoarele care nu au fost proiectate pentru a funcționa în caz de incendiu trebuie să fie închise automat la activarea sistemului de ventilare de urgență, cu excepția cazului în care se poate demonstra că nu influențează în nici un fel circuitul de aer al ventilării de urgență.

Ventilatoarele de urgență, motoarele și celelalte componente expuse la debitul de aer trebuie să funcționeze la temperaturi de **250° C pentru cel puțin 2 ore**.

Motoarele ventilatoarelor de urgență trebuie să ajungă la viteza prevăzută de funcționare în **maxim 30 de secunde** din poziția oprite, sau maxim 60 de secunde pentru motoarele cu viteză variabilă.

Dispozitivele de activare manuală a ventilatoarelor de urgență trebuie să fie amplasate cât mai departe de curentul de aer generat de acestea. Este interzisă montarea dispozitivelor de protecție la suprasarcină termică pe motoarele ventilatoarelor de urgență.

Activarea sistemului de ventilare de urgență trebuie să se facă din Centrul de Comandă al Operațiunilor. Operarea ventilatoarelor din Centrul de Servicii a Pasagerilor (local) se poate face doar cu acordul operatorilor din Centrul de Comandă al Operațiunilor.

Dacă debitul de aer proaspăt este asigurat prin ventilatoare de aspirație a aerului sau căi de acces, trebuie instalate dispozitive de deschidere automată a acestora odată cu activarea sistemului de ventilare de urgență.

2.2.4 Standardul de siguranță la foc pentru sisteme fixe de tranzit și sisteme feroviare pentru pasageri, NFPA 130 – SUA (2010)

Acest standard [20] cuprinde măsurile de siguranță a vieții din punct de vedere a protecției la incendiu pentru sistemele fixe de tranzit subterane, de la suprafață și supraterrane, făcând

referire, fără a se limita, la stații, căi de rulare, tuneluri, sisteme de ventilare de urgență, trenuri, proceduri de urgență, comunicații, sisteme de control și zone de garare a trenurilor.

În ceea ce privește sistemul de ventilare de urgență, se prevede ca acesta să fie instalat în următoarele condiții:

- Într-o stație cu sistem închis
- Într-un sistem subteran sau tunel cu o lungime mai mare de **305 m** (1000 ft)

Sistemul mecanic de ventilare de urgență nu trebuie să fie instalat în următoarele condiții:

- Într-o stație cu sistem deschis
- În cazul în care lungimea tunelului este mai mică sau egală cu 61 m (200 ft)

Dacă în urma unei analize inginerești se constată că ventilarea mecanică poate fi înlocuită cu ventilare naturală, acest lucru poate fi făcut în următoarele condiții:

- Dacă lungimea tunelului este mai mare de 61 m și mai mică de 305 m
- Într-o stație închisă în care analiza inginerească demonstrează că prin folosirea ventilării naturale se respectă aceleași criterii de siguranță a utilizatorilor.

Analiza inginerească a sistemului de ventilare trebuie să includă un program validat de simulare analitică a metroului, însoțit de o analiză cantitativă a curgerii dinamice a aerului generată de scenariul de incendiu, așa cum ar rezulta din aplicarea **tehnicii CFD**. Rezultatul analizei trebuie să includă măsurarea in-situ a vitezelor aerului la rece (în lipsa incendiului), în timpul punerii în funcțiune a instalației.

Sistemul de ventilare de urgență trebuie să poată îndeplini următoarele:

- Să asigure un climat de siguranță pe căile de evacuare în stațiile închise și în tuneluri
- Să asigure ventilarea aerului cu o viteză cel puțin **egală cu viteza critică** din tuneluri
- Să poată fi complet operațional în **cel mult 180 s**
- Să mențină debitele de aer necesare pentru **minim 1 oră** dar nu mai puțin decât

timpul necesar creării condițiilor de siguranță

Sistemele de ventilare a fumului prevăzute cu puț de extragere sunt permise doar dacă în urma analizei inginerești se constată că răspândirea fumului în tunel este limitată la **maxim 150 m**.

Analiza trebuie să ia în considerare cel puțin următoarele evenimente posibile:

- Incendiu în tunel sau stație de metrou
- Incident local în sala electrică ce duce la întreruperea alimentării cu energie electrică a sistemului de ventilare de urgență
- Deraiere

Referitor la ventilatoarele folosite în situații de urgență, acestea trebuie să fie capabile să ventileze aerul în ambele direcții, în funcție de necesități.

Motoarele ventilatoarelor individuale trebuie să atingă viteza de operare în **maxim 30 s**, iar în cazul motoarelor cu viteză variabilă în 60 s.

Sistemul de ventilare de urgență trebuie să poată fi oprit și clapetele să poată fi închise pentru a limita dispersia gazelor toxice, în caz de nevoie.

Ventilatoarele, motoarele lor și toate componentele anexe expuse la fum trebuie să funcționeze la temperaturi ale mediului de **250° C pentru cel puțin 1 oră** dar nu mai puțin decât timpul necesar asigurării condițiilor de siguranță.

Această temperatură poate fi redusă în urma unei analize ingineresti, dar nu mai puțin de 150°C.

Demarorul motoarelor ventilatoarelor locale și dispozitivele aferente de operare și control ale acestora trebuie să fie poziționate cât mai departe posibil de debitul de aer ventilat.

Nu este permisă instalarea de dispozitive de protecție la supratemperatură a ventilatoarelor de urgență.

Ventilatoarele care sunt folosite doar pentru confortul pasagerilor sau al muncitorilor și care nu sunt prevăzute a fi parte din sistemul de ventilare de urgență trebuie să fie oprite automat în momentul în care este identificat un focar de incendiu pentru a nu influența curenții de aer generați de ventilatoarele de urgență.

Operarea întregului sistem de ventilare de urgență trebuie să fie inițiată din centrul de control al operațiunilor (dispeceratul) rețelei de metrou.

Trebuie să fie permis controlul local al sistemului de ventilare peste controlul de la distanță al centrului de comandă.

Funcționarea sistemului de ventilare de urgență nu trebuie să fie întreruptă decât la ordinul comandantului intervenției.

Anexa B a acestui standard oferă mai multe detalii referitoare la ventilație și limitele de siguranță pentru expunere la efectele și consecințele incendiului.

Expunerea la căldură poate pune viața oamenilor în pericol prin 3 moduri:

- Hipertermie
- Arsuri la nivelul pielii
- Arsuri ale tractului respirator

În condițiile în care concentrația de umiditate din aer este mai mică de 10%, arsurile tractului respirator apar ulterior arsurilor de la nivelul pielii. Cu toate acestea, arsurile căilor respiratorii pot apărea ulterior inhalării aerului cu o temperatură mai mare de 60° C dacă este saturat cu apă.

Limita de siguranță pentru expunere la radiație este de aproximativ 2,5 kW/m². Sub acest nivel al fluxului radiativ expunerea poate fi tolerată 30 de min sau mai mult fără a afecta vizibil evacuarea. Peste această valoare, timpul de apariție a arsurilor de piele scade repede potrivit relației:

$$t_{\text{rad}} = 4 \cdot q^{-1.35}$$

unde,

t_{rad} = timpul [min]

q = fluxul de căldură radiantă [kW/m²]

La fel ca în cazul gazelor toxice, se consideră că o persoană expusă acumulează o doză de căldură radiantă într-o perioadă de timp. Doza echivalentă fracționară (FED) de căldură radiantă acumulată pe minut este inversul lui t_{rad} .

Căldura convectivă acumulată pe minut depinde foarte mult de gradul de acoperire a pielii cu haine și de natura hainelor respective. Pentru persoanele îmbrăcate complet se poate folosi următoarea formulă de determinare a timpului de apariție a arsurilor:

$$t_{\text{conv}} = (4.1 \cdot 10^8) \cdot T^{-3.61}$$

iar în cazul persoanelor îmbrăcate mai sumar este mai recomandată următoarea formula:

$$t_{\text{conv}} = (5 \cdot 10^7) \cdot T^{-3.4}$$

unde,

t_{conv} = timpul [min]

T = temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

Aceste ecuații au fost determinate empiric și se estimează că au o incertitudine de $\pm 25\%$.

Datele de toleranță termică pentru pielea neacoperită indică o limită de 120°C pentru căldura convectivă, valoarea deasupra căreia apare, în câteva minute, durere considerabilă și apariția arsurilor.

Corpul unei persoane expuse la o sursă de căldură poate fi considerat ca preluând o doză de căldură într-o perioadă de timp. O expunere scurtă la un flux radiant de putere mare este mai puțin tolerabil decât o expunere mai îndelungată la un flux radiant de putere mai mică. Pentru calculul acestei doze se poate folosi metodologia de la calculul dozei fracționare a gazelor toxice, folosind următoarea formulă:

$$\text{FED} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{t_{\text{rad}}} + \frac{1}{t_{\text{conv}}} \right) \cdot \Delta t$$

Timpul pentru care FED are o valoare mai mare de 0,3 reprezintă timpul disponibil pentru evacuare în cazul expunerilor la căldură convectivă și radiantă.

Tab. 1 Timp maxim de expunere

Temperatura la care se face expunerea ($^{\circ}\text{C}$)	Fără a genera incapacitate (min)
80	3,8
75	4,7
70	6,0
65	7,7
60	10,1
55	13,6
50	18,8
45	26,9
40	40,2

Conținutul de CO:

- Maxim 2000 ppm pentru câteva secunde

- Aproximativ 1150 ppm sau mai puțin pentru primele 6 minute ale expunerii
- Aproximativ 450 ppm sau mai puțin pentru primele 15 minute ale expunerii
- Aproximativ 225 ppm sau mai puțin pentru primele 30 minute ale expunerii
- Aproximativ 50 ppm sau mai puțin pentru restul perioadei de expunere.

Nivelurile de obscurare ale fumului trebuie menținute permanent sub punctul în care semnalele luminoase de 80 lx sunt vizibile de la 30 m, iar ușile și geamurile sunt vizibile de la 10 m.

Viteza aerului în stații închise și tuneluri trebuie să fie **cel puțin egală cu 0,75 m/s**.

Viteza aerului în stații închise și tuneluri folosite pentru evacuare în situații de urgență nu trebuie să fie mai mare de **11 m/s**.

Nivelul maxim de zgomot trebuie să fie de 115 dB pentru câteva secunde și 92 dB pentru restul expunerii.

Sistemele de ventilare de sub platformă sunt recomandate pentru extragerea căldurii generate de dispozitivele de tracțiune și de frânare. Gurile de ventilare ar trebui executate sub nivelul platformei, în apropierea dispozitivelor generatoare de căldură.

Instalarea ușilor de siguranță (**platform screen doors/edge screen doors**) este o opțiune eficientă pentru asigurarea confortului în stație și a controlului fumului din tuneluri. Acestea trebuie să îndeplinească condiții de rezistență la foc și rezistență structurală apropiate de cele ale trenului.

În cazul unui scenariu care presupune evacuare din tunel în stație, trebuie avut în vedere accesul persoanelor din tunel pe platformă.

2.2.5 Standardul tehnic privind liniile ferate din Japonia (2012)

Prin *Ordinul Ministrului Pământului, Infrastructurii, Transporturilor și Turismului nr. 51/2001* [21] au fost implementate normele tehnice care asigură stabilitatea și siguranța transportului public feroviar, inclusiv a sistemului de metrou.

În ceea ce privește ventilarea în situații de urgență, *Articolul 29: Facilitățile stațiilor subterane* prevede că stațiile subterane și tunelurile care duc spre acestea trebuie să fie echipate cu ventilatoare mecanice doar în cazul în care nu au acces la ventilare naturală suficientă.

Sistemul de ventilare (natural, mecanic sau mixt) trebuie să poată asigura extragerea fumului astfel încât pasagerii să poată fi evacuați în siguranță. Dacă este nevoie de sistem mecanic de ventilare, stația va fi echipată cu generator electric de rezervă.

În stațiile de metrou pot fi instalate, dacă se consideră necesare, bariere de fum între platformă și tunel, la scări, puțuri de lift sau alte locații unde trebuie limitată propagarea fumului. Acestea pot fi activate de un detector de fum sau de un operator din centrul de prevenire și control al dezastrelor și trebuie să fie construite dintr-un material ignifug.

De menționat faptul că varianta în engleză a documentului nu a fost tradusă foarte bine, motiv pentru care unele paragrafe au fost mai greu de înțeles. Este de asemenea posibil ca traducerea din japoneză să nu fie completă, având în vedere că nu este vorba de o traducere oficială.

Determinarea capacității de evacuare a fumului de la nivelul platformei de așteptare sau a lobby-ului se realizează pe baza scenariilor de incendii la trenuri sau în stațiile de metrou, prezentate în tabelul de mai jos:

Tab. 2 Scenarii de incendiu

Tipul de incendiu	Locul de inițiere	Sursa de incendiu
Incendiu minor	Tren	Echipamentul mecanic al vagonului
	Platformă	Incendiator folosind o sursă mică de aprindere
Incendiu major	Tren	Incendiator folosind benzină
	Platformă	Incendiator folosind benzină

A. Procedura de verificare a incendiilor minore

A.1 Verificarea densității fumului la nivelul platformei

În cazul incendiilor ordinare la nivelul platformei, densitatea fumului C_s , calculată în funcție de volumul de difuzie al fumului și timpul minim pentru realizarea evacuării, trebuie să aibă o valoare mai mică de 0.1 (1/m).

