



REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Francisc - Vladimir Kubinyecz

SOLUȚII PERFORMANTE PRIVIND SISTEMELE DE VENTILARE PENTRU SITUAȚII DE URGENȚĂ ÎN CADRUL REȚELEI DE METROU

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Conf.univ.dr.ing. Cătălin-Ioan Teodosiu

București, 2022

CUPRINS

1. Introducere	4
2. Stadiul actual al cunoașterii în domeniul tezei de doctorat	6
2.1. Situații de urgență în tuneluri de metrou	6
2.1.1. Configurații cu tuneluri drepte	6
2.1.2. Configurații cu tuneluri înclinate.....	7
2.1.3. Configurații cu tuneluri curbate	8
2.1.4. Configurații cu tuneluri înclinate și curbate.....	8
2.2. Situații de urgență în stații de metrou	9
2.2.1. Stații de metrou fără „platform screen doors/platform edge doors” (PSD/PED).....	9
2.2.2. Stații de metrou cu „platform screen doors/platform edge doors” (PSD/PED)	10
2.3. Sinteză și concluzii.....	11
3. Construcție model numeric CFD pentru situația de urgență a unui tren incendiat oprit într-un tunel curbat și înclinat.....	12
3.1. Configurație rețea de metrou studiată	12
3.2. Scenariu de urgență	13
3.3. Sistem de ventilare	14
3.3.1. Funcționare regim normal	15
3.3.2. Funcționare regim de urgență	16
3.4. Construcție model numeric	17
3.4.1. Geometrie	17
3.4.2. Rețea de discretizare.....	17
3.4.3. Modelare curgere turbulentă și curgere în apropierea frontierelor solide	21
3.4.4. Modelare transfer de căldură radiativ	22
3.4.5. Modelare dispersie poluanți	22
3.4.6. Condiții la limită	23
3.4.7. Rezolvare numerică.....	23
3.5. Procedură simulare	24
3.5.1. Simulare numerică în regim staționar.....	24
3.5.2. Simulare numerică în regim tranzitoriu	25
3.6. Rezultate simulare în regim tranzitoriu	25
3.7. Sinteză și concluzii.....	37
4. Construcție model numeric CFD pentru situația de urgență a unui tren incendiat oprit la peron în stație	38
4.1. Configurație stație de metrou studiată.....	38
4.2. Scenariu de urgență	38

4.3.	Sistem de ventilare	39
4.3.1.	Funcționare în regim normal	39
4.3.2.	Funcționare în regim de urgență	40
4.4.	Construcție model numeric	40
4.4.1.	Geometrie	40
4.4.2.	Rețea de discretizare.....	40
4.4.3.	Modelare curgere turbulentă și curgere în apropierea frontierelor solide	43
4.4.4.	Modelare transfer de căldură radiativ	44
4.4.5.	Modelare dispersie poluanți	44
4.4.6.	Condiții la limită	44
4.4.7.	Rezolvare numerică.....	45
4.5.	Procedură simulare	45
4.5.1.	Simulare numerică în regim staționar.....	46
4.5.2.	Simulare numerică în regim tranzitoriu	46
4.6.	Rezultate simulare în regim tranzitoriu	47
4.7.	Sinteză și concluzii.....	61
5.	Contribuții personale	62
6.	Concluzii și perspective	64

1. Introducere

Rețelele de metrou reprezintă, la momentul actual, cea mai bună soluție de transport intern urban. Având în vedere însă numărul tot mai mare de călători care utilizează acest mijloc de transport, devin din ce în ce mai apăsătoare problemele legate de siguranța călătorilor [1].

După apariția locomotivelor electrice, rețelele de metrou s-au dezvoltat repede în majoritatea capitalelor aglomerate, mai întâi în Europa și apoi la nivel mondial, ajungând la începutul anului 2018, conform datelor puse la dispoziție de Uniunea Internațională a Transportului Public UITP – “L’Union Internationale des Transports Publics” [2], să existe sisteme de metrou în 182 de orașe din 56 de țări. 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% față de anii precedenți, majoritatea fiind construite în marile aglomerări urbane din Asia.

Din totalul stațiilor de metrou construite în perioada 2008-2018, 87% sunt dotate cu uși de protecție (*platform screen doors*) care împiedică accesul oamenilor pe liniile de metrou atunci când trenul nu este în stație. De asemenea, 77% din totalul stațiilor automate sunt dotate cu astfel de echipamente, trendul mondial fiind de adoptare a acestei tehnologii în majoritatea stațiilor ce urmează să fie construite [3].

O statistică privind natura accidentelor din rețelele de metrou a fost întocmită de Yan et al. [4], care au constatat că 68% dintre accidente reprezintă incendii și 12% explozii. Alte tipuri de accidente posibile la metrou (deraiere de tren, gaz otrăvitor, pană de energie electrică, inundație sau cutremur) au o probabilitate extrem de mică de manifestare.

Cel mai devastator incendiu dintr-un tunel de metrou este considerat a fi incendiul care a avut loc în data de 28 octombrie 1995 în Baku, Azerbaijan, cauzând moartea a 289 de pasageri și generând alte 265 de victime (majoritatea fiind intoxicați cu fum) [5]. Un alt dezastru petrecut într-o stație de metrou a avut loc în data de 18 februarie 2003, în Stația Centrală din Daegu, Coreea de Sud [6]. În acest caz, incendiul a fost inițiat de un bărbat de 57 de ani care a împrăștiat 4 litri de benzină în vagonul nr. 1 al unui trenu care se apropia de intrarea în stație. Numărul total de victime s-a ridicat la 142 de persoane decedate în tren, 50 de persoane asfixiate la etajele 2 și 3 ale stației în timp ce încercau să se evacueze și 148 de persoane rănite, dintre care 10 pompieri [7].

Un alt fel de incident la metrou dar cu potențial uriaș de a genera victime este atacul cu agent sarin care a avut loc în dimineața zilei de 20 martie 1995 în Tokio [8], unde 5 adepți ai unui cult religios extremist au spart cu vârful umbrelor pungile în care aveau agent sarin în concentrație de 30%. În urma eliberării agentului sarin, 12 persoane (cei care se aflau cel mai aproape de pungile perforate) au murit, dar peste 5500 de pasageri au fost afectați, o mare parte dintre ei rămânând cu sechele neurologice pentru tot restul vieții [9].

Alan Beard și Richard Carvel au investigat în “*Handbook of tunnel fire safety*” [10] 75 de incidente care au implicat accidente urmate de incendii în tuneluri feroviare sau de metrou și au concluzionat că majoritatea incendiilor din tuneluri subterane (mai mult de două treimi din numărul total) au fost inițiate ca urmare a unei defecțiuni electrice sau mecanice, doar în câteva cazuri izolate se poate vorbi despre greșeli umane. O zecime dintre acestea au fost cauzate cu intenție de către incendiatori sau adepți ai unor organizații teroriste care intenționau să genereze un număr cât mai mare de victime.

Importanța prevenirii incendiilor în construcțiile subterane de metrou este subliniată și de faptul că numărul victimelor din accidente petrecute în acest mediu este mult mai mare decât numărul victimelor din accidente petrecute în tuneluri auto, cu toate că acestea sunt mult mai frecvente. De exemplu, numărul de victime al accidentelor din Baku și Daegu depășește cu mult numărul total al victimelor din accidente petrecute în tuneluri auto.

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).

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. În plus, 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.

În acest context, obiectivul tezei de doctorat este de a dezvolta modele numerice prin care să se poată verifica funcționarea sistemelor de ventilare în situații de urgență în cadrul unor scenarii și configurații cât mai dificile, precum și de a emite predicții privind impactul utilizării sistemelor de tip PSD în astfel de situații.

2. Stadiul actual al cunoașterii în domeniul tezei de doctorat

2.1. Situații de urgență în tuneluri de metrou

Pentru determinarea soluțiilor eficiente de ventilare a tunelurilor 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.

2.1.1. Configurații cu tuneluri drepte

Tunelurile de metrou drepte reprezintă cea mai studiată configurație din acest domeniu, majoritatea studiilor (experimentale și numerice) și analizelor teoretice referitoare la parametrii incendiului specifici tunelurilor având la bază această configurație [11].

Un număr mare de articole prezintă comparații între rezultatele obținute experimental și cele din simulări numerice, așa cum este cazul studiilor publicate de Hu et al. [12] (care prezintă o deviație de doar 4°C pentru temperatura prezisă la o distanță mai mare de 80 de metri de focarul de incendiu), Altan și Sumen [13] (care au determinat viteza critică de ventilare dintr-un tunel în cazul unui obstacol prezent în tunel), Weng et al. [14] (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 pentru 9 configurații diferite ale tunelului), Kazemipour et al. [15] (au studiat efectul ventilatoarelor montate la intrarea în tunelurile rutiere, rezultatele prezentând discrepanțe între 5% și 15% între simulare și experiment), Guo și Zhang [16] (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, rezultatele obținute fiind foarte apropiate), precum și Xi și Hu [17] (au studiat efectul curentului de aer asupra dezvoltării incendiului unui tren care se deplasează prin tunel, rezultând o variație de doar 4% a rezultatelor numerice față de rezultatele experimentale).

Alte articole prezintă doar rezultate obținute numeric, cum este cazul cercetărilor efectuate de Teodosiu et al. [18] (care au studiat eficiența sistemului format din două stații cu sistem de ventilare și o interstație de ventilare în mijlocul tunelului), Tang et al. [19] (au realizat un studiu numeric comparativ între două între tuneluri identice ca geometrie situate unul la altitudine și presiune normală și celălalt la o altitudine mai ridicată), Harish et al [20] (care studiază efectul ventilării naturale asupra propagării fumului în tunel și dependența temperaturii stratului de fum de dimensiunea canalelor de ventilare naturală), Zhang et al. [21] (au studiat numeric viteza critică a ventilării și lungimea de backlayering a fumului), F. Wang and M. Wang (au studiat impactul pe care îl are amplasarea focarului de incendiu în secțiunea tunelului, prin metode analitice de calcul și simulare numerică, concluzionând că în cazul focarului apropiat de peretele lateral al tunelului, distanța parcursă de fum în sensul contrar ventilării este mult mai mică), González et al. (analizează efectul puțurilor de ventilare naturală asupra atenuării efectului de piston indus de mișcarea trenului prin tunelul de metrou), precum și Huang et al. [22] (care utilizează simulări CFD cu rețea de

discretizare dinamică pentru a studia efectul de piston al trenului de metrou asupra mișcării aerului prin conductele de ventilare naturală organizată),

2.1.2. Configurații cu tuneluri înclinate

Aceste configurații se regăsesc acolo unde terenul sau alți factori (râuri, construcții etc.) nu permit construirea unui tunel drept, motiv pentru care este nevoie ca acesta să fie înclinat la un anumit unghi față de orizontală. Distribuția fumului și a gazelor fierbinți în astfel de tuneluri este complet diferită față de tunelurile orizontale din cauza faptului că apar fenomene specifice de „*buoyancy effect*” și „*stack/chimney effect*” [23]. Prin urmare trebuie acordată o atenție deosebită modului în care sunt proiectate soluțiile de ventilare de urgență pentru astfel de configurații, metodele cele mai frecvent folosite pentru analiza și verificarea modului în care se asigură evacuarea fumului fiind studiile numerice.

În ceea ce privește studiile experimentale există câteva astfel de cercetări, de exemplu Chow et al. [24] au desfășurat experimente la o scară de 1:50 pe un tunel de 2 m lungime cu unghi ajustabil până la 30° și au observat că forma stratului de fum este influențată de unghiul de înclinare.

Yi et al. [25] au folosit de asemenea un model la scară (1:60) pentru a studia experimental ventilația longitudinală într-un tunel înclinat la diverse unghiuri față de orizontală ($\pm 3\%$, $\pm 1,8\%$, $\pm 1\%$). Pe baza rezultatelor obținute, autorii studiului au propus corelații între gradul de înclinare al tunelului și viteza critică de ventilare.

Cu toate acestea, majoritatea studiilor ce implică incendii și fum în tuneluri înclinate sunt bazate pe simulări CFD. Ji et al. [26] au realizat o serie de simulări numerice folosind softul FDS pentru tuneluri auto cu pante variabile de la 5% la 15% față de orizontală, cu scopul de a dezvolta corelații empirice care să lege gradul de înclinație al tunelului de rata eliberării de căldură specifică incendiului și temperatura maximă din stratul de fum.

Guo et al. [27] au folosit softul FDS pentru a simula incendii în tuneluri înclinate cu pante de 0,75%, 0,89%, respectiv 2,8% pentru a stabili ce tip de configurație este mai sigură în caz de incendiu (un singur tunel pentru ambele sensuri de mers sau câte un tunel pentru fiecare sens de mers). Simulări în FDS au fost folosite și de Wan et al. [28] pentru a studia lungimea de backlayering în tuneluri înclinate cu pante cuprinse între 5% și 25%, rezultatele arătând că există un grad critic de înclinare pentru care efectul de coș (*stack* or *chimney effect*) este redus substanțial și este îmbunătățită eficiența evacuării fumului. Într-un studiu bazat doar pe simulare numerică, Zhang et al. [29] au observat că temperatura maximă din stratul de fum și lungimea de backlayering scad odată cu creșterea gradului de înclinare al tunelului de la 1% la 8%.

Tot pe baza simulărilor CFD, dar de această dată folosind soft-ul Fluent 18.1, Zhou et al. [30] au studiat impactul gradului de înclinare al tunelului ($\pm 3\%$) asupra distribuției fumului unui tren incendiat care se deplasează prin tunel. Rezultatele studiului arată că odată cu creșterea pantei tunelului scade temperatura fumului din amonte. Cano-Moreno et al. [31] au realizat simulări numerice privind evoluția incendiului și evacuarea oamenilor și au ajuns la concluzia că prin creșterea gradului de înclinare al tunelului de la 1% la 2% crește foarte mult numărul potențial de victime în cazul evacuării pedestre a pasagerilor prin tunel.

Există de asemenea studii referitoare la tuneluri înclinate care se bazează atât pe simulări numerice cât și pe studii experimentale. De exemplu, Chow et al. [32] au folosit ambele metode de studiu pentru

a demonstra că viteza critică de ventilare a aerului necesară pentru a preveni fenomenul de backlayering este mai mare în cazul tunelurilor înclinate decât în cazul celor orizontale. Experimentele la scară redusă și simulările numerice au vizat un tunel înclinat la unghiuri de 0° , 3° , 6° și 9° față de orizontală.

Incendii în tuneluri înclinate cu pante între 0° și 30° au fost studiate și de Chow et al. [33], folosind simulări CFD (Fluent), iar rezultatele numerice au fost comparate cu rezultatele obținute din experimente la scară redusă, cele două seturi de date fiind foarte apropiate. La fel, Zhao et al. [23] au realizat 28 de experimente la scară redusă (1:20) și simulări numerice la scară reală pentru 31 de scenarii de incendiu în tunel înclinat la 5° , $7,5^{\circ}$ și 10° , pentru a analiza impactul unor anumiți factori (panta tunelului, rata de eliberare a căldurii, locația sursei de incendiu) asupra direcției curgerii stratului de fum. Un alt exemplu de studiu comparativ experimental (la scară redusă 1:10) - numeric este cel realizat de Han et al. [34], care au arătat că atunci când crește panta tunelului se intensifică și înclinarea stratului de fum.

2.1.3. Configurații cu tuneluri curbate

O categorie aparte de tuneluri sunt cele care, pentru a urmări un traseu impus de constrângeri geologice sau tehnice, prezintă o anumită curbă în plan orizontal. Există probleme specifice și în situația unui incendiu în astfel de configurații: mișcarea fumului fierbinte este influențată de asimetria pereților tunelului, la fel cum este influențată și mișcarea aerului ventilat longitudinal [35].

În baza unui proiect de cercetare finanțat de Consiliul Național de Cercetare al Canadei, care include atât studii experimentale, cât și numerice, Kashef și Saber [36] au evaluat eficiența strategiilor de ventilare în situații de urgență în regiuni drepte și curbate ale tunelului Ville-Marie din Montreal, recomandând mai multe soluții tehnice adaptate tunelului respectiv.

Zhang et al. [37] au studiat prin efectuarea de simulări numerice dependența dintre gradul de curbă al unui tunel și viteza critică a aerului ventilat longitudinal, concluzionând că distanța de backlayering crește o dată cu raza de curbă a tunelului, fiind maximă când raza tinde spre infinit (tunel drept).

Aceste rezultate sunt confirmate și de Wang et al. [35]: în cazul unui incendiu, viteza critică este cu 7% mai mare pentru un tunel curbat decât pentru unul drept.

2.1.4. Configurații cu tuneluri înclinate și curbate

Trebuie menționat faptul că fenomenele legate de ventilarea longitudinală și propagarea fumului rezultat în urma incendiului sunt mult mai complexe în cazul tunelurilor înclinate și curbate. În plus, fiind mai rar întâlnite, aceste configurații au fost mai puțin studiate motiv pentru care literatura de specialitate conține puține exemple referitoare la evacuarea fumului dintr-un tunel de metrou curbat și înclinat.

Caliendo et al. [38] au realizat un studiu numeric în care au investigat mai multe scenarii de incendiu în tuneluri cu raze de curbă cuprinse între 185 și 400 m și 2% pantă longitudinală. Studiul și-a propus să evalueze eficiența sistemului de ventilare în situații de urgență și a arătat că cel mai dificil scenariu este cel în care focarul de incendiu este amplasat la mijlocul lungimii tunelului și la mijlocul lățimii secțiunii sale.

Zhong et al. [39] au efectuat măsurători într-un tunel curbat și înclinat și au prezentat distribuții de temperatură asimetrice, variații ale poziției verticale a temperaturii maxime, precum și variații ale lungimii de backlayering.

2.2. Situații de urgență în stații de metrou

2.2.1. Stații de metrou fără „platform screen doors/platform edge doors” (PSD/PED)

Pentru determinarea soluțiilor eficiente de ventilare a stațiilor de metrou în situații de urgență este urmărită evoluția parametrilor de incendiu în stație (lungimea flăcării și temperatura maximă din stratul de fum) și distribuția fumului și a gazelor toxice. În general, studiile urmăresc modul în care anumite configurații de funcționare a sistemelor de ventilare din stație pot asigura condițiile minime necesare pentru evacuarea în siguranță a oamenilor.

De exemplu, Wu et al. [40] folosește simularea numerică CFD în FDS și studiază o configurație de stație de metrou cu 2 niveluri, concluzia studiului fiind că se poate realiza evacuarea fumului și în lipsa ventilării mecanice.

Luo et al. [41] au studiat modul de interacțiune al instalației de ventilare mecanică cu ventilarea naturală pe o configurație de stație de metrou pe 3 niveluri, atât experimental (folosind o machetă a stației la scară 1:50) cât și numeric (folosind FDS), rezultatele simulării fiind aproape identice cu cele ale experimentului la scară.

Într-un alt articol bazat pe simulări numerice, Gao et al. [42] au folosit o configurație de stație de metrou cu două niveluri subterane și un vestibul cu atrium, care prezintă și o deschidere pentru realizarea ventilării naturale, constatând 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 vestibulului concentrația de CO este de 3 ori mai mică în aceeași ipoteză.

O atenție deosebită a fost acordată de Zhang et al. [43] 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 vestibul. Pentru validarea rezultatelor numerice a fost efectuat și un experiment in situ, concluzia fiind că parametrii incendiului urmăriți în simulare au valori foarte apropiate de cele măsurate în timpul experimentului.

În cazul trenurilor de metrou incendiate care reușesc să ajungă până în stație, se pune problema ventilării cât mai rapide a fumului folosind instalațiile de ventilare din stația respectivă. Hu et al. [44] 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 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 (de la 3 la 10 m/s), concluzionând că viteza optimă de evacuare a fumului este de 8 m/s.

Articolul publicat de Wu et al. [46] studiază distribuția temperaturii într-o stație de metrou în care sunt luate în considerare 3 poziții ale focarului de incendiu, fiecare dintre acestea cu 5 valori diferite ale ratei de eliberare a căldurii.

Un alt studiu bazat pe experiment și simulare în FDS a fost realizat de Lee et al. [47] într-o stație de metrou din Tokio, rezultatele experimentale în ceea ce privește temperatura maximă din stratul de fum prezentând diferențe de 10°C față de rezultatele numerice.

2.2.2. Stații de metrou cu „platform screen doors/platform edge doors” (PSD/PED)

Pe plan internațional, studiile din domeniul ventilării stațiilor de metrou sunt concentrate pe mai multe direcții de cercetare, având astfel la dispoziție în prezent numeroase date referitoare la calitatea aerului (inclusiv concentrații de poluanți) din stațiile de metrou, confortul termic în stații (inclusiv viteza aerului și impactul efectului de piston generat de sosirea trenului în stație asupra confortului călătorilor), confortul fonic etc.

Pe de altă parte, studiile referitoare la implementarea și impactul sistemelor de tip PSD și PED în cadrul sistemelor de metrou sunt din ce în ce mai numeroase. Cercetările întreprinse au pus astfel în evidență faptul că utilizarea ușilor automate de protecție în cadrul rețelelor de metrou se traduce prin numeroase beneficii.

Printre avantajele instalării acestor uși de protecție se enumeră scăderea numărului de sinucideri din stațiile de metrou (Chung et al. [48], Ueda et al. [49]), scăderea nivelului de zgomot din stațiile de metrou (Soeta și Shimokura [50]), menținerea parametrilor de confort termic în stații cu un consum mai redus de energie (Hu și Lee [51]) și menținerea unui climat mai curat pe platformele de așteptare.

Există un număr mic de studii care investighează modul de operare al ușilor PSD în corelare cu funcționarea sistemelor de ventilare din stațiile de metrou astfel încât să fie evacuat fumul în cazul unui incendiu, printre acestea enumerându-se studiul realizat de Li și Zhu [52] (care au studiat ipoteza unui incendiu izbucnit pe platformă și au concluzionat că deschiderea ușilor automate de protecție pe ambele părți ale platformei mărește timpul de menținere a condițiilor de evacuare în siguranță a persoanelor cu 100 de secunde), Chen et al. [53] (care au studiat efectul ușilor de tip PED și PSD asupra evacuării fumului dintr-o stație de metrou din Taipei 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), Meng et al. [54] (studiu comparativ între avantajele ușilor de tip PSD și PED în cazul unui incendiu), Hu et al. [44] (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), Wang et al. [55] (care au prezentat cele mai bune soluții de evacuare a fumului pentru configurația analizată), Roh et al. [56] (care au concluzionat că ușile PSD cresc intervalul de timp disponibil pentru evacuarea călătorilor), Wu et al. [57] (au propus un model de ventilare naturală pentru o stație de metrou cu două niveluri subterane și sisteme de uși PSD), respectiv Jung et al. [58] (efectul ușilor PSD asupra evacuării fumului și a poluanților în cazul unui incendiu într-o stație de metrou cu trei niveluri subterane).

Studierea cu atenție a bibliografiei disponibile în literatura de specialitate pune în evidență faptul că nu se pot generaliza soluțiile considerate eficiente în ceea ce privește creșterea siguranței pasagerilor din rețelele de metrou, de la o configurație la alta. Pentru implementarea de sisteme adecvate, precum și utilizarea corectă a acestora (de exemplu cuplare ventilare – uși PSD/PED) în funcție de situație, este nevoie de realizarea unor studii aprofundate, specifice configurației analizate.

Numărul de articole referitoare la ventilarea fumului în situații de urgență din stațiile de metrou prevăzute cu uși PSD 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 PSD etc. Din acest motiv a fost considerată importantă și oportună studierii acestui tip de scenariu în cadrul tezei de doctorat pentru o stație de metrou din București.

2.3. Sinteză și concluzii

Majoritatea articolele prezentate în acest capitol folosesc simularea numerică de tip CFD ca și metodă principală de cercetare pentru a analiza evoluția unor parametri specifici incendiilor în tuneluri și stații de metrou.

În ceea ce privește evacuarea fumului din tuneluri de metrou, cele mai multe studii fac referire la tuneluri clasice drepte, acestea fiind și cel mai des întâlnite în realitate. Parametrii urmăriți sunt viteza critică de ventilare, distanța de backlayering a fumului, temperatura maximă în stratul de fum și concentrațiile de poluanți (CO și CO_2). În funcție de modul în care sistemul de ventilare al tunelului reușește să reducă la zero distanța parcursă de fum în contracurent (backlayering), de temperatura maximă din tunel și de concentrația gazelor toxice se evaluează eficiența sistemului de ventilare pentru scenariul respectiv.

Tunelurile înclinate longitudinal față de orizontală sau cele curbate în plan orizontal necesită o atenție deosebită când vine vorba de evacuare fumului generat de incendiu, întrucât asimetria pereților tunelului (în cazul tunelurilor curbate) influențează mișcarea fumului fierbinte și scade eficiența ventilării longitudinale (crescând viteza critică), iar gradul de înclinare al tunelurilor influențează distribuția fumului și a gazelor fierbinți prin faptul că apar fenomene termice specifice (*“buoyancy effect”* și *„stack/chimney effect”*).

În mod evident, tunelurile curbate și înclinate reprezintă cel mai defavorabil caz pentru realizarea unei ventilări eficiente în situații de urgență din cauza fenomenelor complexe ce caracterizează curgerea fumului și a gazelor fierbinți în astfel de construcții. Acesta este și motivul pentru care în această lucrare a fost studiată eficiența sistemului de ventilare propus pentru o configurație formată din două stații de metrou și tunelurile curbate de legătură din ele, din care un tunel este și înclinat.

Referitor la stațiile de metrou, s-a constatat că, pe lângă avantajele ce țin de confortul călătorilor aflați pe peron, ușile automate de protecție influențează evacuarea fumului în situații de urgență generate de incendii. Aceste aspecte sunt studiate tot mai des, însă concluziile studiilor depind de foarte mulți factori precum puterea focarului de incendiu, locul de izbucnire al incendiului, funcționarea instalațiilor de ventilare din stație și din tuneluri, geometria stației, existența instalațiilor de stingere a incendiilor etc. Totuși, o concluzie generală în urma studierii bibliografiei disponibile este că sistemele de tip PSD/PED utilizate corespunzător contribuie la evacuarea fumului și cresc intervalul de timp disponibil pentru evacuarea în situații de urgență a călătorilor.

Prin urmare, în cadrul acestei teze a fost realizat și un studiu numeric pentru verificarea modului de evacuare a fumului în ipoteza unui tren incendiat aflat la peron, într-o stație dotată cu uși PSD.

În continuare se prezintă în mod sintetizat aspectele teoretice ale modelării numerice CFD, urmate de descrierea în detaliu a scenariilor considerate privind un tren incendiat oprit între două stații de metrou într-un tunel curbat și înclinat și un tren incendiat oprit la peron într-o stație de metrou dotată cu uși PSD, analizându-se pentru fiecare situație rezultatele obținute în raport cu condițiile impuse conform standardelor în vigoare privind evacuarea în siguranță a pasagerilor sau persoanelor aflate în stația de metrou.

3. Construcție model numeric CFD pentru situația de urgență a unui tren incendiat oprit într-un tunel curbat și înclinat

Modelul numeric CFD a fost dezvoltat în întregime folosind pachetul software cu licență academică Ansys Fluent 15.0 și unitatea de calcul din dotarea *Departamentului de sisteme termohidraulice și pentru protecția atmosferei* cu următoarele caracteristici tehnice: unitate optică 24xDVD, hard drive de 5TB, placă de bază Asus Dual LGA DDR3, procesor Intel Xeon 3.1 GHz 8 core, placă video GeForce GTX 2 GB, memorie RAM 64GB DDR3 și monitor LCD de 27”.

3.1. Configurație rețea de metrou studiată

Obiectivul principal al acestui studiu este verificarea modului de funcționare a sistemului de ventilare propus pentru o configurație formată din două stații de metrou conectate prin două tuneluri, în cazul scenariului cel mai defavorabil privind apariția unei situații de urgență

Geometria care a stat la baza studiului reprezintă proiectul de construcție a unei stații de metrou și a tunelurilor aferente ce urmează să completeze magistrala M6 din metroul Bucureșten, pe ruta 1 Mai – Aeroport Otopeni.

Geometria domeniului de calcul a fost construită cu ajutorul pre-procesorului din cadrul pachetului de programe Ansys Fluent, pe baza planurilor de construcție pentru stația 1 Mai și ale celor două tuneluri de conexiune. Se menționează faptul că geometria a fost reprezentată la scară reală, ținându-se cont cu acuratețe de toate detaliile constructive care influențează curgerea aerului în domeniul de calcul (stâlpii de rezistență, scările interioare, spațiile tehnice, peronul, coridoarele de ieșire la suprafață etc.).

Stațiile de metrou sunt construite pe două niveluri subterane (vestibul și nivel peron), legătura între acestea asigurându-se prin trei scări interioare și un lift. Dimensiunile interioare, la nivelul peronului, sunt de aproximativ 200 m lungime, 16 m lățime și 4 m înălțime. Stațiile de metrou sunt de tip insulă, cu peronul construit în mijloc și câte o linie de metrou de fiecare parte a acestuia.

Particularitatea geometriei studiate rezidă în faptul că cele două tuneluri sunt curbate (raza de curbură fiind de 250 m), unul dintre ele (tunelul 1) fiind de asemenea și înclinat, pentru a putea trece pe sub alte două tuneluri construite anterior (magistrala M4). Declivitatea acestui tunel este de 3,1%, iar minimul local coincide cu punctul de curbură, lungimea tunelului fiind de aproximativ 835 m (Fig. 1).

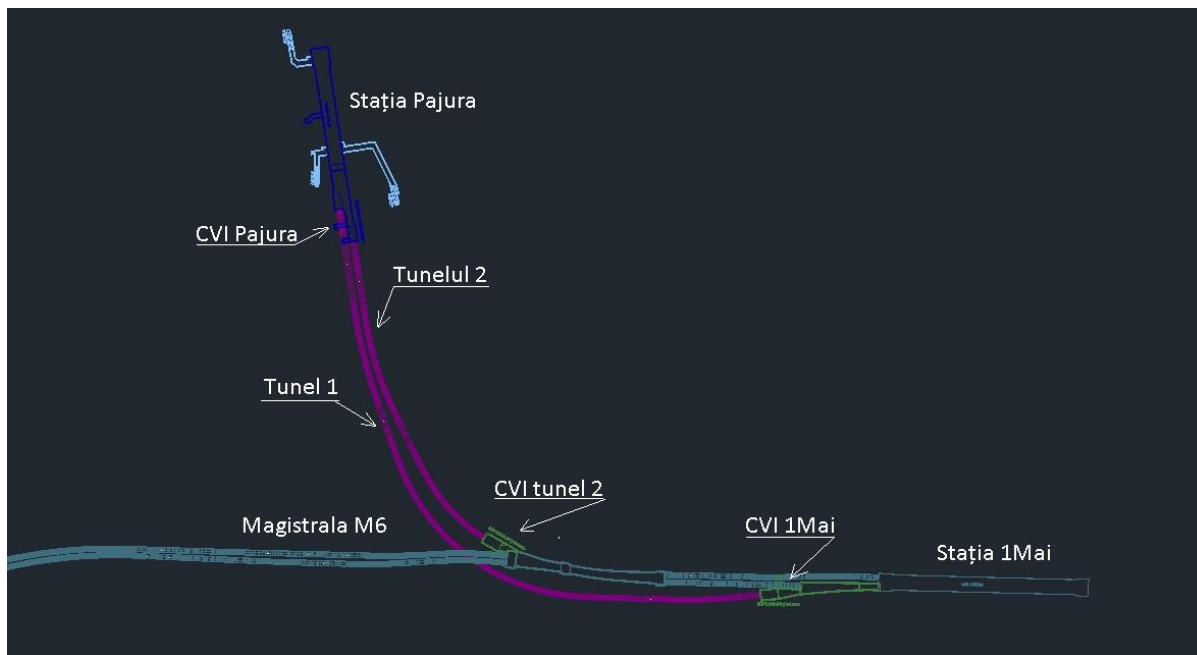


Fig. 1 Vedere de ansamblu rețea de metrou studiată

3.2. Scenariu de urgență

Pentru a realiza un studiu relevant privind eficiența sistemului de ventilare în situații de urgență pentru configurația de metrou studiată, s-a considerat, conform datelor din literatura de specialitate [38] [39], că cel mai dezavantajos scenariu ar fi ca un tren incendiat să se oprească în tunelul 1, în punctul cel mai de jos și în zona de curbură maximă.

Scenariul de urgență care stă la baza acestui studiu respectă prevederile *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., aprobate prin Ordinul Ministrului Transporturilor, Construcțiilor și Turismului nr. 1287 din 10.08.2006* [59], în care sunt precizate acțiunile de executat de personalul Metrorex în cazul în care trenurile prezintă disfuncționalități care duc la izbucnirea incendiilor.

În ceea ce privește natura focarului de incendiu, s-a pornit de la ideea că o defecțiune mecanică sau electrică localizată sub șasiul trenului, aproape de mijlocul lungimii acestuia, a dus la generarea unui incendiu. Această ipoteză este susținută de mai multe referințe bibliografice, cum ar fi statistica realizată de Alan Beard [60], care a concluzionat că din 75 de incendii la metrou aproximativ două treimi au cauza mecanică/electrică sau studiul lui Falin Chen [53] în care prezintă 14 incendii la metrou cauzate de frânele încinse ale garniturilor de tren sau echipamente electrice defecte. Alte statistici realizate de Zhou et al. [61] sau Olenick și Carpenter [62] relevă faptul că aproximativ 50% din incendiile la trenuri de metrou sunt inițiate sub șasiul trenului, în zona sistemelor de frânare, unde se găsesc și alte componente de natură electrică, mecanică și hidraulică.

Referitor la puterea maximă a focarului de incendiu, literatura de specialitate indică valori pornind de la 3 MW [63] până la 43 MW [64], dar având în vedere că în București încă se mai folosesc garnituri de metrou vechi, în cadrul acestor simulări a fost aleasă o valoare maximă de 30 MW pentru focarul de incendiu.

Evoluția incendiului a avut un model de intensificare de tipul t^2 (Fig. 2), astfel încât HRR-ul maxim și emisiile de poluanți au crescut în primele 10 minute ale simulării, ca în cazul unui incendiu real

[65]. Această abordare privind evoluția în timp a puterii focarului de incendiu este des întâlnită în studii referitoare la securitatea la incendiu, precum și în alte simulări ce privesc incendiile în tuneluri [27][63][66].