Pentru estimarea densității fumului se folosesc următoarele formule determinate empiric, în funcție de scenariul de incendiu considerat:

(1) Incendiu la tren

- a. Dacă timpul de evacuare este mai mic de 7 minute

$$C_s = 21 \cdot (1 - e^{-V_e \cdot t / V}) / V_e$$

- b. Dacă timpul de evacuare este mai mare de 7 minute

$$C_s = (66 \cdot V \cdot e^{-V_e \cdot \frac{t-7}{V}} - 21 \cdot V_e \cdot e^{-V_e \cdot \frac{t}{V}} + 66 \cdot V_e \cdot t - 441 \cdot V_e - 66V) / V_e^2$$

(2) Incendiu de magazin pe platformă

- a. Dacă timpul de evacuare este mai mic de 10 minute

$$C_s = 2,1 \cdot (V_e \cdot t - V + V \cdot e^{-V_e \cdot t / V}) / V_e^2$$

- b. Dacă timpul de evacuare este cuprins între 10 și 11 minute

$$C_s = \{(24 \cdot V - 21 \cdot V_e) \cdot e^{V_e \cdot (t-10)/V} + 24 \cdot V_e \cdot t - 198 \cdot V_e - 26,1 \cdot V + 2,1 \cdot V \cdot e^{-10 \cdot V_e / V}\} / V_e^2$$

- c. Dacă timpul de evacuare este mai mare de 11 minute

$$C_s = \{(1,8 \cdot V - 45 \cdot V_e) \cdot e^{-V_e \cdot (t-11)/V} + 1,8 \cdot V_e \cdot t + 91,2 \cdot V_e - 27,9 \cdot V + 2,1 \cdot V \cdot e^{-10 \cdot V_e / V} + (24 \cdot V - 21 \cdot V_e) \cdot e^{-V_e / V}\} / V_e^2$$

unde,

C_s = densitatea fumului sau coeficientul de extincție (1/m)

V = volumul blocului de fum [m^3]

t = timpul de evacuare [min]

V_e = debitul de evacuare a fumului raportat la volumul blocului de fum [m^3/min]

În cazul în care nu există magazin pe platformă, $t=0$, deci $C_s=0$.

(3) Volumul blocului de fum

Volumul blocului de fum este spațiul în care se estimează că densitatea fumului este cea mai mare din total platformei inundate cu fum pe timpul incendiului.

Volumul blocului de fum se determină folosind următoarele formule:

$$V = (A_0 - A_v) \cdot 20$$

$$A_0 = (V_a - V_m) / L$$

Unde,

A_0 = aria secțiunii inundate cu fum [m^2]

A_v = aria secțiunii trenului [m^2]

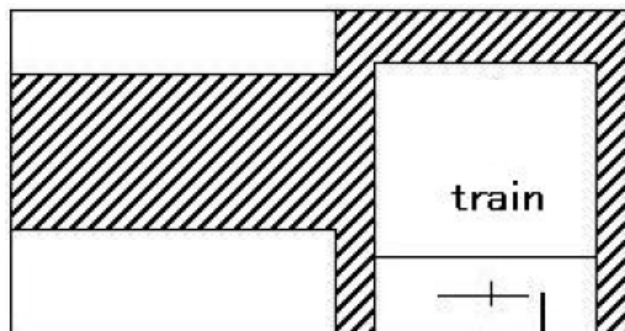
V_a = volumul total calculat din secțiunea blocului de fum și lungimea platformei [m^3]

V_m = volumul părților lipsite de fum din V_a , cum ar fi pilonii, scările etc. [m^3]

L = lungimea platformei [m]

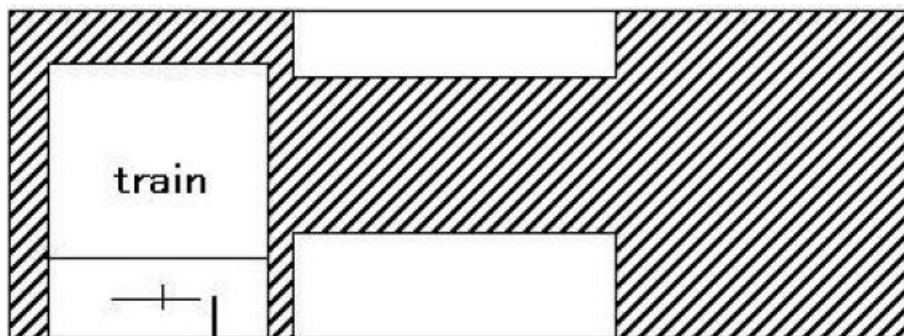
Următoarele figuri prezintă exemple de calculare a suprafeței secțiunii inundate cu fum:

Fig. 1 Platformă cu un singur tunel de metrou



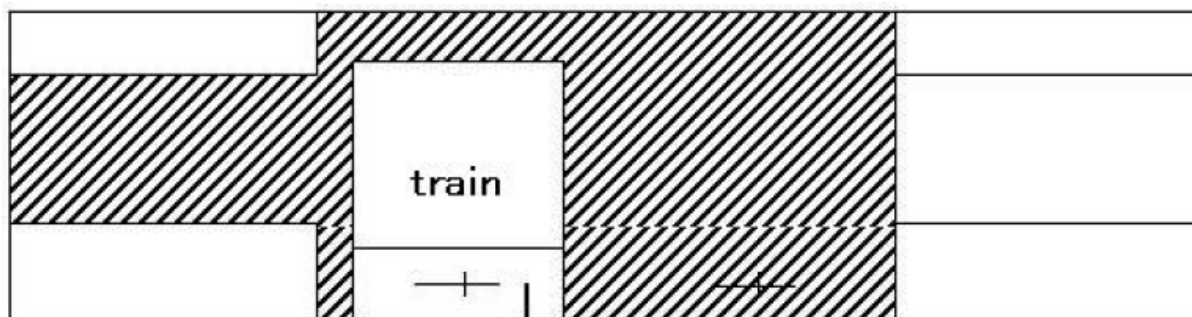
În acest caz presupunem că fumul se va răspândi în toată secțiunea hașurată

Fig. 2 Platformă insulă cu tunel dublu



În acest caz fumul se va răspândi atât pe platformă cât și în tunelul paralel, dacă nu sunt instalate bariere fizice (de ex. uși de siguranță – *platform screen doors*)

Fig. 3 Platforme opuse cu două tuneluri



În acest caz este foarte probabil ca fumul să nu se răspândească și pe platforma opusă din cauză că tavanul platformei este mai jos decât cel al tunelului.

(4) Rata minimă de extragere a fumului

Sistemul de extragere a fumului de la nivelul platformei ar trebui să aibă un debit minim de 5000 m³/h pentru volumul blocului de fum.

A.2 Verificarea volumului de difuzie a fumului necesar pentru alte niveluri diferite de platformă

Volumul necesar de difuzie a fumului (V_0) corespunzător timpului de evacuare t trebuie să fie calculat folosind formulele de mai jos și făcând rotunjirile la o zecimală. Volumul de difuzie a fumului (V) calculat separat nu ar trebui să fie mai mic decât volumul necesar de difuzie a fumului (V_0).

- a. Dacă timpul de evacuare este mai mic de 10 minute

$$V_0 = 10,5 t^2$$

- b. Dacă timpul de evacuare este cuprins între 10 și 11 minute

$$V_0 = 120t^2 - 2190t + 10950$$

- c. Dacă timpul de evacuare este mai mare de 11 minute

$$V_0 = 9t^2 + 252t - 2481$$

Volumul de difuzie a fumului (V) se determină folosind următoarele formule:

$$V = V' + t \cdot V_e'$$

$$V' = (A_f - A_t) \cdot (H - 2)$$

$$V_e' = V_e \cdot (H - 2) / H$$

Unde,

V' = volumul de difuzie a fumului fără a se lua în considerare debitul de extragere a sistemului de evacuare a fumului [m³]

$V_e' = \text{debitul de extragere } [m^3/min]$

$A_f = \text{suprafața lobby-ului } [m^2]$

$A_t = \text{suprafața din lobby acoperită de alte obiecte (stâlpi) } [m^2]$

$H = \text{înălțimea lobby-ului } [m]$

$V_e = \text{debitul de extragere a fumului al instalației de la nivelul lobby-ului } [m^3/min]$

B. Procedura de verificare a incendiilor majore

Timpul necesar pentru ca nivelul limită al stratului de fum să coboare la limita de 2 m față de pardoseală (t_0) poate fi calculat folosind formulele de mai jos, și trebuie confirmat că timpul necesar calculat este mai mare decât timpul necesar pentru evacuare (t), calculat separat.

(1) În cazul unui incendiu de tren sau magazin pe platformă

$$t_0 = V_E / (V_s - V_e')$$

$$V_E = (A_E - A_V') \cdot L$$

$$V_e' = V_e \cdot (A_E - A_V') / (A_0 - A_V)$$

Unde,

$(V_E - V_e')$ are valoarea 0 sau este un număr negativ, $t_0 = \infty$

$V_E = \text{volumul efectiv al întregii platforme, la 2 m deasupra pardoselii } (m^3)$

$V_s = \text{debitul de fum și rata de generare, ambele având valoarea de } 300 (m^3/min)$

$V_e' = \text{rata efectivă de extragere a fumului raportată la volumul efectiv } (V_E) \text{ al întregii platforme } (m^3/min)$

$A_E = \text{aria secțiunii platformei poziționată în unghi drept față de calea ferată, la 2 m de pardoseală, excluzând stâlpii, scările etc. (unde fumul nu se răspândește) } (m^2)$

$A_V' = \text{aria secțiunii trenului la 2 m deasupra platformei } (m^2)$

$V_e = \text{debitul de extragere a fumului al instalației de pe platformă } (m^3/min)$

$A_0 = \text{aria secțiunii poziționată în unghi drept față de calea ferată folosită în calcularea volumului blocului de fum } (m^2)$

$A_V = \text{aria secțiunii trenului } (m^2)$

(2) În cazul incendiilor din lobby (cu excepția cazurilor în care lobby-ul este separat independent în două sau mai multe părți)

$$t_0 = V' / (V - V_e')$$

$$V' = (A_f - A_t) \cdot (H - 2)$$

$$V_e' = V_e \cdot (H - 2) / H$$

Unde,

$(V' - V_e')$ are valoarea 0 sau este un număr negativ, $t_0 = \infty$, iar în cazul lobby-ului fără magazin, dacă t_0 este mai mare sau egal cu 3, $t_0 = \infty$,

V' = volumul de difuzie a fumului fără a lua în considerare debitul de extragere al sistemului de ventilare a fumului (m^3)

V_s = rata de generare a fumului = $300 m^3/min$

V_e' = debitul de extragere efectiv (m^3/min)

A_f = aria suprafeței lobby-ului (m^2)

A_t = aria pilonilor, scărilor etc. de la nivelul lobby-ului, unde fumul nu se poate răspândi (m^2)

H = înălțimea tavanului lobby-ului (m)

V_e = debitul de extragere al instalației de ventilare a fumului de la nivelul lobby-ului (m^3/min)

C. Contramăsuri

Dacă capacitatea sistemului mecanic de extragere a fumului nu este suficient de mare se recomandă aplicarea următoarelor măsuri:

- Crearea unor căi suplimentare de evacuare sau lărgirea celor existente, pentru a scădea timpul necesar realizării evacuării;
- Mărirea volumului de difuzie a fumului;
- Construirea magazinelor din materiale rezistente la foc și prevederea instalație de sprinklere;
- Evitarea construirii de magazine în stațiile de metrou;
- Prevederea altor măsuri suplimentare pentru evacuarea în siguranță a persoanelor.

Tab. 3 Tabel comparativ cu normativele prezentate anterior

	Ventilare căi de evacuare	Evacuarea persoanelor în contracurent de aer proaspăt	Timp schimbare sens de rotație ventilatoare	Temperatura maximă de funcționare a ventilatorului [°C]	Perioada minimă de funcționare	Radiația termică maximă a stratului de fum [kW/m2]	Vizibilitate minimă	Concentrația maximă de CO
România	În suprapresiune	X	max 3 min	200 - 400	perioadă egală cu timpul de intervenție	-	10% până la 2 m față de podea	-
Italia	În suprapresiune	X	-	400	90 min	2,5 kW/m2	min 15 m la 1,8 m față de podea	Doza efectivă fracționară max 0,3
Franța	În suprapresiune	-	-	200 în tunel 400 în stație	2 h în tunel 1 h în stație	-	-	-
Singapore	-	-	-	250	2 h	-	-	-
SUA	-	-	-	250	1 h	2,5 kW/m2	10 m până la uși 30 m până la semnalele luminoase	între 50-2000 ppm, în funcție de perioada de expunere

	Viteza de ventilare aer în tunel [m/s]	Viteza de ventilare aer pe căi de evacuare [m/s]	Lungime minimă tunel	Verificare CFD	Nr de schimburi orare de aer	Timp de intrare în regim de funcționare
România	-	-	-	-	-	-
Italia	min 2	1-6 m/s	300 m	X	-	-
Franța	min 1,5	-	400 m	-	15	-
Singapore	-	max 5 m/s	-	-	9	max 120s
SUA	-	max 11 m/s	305 m	X	-	max 180 s

Tab. 3 nu este exhaustiv, normativele prezentate anterior conținând mult mai multe informații și reglementări decât cele menționate în capul de tabel, însă au fost alese pentru comparație câteva aspecte considerate esențiale în asigurarea securității la incendiu a tunelurilor și stațiilor de metrou.