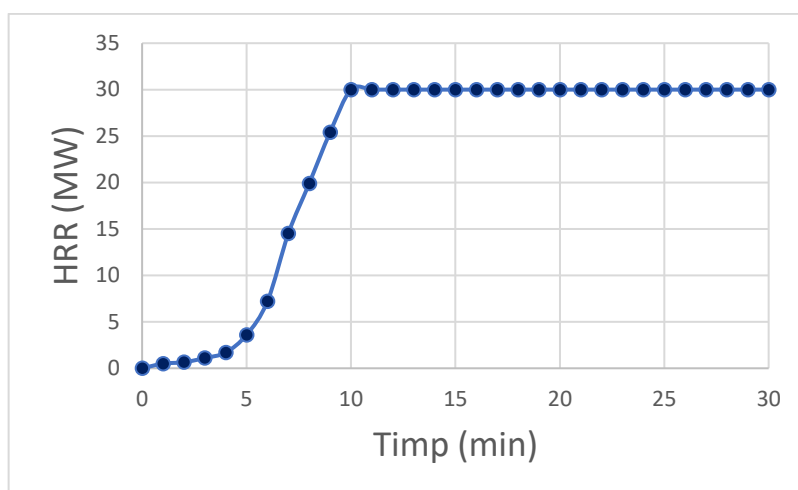


Fig. 2 Evoluția ratei de eliberare a căldurii în timpul simulării

Pentru a obține curba de dezvoltare a incendiului și emisiile corespunzătoare de CO și CO₂ cât mai apropiate de valorile reale ale unui focar cu o rată maximă de eliberare a căldurii de 30 MW, a fost folosit programul specializat *Fire Dynamics Simulator* (FDS), concentrațiile maxime de poluanți obținute fiind prezentate în Fig. 3.

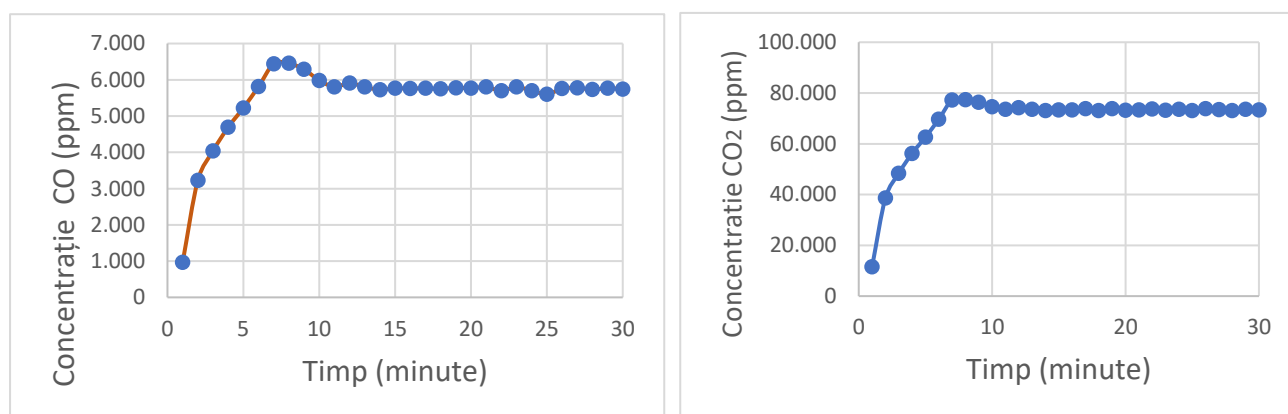


Fig. 3 Emisiile de poluanți obținute în FDS pentru simularea 2

Trebuie menționat că această ipoteză de lucru reprezintă o simplificare a procesului de ardere, întrucât într-un incendiu real sunt implicate mai multe materiale combustibile care generează o cantitate mare de produși de ardere, cu o compoziție chimică complexă și cantități variabile de compuși.

3.3. Sistem de ventilare

Sistemul de ventilare al rețelei de metrou studiate este unul atipic, întrucât este format dintr-o centrală de ventilare de interstație (CVI) amplasată la mijlocul tunelului 2, două centrale de ventilare de interstație (CVI) amplasate la capetele celor două stații de metrou și centralele de ventilare generală (CVG) ale celor două stații de metrou. Un aspect important este că toate aceste cinci centrale de ventilare menționate anterior au același debit de aer și pot funcționa atât pentru extragere cât și pentru introducere aer, având două regimuri de funcționare: normal și de urgență. Fiecare din cele cinci centrale de ventilare asigură un debit de 200.000 m³/h în regim normal, respectiv 400.000 m³/h în regim de urgență.

În mod normal, la mijlocul tunelului 1 ar fi trebuit să fie montată o altă CVI, însă din cauza faptului că deasupra tunelului 1 trece magistrala de metrou M4, aceasta nu poate fi construită. Prin urmare, pentru a corespunde normelor de securitate la incendiu a fost propusă soluția bazată pe construirea celor două CVI amplasate la capătul tunelurilor, în apropierea stațiilor Pajura și 1 Mai. Astfel, ventilarea tunelului 2 (atât în situația funcționării în regim normal cât și de urgență) este asigurată de CVI amplasată la mijlocul tunelului, în timp ce ventilarea tunelului 1 (cel care este curbat și înclinat) este asigurată doar de cele două CVI amplasate la capătul tunelului pentru a se asigura ventilarea longitudinală a acestuia

În ceea ce privește sistemul de ventilare generală al unei stații de metrou, acesta este format din 80 de dispozitive circulare, cu diametrul de 30 cm, amplasate paralel cu latura lungă a peronului, deasupra șinelor de tren, câte 40 de fiecare parte. (Fig. 4)

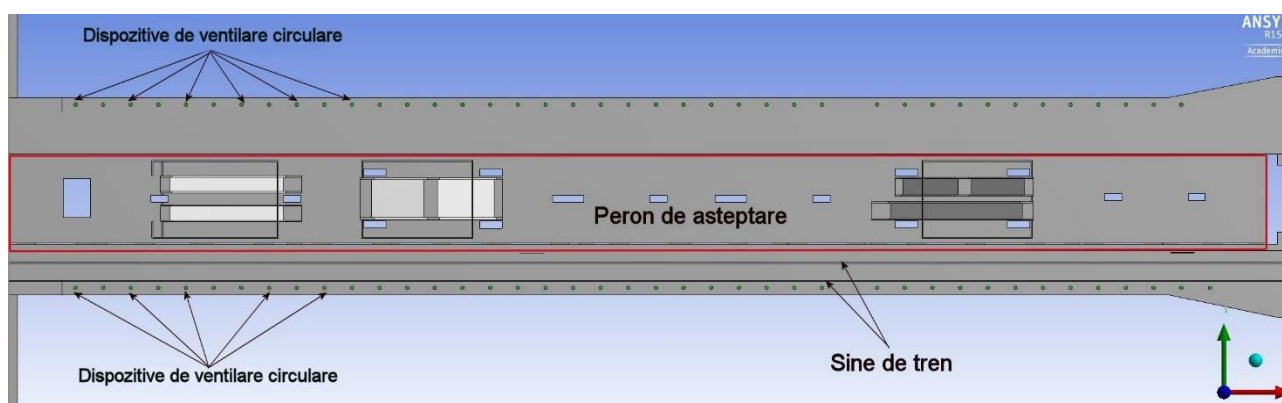


Fig. 4 Dispozitivele de ventilare ale unei stații de metrou

3.3.1. Funcționare regim normal

Pe timp de vară, aerul este introdus prin centrala de ventilare generală (CVG) a fiecărei stații de metrou și prin centrala de ventilare de interstație (CVI) Pajura, fiind evacuat prin CVI 1Mai și CVI tunel 2 (Fig. 5). Debitul de funcționare normal, atât pentru CVG cât și pentru CVI este de 200.000 m³/oră. Aerul exterior este răcit în CVG înainte de a fi introdus în stațiile de metrou, iar în cazul în care temperatura aerului ventilat depășește 25⁰ C ventilarea este întreruptă, pentru a nu genera disconfort termic în stațiile de metrou.

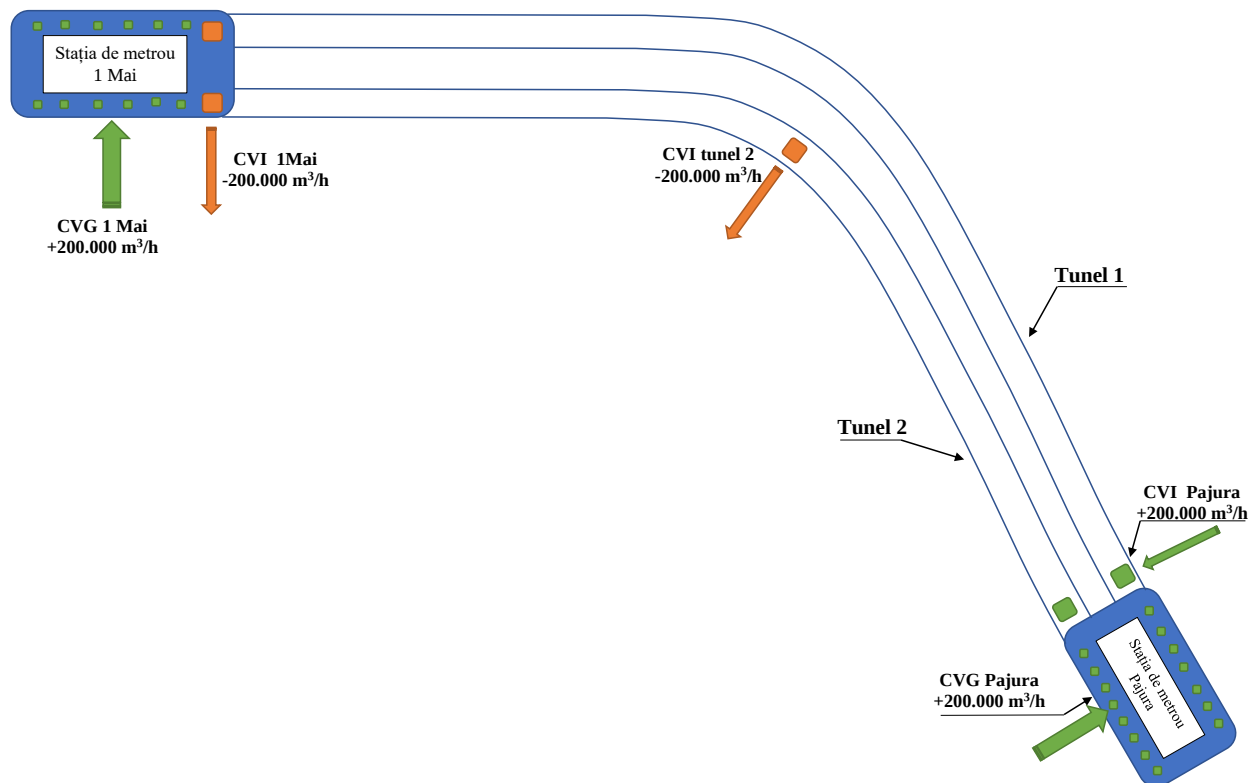


Fig. 5 Funcționarea sistemului de ventilare în regim normal – vara

3.3.2. Funcționare regim de urgență

În ceea ce privește funcționarea sistemului de ventilare a configurației studiate în regim de urgență, în situația în care un tren rămâne blocat în tunelul 1, în punctul cel mai de jos, aerul este introdus prin CVG Pajura (200.000 m³/h) și CVI Pajura (400.000 m³/h) și este evacuat prin CVI 1Mai (400.000 m³/h), în timp ce CVG 1Mai și CVI tunel 2 sunt oprite. În acest fel se asigură ventilarea longitudinală clasică: debit de aer proaspăt pe calea de evacuare a călătorilor (porțiunea de tunel cuprinsă între focarul de incendiu și stația Pajura) și evacuarea fumului și a gazelor toxice spre centrala de ventilare de interstație 1 Mai.

Foarte important de menționat este că dispozitivul de introducere/evacuare aer al CVI Pajura, corespunzător tunelului 2, este închis prin intermediul unui damper, în acest fel tot debitul de aer introdus de CVI Pajura fiind vehiculat în tunelul 1. La fel, CVI 1Mai extrage aer doar din tunelul 1, dispozitivul de ventilare din tunelul 2 fiind închis, așa cum se poate vedea și în Fig. 6.

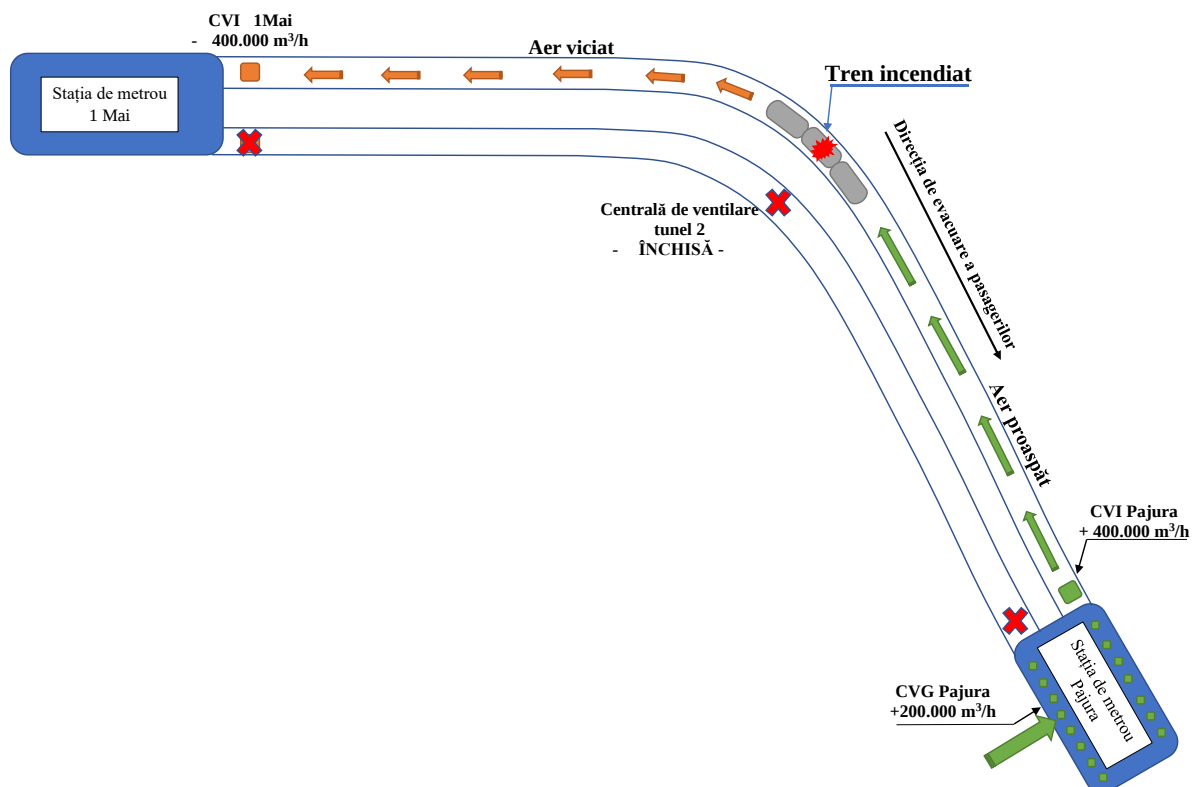


Fig. 6 Funcționarea sistemului de ventilație în regim de urgență

3.4. Construcție model numeric

3.4.1. Geometrie

Conform proiectului stației de metrou Pajura și a tunelurilor de legătură cu 1 Mai, a fost realizată în Design Modeler geometria pentru întreaga configurație de metrou studiată.

Stația de metrou 1Mai a fost construită pe același model cu stația Pajura, deosebirea constând în partea de legătură a stației cu cele două tuneluri, care este mai complexă în acest caz, întrucât stația 1Mai este punct de legătură cu două magistrale de metrou, M4 și M6.

3.4.2. Rețea de discretizare

Având în vedere dimensiunea și complexitatea geometriei studiate, a fost imperios necesar ca rețeaua de discretizare să fie nestructurată, formată din volume finite de formă tetraedrică.

În cadrul studiului, rețeaua de discretizare a fost realizată folosind programul specializat al pachetului Ansys Fluent 15.0 (Ansys Meshing), care permite utilizatorului să controleze felul în care realizează rețeaua de discretizare atât la nivel global, cât și la nivel local.

Funcțiile de control global permit un control general al elementelor de discretizare, astfel încât să nu existe diferențe foarte mari între elementele aceluiași domeniu de calcul care să ducă ulterior la erori în obținerea soluției numerice sau chiar la divergența soluției. Acestea asigură controlul calității unui element prin raportarea la dimensiunea, orientarea și poziția elementelor vecine, începând de la frontiera domeniului de calcul și mergând pas cu pas spre interiorul acestuia. [67]

Pentru a nu rafina discretizarea întregului domeniu și a obține astfel costuri ridicate, poate chiar prohibitive, în ceea ce privește timpul de calcul și resursele informatice necesare efectuării simulărilor

numerice, rețeaua de discretizare a fost finisată în anumite zone cu gradienti mari ai variabilelor prin inserarea unor funcții de dimensionare locală (*local sizing*) în următoarele zone:

- Zona din apropierea pereților CVI 1Mai, CVI Pajura și CVI tunel 2 (Fig. 7);
- Zona din apropierea dispozitivelor de introducere a aerului prin CVG Pajura, respectiv CVG 1Mai;
- Zona din apropierea focarului de incendiu;
- Zona din apropierea șinelor de tren.

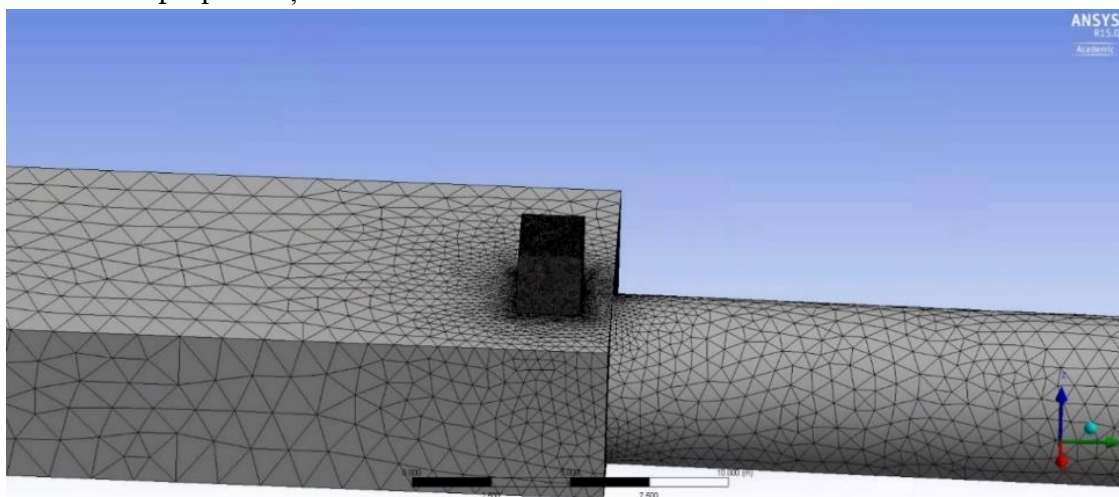


Fig. 7 Discretizare locală CVI 1Mai

În urma aplicării funcțiilor de control global și local al elementelor de discretizare s-au obținut **23 285 891** de celule de calcul.

3.4.2.1. Control calitate elemente de discretizare spațială

Calitatea rețelei de discretizare este verificată prin criteriul asimetriei (*skewness*). Acest criteriu este aplicat elementelor triunghiulare (fețele tetraedrelor) și prezintă cât de aproape de forma ideală este o față sau o celulă.

Cu cât valoarea factorului de asimetrie este mai aproape de 1 celulele sunt mai deformate și calitatea rețelei este slabă. La polul opus, cu cât valoarea factorului se apropie de 0, celulele generate sunt apropiate de forma ideală și creează o rețea de discretizare de calitate. Rezultatele acestei verificări pentru rețeaua de discretizare realizată sunt prezentate în Tabel 1.

Numărul de elemente	Procent din volumul total		Valoarea factorului de asimetrie (<i>skewness</i>)	Evaluarea calitativă a elementelor de discretizare
$3,23 \cdot 10^6$	15,1 %	75,1 %	0,0489	Calitate foarte bună
$6,86 \cdot 10^6$	31,4 %		0,147	
$6,46 \cdot 10^6$	28,6 %		0,244	
$4,14 \cdot 10^6$	16,5 %	23 %	0,342	Calitate bună
$1,86 \cdot 10^6$	6,5 %		0,44	
$5,56 \cdot 10^5$	1,63 %	1,91 %	0,537	Calitate satisfăcătoare
$1,33 \cdot 10^5$	0,26 %		0,635	
$3,88 \cdot 10^4$	0,027 %		0,733	
$1,42 \cdot 10^4$	0,0013 %		0,831	Calitate slabă
$1,82 \cdot 10^3$	0,000016 %		0,928	Calitate foarte slabă

Tabel 1 Numărul elementelor de discretizare și calitatea lor

Se observă că rețeaua de discretizare este formată în proporție de 75,1 % din elemente cu un factor de asimetrie mai mic de 0,25, deci cu elemente de o calitate foarte bună. În proporție de 98,1% elementele obținute au un factor de asimetrie mai mic de 0,5, ceea ce înseamnă că marea majoritate a elementelor de discretizare au o calitate bună și rețeaua poate fi folosită ulterior pentru efectuarea simulării numerice.

3.4.2.2. Verificare independență rezultate față de nivel de discretizare

Verificarea independenței rezultatelor față de nivelul de discretizare presupune identificarea numărului optim de elemente ale unei rețele de discretizare pentru care soluțiile numerice obținute nu mai pot fi ameliorate printr-o discretizare mai fină. Având în vedere că pentru validarea rezultatelor numerice nu am avut posibilitatea de a utiliza date obținute experimental, verificarea independenței rețelei de discretizare s-a realizat prin raportare la rezultatele parametrice obținute utilizând discretizări cu cel mai mare număr de elemente posibil, ținând cont și de infrastructura hardware disponibilă și de timpul de calcul necesar, în special pentru simulările în regim tranzitoriu.

Astfel, au fost realizate 3 rețele de discretizare cu un număr de 14 milioane, 23 milioane și 30 milioane de elemente obținute prin utilizarea funcțiilor de control global și local descrise anterior. Controlul local al rețelei de discretizare a vizat aceleași zone în toate cele 3 cazuri, fiind vorba de zonele din domeniu în care curgerea aerului prezintă o importanță deosebită. Pentru fiecare dintre cele 3 rețele de discretizare a fost realizată câte o simulare în regim staționar și a fost urmărită evoluția a doi parametri (viteza și temperatura aerului) într-un punct din domeniul de calcul, considerat reprezentativ (punct situat la intersecția tunelului 1 cu stația de metrou Pajura, la un metru sub plafon).

Rezultatele obținute cu fiecare dintre cele 3 rețele de discretizare au fost comparate folosind câmpurile de viteze a aerului într-o secțiune transversală prin stația de metrou Pajura, precum și prin evoluția celor 2 parametri ai aerului în punctul menționat în ultimele 1.000 de iterații.

În Fig. 8 sunt prezentate câmpurile de viteză a aerului într-o secțiune transversală realizată în mijlocul stației Pajura, secțiune ce cuprinde două dispozitive de ventilare amplasate de o parte și de alta a peronului, deasupra șinelor de tren. După cum se poate observa, nu există diferențe majore între jeturile de aer formate de dispozitivele de ventilare, diferențe minore putând fi sesizate în ceea ce privește modul de distribuire a vitezelor aerului în zona peronului.

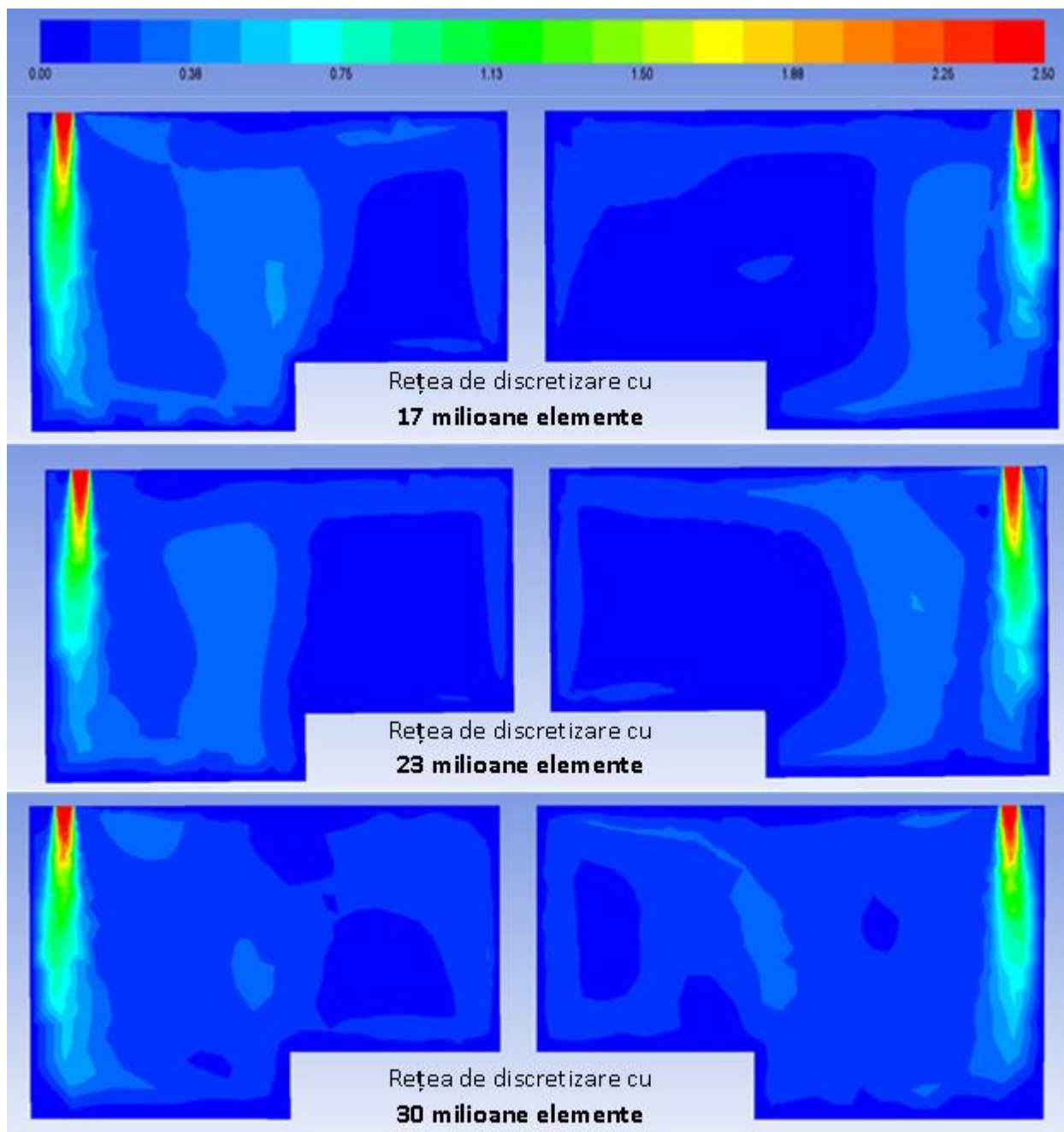


Fig. 8 Câmpuri de viteze aer (m/s) în aceeași secțiune transversală pentru cele 3 variante de rețea de discretizare

În Fig. 9 și Fig. 10 sunt prezentate viteza aerului, respectiv temperatura aerului în punctul de probă, și se poate observa că viteza aerului în cazul rețelei de discretizare formată din 17 milioane de elemente prezintă fluctuații după 11.000 de iterații, aspect care nu caracterizează curgerea aerului în cazul celorlalte două rețele. În plus, valorile de viteză a aerului obținute în cele două rețele cu 23 de milioane, respectiv 30 de milioane de elemente sunt apropiate, diferența dintre ele fiind de doar 3,5%. De asemenea, temperatura aerului în cazul rețelei de discretizare cu 17 milioane de elemente este mai mică decât temperaturile obținute în simulările efectuate folosind celelalte două rețele de discretizare, ale căror valori de temperatura sunt foarte apropiate (diferență de 1%). Prin urmare, putem considera că prin creșterea numărului de elemente ale rețelei de discretizare de la 23 la 30 de milioane de elemente nu se aduc îmbunătățiri majore în ceea ce privește curgerea aerului prin domeniul de calcul, motiv pentru care a fost utilizată pentru realizarea studiului rețeaua de discretizare cu 23 de milioane de elemente. În plus, timpul necesar realizării celor 11.000 de iterații

folosind rețeaua de discretizare cu 30 de milioane de elemente a fost de 182 de ore (aproximativ 8 zile), ceea ce ar fi dus în regim tranzitoriu la un timp de calcul prohibitiv. Prin comparație, timpul necesar realizării celor 11.000 de iterații folosind rețeaua de discretizare cu 23 de milioane de elemente a fost de 125 de ore (5 zile), rezultând o economie de timp semnificativă.

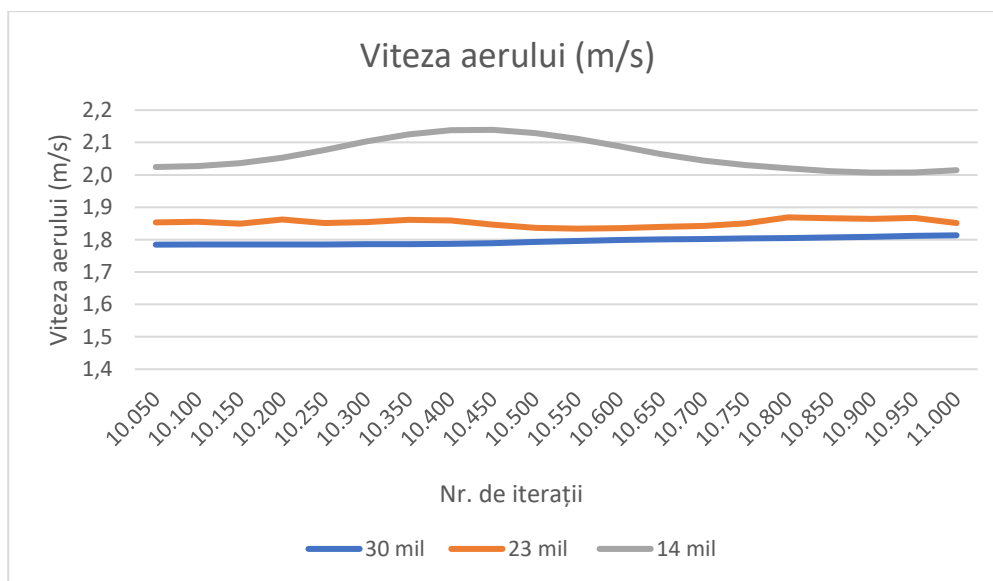


Fig. 9 Valori de viteză a aerului înregistrate în punctul de control în cele 3 rețele de discretizare (m/s)

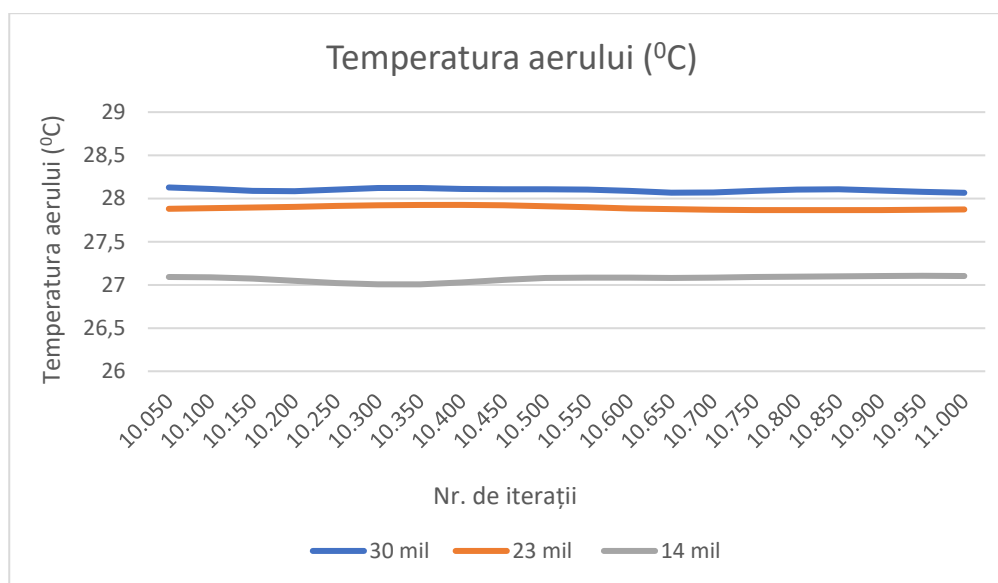


Fig. 10 Valori de temperatură a aerului înregistrate în punctul de control în cele 3 rețele de discretizare (°C)

3.4.3. Modelare curgere turbulentă și curgere în apropierea frontierelor solide

Pentru alegerea modelelor de curgere a aerului din cadrul domeniului de calcul studiat s-a ținut cont că în interiorul stațiilor de metrou și a tunelurilor întâlnim curgeri predominant turbulente, însoțite de transfer de căldură și de transfer de masă.

Pe baza acestor considerente a fost utilizat modelul de turbulență RANS cu două ecuații $k - \epsilon$. Acesta este un model robust, economic și destul de precis pentru o gamă largă de curgeri turbulente, motiv pentru care este folosit cu preponderență în simulări de curgeri industriale și transfer de căldură.

Având în vedere că acest studiu nu își propune să surprindă în detaliu curgerea aerului în apropierea pereților și ținând cont de dimensiunea mare a geometriei, a fost ales ca model de curgere în

apropierea pereților modelul funcției standard de perete (*Standard wall function*). Alegerea unui model mai complex, care să surprindă mai bine influențele pereților asupra curgerii aerului prin stația de metrou ar fi necesitat o discretizare mai fină în apropierea pereților, ceea ce ar fi dus la un număr mai mare de elemente de calcul și implicit la un timp de calcul nejustificat de mare.