Instrucțiunile tehnice și normativele nu urmăresc aceeași structură în fiecare țară, făcând foarte dificilă sintetizarea informațiilor conținute și compararea lor. Ele sunt adaptate la cadrul legislativ propriu și prevederile lor diferă foarte mult în funcție de anul în care a fost realizată ultima actualizare.

În ceea ce privește reglementarea ușilor de tip *platform screen doors*, singurul normativ care face referire la ele este NFPA 130 din SUA, menționând că acestea reprezintă o opțiune eficientă pentru asigurarea confortului în stație și a controlului fumului din tuneluri, dacă rezistența structurală și rezistența la foc sunt apropiate de cele ale garniturii de metrou. Este menționat însă faptul că trebuie acordată atenție accesului persoanelor din tunel pe platformă în cazul unui incendiu care presupune evacuare din tunel în stație și pregătite măsuri în acest sens.

Referitor la condițiile de siguranță a persoanelor care se auto-evacuează într-o situație de urgență, normativele din SUA și Italia prezintă valori maxime ale căldurii radiate de stratul de fum, a vizibilității și a concentrației de CO ce trebuie să fie menținute prin funcționarea instalațiilor de desfumare.

Singurele două aspecte prezente în cele 5 normative din tabel fac referire la temperatura maximă a fumului pentru care trebui ca ventilatoarele (și ansamblurile lor) să funcționeze (200 – 400°C), precum și durata de timp minimă obligatorie de funcționare (1 -2 ore).

3. Studiu documentar privind soluțiile eficiente de ventilare în situații de urgență în stații și tuneluri de metrou

Pentru determinarea soluțiilor eficiente de ventilare în situații de urgență, atenția cercetătorilor se îndreaptă spre determinarea valorilor unor parametri specifici dezvoltării incendiilor în tuneluri, precum viteza critică de ventilare, distanța de backlayering, lungimea flăcării, temperatura maximă din stratul de fum și concentrația gazelor toxice.

Viteza critică este viteza de ventilare longitudinală necesară pentru a preveni mișcarea stratului de fum contra direcției de ventilare, iar distanța de backlayering este lungimea parcursă de stratul de fum în contracurentul ventilației longitudinale. Altfel spus, pentru a reduce distanța de backlayering la zero trebuia ca viteza de ventilare longitudinală din tunel să fie cel puțin egală cu viteza critică.

3.1 Articole studiate

O analiză laborioasă a studiilor experimentale la scară redusă și a analizelor teoretice referitoare la acești parametri a fost realizată de Haddad et al. [22], însă aceasta nu face nici o referire la studiile numerice din domeniu.

Hu et al. [23] au realizat patru experimente la scară reală într-un tunel auto și au comparat valorile măsurate ale parametrilor incendiului cu rezultatele simulărilor CFD, concluzia fiind că valorile obținute din simulările numerice pentru temperatura stratului de fum, viteza critică și distanța de backlayering sunt foarte apropiate de rezultatele experimentale, cu o deviație de doar 4° C pentru temperatura prezisă la o distanță mai mare de 80 de metri de focarul de incendiu.

David Purser a folosit simularea numerică pentru a determina condițiile din interiorul tunelului Mont Blanc în timpul incendiului din 1999 [24]. Condițiile inițiale folosite pentru simulare au fost preluate din experimentele la scară reală realizate cu câțiva ani în urmă în același tunel. Rezultatele numerice au fost apoi folosite pentru a estima perioada de timp până când condițiile din tunel au devenit periculoase pentru călători. Apoi a fost realizată o analiză a dozei efective fracționare (*fractional effective dose*) pentru a determina perioada de timp necesară pentru afectarea și ulterior moartea pasagerilor în raport cu poziția lor în tunel. Doza efectivă fracționară a unui poluant sau a unui iritant este pragul limită al concentrației sau al dozei de expunere ce cauzează efecte negative asupra oamenilor. Această doză este calculată luând în calcul timpul de expunere necesar pentru pierderea conștiinței sau moartea oamenilor și timpul efectiv de expunere la acel poluant/iritant [25]. Concluziile studiului au validat rezultatele obținute numeric, confirmând încă o dată utilitatea analizelor CFD în descrierea evoluției incendiilor în tunel.

Guo et al. [26] au studiat impactul geometriei tunelului (tunel cu o singură linie de tren sau tunel cu două linii de tren) asupra eficienței sistemului de ventilare în situații de urgență. Având în vedere că tunelul studiat trece pe sub un râu, aproximativ jumătate din lungimea tunelului este construită în pantă pozitivă, cealaltă jumătate fiind construită în pantă

negativă, cu valori maxime de (+) sau (-) 28 %. Pentru că nu s-au putut realiza experimente la scară reală, cercetarea s-a bazat pe modelare Froude și simulare CFD, prin ambele metode urmărindu-se câmpurile de concentrații ale dioxidului de carbon, temperatura mediului, a fumului și gradul de vizibilitate. Cele două metode au generat rezultate foarte apropiate, concluzia fiind că cele mai bune condiții pentru evacuarea în siguranță a călătorilor în cazul unui incendiu în tunel sunt asigurate de configurația cu tunelul dublu (cu două linii de metrou).

Cercetătorii Altan și Sumen [27] au realizat un studiu CFD concentrat pe efectul blocajelor din tunel asupra vitezei critice a aerului ventilat și a distribuției temperaturii. În acest sens, ei au luat în considerare 3 cazuri diferite, primul cu o sursă de incendiu în tunel și fără element de blocare, al doilea cu un element de blocare în amonte de sursa de incendiu și ultimul caz cu elementul de blocare în aval de sursa de incendiu. Viteza critică în primul scenariu a fost de 0,67 m/s, valoare confirmată în studiile precedente, iar vitezele obținute pentru celelalte două scenarii au fost de 0,77 și 0,75 m/s. Autorii au concluzionat că parametrii incendiului din tunel sunt influențați de forma, mărimea și poziția elementului de blocare.

Teodosiu et al. [28] au studiat eficiența sistemului format din două stații cu sistem de ventilare și o interstație de ventilare în mijlocul tunelului. Scenariul studiat în articol a presupus incendiu la un tren oprit în tunel, la 250 m de o stație și 750 m de stația din direcția opusă, necesitând evacuarea de urgență a călătorilor spre cea mai apropiată stație. Studiul a fost realizat numeric, iar pentru simularea focarului de incendiu au fost introduse în simulare surse de CO₂ și de căldură. Au fost obținute rezultate referitoare la viteza aerului în tunel, câmpuri de temperatură și concentrații de CO₂. Acestea au demonstrat că strategia de ventilare studiată asigură evacuarea în condiții de siguranță a călătorilor, deoarece accesul spre stația cea mai apropiată nu este restricționat de viteza aerului (care nu depășește 5-6 m/s), temperaturi prea mari sau concentrații periculoase de CO₂.

În cele mai multe experimente la scară redusă și simulări se pornește de la premisa că presiunea mediului ambiant este cea normală, însă în cazul tunelurilor construite la altitudine mare (3.700 m) ar trebui luat în considerare modul în care presiunea redusă influențează variația temperaturii și a concentrației de CO. Tang et al. [29] au realizat un studiu numeric comparativ între două între tuneluri identice ca geometrie situate unul la altitudine și presiune normală (1 atm) și celălalt la o altitudine mai ridicată (0,64 atm). Autorii au pornit de la ipoteza unui incendiu cu o valoare a ratei de eliberare a căldurii (HRR) de 4 MW și au ajuns la concluzia că profilul concentrației de CO este independent de presiune, în timp ce scăderea temperaturii este mai accentuată în condiții de presiune redusă, de unde rezultă că diferența dintre rata de descreștere a concentrației de CO și a temperaturii este mai accentuată în cazul presiunii reduse.

Weng et al. [30] au studiat viteza critică și lungimea de backlayering a fumului într-un tunel printr-un experiment realizat la scară 1/10 și simulări CFD folosind Fire Dynamics Simulator. Simulările FDS au vizat două valori ale ratei HRR-ului (5 și 7,5 kW), 9 configurații diferite ale tunelului (diferite înălțimi și lățimi, chiar și forme diferite), precum și variații ale vitezei aerului

ventilat longitudinal în tunel. Parametrii determinați în cadrul simulărilor și a experimentelor au fost transformați în mărimi adimensionale, care au fost apoi comparate, rezultând o similitudine foarte mare între rezultatele obținute pe cele două căi, concluzie ce validează modelul CFD. Autorii au mers mai departe și au folosit două formule analitice de calcul a vitezei critice și a lungimii de backlayering a fumului, ale căror rezultate adimensionale au fost mai mici decât valorile obținute experimental și prin metoda CFD, cel mai probabil din cauza faptului că modele analitice nu țin cont de pierderea căldurii din flacără prin radiație și convecție.

Un articol care studiază efectul ventilării naturale asupra propagării fumului în tunel și dependența temperaturii stratului de fum de dimensiunea canalelor de ventilare naturală a fost scris de Harish et al [31]. În acest sens au fost realizate mai multe simulări numerice pentru a studia configurații diferite în ceea ce privește amplasarea focarului de incendiu, numărul și dimensiunea canalelor de ventilare etc. În cazul cel mai favorabil, al sursei de incendiu aflată chiar sub gura de ventilare, temperatura și concentrația gazelor toxice scade foarte mult și întârzie considerabil propagarea fumului spre intrarea/ieșirea din tunel, unde ar putea pune în pericol siguranța persoanelor care se auto evacuează.

Dacă focarul de incendiu este deplasat în lateralul tunelului, o singură gură de ventilare nu este suficientă pentru evacuarea în totalitate a gazelor rezultate în urma arderii, fiind necesară prezența mai multor guri de ventilare. Temperatura fumului din tunel scade o dată cu creșterea suprafeței canalului de ventilare, cum scade de altfel și cantitatea de fum care se ventilează prin ieșirea/intrarea în tunel. Articolul nu cuprinde și parte experimentală, însă rezultatele studiului au fost comparate cu experimentele prezentate în literatură și sunt foarte apropiate.

Viteza critică a ventilării și lungimea de backlayering a fumului au fost studiate și de Zhang S. et al. [32] folosind metoda numerică. După detalierea modului de construire a modelului de tunel, acesta a fost validat prin rularea unor simulări care respectă condițiile unui experiment la scară prezentat în literatură. Rezultatele obținute numeric fiind foarte apropiate de cele din experiment, rezultă că modelul propus poate fi folosit pentru determinarea vitezei critice și a distanței de backlayering propuse de autori.

Simulările au vizat două cazuri: când lungimea de backlayering a fumului este mai mică decât trenul și atunci când e mai mare. Din analiza adimensională au fost deduse formule care corelează viteza aerului deasupra trenului de metrou, puterea focarului și lungimea trenului cu lungimea de backlayering. În situația în care lungimea de backlayering este mai mare decât trenul, a fost propus ca și model de calcul focarul virtual amplasat în partea opusă a trenului (spre direcția din care este ventilat aerul proaspăt) care devine astfel "generatorul" fumului ce depășește lungimea trenului. A fost propus de asemenea un mod de calcul a puterii acestui focar virtual prin analiză adimensională.

Un incendiu în tunel poate influența modul de funcționare și eficiența ventilatoarelor de urgență, motiv pentru care Kazemipour et al. [33] au studiat acest aspect printr-un studiu în

două părți. În prima parte a studiului se consideră că ventilatoarele sunt instalate la intrarea în tunel și sunt simulate incendii de diferite puteri (HRR) pentru a studia modul în care puterea incendiului influențează presiunea generată de ventilatoare și viteza aerului. Concluzia simulărilor efectuate este că viteza aerului în tunel este invers proporțională cu puterea incendiului, ajungând până la momentul în care se observă că fumul urcă spre ventilatoare și iese din tunel prin partea din care este ventilat aerul (backlayering). Graficul rezultat în urma simulărilor arată o dependență liniară între viteza de circulație a aerului prin tunel și puterea incendiului.

Următoarea serie de experimente a vizat efectul poziției focarului față de viteza de circulație a aerului, evidențiind faptul că apropierea focarului de gura de ventilare scade viteza de circulație și presiunea aerului din cauza faptului că fumul este antrenat spre ieșirea opusă pe o distanță mai mare și reduce viteza de circulație a aerului.

Partea a doua a studiului numeric a urmărit efectul incendiului asupra unui ventilator montat în interiorul tunelului, la diferite distanțe față de focar, în amonte și în aval. La prima încercare, la distanța de 75 de m în amonte, eficiența ventilatorului nu a fost afectată, acesta funcționând în parametri normali. În cazul în care ventilatorul se afla la doar 10 m în amonte de focar, eficiența acestuia a scăzut considerabil datorită faptului că energia cinetică a aerului ventilat se disipă în principal prin frecarea cu plafonul tunelului, din cauză că stratul de fum dens direcționează o mare parte a aerului ventilat spre plafon. O altă cauză a scăderii eficacității ventilatorului este întreruperea stratificării fumului și crearea unei bucle de recirculare a fumului între focar și ventilator. Ventilatorul montat la 30 de metri în aval de focar este cel mai ineficient datorită faptului că absoarbe foarte mult fum, cu o densitate considerabil mai mare decât a aerului, funcționând astfel la parametri mult mai scăzuți decât cei prevăzuți. O îmbunătățire a performanțelor acestui ventilator a fost observată o dată cu instalarea acestuia la o distanță mai mare de plafon, cu 35 cm mai jos, unde densitatea fumului este mai scăzută.

Procedura numerică folosită anterior a fost folosită în continuare pentru a compara rezultatele cu un experiment la scară reală, într-un tunel de 850 m lungime, rezultatele prezentând discrepanțe între 5 și 15% între simulare și experiment.

[28] Zhang S. et al. [34] au studiat dependența dintre gradul de curbură al unui tunel și viteza critică a aerului ventilat longitudinal. Folosind metoda analizei teoretice, autorii au determinat formule de calcul pentru lungimea de backlayering a fumului și pentru viteza critică. Aceste calcule pornesc de la premisa că fumul încetează să mai înainteze împotriva curentului longitudinal de aer atunci când presiunea statică a fumului este egală cu presiunea hidraulică a curentului de aer. Pe baza relațiilor determinate teoretic pot fi calculate cele două variabile în funcție de dimensiunile tunelului și raza de curbură a acestuia, astfel încât rezultatele pot fi comparate cu cele determinate numeric.

În ceea ce privește simularea numerică, au fost realizate două teste de validare a modelului numeric prin reproducerea condițiilor a două experimente ale lui Li și Hu referitoare la viteza

critică, rezultatele simulărilor fiind foarte apropiate de cele ale experimentelor. Simulările numerice au vizat modificarea razei de curbură a tunelului și puterea focarului (HRR) pentru a observa cum variază lungimea stratului de backlayering și viteza critică. Astfel, de pe graficul înregistrat de termocuplele introduse în simulare, lungimea de backlayering poate fi estimată ca distanța de la temperatura maximă (chiar deasupra focarului) până la prima scădere bruscă de temperatură (*temperature jump*) spre direcția din care este introdus aer. Din studiile anterioare (pe tuneluri drepte) se știe că distanța de backlayering scade o dată cu creșterea vitezei aerului și reducerea puterii focarului de incendiu. Pe de altă parte, din aceste simulări rezultă că distanța de backlayering crește o dată cu raza de curbură a tunelului, fiind maximă când raza tinde spre infinit (tunel drept). O explicație ar fi faptul că înaintarea fumului este îngreunată de schimbarea direcției aerului ventilat, care generează turbulențe adiționale. Factorul de impact al rezistenței, notat în studiu cu K_f , descrește o dată cu creșterea razei de curbură și crește o dată cu creșterea vitezei de ventilare a aerului.

Articolul publicat de Wang F. și Wang M. [35] studiază impactul pe care îl are amplasarea focarului de incendiu în secțiunea tunelului, prin metode analitice de calcul și simulare numerică. Modelul de tunel construit în Fluent are o lungime de 300 m, cu două sensuri de mers și ventilatoare montate sub plafon. Pentru a simplifica modelul numeric și a reduce timpul de calcul nu sunt incluse ecuațiile de transfer radiativ a căldurii focarului, motiv pentru care se consideră o reducere cu 35% a valorii puterii sursei de incendiu, modalitate de simplificare abordată și validată și de alți cercetători în studii anterioare (Vega et al. [36]) Atunci când focarul este poziționat între cele două sensuri de mers, viteza critică a instalației de ventilare longitudinală este determinată prin analiză numerică la valoarea de 2,5 m/s. Aceeași viteză critică este valabilă și atunci când focarul este situat pe unul din cele două sensuri de mers. Însă atunci când focarul este lipit de unul dintre zidurile laterale ale tunelului, valoarea vitezei critice crește la 2,8 m/s. Aceste valori sunt comparate cu valorile obținute de alți cercetători prin analize teoretice și valorile sunt apropiat între ele. Temperaturile maxime ale stratului de fum rezultă a fi de 1900° C în cazul focarului amplasat între sensurile de mers, 2100° C pentru focarul amplasat pe unul din sensurile de mers și 2600° C în cazul focarului apropiat de perete. În ceea ce privește distanța parcursă de fum în sens contrar ventilării aerului, aceasta este cea mai mare în cazul focarului situat în mijlocul tunelului și se reduce la jumătate în cazul focarului situat pe un sens de mers, pentru aceleași viteze de 2,4 și 2,3 m/s. În cazul focarului apropiat de peretele lateral al tunelului, distanța parcursă de fum în sensul contrar ventilării este mult mai mică din cauză că fumul cedează o parte din căldură peretelui și își pierde astfel din forța de inerție necesară deplasării în contra curent.

Un articol care studiază efectul puțurilor de ventilare naturală asupra atenuării efectului de piston indus de mișcarea trenului prin tunelul de metrou este cel publicat de Gonzales et al. [37]. Astfel, sunt studiate cazurile în care un singur tren se deplasează în tunel sau când două trenuri circulând din sensuri opuse se deplasează simultan prin tunel. Studiul se bazează pe simulări în Fluent și comparații cu softuri unidimensionale de simulare a presiunii și a vitezei de circulație a aerului prin tuneluri. Configurația studiată este formată din două stații

(platforme) de așteptare de 100 m fiecare, unite printr-un tunel dublu de 500 m. În fiecare stație este instalată o centrală de ventilare care introduce aer în stație și tunel ($120.000 \text{ m}^3/\text{h}$), iar în mijlocul tunelului este un canal de ventilare cu o centrală ce evacuează mecanic aerul. De asemenea, la cele două capete ale tunelului, în apropierea stațiilor de așteptare, sunt construite puțuri de ventilare naturală, care comunică cu suprafața.

Scenariile studiate în articol includ introducerea mecanică a aerului în stații și funcționarea la diferite capacități a centralei de extragere a aerului din mijlocul tunelului (în condițiile funcționării la capacitate normală de $120.000 \text{ m}^3/\text{h}$ a centralelor de introducere a aerului în cele două stații aflate la extremitățile tunelului). Aceste scenarii sunt studiate atât cu un tren ce parcurge distanța dintre stații, cât și cu două trenuri ce se deplasează simultan. Rețeaua de discretizare folosită este dinamică, pentru a putea fi simulat efectul de piston indus de tren. Au fost analizate câmpurile de viteză ale aerului și distribuția presiunii aerului prin tunel și printr-un puț de ventilare naturală din apropierea unei stații. Studiul a concluzionat că amplitudinea efectului de piston, în configurația studiată, este influențată de extracția mecanică centrală. Debitul de aer instantaneu generat de efectul de piston poate ajunge la 50% din debitul total al sistemului de ventilare, în funcție de schema de evacuare mecanică utilizată. Pentru a beneficia maxim de fluctuațiile de presiune induse de mișcarea trenului, sistemul de ventilare ar trebui folosit astfel încât mișcările aerului induse de tren să fie accentuate de ventilarea mecanică. Pentru aceasta ar fi nevoie de ventilație dependentă de poziția trenului și direcția sa de mișcare. Puțurile de ventilare naturală din mijlocul tunelului sunt foarte eficiente în realizarea schimbului de aer cu exteriorul, în special în cazul stațiilor care nu sunt dotate cu PSD. Acestea mai prezintă și avantajul reducerii puterii de tracțiune necesară deplasării trenului. S-a estimat că poate fi economisită 3% din energia necesară deplasării trenului dacă sunt construite aceste puțuri de ventilare naturală. Având în vedere că efectul de piston este mai accentuat în cazul tunelurilor simple față de cele duble, și eficiența puțurilor de ventilare naturală este mai mare în cazul tunelurilor simple. Efectul puțurilor de ventilare naturală se face simțit și atunci când vine vorba de confortul pasagerilor ce se află în stațiile de așteptare, unde au fost măsurate fluctuațiile de turbulență ale aerului generate de apropierea trenului și s-a constatat că acestea nu depășesc 4-5%, fără a compromite astfel confortul oamenilor de pe platforma de așteptare.

Asemenea articolului precedent, și cel publicat de Huang et al. [38] este bazat pe metodă de studiu CFD cu rețea de discretizare dinamică, ceea ce îi permite să acorde o atenție deosebită efectului de piston al trenului de metrou asupra mișcării aerului prin conductele de ventilare (ventilare naturală organizată).

Se consideră două variante de realizare a tubulaturii de ventilare, și anume cu 3 tuburi de ventilare montate individual pe cele două tuneluri, sau 3 tubulaturi comune pentru cele două tuneluri (sensuri de mers). De asemenea, sunt luate în calcul două variante în ceea ce privește separarea tunelurilor: cu goluri în perete la fiecare 200 de m sau cu perete lipsa pe o anumită porțiune la același interval. De menționat că zidul despărțitor al celor două sensuri de mers este neîntrerupt în dreptul gurilor de ventilare.

Concluziile studiului afirmă că cel mai mare debit de aer este vehiculat în cazul tunelurilor separate de zid cu perete întrerupt la interval de 200 de m și cu tubulaturi individuale, apoi în cazul tunelurilor cu goluri în perețele despărțitor și cu tubulaturi individuale, cel mai mic debit fiind înregistrat în cazul tubulaturii comune și cu goluri practicate în perețele despărțitor, între cele două sensuri de mers.

În cazul simulărilor cu zid despărțitor și goluri practicate între sensuri, circulația aerului pe sensul celălalt de mers este mai puțin afectată de circulația aerului din tunelul în care circulă trenul, rezultând o creștere a vitezei aerului prin conductele corespunzătoare tunelului prin care circulă trenul și o accentuare a efectului de piston.

Guo și Zhang [39] au realizat un studiu comparativ între rezultatele formulelor empirice, ale experimentelor și ale simulărilor numerice realizate în FDS și Fluent pentru a determina valoarea critică a ventilării longitudinale dintr-un tunel. Atenția lor s-a îndreptat spre două tipuri de tuneluri, mai înguste sau mai late de 0,25 m. Studiul lor arată că în cazul tunelurilor înguste, cu lățime de 0,25 m, FDS s-a abătut de la predicțiile celorlalte metode de determinare a vitezei critice, calculând valori mult mai mari. Acest aspect este lipsit de importanță dacă ne gândim că nici un tunel de metrou nu ar putea avea această lățime. În ceea ce privește experimentele și simulările realizate pe tuneluri de dimensiuni normale, rezultatele au fost foarte apropiate, demonstrând validitatea metodelor CFD de calcul a parametrilor incendiului, precum și a formulei de calcul analitic propusă de cercetători.

Xi și Hu [40] studiază efectul curentului de aer asupra dezvoltării incendiului unui tren care se deplasează prin tunel. Având în vedere că procedurile de urgență ale unor țări prevăd ca în cazul unui incendiu trenul să se deplaseze până la cea mai apropiată stație, este important de studiat care este viteza optimă de deplasare astfel încât incendiul să evolueze cât mai puțin. Studiul a fost realizat pe un model la scară 1/8 și simulare numerică în STAR CCM+. Potrivit rezultatelor experimentale, viteza optimă de deplasare a trenului, la care HRR, temperatura și concentrația de CO sunt minime, este de aproximativ 42 km/h, corespunzătoare unui efect de piston de 19 km/h. Potrivit simulărilor realizate în STAR CCM+, în care au putut fi încercate cu ușurință mai multe variații ale parametrilor (viteză de deplasare a trenului, HRR), viteza optimă este de 45 km/h, prezentând astfel o variație de doar 4% față de rezultatele experimentale.

Articolul lui Wu et al. [41] se bazează pe simulare numerică în FDS și studiază o configurație de stație de metrou cu 2 niveluri, formată din lobby și platformă de așteptare. Instalația de ventilare mecanică este folosită doar pentru introducerea aerului proaspăt, evacuarea aerului și a fumului (în situații de urgență) realizându-se prin puțuri de ventilare naturală. Stația mai dispune în plus de bariere de fum, montate la nivelul scărilor care asigură accesul de la platformă spre lobby. Se pornește de la premisa că în cazul unui incendiu sistemele de ventilare forțată ar putea să nu funcționeze sau ar putea fi folosite greșit din cauză că personalul de serviciu nu poate identifica corect focarul. Prin urmare se studiază posibilitatea folosirii ventilării naturale în situații de urgență.

În cazul focarului de incendiu situat în lobby, cu o putere de 3 MW, factorii care influențează cel mai mult eficacitatea ventilării naturale sunt suprafața totală de ventilare și înălțimea puțului de ventilare. Efectul de coș nu poate fi obținut de la acest nivel din cauza înălțimii reduse a tunelului. O atenție deosebită trebuie acordată fenomenului de absorbție a aerului împreună cu fumul din lobby, cauzat de o suprafață prea mare a gurii tunelului.