Pentru obținerea unor rezultate optime folosind funcțiile de perete standard se recomandă discretizarea domeniului de calcul astfel încât distanța adimensională y^+ (sau y^*) să aibă valori mai mici de 5 sau cuprinse în intervalul 30-300. În cazul utilizării funcțiilor de perete avansate, nu se recomandă depășirea valorii de 5 pentru y^+ (sau y^*). Important de reținut este faptul că nici una din funcțiile de perete nu generează rezultate bune dacă y^+ (sau y^*) are valori cuprinse între 5 și 30 [68].

În cadrul studiului, y^+ are valorile prezentate în Tabel 2, care aparțin intervalului 30-300, așa cum este recomandat în manualul Ansys Fluent 15.0 [67].

	Pereții tunelului 1	Pereții tunelului 2	Pereții trenului din tunel	Pereții șinelor de tren	Pereții stației 1 Mai	Pereții stației Pajura
Valoarea medie a lui y^+	296,16	208,10	283,17	75,37	110,16	122

Tabel 2 Valorile lui y^+ obținute în cadrul studiului

3.4.4. Modelare transfer de căldură radiativ

Din cele cinci modele de radiație ce pot fi utilizate în Ansys Fluent 15.0 a fost ales pentru acest studiu modelul de radiație cu ordonate discrete (DO) deoarece este mai versatil decât celelalte modele, putând fi utilizat pentru întreaga plajă de grosimi optice. Costul de calcul este modest pentru discretizări unghiulare normale și necesarul de memorie este redus, atât timp cât nu este realizată o discretizare unghiulară fină. [69].

3.4.5. Modelare dispersie poluanți

Pentru a simula incendiul care are loc în ipoteza situației de urgență descrisă la cap 3.2, au fost cuprinse în simulare cele mai importante efecte ale unui incendiu: temperatura înaltă rezultată și concentrațiile mari de CO și CO₂ prezente în fum. Cu toate că fumul are o compoziție mult mai complexă și cuprinde un număr mare de poluanți, în concentrații diferite în funcție de natura materialului combustibil, monoxidul și dioxidul de carbon sunt compuși nelipsiți din structura fumului, fiind poluanții monitorizați în toate experimentele prezentate în literatură [70][71][72].

Prin urmare, în cadrul studiului a fost definit un amestec de aer, CO și CO₂ în concentrații diferite, în funcție de locul de introducere în domeniul de calcul și de momentul introducerii acestuia.

Concentrația componentelor amestecului la inițializarea domeniului de calcul a fost setată diferit, în funcție de locul din domeniul de calcul, pentru a avea valori cât mai apropiate de cele măsurate în stațiile de metrou. Astfel, pentru aerul exterior care este introdus în domeniul de calcul prin centralele de ventilație a fost setată o concentrație de 403,7 ppm pentru CO₂ [73], respectiv 0,627 ppm pentru CO [74]. Pentru inițializarea concentrațiilor de poluanți în stații și tuneluri, precum și pentru aerul care este introdus în domeniul de calcul prin tunelurile care ies din cele două stații de metrou, au fost

setate concentrațiile obținute în urma măsurătorilor efectuate în mai multe stații de metrou din Taiwan [75], pentru CO₂ fiind setată o concentrație de 692,5 ppm, iar pentru CO o valoare de 2,447 ppm.

3.4.6. Condiții la limită

Condițiile la limită au fost setate astfel încât să fie simulat modul real de operare a sistemului de ventilare în condiții de vară. Astfel au fost impuse viteze ale aerului pentru dispozitivele de introducere din stațiile de metrou și la CVI corespunzătoare debitelor asigurate de centralele de ventilare respective. De asemenea, deschiderile de la limita domeniului de calcul (cele trei ieșiri la suprafață și patru tuneluri de legătură ale stațiilor Pajura și 1 Mai cu stațiile învecinate din rețeaua de metrou) sunt considerate a fi la presiune atmosferică, astfel încât să se păstreze bilanțul masic al debitelor de aer.

Condițiile la limită utilizate (centralizate în Tabel 3) au fost determinate pe baza datelor rezultate din studiul experimental [76] efectuat în stația de metrou Piața Unirii.

Tabel 3 Condițiile la limită impuse în studiu

Parametru	Valoare	Observații
Temperatură pereți stații (<i>wall_statie</i>)	20 ⁰ C	[76]
Temperatură pereți tren metrou (<i>wall_tren</i>)	17 ⁰ C	
Temperatură pereți tunel (<i>wall_tunel</i>)	12 ⁰ C	
Temperatură aer stații, la inițializare	20 ⁰ C	
Concentrație CO ₂ aer din stații, la inițializare	692,5 ppm	[75]
Concentrație CO aer din stații, la inițializare	2,447 ppm	
Temperatură aer proaspăt introdus în stație	25 ⁰ C	scenariu de vară
Temperatură aer proaspăt introdus în tunel prin CVI Pajura	30 ⁰ C	scenariu de vară
Concentrație CO ₂ aer proaspăt	403,7 ppm	[73]
Concentrație CO aer proaspăt	0,627 ppm	[74]
Temperatură aer prin ușile de acces de la suprafață (<i>backflow</i>)	30 ⁰ C	scenariu de vară
Viteză introducere aer în stații	+ 2,42 m/s	Corespunzătoare unui debit de 200.000 m ³ /h
Viteză extragere/introducere aer în interstații	+/- 9,1 m/s	Corespunzătoare unui debit de 200.000 m ³ /h

3.4.7. Rezolvare numerică

Pentru simulările realizate în cadrul studiului a fost folosit un solver de presiune, care utilizează pentru discretizarea ecuațiilor diferențiale *metoda volumelor finite*, cea mai recomandată pentru simularea curgerii fluidelor în geometrii complexe. În cadrul acestuia a fost utilizat un algoritm de rezolvare independentă a funcțiilor de conservare a momentului și a presiunii – SIMPLE, acesta fiind recomandat pentru utilizare în cazul geometriilor complexe, care au rețele de discretizare cu un factor de asimetrie (skewness) mare (skewness maxim de 0,92 în cazul acestui studiu).

În ceea ce privește discretizarea spațială, au fost utilizate scheme de tip ”upwind” de ordinul II pentru presiune, moment, energie cinetică turbulentă, rata de dispere a energiei, concentrațiile de CO și CO₂ și energie, deoarece acestea sunt recomandate în cazul rețelelor de discretizare nealiniat cu curgerea,

ele contribuind la obținerea unor rezultate mai precise, chiar dacă prelungesc timpul necesar obținerii convergenței.

Pasul de timp utilizat pentru calcularea soluției a fost fix, cu valoarea de 1 secundă, iar numărul maxim de iterații pentru rezolvarea fiecărui pas de timp a fost de 20 de iterații.

Principalele elemente ce țin de rezolvarea numerică din cadrul modelului CFD dezvoltat sunt prezentate în Tabel 4.

Tabel 4 Setările rezolvare numerică

Solver	Bazat pe presiune (formularea vitezei: absolută)
Cuplare viteză-presiune	algoritm SIMPLE
Discretizare spațială (gradient)	• <i>Least squares cell based</i>; • Presiune: de ordinul II; • Viteză, turbulență, CO, CO₂, energie: scheme upwind de ordinul II • Ordonate discrete (radiație): scheme upwind de ordinul I; • Factori de sub-relaxare: ○ presiune: 0,2; ○ body forces: 0,3; ○ densitate: 0,3; ○ viteză: 0,3; ○ vâscozitate turbulentă: 0,3; ○ CO/CO₂: 0,3; ○ energie: 0,4; ○ ordonate discrete (radiație): 0,7
Rezolvare sistem de ecuații discretizate	Gauss-Siedel cu metodă de tip algebraic multigrid (acelerare convergență)
Simulări în regim tranzitoriu	First order implicit (nr. maxim de iterații / pas de timp: 20) Pas de timp: 1 secundă

3.5. Procedură simulare

Un obiectiv important în realizarea simulării a fost să se reprezinte cât mai mult realitatea, adică să fie aplicate cât mai puține ipoteze simplificatoare. În acest sens, simularea efectuată respectă modul de operare al sistemului de ventilare al rețelei de metrou atât în condiții normale cât și în situații de urgență. O atenție specială a fost acordată trecerii dintr-un mod de operare în altul, simulările fiind realizate întâi în regim staționar pentru a descrie modul de funcționare standard al sistemului de ventilare, apoi, bazat pe rezultatele acestei simulări în regim staționar (considerate acum valori de inițializare) au fost lansate simulările în regim tranzitoriu, odată cu introducerea sursei de căldură și de poluanți (focarul de incendiu) și cu trecerea sistemului de ventilare în modul de operare de urgență. Această metodă de lucru permite surprinderea interacțiunii focarului de incendiu cu mișcarea aerului prin domeniul de calcul (de la primul pas de timp al simulării în regim tranzitoriu), stabilită în timpul simulării în regim staționar. Simularea în regim tranzitoriu are o durată de 30 de minute.

3.5.1. Simulare numerică în regim staționar

Prima simulare a fost efectuată în regim staționar, fără focar de incendiu, cu CVG din stațiile de metrou și CVI Pajura introducând aer, iar CVI 1 Mai și tunel 2 evacuând aer, conform Fig. 40 din capitolul 4.3.1. Obiectivul acestei simulări este de a genera un regim de curgere stabil al aerului în domeniul de calcul, aceste date urmând să fie datele de inițializare ale celor două simulări în regim tranzitoriu.

Pentru verificarea stabilității modelului realizat au fost stabilite 12 puncte de control în domeniul de calcul, în care au fost monitorizate valorile pentru 4 parametri: viteză aer, temperatură aer și concentrații de CO și CO₂ din aer. Având în vedere că valorile parametrilor menționați nu prezintă modificări semnificative în ultimele 1.000 de iterații, se consideră că soluția s-a stabilizat și aceste rezultate sunt folosite ca date de inițializare pentru simularea în regim tranzitoriu.

3.5.2. Simulare numerică în regim tranzitoriu

Pentru trecerea simulării în regim tranzitoriu au fost schimbate condițiile la limită astfel încât să corespundă cu trecerea sistemului de ventilare din regim de funcționare normală în regim de urgență. În acest sens, aerul este introdus prin CVG Pajura (200.000 m³/h) și CVI Pajura (400.000 m³/h) și este evacuat prin CVI 1Mai (400.000 m³/h), în timp ce CVG 1Mai și CVI tunel 2 sunt oprite.

De asemenea, a fost introdus focarul de incendiu ca sursă de căldură și poluanți (CO și CO₂). În cadrul modelului numeric dezvoltat, focarul a fost reprezentat ca o suprafață de formă ovală cu lungime de 3 m și lățime de 0,25 m dispus între roțile trenului, la jumătatea lungimii acestuia. Suprafața respectivă este atât sursă de căldură cât și de poluanți și este prezentată în Fig. 11.

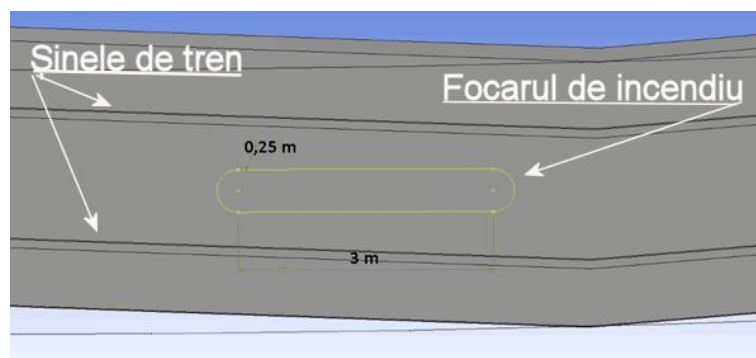


Fig. 11 Suprafața ce definește focarul de incendiu

În aceste condiții, pentru fiecare din cele două simulări au fost rulate peste 47.000 de iterații, într-un timp de calcul CPU de aproximativ 810 ore (27 de ore CPU pentru fiecare minut simulat), pentru a simula curgerea aerului prin tuneluri și stații timp de 30 de minute.

Verificarea stabilității modelului de calcul se realizează prin analizarea bilanțului debitelor masice de aer din domeniul de calcul în diferite momente ale simulării. Acest bilanț reprezintă diferența dintre debitele de aer care intră în domeniul de calcul și debitele de aer care ies din domeniul de calcul. În Tabel 5 se poate observa că bilanțurile debitelor de aer masice obținute în ambele simulări prezintă valori satisfăcătoare, eroarea (neînchiderea) maximă fiind de 0,12 %.

Tabel 5 Bilanțurile debitelor de aer masice obținute în cele două simulări

	Min 1	Min 2	Min 4	Min 7	Min 11	Min 15	Min 20	Min 30
Bilanț debite de aer [kg/s]	-0,274	0,182	0,0323	0,204	0,174	0,117	0,078	0,040
Valoare procentuala	0,11%	0,077%	0,014%	0,086%	0,073%	0,049%	0,033%	0,017%

3.6. Rezultate simulare în regim tranzitoriu

Rezultatele simulării în regim tranzitoriu sunt prezentate din minut în minut pentru primele 5 minute de la izbucnirea incendiului deoarece acestea sunt cele mai importante minute pentru realizarea evacuării de urgență a pasagerilor. De asemenea, sunt prezentate și rezultatele simulării după 10, 15, respectiv 30 de minute, pentru a se sublinia efectul ventilării de urgență a tunelului asupra evacuării

aerului fierbinte și a poluanților și pentru a avea o imagine de ansamblu asupra situației de urgență din tunel pe tot parcursul simulării.

Rezultatele sunt prezentate sub forma unor secțiuni longitudinale ce surprind curgerea aerului, temperatura și concentrațiile de CO și CO₂ în 4 zone importante de pe traseul de evacuare a pasagerilor:

- zona de mijloc a trenului unde a fost amplasat focarul de incendiu;
- capătul trenului din direcția stației 1Mai;
- capătul trenului din direcția stației Pajura;
- centrala de ventilație de interstație Pajura.

Necesitatea întocmirii a 4 secțiuni longitudinale pe traseul de evacuare rezultă din faptul că tunelul 1 este curbat în plan orizontal și nu se poate surprinde într-o singură secțiune longitudinală toată distanța dintre cele două stații de metrou, nici măcar toată lungimea trenului amplasat în zona de curbură a tunelului.

În Fig. 12 este prezentată secțiunea longitudinală trasată prin focarul de incendiu și se poate observa că aceasta cuprinde la extremități spațiul dintre pereții tunelului și corpul trenului.

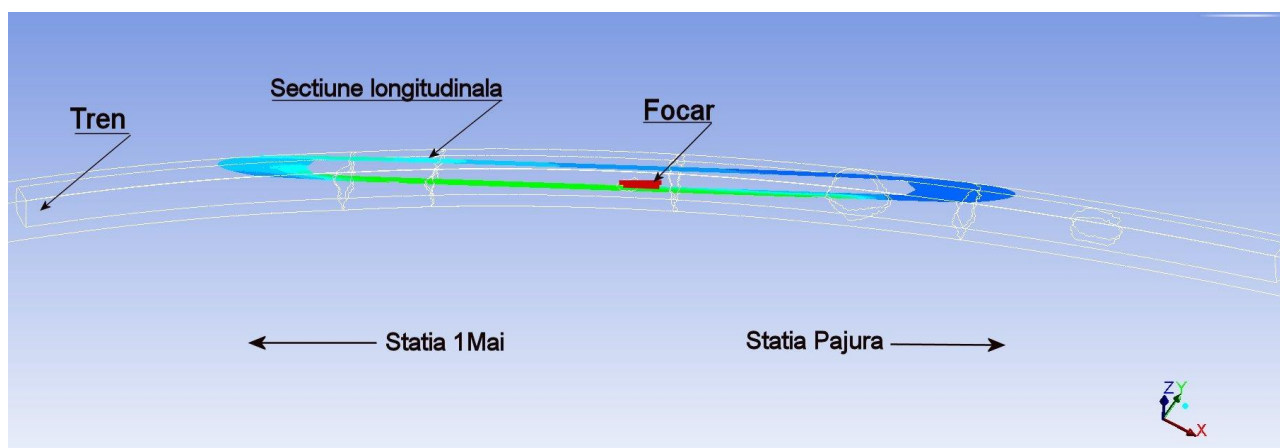


Fig. 12 Secțiune longitudinală prin tunelul 1, în zona focarului de incendiu

În Fig. 13 se poate observa că nu există schimbări majore în timp în ceea ce privește curgerea aerului în jurul trenului, ceea ce înseamnă că modul de operare al sistemului de ventilare în situații de urgență este bine stabilizat. De asemenea, viteza maximă de curgere a aerului nu depășește 3,5 m/s, valoare ce se situează sub limita de viteză a aerului pe căile de evacuare impusă de normativul NFPA 130 [77]. În plus, valori ale vitezei aerului cuprinse între 3-5 m/s au fost determinate și în cadrul experimentului la scară reală din proiectul METRO [78].