În situația în care focarul incendiului se află la nivelul platformei de așteptare, a fost propusă soluția tunelurilor multietajate, care se întrerup la nivelul lobby-ului. Eficiența lor depinde foarte mult de poziția focarului de incendiu, cea mai eficientă distribuție a lor trebuind să cuprindă neapărat și zona învecinată scărilor. Pentru obținerea unui efect de coș mai puternic, trebuie ca barierele de fum să aibă o înălțime cât mai mare și toate ușile PSD să fie închise. Rata de evacuare a fumului folosind această metodă este mai mare decât rata minimă impuse de standardele din China (unde a fost făcut studiul), prin urmare concluzia studiului este că se poate realiza evacuarea fumului și în lipsa ventilării mecanice.

Luo et al. [42] au studiat modul de interacțiune al instalației de ventilare mecanică cu ventilarea naturală pe o configurație de stație de metrou pe 3 niveluri (subsol 2, subsol 1 și lobby cu atrium central cu posibilitate de deschidere – ventilare naturală). Studiul cuprinde o parte experimentală folosind o machetă a stației la scară 1/50 (și scalare Froud pentru reducerea parametrilor incendiului), precum și pe simulare numerică folosind FDS. Primul scenariu al cercetării a presupus că focarul de incendiu este situat la nivelul lobby-ului și are o putere (HRR) de 800 kW (0,045 kW în cazul machetei). Gurile de ventilare (introducerea aerului la nivelul lobby-ului) au fost închise, ușile de ieșire din stație deschise și a variat dimensiunea deschiderii din dom. Rezultatele simulării sunt aproape identice cu cele ale experimentului la scară, parametrul măsurat fiind temperatura.

A doua simulare (care nu mai implică folosirea modelului la scară) a urmărit concentrația de CO, în cazul aceluiași incendiu de la nivelul lobby-ului, de sub dom, fără ventilare naturală. Au fost urmărite diferențele între scenariul fără ventilare de nici un fel (scenariul de referință), scenariul cu pornirea extracției fumului prin instalația mecanică de la nivelul lobby-ului, ipoteza anterioară plus introducerea de aer proaspăt la nivelul 2 și ipoteza anterioară plus introducerea de aer proaspăt la nivelul 3. Rezultatele arată o scădere a concentrației de CO o dată cu pornirea ventilării mecanice și a introducerii de aer proaspăt la nivelul celor două platforme subterane, creându-se astfel o suprapresiune ce împiedică CO să coboare la nivelul platformelor de așteptare. Debitul de aer introdus la nivelul platformelor este aproximativ egal cu debitul de aer extras de la nivelul lobby-ului.

Următoarea simulare a urmărit aceleași cazuri ca cea precedentă, cu diferența că a fost inclusă și ventilarea naturală. Concluziile au fost aceleași. Prin următoarea serie de simulări a fost urmărit efectul dimensiunii deschiderii din dom asupra eficienței ventilării, corelat cu poziția focarului (în centrul stației, sub atrium sau în lateral). Concluzia este că o dată cu creșterea suprafeței deschiderii din atrium scade concentrația de CO (în cazul focarului de sub atrium). În cazul focarului lateral față de atrium, dependența este mai redusă.

Într-un alt articol bazat pe simulări numerice, Gao et al. [43] au folosit o configurație de stație de metrou cu două niveluri subterane și un lobby cu atrium, care prezintă și o deschidere pentru realizarea ventilării naturale. Pentru validarea modelului numeric construit, autorii au reprodus experimentele realizate de alți cercetători și au comparat 4 parametri ai incendiului (HRR, temperatura stratului de fum, înălțimea stratului de fum și concentrația de CO) obținuți din simulare cu valorile parametrilor obținuți experimental, valorile obținute prin cele două metode dovedindu-se a fi foarte apropiate.

Obiectivul studiului a fost de a verifica eficiența a două variante de ventilare hibridă: varianta 1 când instalația mecanică este folosită atât pentru introducerea de aer proaspăt la cele două niveluri subterane cât și pentru evacuarea de fum din lobby, și varianta 2 când instalația mecanică este folosită doar pentru extragerea fumului din stația de metrou. Simulările realizate vizează diferite mărimi ale deschiderii din atrium (de la 0 la 16 m²) precum și diferite viteze de evacuare a fumului prin instalația de ventilare.

În urma simulărilor realizate s-a constatat o scădere a concentrației de CO din atrium cu 57% dacă se folosește ventilarea hibridă față de cazul în care se folosește doar ventilarea mecanică, iar în restul lobby-ului concentrația de CO este de 3 ori mai mică în aceeași ipoteză.

Scăderea concentrației de CO este dependentă de mărimea deschiderii din acoperișul atriumului. Se observă de asemenea o relație invers proporțională între viteza de evacuare a fumului prin instalația mecanică și cantitatea de fum evacuată prin deschidere. Cu cât este mai mare viteza de extragere a fumului scade cantitatea de fum evacuată pe cale naturală, din cauză că forțele de ascensiune ale fumului trebuie să învingă depresiunea formată de instalația mecanică pentru a ajunge în atrium și a se evacua natural.

O atenție deosebită a fost acordată de Zhang L. et al. [44] modului de verificare a scenariilor de securitate la incendiu care implică evacuarea unui număr mare de persoane dintr-o stație de metrou cu un nivel subteran (platforma de așteptare) și un lobby. Autorii precizează că factorii care influențează cel mai mult evacuarea sunt: puterea incendiului (rata de dezvoltare a incendiului, cantitatea de fum, toxicitatea și HRR), caracteristicile constructive (planul, mărimea și compartimentarea) și factorul uman.

În acest studiu este propus un cadru integral de determinare a celui mai defavorabil scenariu în caz de incendiu, care include simulare numerică, timpul la dispoziție pentru evacuare în siguranță (ASET), timpul necesar pentru evacuare în siguranță (RSET) și analiză decizională bazată pe mai multe atribute (MADA). Astfel, simulările numerice sunt folosite pentru a studia evoluția incendiului în tot cuprinsul construcției, iar analiza multi-atributară MADA este folosită pentru estimarea ASET și evaluarea evacuării în nodurile critice, realizându-se astfel o evaluare mai complexă a riscului de incendiu în diferite scenarii. Condițiile minime necesare pentru ca evacuarea oamenilor să se facă în siguranță, potrivit criteriilor impuse de legislația din China, sunt: temperatura fumului mai mică de 140 °C, concentrația de CO din aer să fie mai mică de 1500 ppm și vizibilitatea să fie de minim 10 m.

Pentru identificarea celui mai defavorabil scenariu de securitate la incendiu este folosită simularea numerică și este luat ca și studiu de caz o stație de metrou din China pe care sunt alese 4 scenarii de incendii. Primul scenariu presupune un incendiu la nivelul platformei, la baza uneia dintre scările care face legătura cu nivelul superior. Scenariul al doilea presupune că focarul de incendiu este situat la nivelul lobby-ului, în dreptul unei scări ce coboară spre platforma de așteptare, iar scenariul al treilea vizează un focar de incendiu situat la una din ieșirile din stația de metrou. În toate cele trei scenarii puterea focarului de incendiu era de 2 MW, scenariul 4 fiind singurul care presupune un focar cu o putere de 3 MW situat la nivelul lobby-ului, în dreptul unei scări ce face legătura cu platforma de așteptare. Cel mai defavorabil scenariu s-a dovedit a fi ultimul dintre cele studiate, în care timpul avut la dispoziție pentru realizarea evacuării era mai mic decât timpul necesar acestei operațiuni.

Pentru validarea rezultatelor a fost efectuat și un experiment in-situ, în stația de metrou folosită ca model pentru realizarea modelului numeric, unde a fost generat un focar de incendiu de 2 MW și s-a constatat că parametrii incendiului urmăriți în simulare au valori foarte apropiate de cele măsurate în timpul experimentului, dovedind încă o dată că rezultatele modelelor numerice se apropie foarte mult de rezultatele experimentale.

În cazul trenurilor de metrou incendiate care reușesc să ajungă până în stație pentru a facilita evacuarea călătorilor, se pune problema ventilării cât mai rapide a fumului folosind instalațiile de ventilare din stația respectivă. Dacă există mai multe sisteme de ventilare, cum ar fi instalația de introducere/evacuare aer proaspăt de la nivelul platformei de așteptare, instalația de evacuare a aerului încălzit de la partea inferioară a tunelului – nivelul șinelor de tren și instalația de evacuare a fumului din tavanul tunelurilor, modul de funcționare al acestora trebuie foarte bine stabilit astfel încât să nu favorizeze o propagare și mai rapidă a fumului în stație. Folosind soft-ul special Fire Dynamic Simulator (FDS), Hu et al. [9] au realizat o serie de simulări pentru a determina modul cel mai eficient de interacțiune a instalațiilor de ventilare dintr-o stație de metrou din China. Pentru aceasta au studiat modul de propagare a fumului în patru scenarii diferite, astfel: scenariul 1 - când pornește doar instalația de extracție a fumului de la partea superioară a tunelului, scenariul 2 - când funcționează simultan instalația de la partea superioară și cea de la partea inferioară, de la nivelul șinelor de tren, scenariul 3 - când pornește instalația de extracție a fumului de la partea superioară a tunelului iar instalația de la nivelul platformei extrage fumul și scenariul 4 - când pornește instalația de extracție a fumului de la partea superioară a tunelului iar instalația de la nivelul platformei introduce aer proaspăt, pentru a crea o suprapresiune și a nu permite fumului să ocupe întreaga platformă pe unde se evacuează de urgență călătorii. În urma analizării distribuției de temperaturi și a vizibilității pe platforma de așteptare, autorii au concluzionat că varianta care asigură o temperatură maximă în stratul de fum de 600 °C și o vizibilitate bună la o înălțime de 1,8 m (condițiile necesare pentru evacuarea călătorilor) este cea în care funcționează instalația de extracție a fumului de la partea superioară a tunelului și cea de la nivelul platformei – scenariul 3. Aceste rezultate nu sunt în conformitate cu abordarea clasică, prin care se presupunea că este mai eficientă soluția cu introducerea aerului prin sistemul de

ventilare al platformei pentru a crea suprapresiune și a nu permite fumului să se propage în această direcție, simulările numerice arătând clar că această procedură nu face altceva decât să scadă vizibilitatea pe platformă și să reducă drastic planul neutru al fumului.

Eficiența sistemelor de ventilare în situații de urgență este judecată de cele mai multe ori prin viteza cu care acestea asigură evacuarea fumului din spațiul incendiat. O viteză prea mică ar face imposibilă evacuarea fumului în timp util, iar o viteză prea mare duce la supradimensionarea instalației și implicit creșterea costurilor de funcționare a acesteia. Pentru a determina viteza optimă de evacuare a fumului dintr-o stație de metrou, Zhang et al. [45] au efectuat simulări utilizând FDS, prin care au testat eficiența instalației de evacuare a fumului la mai multe viteze de operare (3...10 m/s). Validarea rezultatelor numerice s-a realizat printr-un experiment la scară pentru o stație de metrou construită pe două niveluri. Graficele de variație a temperaturii și cele ale vitezei aerului diferă foarte puțin de la simulare la experiment și sugerează faptul că viteza optimă de evacuare a fumului este de 8 m/s, deoarece 7,5 m/s nu asigură aerisirea spațiului inundat cu fum în 360 de secunde, iar viteza de 10 m/s nu oferă o diferență semnificativă față de cea de 8 m/s astfel încât să justifice un debit de aer mărit (și implicit un consum de energie mult mai mare).

Articolul publicat de Wu et al. [46] studiază distribuția temperaturii într-o stație de metrou cu un singur nivel subteran – platforma de așteptare, construită ca un dom fără planșeu despărțitor cu lobby-ul de la nivelul parterului. Sunt luate în considerare 3 poziții ale focarului de incendiu, fiecare dintre ele cu 5 valori diferite ale ratei de eliberare a căldurii. Temperaturile obținute în aceste simulări sunt comparate cu valorile obținute din calcule empirice ale lui cercetătorilor Alpert, Heskestad și McCaffrey rezultatele sunt foarte apropiate. De asemenea, au fost realizate grafice cu profilele longitudinale ale temperaturii fumului sub plafon, fiind propuse ecuații de descriere a parabolilor rezultante prin combinații ale diferitelor modele identificate în literatură (Li, Heskestad, McCaffrey).

În cazul focarului de incendiu situat în mijlocul platformei, datorită particularităților constructive ale stației, fumul se ridică până la tavanul lobby-ului, iar profilele longitudinale de temperatură pot fi determinate cu relația propusă de Li și McCaffrey:

$$\Delta T_x = 0,0761 \left(\frac{H}{Q^{\frac{2}{5}}} \right)^{-5/3} T_{\infty} (0,607 e^{-2,12x} + 0,413 e^{-0,07x})$$

Unde,

ΔT_x reprezintă creșterea temperaturii fumului la poziția "x" [K],

H este înălțimea până la plafonul lobby-ului [m],

Q este rata totală a eliberării de căldură [kW],

T_{∞} este temperatura ambientală [K].