În Fig. 14 sunt prezentate câmpurile de temperatură și este vizibil cum aerul fierbinte de sub tren (din apropierea focarului de incendiu) este direcționat în timp spre stația 1Mai, în direcția opusă evacuării pasagerilor. Este important de precizat că, din cauza diferențelor foarte mari de temperatură ale zonelor surprinse în secțiune (zona din apropierea focarului și zonele mai îndepărtate spre stația Pajura), a fost aleasă pentru reprezentarea grafică o scară mai mică, care să pună în evidență dirijarea aerului spre stânga. Temperatura maximă a aerului din regiune, în primele minute ale simulării, are valori cuprinse între 1200⁰-1800⁰ C, în concordanță cu nivelurile de temperatură determinate experimental de Ingason și Lonnermark [64] pentru focare de incendiu cu valori similare de HRR cu cele din această lucrare. Mai mult decât atât, nu există riscul de afectare prin arsuri a tractului respirator al pasagerilor care se evacuează spre stația de metrou Pajura, deoarece temperatura aerului

în această zonă nu înregistrează valori mai mari de 35⁰C, valoare situată sub limita de 60⁰ C impusă de standardul NFPA 130 [77].

În ceea ce privește concentrațiile de CO, respectiv CO₂, putem observa în Fig. 15, respectiv Fig. 16, că în primele 4 minute ale simulării se înregistrează concentrații mai mari decât valorile medii sub tren la câțiva metri spre stația Pajura, însă începând cu minutul 4 aerul poluat este direcționat spre CVI 1Mai, neatingând valori care să pună în pericol viața pasagerilor pe calea de evacuare. Aceeași observație ca în cazul temperaturii este valabilă și aici, în sensul că pentru a putea reprezenta grafic concentrațiile medii de CO și CO₂ din aer nu sunt surprinse valorile maxime din apropierea focarului, care ating valori de 4.162 ppm pentru CO și 42.960 ppm pentru CO₂.

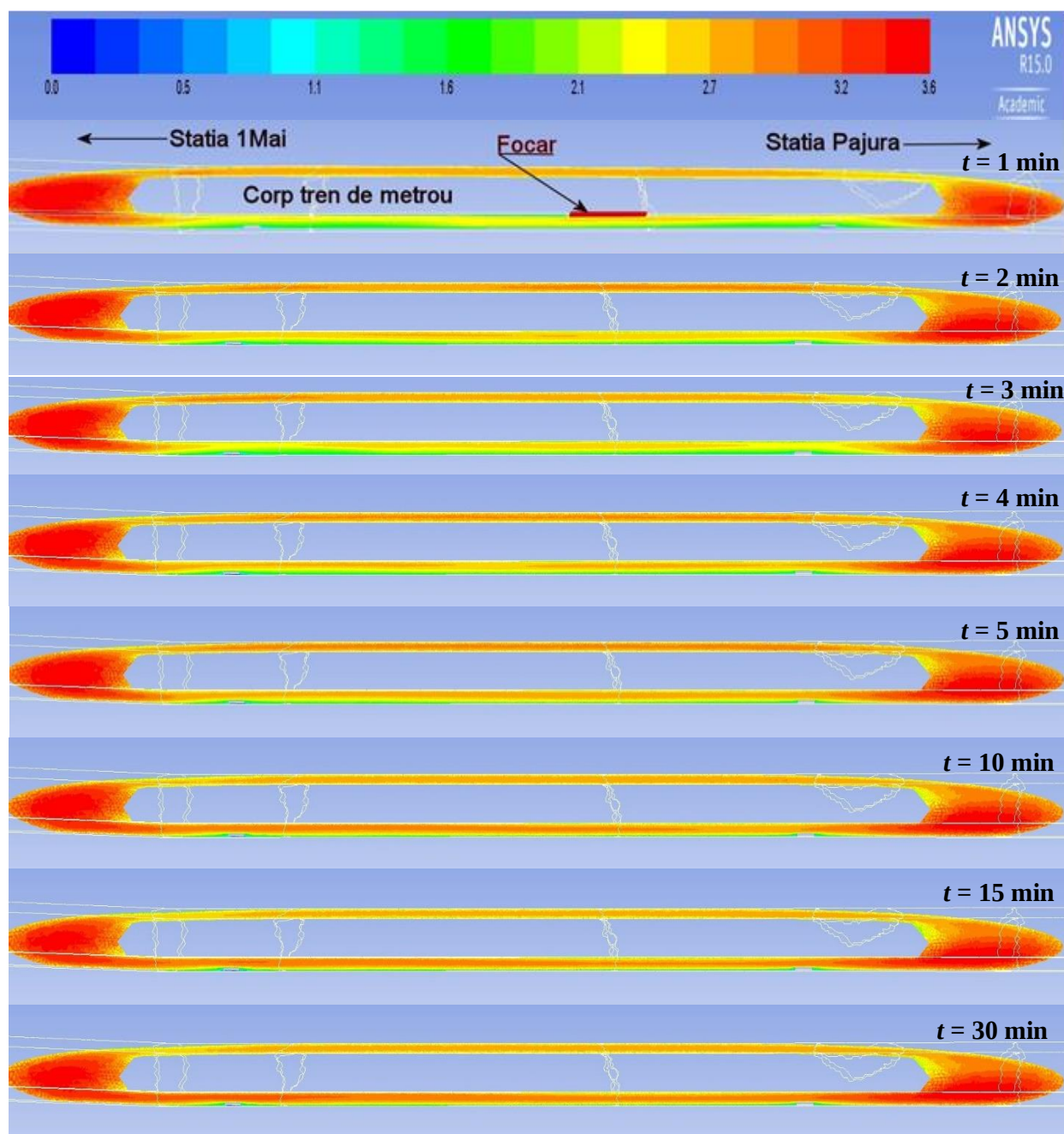


Fig. 13 Secțiune în regiunea focarului – câmpuri de viteză (m/s)

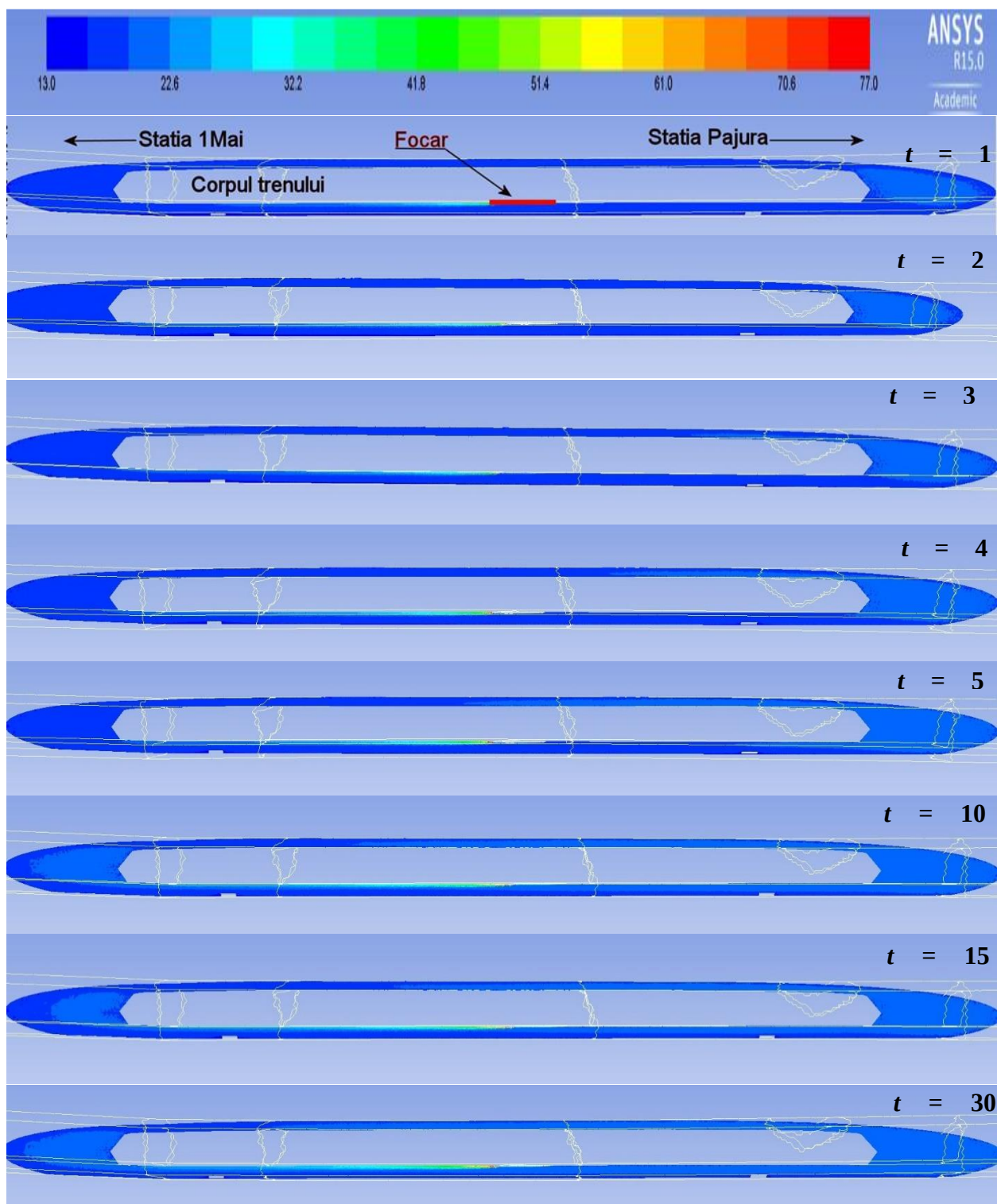


Fig. 14 Secțiune în regiunea focarului – câmpuri de temperatură (°C)

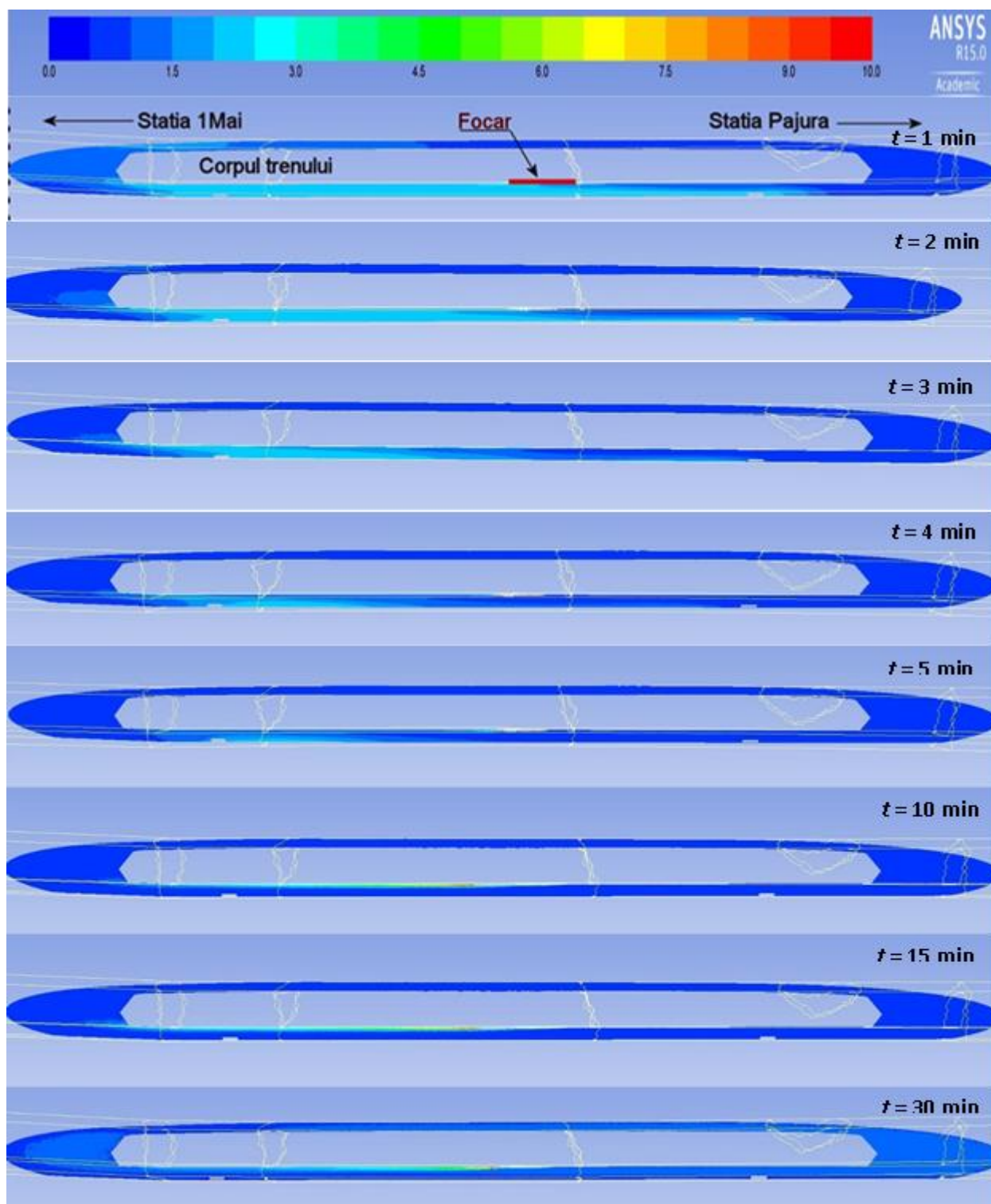


Fig. 15 Secțiune în regiunea focarului – câmpuri de concentrație de CO (ppm)

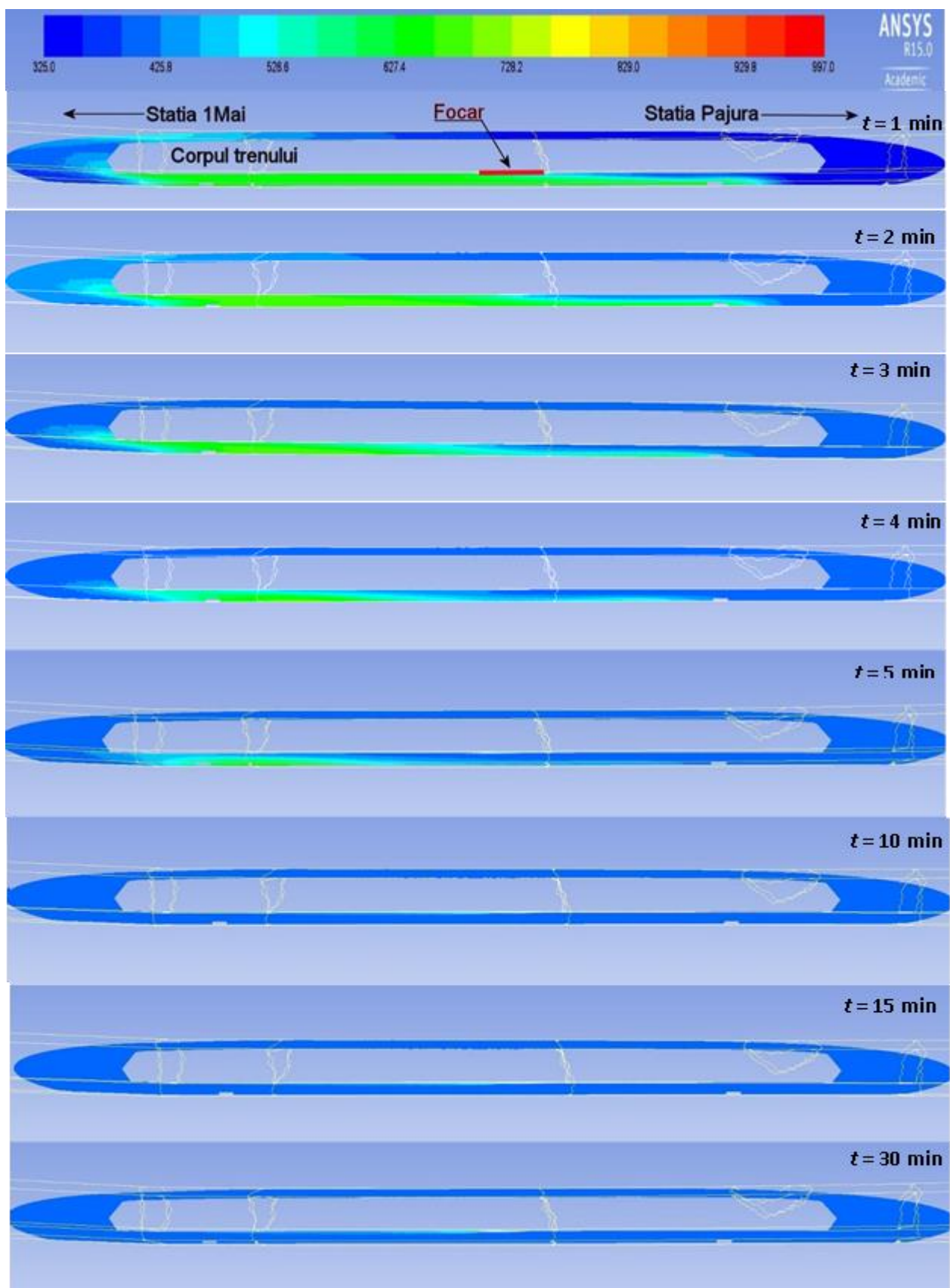


Fig. 16 Secțiune în regiunea focarului – câmpuri de concentrație de CO_2 (ppm)

Analiza câmpurilor de viteză a aerului din secțiunea longitudinală care surprinde capătul trenului din direcția stației 1Mai ilustrează efectul de obstacol al trenului asupra ventilării longitudinale din tunelul 1, precum și faptul că modelul numeric este stabil și curgerea aerului este constantă.

Câmpurile de temperatură și concentrații de poluanți din aceeași secțiune relevă faptul că aerul cu temperaturi mai mari și concentrații crescute de CO și CO₂ este evacuat spre stația de metrou 1Mai, în zona în care nu riscă să pună în pericol viețile oamenilor, fiind în sens opus direcției de evacuare a pasagerilor.

În Fig. 17 este prezentată secțiunea longitudinală din zona capătului trenului din direcția stației Pajura și o porțiune din tunel. După cum se poate observa, în partea dreaptă secțiunea cuprinde o regiune din tunelul 1 (dispusă între corpul trenului și stația Pajura), apoi trece prin corpul trenului (regiunea necolorată din secțiuni) și la final este surprins spațiul dintre pereții tunelului și tren.

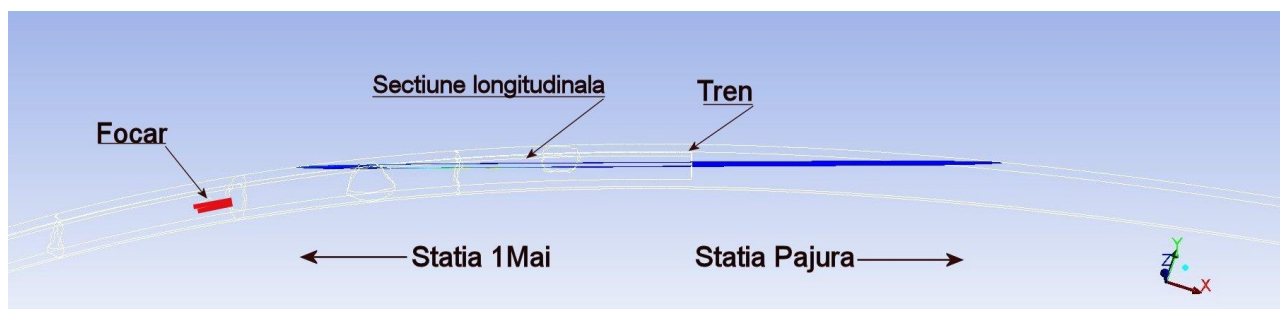


Fig. 17 Secțiune longitudinală prin tunelul 1 care surprinde capătul trenului dinspre stația Pajura

Fig. 18 prezintă câmpurile de viteză din această secțiune și se evidențiază efectul de blocaj al trenului oprit în tunel asupra curgerii aerului. Se observă din nou că viteza aerului spre stația Pajura nu depășește 3 m/s, ceea ce este suficient pentru a ventila corespunzător tunelul dar fără a îngreuna evacuarea persoanelor.

Fig. 19 - Fig. 21 indică faptul că fumul nu ajunge în această zonă deoarece temperatura aerului și concentrațiile de poluanți sunt în limite normale. Această abordare, potrivit căreia aerul fierbinte este un indicator al prezenței fumului a fost propusă de Meng et al [79]. În plus, Chen et al. [53] consideră că prezența concentrațiilor ridicate de CO și CO₂ ar semnala prezența fumului.

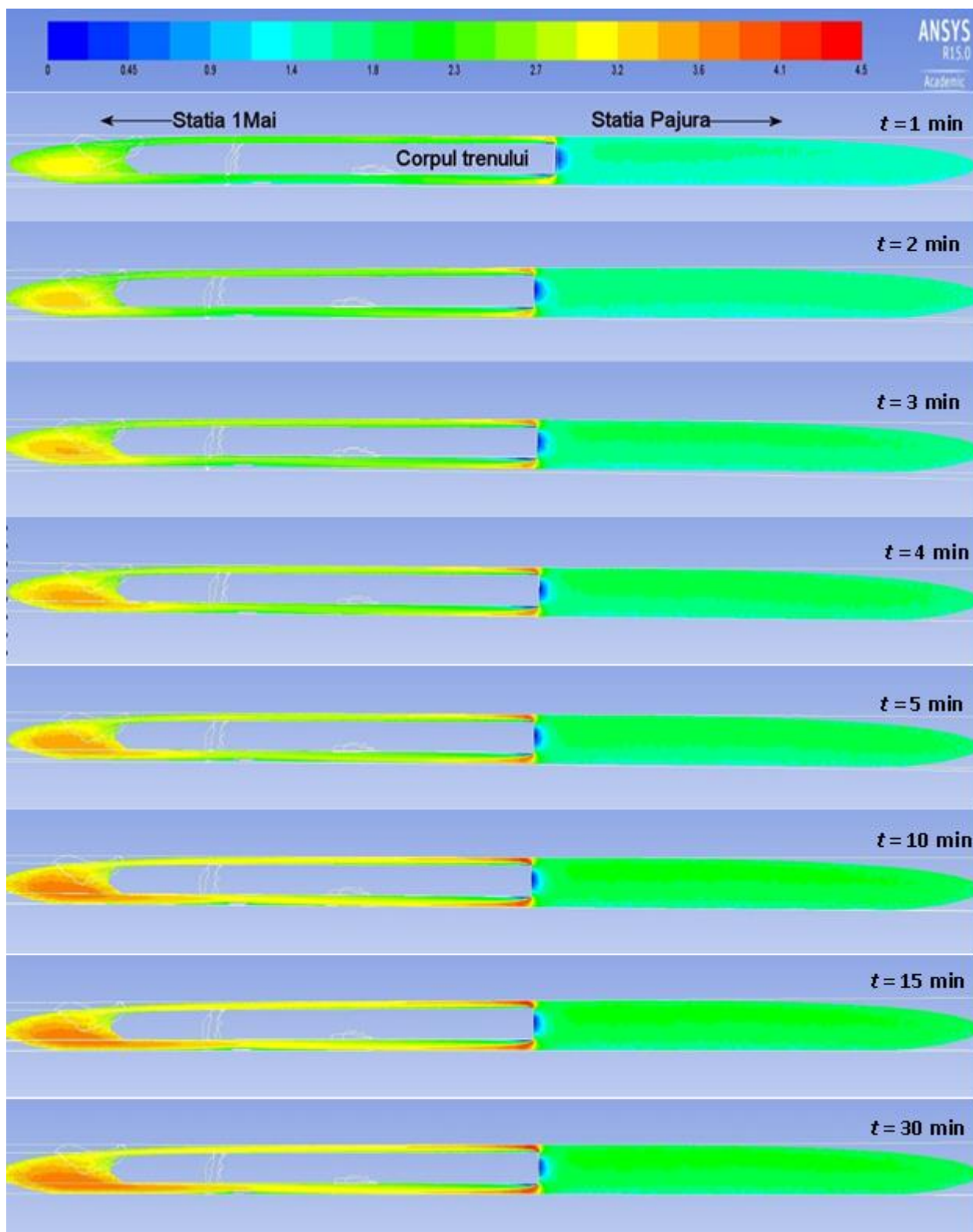


Fig. 18 Secțiune în regiunea capătului de tren din direcția stației Pajura – câmpuri de viteză (m/s)

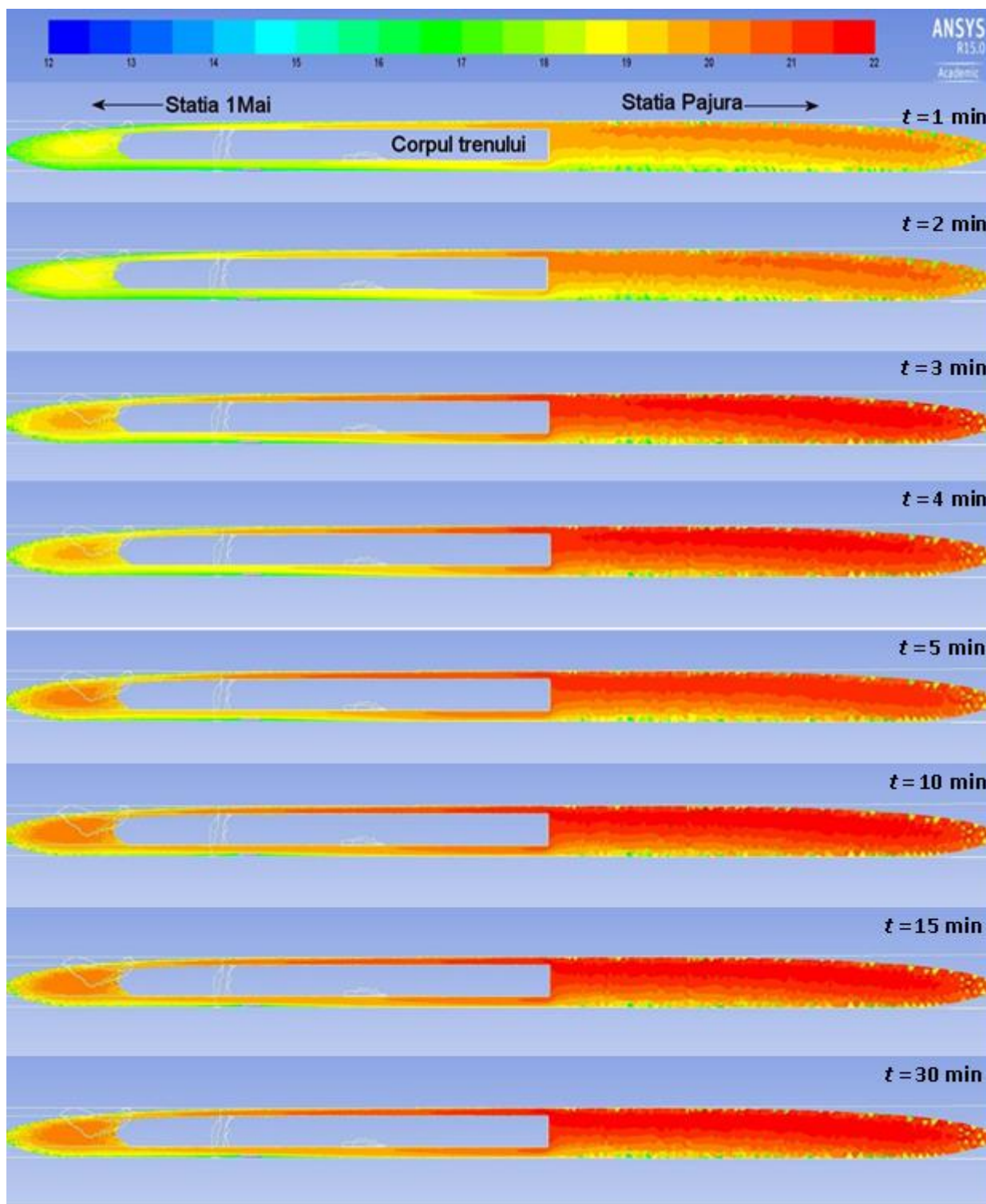


Fig. 19 Secțiune în regiunea capătului de tren din direcția stației Pajura – câmpuri de temperatură ($^{\circ}\text{C}$)

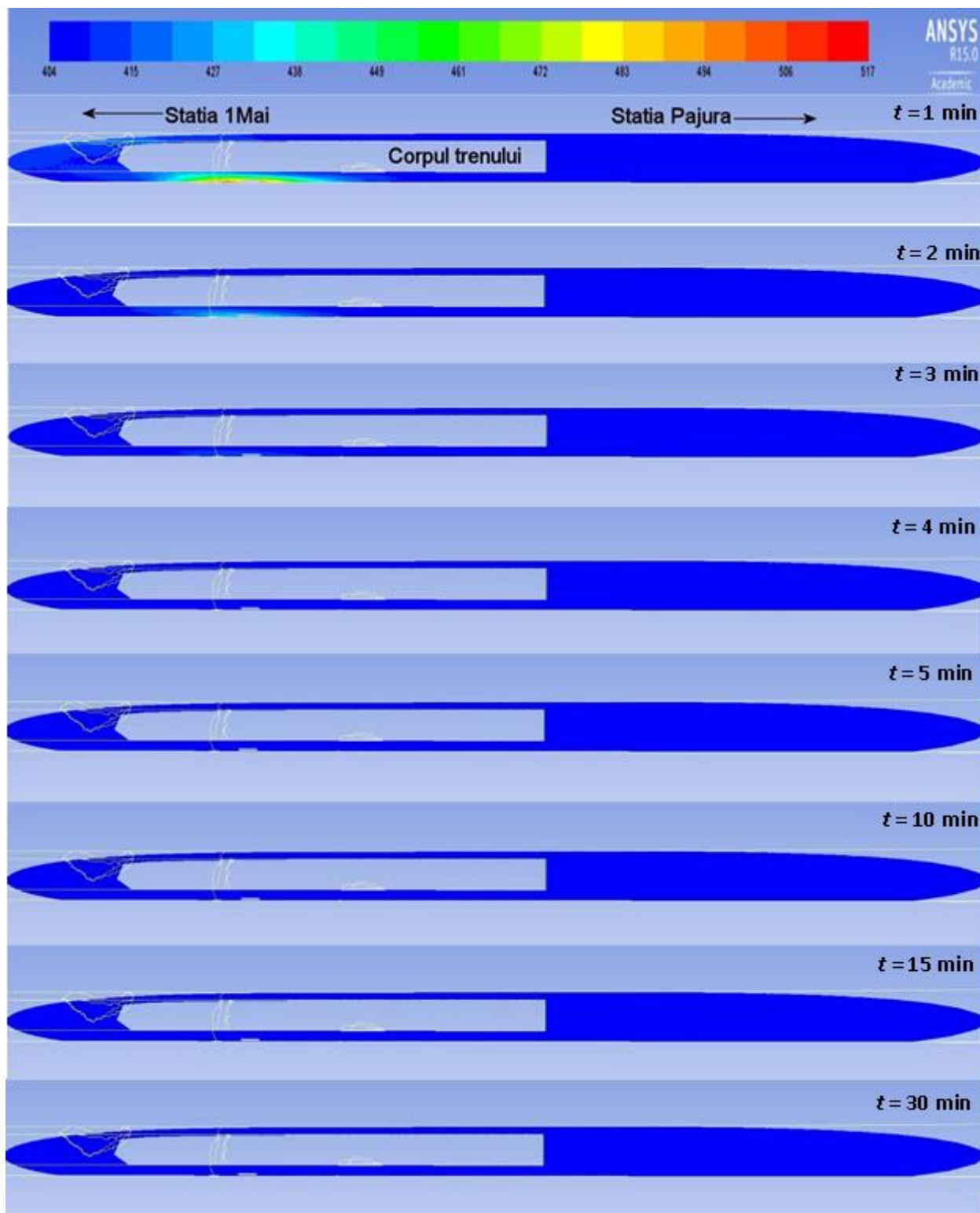


Fig. 21 Secțiune în regiunea capătului de tren din direcția stației Pajura – câmpuri de concentrație de CO₂ (ppm)

Câmpurile de temperatură a aerului și concentrații de poluanți din secțiunea longitudinală trasată prin CVI din tunelul 1 confirmă faptul că temperaturile înalte și concentrațiile de CO și CO₂ din apropierea focarului nu ajung la stația Pajura, fiind astfel create condițiile pentru evacuarea în siguranță a călătorilor din tunel. Viteza aerului rămâne la un nivel (3,5 m/s) care nu împiedică procesul de evacuare a persoanelor până la intrarea în stația Pajura. Pe de altă parte se observă că o bună parte din debitul de aer introdus prin CVI Pajura ajunge în stația de metrou din apropiere, dar cu toate acestea debitul care asigură ventilarea tunelului 1 este suficient pentru a preveni răspândirea fumului în această direcție.

3.7. Sinteză și concluzii

În cadrul acestui capitol a fost verificat modul de funcționare a sistemului de ventilare propus pentru o configurație formată din două stații de metrou conectate prin două tuneluri, în cazul scenariului cel mai defavorabil de inițiere a unei situații de urgență (tren incendiat oprit în punctul de curbură maximă și minim local al unui tunel curbat și înclinat). În acest sens a fost prezentat modul de construcției a geometriei la scara 1:1, realizarea rețelei de discretizare, condițiile la limită impuse, fenomenele fizice modelate, procedura de simulare și rezultatele obținute atât în regim staționar cât și în regim tranzitoriu.

Rezultatele simulării în regim staționar sunt prezentate sub forma unor câmpuri de viteză obținute în secțiuni longitudinale prin centrul dispozitivelor de ventilare circulare amplasate deasupra șinelor de tren din stația Pajura, precum și secțiuni longitudinale prin mijlocul CVI Pajura, CVI 1Mai și CVI tunel 2. Din analiza câmpurilor de viteză astfel obținute se poate observa că regimul de curgere este stabil și rezultatele pot fi folosite ca valori de inițializare pentru simulările în regim tranzitoriu.