Pentru al doilea scenariu, când focarul de incendiu se află în apropierea peretelui platformei de așteptare, fumul se ridică până la nivelul planșeului de la parter, după care începe o

deplasare laterală fiind restrâns și de cortinele de fum montate la nivelul tavanului platformei. Relația matematică propusă pentru descrierea distribuției temperaturii fumului în acest caz este o combinație a două relații anterioare propuse de Li și Heskestad:

$$\Delta T_x = 25 \left(\frac{Q_c^{2/5}}{H - z_0} \right)^{5/3} (0,46 e^{-2,55x} + 0,552 e^{-0,075x})$$

Unde,

Q_c este rata convectivă a eliberării de căldură [kW],

z_0 este originea virtuală [m],

x este distanța de la sursa de incendiu [m].

Al treilea scenariu este asemănător cu cel anterior, cu diferența că distanța de la zid la cortina de fum este mai mare, motiv pentru care durează mai mult până când fumul ajunge să aibă o curgere unidimensională.

Relația matematică potrivită pentru acest scenariu este o combinație a relațiilor determinate anterior de cercetătorii Li și Alpert:

$$\Delta T_x = \frac{16,9 Q^{2/3}}{H^{5/3}} (0,299 e^{-2,232x} + 0,713 e^{-0,108x}) \quad (x \leq 3,33)$$

$$\Delta T_x = \frac{16,9 Q^{2/3}}{H^{5/3}} \left(0,337 \left(\frac{H}{L} \right)^{1/3} e^{-0,079x \left(\frac{L}{H} \right)^{1/3}} \right) \quad (x \geq 3,33)$$

Unde L este lățimea tavanului [m].

Un alt studiu bazat pe experiment și simulare în FDS a fost realizat de Lee et al.[7] într-o stație de metrou din Tokio, formată dintr-un singur nivel subteran - platforma de așteptare. Scenariul propus în studiu viza incendiu la magazinul de la nivelul platformei de așteptare, pentru realizarea experimentului fiind folosite șase surse de metanol, de 80 kW fiecare.

Configurația studiată de stație de metrou este de platformă de așteptare și lobby, cu sistem de ventilare mecanică care în funcție de necesități introduce sau evacuează aerul din stație. Au fost măsurate temperaturile și concentrațiile de CO din stratul de fum în diferite puncte de pe platformă, de pe scară și de la nivelul parterului. Aceste valori au fost comparate cu cele ale simulării numerice din FDS, iar rezultatele au prezentat diferențe de maxim 10°C. Modelul numeric fiind astfel validat, autorii studiului au mers mai departe și au simulat incendii de puteri mai mari, pe perioade mai lungi de timp, în care au putut observa efectul ventilării mecanice și a cortinelor de fum instalate la nivelul platformei de așteptare. Fără să funcționeze sistemul de ventilare și să fie folosite cortinele de fum, ambele niveluri ale stației de metrou au fost inundate cu fum în aproximativ 400 s, lucru care nu s-a mai întâmplat atunci când au fost pornită ventilația. Autorii studiului au putut astfel demonstra eficiența măsurilor de reducere a efectelor incendiului din stația de metrou studiată.

Una dintre puținele simulări numerice realizate în Fluent pentru studiul metodelor de ventilare dintr-o stație de metrou este cel realizat de Yucel et al. [47]. Studiul lor vizează o configurație formată dintr-un tunel conectat la o stație/platformă de așteptare, în mijlocul

căreia este dispusă sursa de incendiu: o tavă rotundă cu polipropilenă. Au fost măsurate variațiile de temperatură și de viteză a fumului, deasupra și la diferite distanțe față de focar, în condițiile unei ventilări longitudinale de 0,1 respectiv 3 m/s în tunel. Viteza critică a fost determinată analitic la 1,4, respectiv 1,43 m/s, viteză care nu a fost atinsă în nici unul din cele trei cazuri studiate, având în vedere că viteza aerului scădea la intrarea din tunel în stația de metrou.

Temperatura cea mai mare deasupra focarului se înregistrează atunci când ventilația longitudinală este oprită, a doua se înregistrează cu o ventilație a aerului de 3 m/s și cea mai scăzută temperatură a putut fi observată la o ventilație a aerului de 1 m/s. Explicația pentru faptul că temperatura a crescut o dată cu creșterea vitezei aerului este că s-a realizat o oxigenare mai puternică a focarului, fapt ce a dus la intensificarea arderii și implicit creșterea temperaturii.

Valorile temperaturilor din stratul de fum obținute din simulări diferă de cele obținute experimental, cel mai probabil din cauza ipotezelor simplificatoare folosite (nu a fost luată în calcul radiația incendiului și pereții au fost considerați izotermi), dar mai ales din cauza modelului de turbulență ales ($k-\omega$ SST), care nu este indicat pentru acest tip de aplicații deoarece are probleme în prezicerea nivelurilor de turbulență și a curgerilor interne complexe și nu ține cont de efectul gravitației asupra fumului.

3.2 Sinteză și concluzii

Se poate observa că toate articolele descrise anterior folosesc simularea numerică ca și metodă de cercetare pentru a studia evoluția unor parametri specifici incendiilor în tuneluri și stații de metrou. În majoritatea articolelor simularea numerică este metoda principală de studiu, celelalte metode (analiză teoretică, experimente la scară redusă sau experimente la scară reală) fiind folosite pentru validarea rezultatelor obținute numeric. În același timp, un număr redus de articole folosesc simularea numerică ca și metodă secundară de studiu, pentru a compara rezultatele obținute anterior sau pentru a le vizualiza mai bine.

Tab. 4 centralizează articolele prezentate în acest capitol și scoate în evidență anumite aspecte legate de modul de realizare a studiului numeric, de validarea acestuia (acolo unde este cazul) și de configurația de tunel sau stație de metrou studiată. Parametrii urmăriți cel mai des sunt viteza critică, distanța de backlayering, temperatura maximă în stratul de fum și concentrația de CO.

Astfel, putem constata că 80% din simulări au o rețea de discretizare structurată, la fel cum 80% au realizat și o verificare a rețelei de discretizare înainte de realizarea studiului numeric propriu zis. De asemenea, 65% din articole folosesc ca și model de turbulență Large Eddy Simulation (LES), în timp ce 35% folosesc modelul K- ϵ standard sau forme modificate ale acestuia. În ceea ce privește validarea rezultatelor numerice, doar 60% sunt validate, dintre care 25% sunt validate prin experiment la scară redusă. În plus, doar 55% din articolele

studiate au ținut cont de transmiterea căldurii prin radiație, celelalte folosind forme simplificate de calcul pentru aproximarea acestei cantități de căldură.

Tab. 4 Tabel centralizator al studiului documentar privind soluțiile eficiente de ventilare în situații de urgență în stații și tuneluri de metrou

Nr.de referință	Rețea de discretizare	Verificare independență rețea	Curgere strat limită	Model de turbulență	Software folosit	Validare rezultate	Metodă analitică	Experim. anterioare	Experim. în cadrul studiului	Parametrii urmăriți	Putere focar [kW]	Radiație	Configurație studiată	Poziție focar
26	structurat	da	-	LES	FDS	da	da	-	scară redusă	Temperatură Vizibilitate Concentrație CO	7,5	da	Tunel simplu și dublu, în pantă	În punctul cel mai de jos al tunelului
27	structurat	da	-	LES	FDS	nu	-	-	-	Temperatură, Viteza critică	16,7	da	Tunel cu tren oprit în tunel	Înainte și după blocajul din tunel
28	nestructurat	da	standard wall function	k-ε turb model	Fluent 15.0	nu	-	-	-	Temperatură Concentrație CO Viteza aer	30 MW	da	2 stații de metrou și tunelul dintre ele	Tren incendiat în tunel
29	structurat	da	-	LES	FDS	nu	-	-	-	Temperatură Concentrație CO	4	nu	Tunel simplu la altitudine	În mijlocul tunelului
30	structurat	da	-	LES	FDS	da	da	-	scară 1:10	Viteză aer ventilat, Temperatură fum Backlayering	5 7,5	nu	Tunel simplu	În mijlocul tunelului
31	structurat	da	-	LES	FDS	nu	-	-	-	Viteza evacuare fum și timp de ventilare a fumului	7,5	nu	Tunel simplu	La distanțe diferite față de intrare
32	structurat	da	-	LES	FDS	da	-	da	-	Viteză aer Temperatură max	5 7.5 10	da	Tunel cu sistem de ventilare longitudinală	Comp.electric al trenului, în tunel
33	structurat	da	non-slip condition	LES	FDS	da	-	da	-	Viteză aer Temperatură max	8, 18, 30, 50 și 100	da	Tunel cu sistem de ventilare longitudinală	În tunel
35	nestructurat	da	standard wall function	RNG k-ε turbulent model	Fluent	da	-	da	-	Temperatură fum Viteză critică Backlayering	10	nu	Tunel simplu	În mijlocul și în lateralul tunelului
37	structurat, dinamic	da	-	k-ε turb model	Fluent	-	-	-	-	Presiune statică, Suprapresiune, Debite de aer, Viteze ale aerului	-	nu	Tunel cu puțuri de aerisire	-
38	structurat, dinamic	da	-	standard k-ε	Fluent	da	-	da	-	Viteză aer Presiune aer	-	nu	Tunel dublu cu puțuri de ventilare naturală	-
39	structurat/nestructurat	-	-	LES și RNG k-ε model	FDS și Fluent	da	da	da	-	Viteza critică	-	nu	Tunel simplu	La distanțe diferite față de intrare
40	nestructurat	da	nonslip condition	buoyancy-modified RNG k-ε	STAR-CCM+	da	-	-	scară 1:8	Temperatură Viteză aer Concentrație O2	5 6	da	Tunel cu sistem de ventilare mecanic	Tren incendiat în mers
41	structurat	da	-	LES	FDS	nu	-	-	-	Temperatură, Vizibilitate Concentrație CO	3	nu	Stație cu platformă și lobby	3 poziții diferite în stație
42	structurat	-	-	LES	FDS	da	-	-	scară 1:50	Temperatură, Concentrație CO	5	da	Stație pe 3 niveluri	Diferite poziții în stație
43	structurat	da	-	LES	FDS	da	-	da	-	Temperatură, Concentrație CO	7,5	da	Stație cu 2 niveluri subterane, 1 lobby și atrium	Incendiu în lobby
44	structurat	-	-	LES	FDS	nu	-	-	-	Temperatură, Vizibilitate Concentrație CO	2 3	da	Stație cu un nivel subteran și un lobby	4 poziții, atât în lobby cât și pe platformă
45	structurat	-	-	LES	FDS	da	-	-	da	Temperatură, Vizibilitate Concentrație CO	2	da	Stație cu platformă și lobby	Lângă una dintre scări
46	structurat	da	-	LES	FDS	nu	-	-	-	Temperatură	2,5	da	Stație de metrou în stil atrium	3 locații diferite pe platforma de așteptare
47	nestructurat	da	nonslip condition	k-ω SST	Fluent	da	-	-	scară 1:10	Viteză aer ventilat Temperatură max	2 2,3	nu	Tunel și platformă de așteptare	Incendiu în mijlocul platformei

4. Studiu documentar privind evacuarea fumului din stații de metrou echipate cu uși de siguranță (PSDs/PEDs)

Ușile de siguranță sau *platform screen doors* (PSDs) au rolul de a crea o barieră fizică între platforma de așteptare și tunelul prin care circulă trenurile. Acestea sunt realizate în cea mai parte din plexiglas ranforsat și cadru metalic, întinzându-se de la podea până la tavan, în cazul celor de tip PSD, sau pot avea o înălțime mai redusă, în acest caz fiind vorba de *platform edge doors* (PEDs).

Deși au început să fie instalate în 1987, există foarte puține studii referitoare la siguranța lor în exploatare în cazul unui incendiu, în special modul în care influențează sistemul de ventilare de urgență.

4.1 Articole studiate

În articolul publicat de Chen et al. [5], autorii studiază efectul ușilor de tip PEDs asupra evacuării fumului dintr-o stație de metrou din Taipei. Stația folosită ca model pentru simulările numerice are două niveluri subterane, cu platforma de tip insulă și un lobby din care se face legătura cu exteriorul. Pentru a da impresia de spațiu mai mare, planșeul despărțitor dintre cele două niveluri a fost înlăturat în centrul stației, aspect care îngreunează evacuarea fumului în situații de urgență. Stația este dotată cu sistem de ventilare a tunelului care aspiră aerul din tunel și îl refulează la suprafață, inducând în tunel o viteză de mișcare a aerului de 5 m/s, sistem de ventilare a aerului de sub platformă, care preia aerul încălzit și poluat de la nivelul șinelor de tren și sistemul de evacuare a fumului de la nivelul lobby-ului, format din 8 ventilatoare uniform distribuite care induc o viteză de mișcare a aerului de aproximativ 2 m/s. În cazul unui incendiu, persoana responsabilă din centrul de comandă decide care sisteme trebuie pornite, în funcție de poziția focarului și de dezvoltare sa.

Primul scenariu de incendiu a presupus un focar de incendiu în partea dreaptă a lobby-ului, fumul evacuându-se natural, datorită efectului de coș, pe cele două scări care fac legătura cu exteriorul. Același efect contribuie la evacuarea fumului și în cazul focarului de incendiu localizat în extremitatea stângă/dreaptă a platformei de așteptare. Dacă focarul de incendiu este poziționat în centrul platformei, fumul se răspândește la nivelul lobby-ului și pune în pericol viața călătorilor, chiar dacă este activat sistemul de evacuare a fumului de la acest nivel. Dacă sunt activate simultan și celelalte două sisteme de evacuare a fumului, răspândirea acestuia este limitată la zona centrală a platformei și nu mai pune în pericol evacuarea călătorilor pe cele 4 scări către lobby. Acest lucru se datorează în cea mai mare parte faptului că sistemul de ventilare a tunelului și sistemul de ventilare de sub platformă generează un curent descendent de aer de la lobby spre platformă, prin aspirația aerului de la nivelul platformei.

Studiul a verificat de asemenea ipoteza în care sunt instalate uși PSD și a propus ca mod de îmbunătățire a strategiei de ventilare deschiderea a doar 8 uși în dreptul focarului de incendiu, concomitent cu pornirea celor două sisteme de ventilare din tunel. În acest fel se

accentuează forța de aspirație a aerului din stație în tunel, realizând într-un timp mai scurt evacuarea fumului.

În cazul unui incendiu de tren oprit în stație, chiar dacă toate ușile PSD sunt deschise pentru evacuarea de urgență a călătorilor din tren pe platformă, simpla instalare a ușilor are un efect major asupra împiedicării propagării fumului pe platformă, datorită forme constructive a acestora. Fumul reținut în acest fel în tunel nu pune în pericol viața oamenilor și este apoi evacuat prin sistemul de ventilare al tunelului.

Un studiu comparativ între eficiența ușilor de tip PSDs și PEDs a fost realizat de Meng et al. [48]. Aceștia au realizat un experiment la scară redusă și simulări numerice pentru a determina temperatura maximă în stratul de fum și distribuția longitudinală a temperaturii în tunel în cazul unui incendiu la un tren în tunel. În acest fel au putut observa că în cazul instalării ușilor de tip PEDs temperatura maximă în stratul de fum este mai mică și scăderea temperaturii în plan longitudinal este mai accentuată, cel mai probabil din cauză că fumul se răspândește sub tavanul platformei de așteptare.

În cazul în care ușile de tip PEDs au deasupra perdele de fum care pot coborî în situația unui incendiu, acestea se comportă asemănător cu ușile PSDs. Acest lucru a fost cercetat de Meng et al. [49] folosind analiză numerică, pentru scenariul unui tren incendiat în stație. Studiul lor arată că cele mai bune rezultate de evacuare a fumului sunt obținute dacă este activat sistemul de introducere a aerului din lobby, sistemul de evacuare a aerului de la nivelul platformei și sistemul de evacuare a aerului din tunel, concomitent cu dezactivarea sistemului de evacuare de sub platformă și a sistemului de introducere a aerului de la nivelul platformei. Această strategie de ventilare a generat cele mai bune rezultate de evacuare a fumului din cele investigate, indiferent de tipul de uși folosite.

Li și Zhu [50] au studiat impactul pe care îl au ușile PSDs asupra evacuării fumului în cazul unui incendiu izbucnit în centrul platformei de așteptare. În mod normal, dacă nu este un tren în stație din care să fie debarcați/îmbarcați călători, ușile PSDs sunt închise, reducând mult spațiul în care se poate dispersa fumul. Prin deschiderea ușilor de ambele părți ale platformei tip insulă, fumul este aspirat în sistemul de defumare al tunelului, îmbunătățind vizibilitatea în stație și scăzând temperatura stratului de fum, îmbunătățind astfel condițiile de evacuare a călătorilor.

Hu et al. [9] au investigat cel mai eficient mod de cooperare a instalațiilor de evacuare a fumului de la nivelul tunelului și a platformei unei stații de metrou, în cazul unui incendiu de tren oprit în stație. Stația este dotată cu uși de tipul PSDs care sunt deschise pentru debarcarea de urgență a călătorilor. Autorii studiului au analizat și au comparat distribuția temperaturii fumului și a vizibilității pe platformă și au ajuns la concluzia că cea mai bună strategie de ventilare este asigurată de activarea sistemului de aspirație din tavanul tunelului și a sistemului de aspirație de la nivelul platformei, concomitent cu dezactivarea sistemului de evacuare a aerului de sub platformă.

Efectul sistemelor PSD/PED asupra evacuării fumului dintr-o stație de metrou a fost studiat și de către Wang et al. [51], prin realizarea a 24 de simulări corespunzătoare unui număr la fel de mare de scenarii posibile, generate de folosirea alternativă a sistemelor de ventilare. Cele mai bune soluții de evacuare a fumului pentru configurația analizată au fost obținute prin optimizarea închiderii/deschiderii ușilor PSD și a ușilor de la capătul platformei de metrou, corelat cu folosirea dispozitivelor de ventilare (de la nivelul etajului superior – lobby, de la nivelul platformei, deasupra liniilor de tren, de la nivelul liniilor de tren și a ventilatoarelor din tunelurile de metrou). De importanță deosebită s-a constatat a fi și introducerea aerului la nivelul etajului superior și extracția fumului la nivelul platformei și a liniilor de metrou. De asemenea, este mai eficient să nu fie pornite ventilatoarele de la nivelul liniilor de metrou dacă sunt deschise ușile PSD, dar se recomandă deschiderea lor când sunt deschise ușile de la capătul platformei de metrou. Prin urmare, închiderea/deschiderea ușilor PSDs/PEDs ține foarte mult de poziția focarului și sistemele de ventilare disponibile în stație, soluțiile de desfumare cele mai eficiente fiind determinate în funcție de scenariul de incendiu propus.

Tot în favoarea instalării ușilor PSD este și studiul publicat de Roh et al. [52] care, deși este mai simplist din punct de vedere al modelului creat și al scenariilor studiate, ajunge la aceeași concluzie: cea mai lungă perioadă de timp până la atingerea unor condiții care să nu mai permită evacuarea în siguranță a persoanelor se obține în cazul folosirii simultane a sistemelor de tip PSD și a sistemelor de ventilare (din tunel și de pe platformă). Un aspect important de luat în considerare este faptul că ușile PSD aflate în imediata apropiere a focarului din tren au fost programate să se "spargă" după 90 de secunde, timp în care nu au permis propagarea fumului în stația de metrou. În cazul folosirii ușilor PSD și a sistemelor de ventilare, timpul disponibil pentru evacuare crește cu 350 s față de scenariul fără uși PSD și fără ventilare (pentru configurația studiată).

O strategie de ventilare mai puțin studiată este ventilarea naturală, care face subiectul studiului realizat de Wu et al. [53]. Aceștia au propus un model de ventilare naturală pentru o stație de metrou cu două niveluri subterane și sisteme de uși PSDs. Rezultatele lor au arătat că factorii cei mai importanți pentru o ventilare eficientă a lobby-ului sunt suprafața totală ventilată și înălțimea puțului de ventilare. Cu cât sunt mai înalte puțurile cu atât este mai accentuat efectul de coș și crește astfel debitul de fum evacuat. Pentru ventilarea platformei este propus un sistem de puțuri defazate, care asigură formarea efectului de coș necesar evacuării fumului fără a fi nevoie de construcții continue care să parcurgă lobby-ul pentru a face legătura platformei cu exteriorul. Pentru a întări efectul de coș de la nivelul platformei este nevoie însă ca ușile PSDs să fie închise și să nu permită aerului din tunel să afecteze presiunea negativă care se creează prin eliminarea fumului de la nivelul platformei.

Efectul ușilor PSDs asupra evacuării fumului și a poluanților în cazul unui incendiu într-o stație de metrou cu trei niveluri subterane a fost studiat de Jung et al. [54]. Aceștia au analizat 8 scenarii de urgență în care au variat condițiile de operare ale instalației de desfumare de la nivelul platformei și modul de închidere/deschidere al ușilor PSDs. Rezultatele simulărilor au demonstrat că prin deschiderea ușilor PSDs crește concentrația de CO care ajunge în camera

de așteptare (nivelul cel mai de sus al stației), precum și gradul de răspândire al poluantului în întreaga stație.

4.2 Sinteză și concluzii

Numărul de articole referitoare la ventilarea fumului în situații de urgență din stațiile de metrou prevăzute cu uși PSDs este mic, în special datorită faptului că cercetătorii și-au îndreptat atenția asupra altor aspecte ce țin de confortul persoanelor din stație, a gradului de poluare a aerului, a izolării fonice a ușilor PSDs etc.

În Tab. 5 au fost centralizate articolele prezentate în acest capitol și au fost puse în evidență unele aspecte ce țin de modul de realizare a simulării numerice, validarea rezultatelor obținute, parametri urmăriți în simulare și configurația stațiilor de metrou studiate. Cei mai urmăriți parametri sunt temperatura maximă din stația de metrou, viteza aerului ventilat, limita de vizibilitate și concentrațiile de CO.

Astfel, putem observa că 88% din studii folosesc o rețea de discretizare structurată, 55% au efectuat o verificare a independenței rețelei de discretizare, 77% folosesc ca modelul de turbulență LES, 66% nu au validat rezultatele prin nici o altă formă de studiu, în timp ce 22% au realizat experimente la scară redusă pentru validarea rezultatelor obținute numeric.

Tab. 5 Tabel centralizator al studiului documentar privind evacuarea fumului din stații de metrou echipate cu uși de siguranță (PSDs/PEDs)

Nr.de referință	Rețea de discretizare	Verificare independență rețea	Model de turbulență	Software folosit	Validare rezultate	Metodă analitică	Experimente anterioare	Experiment în cadrul studiului	Parametrii urmăriți	Putere focar [MW]	Configurație studiată	Tip de uși	Poziție focar
5	structurată	-	Standard k-e	CFX4	nu	-	-	-	Viteză fum Temperatură fum Concentrație CO	5 10	Stație de metrou cu un nivel subteran	PSD și PED	3 poziții pe platformă plus tren incendiat
9	structurată	-	LES	FDS	nu	-	-	-	Temperatură Viteză aer ventilat	2	Stație cu platformă	PSD	Tren incendiat în stație
48	structurată	-	LES	FDS	da	-	-	scară 1:10	Temperatura maximă Distribuția temperaturii	2 5	Tren incendiat în stație	PSD și PED	Tren incendiat în stație
49	structurată	da	LES	FDS	nu	-	-	-	Temperatură strat fum Limită vizibilitate	10	stație cu platformă subterană	PSD	Tren incendiat în stație
50	structurată	-	LES	FDS	da	da	-	-	Înălțime strat de fum Temperatura maximă	0,7	Stație cu platformă subterană	PSD	În mijlocul platformei, între scările spre parter
51	structurată	da	LES	FDS	nu	-	-	-	Distribuție temperatură Concentrație CO Înălțime strat de fum Limită vizibilitate	2,5	Stație cu platformă subterană	PSD	3 poziții diferite la nivelul platformei
52	structurată	da	LES	FDS	nu	-	-	-	Limită vizibilitate Timp de evacuare	35	Stație cu 3 niveluri	PSD	Tren incendiat în stație
53	structurată	da	LES	FDS	da	da	-	-	Înălțime strat fum viteza evacuare fum	3	Stație cu platformă subterană	PSD	3 poziții diferite la nivelul platformei
54	nestructurată	da	Standard k-e	ANSYS Fluent 13.0	nu	-	-	-	Temperatura maximă Distribuția CO	5	Stație cu platformă subterană	PSD	Pe platformă

5. Concluzii și perspective

Asigurarea securității la incendiu a rețelelor de metrou care sunt într-o continuă expansiune este o provocare atât pentru administratorii rețelelor cât și pentru mediul academic, care încearcă să țină pasul cu cerințele de dezvoltare și să propună soluții eficiente și moderne de prevenire și gestionare a consecințelor unei situații de urgență în acest tip de construcții.

Având în vedere provocările impuse de realizarea experimentelor la scară reală în tuneluri și stații de metrou, simulările numerice reprezintă soluția optimă de testare a strategiilor de ventilare propuse de ingineri pentru eficientizarea evacuării fumului în cazul izbucnirii unui incendiu.

Normativele de securitate la incendiu ale unor țări (Italia și SUA) impun realizarea de simulări CFD pentru verificarea scenariilor ce implică activarea sistemului de ventilare în situații de urgență, înainte de executare testelor *in-situ*. În acest fel pot fi alese pentru verificare în teren doar scenariile care pun probleme deosebite în desfumare, realizându-se astfel validarea rezultatelor numerice obținute anterior.

Majoritatea articolelor supuse atenției studiază parametrii incendiilor în tuneluri și folosesc modelarea numerică ca metodă principală de studiu, validarea rezultatelor fiind făcută prin analize teoretice, experimente la scară redusă sau, în foarte puține cazuri, experimente la scară reală. Rezultatele astfel obținute contribuie la dezvoltarea cunoștințelor generale în domeniu dar mai ales la identificarea de soluții de desfumare particularizate pentru configurațiile de stații și tuneluri studiate.

În ceea ce privește reglementarea utilizării ușilor de tip PSD/PED, singurul normativ care face referire la ele este NFPA 130 din SUA, menționând că acestea reprezintă o opțiune eficientă pentru asigurarea confortului în stație și a controlului fumului din tuneluri, dacă rezistența structurală și rezistența la foc sunt apropiate de cele ale garniturii de metrou. Este menționat însă faptul că trebuie acordată atenție accesului persoanelor din tunel pe platformă în cazul unui incendiu care presupune evacuare din tunel în stație și pregătite măsuri în acest sens.

Studiile numerice care implică utilizarea acestor sisteme ca parte integrantă a strategiei de ventilare sunt puține, ele fiind centrate pe identificarea soluției optime de închidere/deschidere a ușilor pentru realizarea unei ventilări eficiente a fumului, în vederea evacuării în siguranță a călătorilor din tren și din stație.

Concluzia studiilor este că simpla instalare a sistemelor de siguranță PSD contribuie la reducerea propagării fumului din tunel pe platformă (în situația unui incendiu la garnitura de tren), din cauza faptului că partea superioară a cadrului pe care sunt montate acționează ca o perdea de fum.

În plus, în situația unui incendiu pe platformă, prin deschiderea organizată a ușilor se poate accentua efectul de coș al casei scărilor (pentru o evacuare naturală a fumului), se poate forța evacuarea fumului într-o anumită parte a stației (prin activarea sistemului de evacuare a fumului din tunel și deschiderea unui număr limitat de uși pentru a crea un tiraj mai puternic) sau se poate limita accesul aerului proaspăt din tunel pentru a încetini propagarea incendiului.

Având în vedere numărul redus de articole referitoare la impactul instalării sistemelor de tip PSDs/PEDs asupra ventilării fumului în situații de urgență din stațiile de metrou, poate fi considerată oportună studierea acestor aspecte pe configurația rețelei de metrou din București, pentru identificarea celor mai bune soluții de corelare a funcționării instalației de desfumare cu deschiderea organizată a ușilor. De asemenea, în cazul reactualizării legislației interne specifice (din 2002, respectiv 2006), considerăm oportună prevederea obligativității de verificare a scenariilor de răspuns la incendiu prin realizarea unor simulări CFD de către instituțiile/operatorii specializați în acest sens.

6. Referințe bibliografice

- [1] UITP, "World Metro Figures 2014 Outlook and Focus on Automated Lines," no. October, 2015.
- [2] DIGI24, "Câți oameni au murit în incidente la metrou, în ultimii ani," 2017. [Online]. Available: <https://www.digi24.ro/stiri/actualitate/evenimente/incidente-la-metrou-in-perioada-2010-2017-844695>.
- [3] "48 People Were Killed by Subways in 2016, Lowest in 5 Years, MTA Says - Civic Center - New York - DNAinfo." [Online]. Available: <https://www.dnainfo.com/new-york/20170112/civic-center/hit-by-train-subway-mta-2016-year/>. [Accessed: 19-Nov-2018].
- [4] Wikipedia, "List of terrorist incidents involving railway systems," 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_terrorist_incidents_involving_railway_systems.
- [5] F. Chen, S. C. Guo, H. Y. Chuay, and S. W. Chien, "Smoke control of fires in subway stations," *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, vol. 16, no. 5, pp. 349–368, 2003.
- [6] M. Kumm, *Carried Fire Load in Mass Transport*. 2010.
- [7] D. G. N. S.R. Lee and S. Moriyama, "A Numerical Study on the Effect of Smoke Control Systems in Subway Station Fires," *Proc. 7th Asia-Oceania Symp. Fire Sci. Technol.*, pp. 1–10, 2007.
- [8] Murakami Haruki, *Underground: The Tokyo Gas Attack and the Japanese Psyche*. New York: Vintage Books, 2000.
- [9] L. Hu, L. Wu, K. Lu, X. Zhang, S. Liu, and Z. Qiu, "Optimization of emergency ventilation mode for a train on fire stopping beside platform of a metro station," *Build. Simul.*, vol. 7, no. 2, pp. 137–146, 2014.
- [10] Parlamentul României, *LEGE nr. 307 din 12 iulie 2006 privind apărarea împotriva incendiilor*. 2016, p. 25.
- [11] Ministerul Administrației și Internelor, "ORDIN nr. 163 din 28 februarie 2007 pentru aprobarea Normelor generale de apărare împotriva incendiilor," p. 25, 2007.
- [12] Ministerul Lucrărilor Publice Transporturilor și Locuinței, *Ordinul nr. 1065 din 30.07.2002 pentru aprobarea reglementărilor tehnice "Normativ pentru proiectarea construcțiilor și instalațiilor specifice de metrou privind prevenirea și stingerea incendiilor", indicativ NP 071-02*. 2002.
- [13] Ministerul Transporturilor Construcțiilor și Turismului, *Ordinul nr. 1287 din 10.08.2006 pentru aprobarea Normelor de prevenire și stingere a incendiilor, de dotare cu mijloace tehnice de prevenire și stingere a incendiilor și salvare a persoanelor, specifice Societății Comerciale de Transport cu Metroul Bucure*. 2006, p. 167.
- [14] S. Edge and P. Choiniere, "An Engineering Methodology for Performance-Based Fire Safety Design of Underground Rail Systems," no. May, 2014.
- [15] European Commission, *COMMISSION REGULATION (EU) No 1303/2014 of 18 November 2014 concerning the technical specification for interoperability relating to*

- 'safety in railway tunnels' of the rail system of the European Union*, vol. 2014, no. July. 2002, pp. 22–33.
- [16] The Minister of Interior, *Decree for approval of technical regulations for fire prevention in the design, construction and operation of metropolitan railways*. 2015.
 - [17] Minstere de l'interieur, *Instruction technique interministerielle relative a la securite dans les tunnels ferroviaires nr.98 300 din 8 iulie 1998*. 1998.
 - [18] Ministre de l'intérieur et de la décentralisation, *Arrêté du 20 février 1983 portant approbation des règles de sécurité et des modalités de contrôle applicables aux locaux accessibles au public, situés sur le domaine public de chemin de fer et rigoureusement indispensables à l'exploitation de celui-ci*. 1983.
 - [19] Singapore, *Standard for fire safety in rapid transit systems*. 2012, p. 137.
 - [20] NFPA, *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. 2010.
 - [21] Ministry of Land Infrastructure Transport and Tourism, *Technical Regulatory Standards on Japanese Railways*. 2012.
 - [22] R. K. Haddad, C. Maluk, E. Reda, and Z. Harun, "Critical Velocity and Backlayering Conditions in Rail Tunnel Fires: State-of-The-Art Review," *J. Combust.*, vol. 2019, no. May, 2019.
 - [23] L. H. Hu, R. Huo, H. B. Wang, and R. X. Yang, "Experimental and numerical studies on longitudinal smoke temperature distribution upstream and downstream from the fire in a road tunnel," *J. Fire Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 23–43, 2007.
 - [24] D. Purser, "Application of human behaviour and toxic hazard analysis to the validation of CFD modelling for the Mont Blanc Tunnel fire incident," *Fire Prot. Life Saf. Build. Transp. Syst. Work.*, no. October 2009, pp. 23–57, 2009.
 - [25] D. A. Purser, "Toxic hazard calculation models for use with fire effluent data," *Fire Toxic.*, pp. 619–636, 2010.
 - [26] X. Guo, X. Pan, Z. Wang, J. Yang, M. Hua, and J. Jiang, "Numerical simulation of fire smoke in extra-long river-crossing subway tunnels," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 82, no. January, pp. 82–98, 2018.
 - [27] M. Altay and A. Surmen, "Effect of the relative positions of vehicular blockage on the smoke flow behaviour in a scaled tunnel," *Fuel*, vol. 255, no. June, 2019.
 - [28] C. Teodosiu, V. Ilie, R. Dumitru, and R. Teodosiu, "Numerical Evaluation of Ventilation Efficiency in Underground Metro Rail Transport Systems," *Energy Procedia*, vol. 85, no. November 2015, pp. 539–549, 2016.
 - [29] F. Tang, L. H. Hu, L. Z. Yang, Z. W. Qiu, and X. C. Zhang, "Longitudinal distributions of CO concentration and temperature in buoyant tunnel fire smoke flow in a reduced pressure atmosphere with lower air entrainment at high altitude," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 75, pp. 130–134, 2014.
 - [30] M. cheng Weng, X. ling Lu, F. Liu, X. peng Shi, and L. xing Yu, "Prediction of backlayering length and critical velocity in metro tunnel fires," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 47, pp. 64–72, 2015.
 - [31] R. Harish and K. Venkatasubbaiah, "Effects of buoyancy induced roof ventilation

- systems for smoke removal in tunnel fires," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 42, pp. 195–205, 2014.
- [32] S. Zhang *et al.*, "Prediction of smoke back-layering length under different longitudinal ventilations in the subway tunnel with metro train," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 53, pp. 13–21, 2016.
 - [33] A. Kazemipour, H. Afshin, and B. Farhanieh, "Numerical–Analytical Assessment of Fire and Ventilation Interaction in Longitudinally Ventilated Tunnels Using Jet Fans," *Heat Transf. Eng.*, vol. 38, no. 5, pp. 523–537, 2017.
 - [34] S. Zhang *et al.*, "Numerical Investigation of Back-Layering Length and Critical Velocity in Curved Subway Tunnels with Different Turning Radius," *Fire Technol.*, vol. 53, no. 5, pp. 1765–1793, 2017.
 - [35] F. Wang and M. Wang, "A computational study on effects of fire location on smoke movement in a road tunnel," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 51, pp. 405–413, 2016.
 - [36] M. G. Vega, K. M. Argüelles Díaz, J. M. Fernández Oro, R. B. Tajadura, and C. Santolaria Morros, "Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Memorial Tunnel case," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 23, no. 5, pp. 539–551, 2008.
 - [37] M. López González, M. Galdo Vega, J. M. Fernández Oro, and E. Blanco Marigorta, "Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 40, pp. 22–37, Feb. 2014.
 - [38] Y. D. Huang, C. Li, and N. C. Kim, "A numerical analysis of the ventilation performance for different ventilation strategies in a subway tunnel," *J. Hydrodyn.*, vol. 24, no. 2, pp. 193–201, 2012.
 - [39] X. Guo and Q. Zhang, "Analytical solution, experimental data and CFD simulation for longitudinal tunnel fire ventilation," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 42, pp. 307–313, 2014.
 - [40] Y. H. Xi, J. Mao, G. Bai, and J. W. Hu, "Safe velocity of on-fire train running in the tunnel," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 60, pp. 210–223, Nov. 2016.
 - [41] F. Wu, J. Jiang, R. Zhou, D. Zhao, and L. Shi, "A new natural ventilation method for fire-induced smoke control in a common subway station," *Int. J. Vent.*, vol. 17, no. 2, pp. 63–80, 2018.
 - [42] N. Luo, A. Li, R. Gao, T. Song, W. Zhang, and Z. Hu, "Performance of smoke elimination and confinement with modified hybrid ventilation for subway station," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 43, pp. 140–147, 2014.
 - [43] R. Gao, A. Li, X. Hao, W. Lei, Y. Zhao, and B. Deng, "Fire-induced smoke control via hybrid ventilation in a huge transit terminal subway station," *Energy Build.*, vol. 45, pp. 280–289, 2012.
 - [44] L. Zhang, X. Wu, M. Liu, W. Liu, and B. Ashuri, "Discovering worst fire scenarios in subway stations: A simulation approach," *Autom. Constr.*, vol. 99, no. November 2018, pp. 183–196, 2019.
 - [45] J. Zhang, Y. Li, B. Dai, X. Li, and Y. Huang, "The Effect of Exhaust Velocity on Smoke Exhaust in Subway Platform," *Procedia Eng.*, vol. 211, pp. 1018–1025, 2018.

- [46] R. Z. Fan WU, Jun-Cheng JIANG, "Smoke flow temperature beneath the ceiling in an atrium-style subway station with different fire source locations," *8th Int. Conf. Fire Sci. Fire Prot. Eng.*, vol. 211, no. 2018, pp. 794–800, 2017.
- [47] N. Yucel, M. I. Berberoglu, S. Karaaslan, and N. Dinler, "Experimental and numerical simulation of fire in a scaled underground station," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 40, pp. 309–314, 2009.
- [48] N. Meng, Q. Wang, Z. Liu, X. Li, and H. Yang, "Smoke flow temperature beneath tunnel ceiling for train fire at subway station: Reduced-scale experiments and correlations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 995–1003, Mar. 2017.
- [49] N. Meng *et al.*, "Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 40, pp. 151–159, 2014.
- [50] D. Y. Li and G. Q. Zhu, "Effect of Platform Screen Doors on Mechanical Smoke Exhaust in Subway Station Fire," *Procedia Eng.*, vol. 211, pp. 343–352, 2018.
- [51] W. Wang, T. He, W. Huang, R. Shen, and Q. Wang, "Optimization of switch modes of fully enclosed platform screen doors during emergency platform fires in underground metro station," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 81, pp. 277–288, Nov. 2018.
- [52] J. S. Roh, H. S. Ryou, W. H. Park, and Y. J. Jang, "CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 447–453, 2009.
- [53] F. Wu, J. Jiang, R. Zhou, D. Zhao, and L. Shi, "A new natural ventilation method for fire-induced smoke control in a common subway station," *Int. J. Vent.*, vol. 17, no. 2, pp. 63–80, 2018.
- [54] J. Jung, S. Kang, H. Yoon, K. Shin, and J. Lee, "Analysis of Heat and Smoke Flow according to Platform Screen Door and Fan Conditions on Fire in Underground Platform," vol. 2018, no. February 2003, 2018.