Potrivit scenariului de incendiu, odată cu trecerea simulării în regim tranzitoriu a fost introdus focarul de incendiu ca sursă de căldură și poluanți (CO și CO₂). În acest fel au fost realizate două simulări, diferența dintre ele constând în concentrațiile de poluanți generate de focarul de incendiu (în a doua simulare concentrațiile de CO și CO₂ au fost de aproximativ 30 de ori mai mari). Rezultatele celei de-a doua simulări sunt prezentate din minut în minut pentru primele 5 minute de la izbucnirea incendiului, respectiv după 10, 15 și 30 de minute, pentru a se sublinia efectul ventilării de urgență a tunelului asupra evacuării aerului fierbinte și a poluanților. Acestea sunt prezentate sub forma unor câmpuri de viteză, temperatură și concentrații de CO și CO₂ ale aerului în secțiuni longitudinale prin tunel, în 4 zone importante de pe traseul de evacuare a pasagerilor (zona de mijloc a trenului unde a fost amplasat focarul de incendiu, capătul trenului din direcția stației 1Mai și din direcția stației Pajura, respectiv centrala de ventilație de interstație Pajura). Întrucât nu sunt identificate concentrații mari de CO și CO₂ sau temperaturi mari (maxim 35°C) în porțiunea de tunel cuprinsă între focarul de incendiu și stația Pajura (traseul de evacuare a pasagerilor), putem concluziona că sistemul de ventilare propus asigură condiții optime pentru evacuarea de urgență a călătorilor din tunel.

4. Construcție model numeric CFD pentru situația de urgență a unui tren incendiat oprit la peron în stație

4.1. Configurație stație de metrou studiată

Obiectivul principal al acestui studiu este verificarea modului de funcționare a sistemului de ventilare propus pentru o stație de metrou cu două niveluri subterane echipată cu uși de tip PSD (*platform screen doors*) în situația de urgență a unui tren incendiat oprit în stație.

Se menționează că stația de metrou analizată este similară cu cea din studiul precedent, însă se consideră că în această situație este echipată cu uși de protecție de tip PSD, care separă tunelul de peron și împiedică accidentările cauzate de căderea pasagerilor pe calea de rulare.

4.2. Scenariu de urgență

Scenariul de urgență în acest caz pornește de la prezumția că un tren a fost cuprins de incendiu între două stații, dar mecanicul reușește să ajungă cu trenul în stația următoare (Pajura) pentru a coborî pasagerii, conform procedurilor indicate în [59].

Natura focarului de incendiu se presupune a fi similară cu cea luată în calcul pentru scenariul precedent, și anume o defecțiune mecanică sau electrică localizată sub șasiul trenului, aproape de mijlocul lungimii acestuia, care duce la inițierea unui incendiu sub șasiu. Pe de altă parte, pentru a simula situația corespunzătoare unuia dintre cele mai periculoase scenarii privind pătrunderea fumului și gazelor fierbinți în stația de metrou (*worst case scenario*), de această dată focarul a fost amplasat pe partea laterală a trenului, la mijlocul lungimii acestuia, așa cum poate fi văzut în Fig. 22.

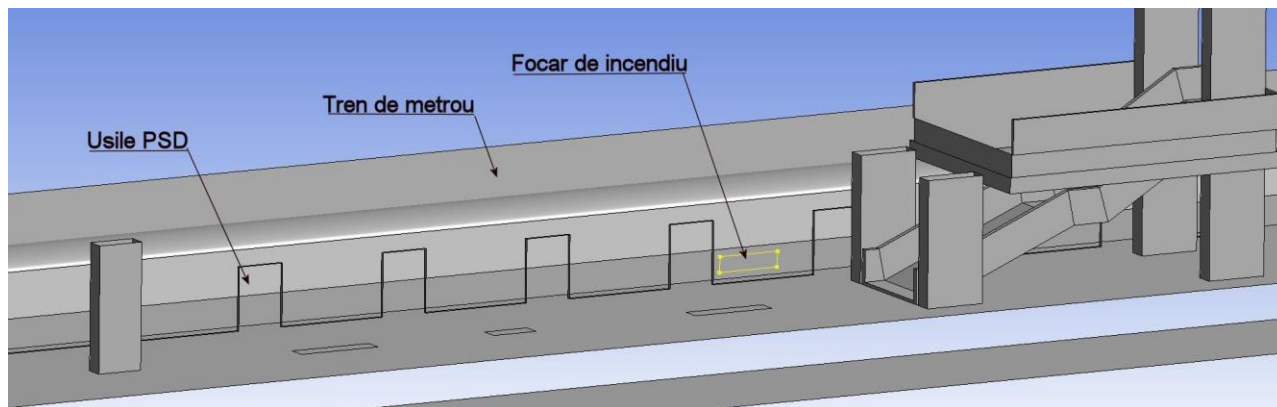


Fig. 22 Amplasarea focarului de incendiu pe partea laterală a trenului

În ceea ce privește rata maximă de eliberare a căldurii (HRR) specifică focarului de incendiu, o valoare maximă de 10 MW a fost utilizată în acest studiu pentru verificarea în condiții cât mai nefavorabile a modului de funcționare a sistemului de ventilare a stației de metrou prevăzută cu sistemul PSD.

Asemănător studiului precedent, rata de eliberare a căldurii a avut un model de intensificare de tipul t^2 , astfel încât HRR-ul maxim și emisiile de poluanți au crescut în primele 10 minute ale simulării, ca în cazul unui incendiu real. Modelarea curbei de dezvoltare a incendiului și obținerea emisiilor de CO și CO₂ echivalente s-a făcut la fel ca în studiul precedent, motiv pentru care metoda nu va mai fi detaliată din nou. Concentrațiile maxime de poluanți obținute în FDS sunt prezentate în Fig. 23.

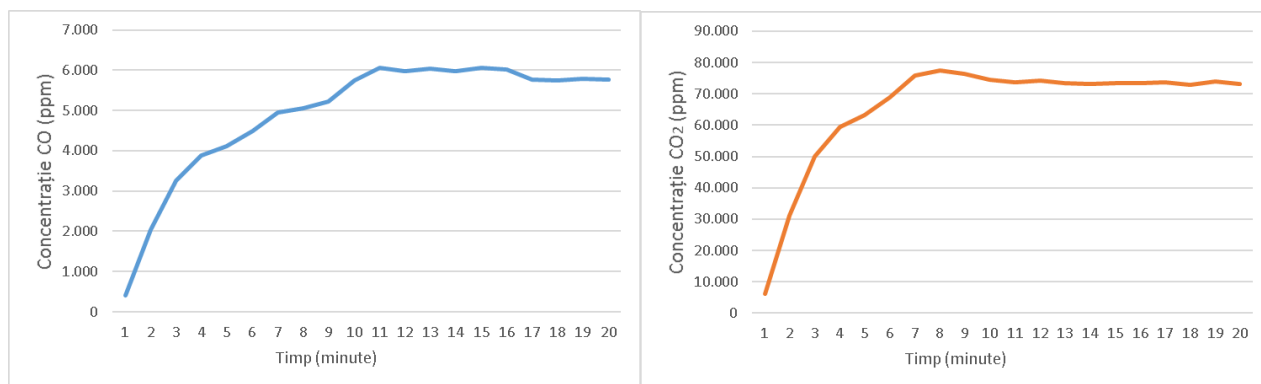


Fig. 23 Concentrațiile de CO și CO₂ obținute în urma studiului din FDS

4.3. Sistem de ventilare

Ventilarea stației de metrou Pajura este asigurată de o centrală de ventilare generală (CVG) cu un debit de 200.000 m³/h în regim normal, respectiv 400.000 m³/h în regim de urgență. CVG poate fi folosită atât pentru introducere cât și pentru evacuare și este dimensionată astfel încât să mențină vara o temperatură maximă de 25°C în stația de metrou. Aerul proaspăt este introdus în stație prin intermediul a două conducte de aer, dispuse de o parte și de cealaltă a peronului tip insulă, deasupra șinelor de tren. Aceste conducte de aer sunt prevăzute cu 80 de dispozitive de ventilare circulare, cu diametrul de 30 cm, câte 40 de fiecare parte a peronului (Fig. 24).

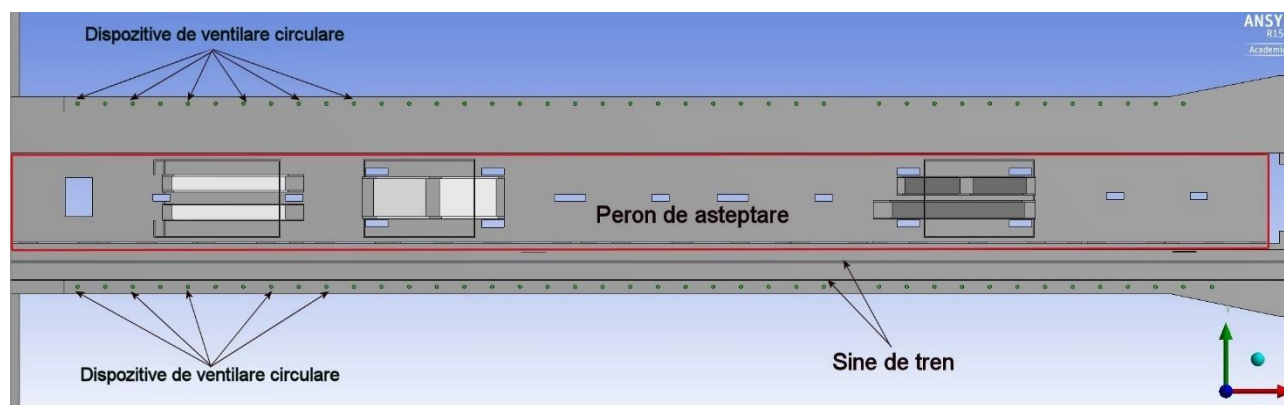


Fig. 24 Dispunere dispozitive de ventilare în stația de metrou

În plus, pentru a preveni dispersia particulelor de praf antrenate de mișcarea garniturilor de metrou și pentru a prelua căldura degajată la frânarea în stații, a fost prevăzut un sistem de ventilare a zonei de sub peroane. Acesta aspiră aerul de la nivelul căii de rulare cu un debit maxim de 20.000 m³/h.

4.3.1. Funcționare în regim normal

Funcționarea în regim normal a sistemului de ventilare presupune că pe timp de vară aerul proaspăt este introdus prin CVG a stației și este evacuat prin CVI montate în tuneluri, iar pe timp de iarnă

circuitul de introducere-evacuare este inversat pentru a folosi degajările de căldură din tunel la încălzirea aerului direcționat către stații.

4.3.2. Funcționare în regim de urgență

În cazul în care un tren incendiat ajunge în stație, prioritatea este evacuarea de urgență a pasagerilor la suprafață și ulterior intervenția serviciului privat de pompieri și a serviciilor profesionale pentru situații de urgență pentru stingerea incendiului. În acest sens, CVG din stație trece la modul de funcționare în regim de urgență (evacuare aer cu un debit de $4000.000 \text{ m}^3/\text{h}$), toate ușile PSD de pe partea cu trenul incendiat se deschid, iar cele de pe partea opusă rămân închise (Fig. 25). În acest fel se încearcă prevenirea răspândirii fumului și gazelor fierbinți din tunel pe platformă, scopul fiind ca acestea să fie evacuate prin cele 40 de dispozitive de ventilare de deasupra trenului și cele 15 dispozitive de aspirație ale sistemului de ventilare dispuse în zona de sub peron.

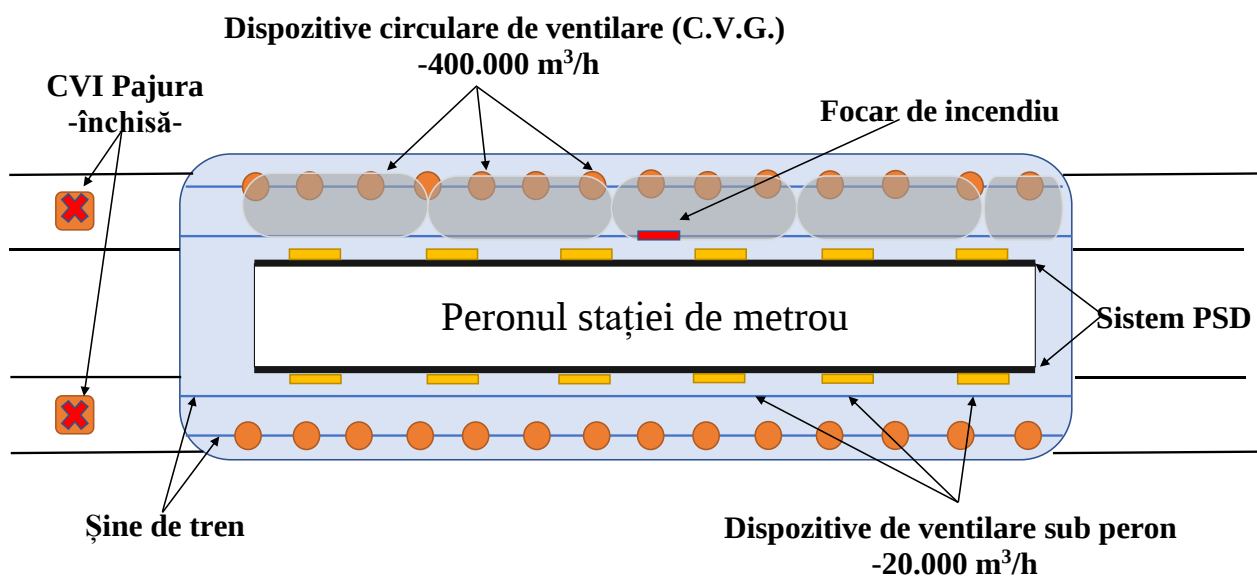


Fig. 25 Funcționarea sistemului de ventilare în regim de urgență

4.4. Construcție model numeric

4.4.1. Geometrie

Modelul geometric al stației de metrou a fost preluat din studiul anterior, diferența constând în adăugarea ușilor PSD și a dispozitivelor de ventilare a zonei de sub peron.

4.4.2. Rețea de discretizare

Rețeaua de discretizare este nestructurată, formată din volume finite de formă tetraedrică, la fel ca în cazul rețelei prezentate la capitolul anterior. În construirea ei au fost utilizate atât funcții de control global, cât și funcții de control local, fiind alese pentru discretizare locală următoarele elemente de geometrie:

- Zona din apropierea dispozitivelor de evacuare a aerului prin CVG Pajura;
- Zona din apropierea dispozitivelor de evacuare a aerului din zona de sub peron;
- Zona din apropierea focarului de incendiu;
- Zona din apropierea șinelor de tren.

În urma aplicării funcțiilor de control global și local al elementelor de discretizare s-au obținut **14.164.713** de celule de calcul.

4.4.2.1. Control calitate elemente de discretizare spațială

La fel ca în cazul primei simulări, calitatea rețelei de discretizare este verificată prin criteriul asimetriei (skewness). Pe baza acestui criteriu este evaluat gradul de deformare al elementelor generate. Rezultatele acestei verificări pentru rețeaua de discretizare realizată în acest studiu sunt prezentate în Tabel 6.

Tabel 6 Numărul elementelor de discretizare și calitatea lor

Numărul de elemente	Procent din volumul total		Valoarea factorului de asimetrie (skewness)	Evaluarea calitativă a elementelor de discretizare
$1,81 \cdot 10^6$	13,4 %	71,7 %	0,0495	Calitate foarte bună
$3,95 \cdot 10^6$	29,7 %		0,148	
$3,91 \cdot 10^6$	28,6 %		0,247	
$2,65 \cdot 10^6$	17,7 %	25,6 %	0,346	Calitate bună
$1,29 \cdot 10^6$	7,92 %		0,445	
$4,07 \cdot 10^5$	2,22 %	2,66 %	0,544	Calitate satisfăcătoare
$1,07 \cdot 10^5$	0,39 %		0,643	
$3,58 \cdot 10^4$	0,05 %		0,742	
$1,06 \cdot 10^4$	0,0016 %		0,841	Calitate slabă
$1,15 \cdot 10^3$	0,000088 %		0,94	Calitate foarte slabă

Fig. 26 Numărul elementelor de discretizare raportat la factorul skewness

Se observă că rețeaua de discretizare este formată în proporție de 71,7 % din elemente cu un factor de asimetrie mai mic de 0,25, deci cu elemente de o calitate foarte bună. În proporție de 97,3% elementele obținute au un factor de asimetrie mai mic de 0,5, ceea ce înseamnă că marea majoritate a elementelor de discretizare au o calitate bună și rețeaua poate fi folosită ulterior pentru efectuarea simulării numerice.

4.4.2.2. Verificare independență rezultate față de nivel de discretizare

Pentru a verifica dacă rețeaua de discretizare nu influențează soluțiile obținute a fost realizat un test de independență a nivelului de discretizare. În acest sens, prin variația funcțiilor de control global și local prezentate anterior au fost realizate 3 rețele de discretizare cu un număr de 10 milioane, 14 milioane și 18 milioane de elemente. Funcțiile de control local au vizat aceleași zone, considerate importante pentru descrierea curgerii aerului prin domeniul de calcul. Pentru fiecare dintre cele 3 rețele de discretizare a fost realizată câte o simulare în regim staționar, și a fost urmărită evoluția a doi parametri (viteza și temperatura aerului) într-un punct din domeniul de calcul, considerat reprezentativ (punct situat în mijlocul stației, între ușa din stânga focarului și stâlpul de rezistență, la 1,8 m față de pardoseală).

Cele 3 rețele de discretizare au fost comparate pe baza câmpurilor de viteze ale aerului într-o secțiune transversală prin focar, precum și prin evoluția celor 2 parametri ai aerului în punctul menționat în ultimele 1.000 de iterații.

În Fig. 27 sunt prezentate câmpurile de viteză a aerului într-o secțiune transversală prin focar și se poate observa că primul câmp de viteze este diferit de următoarele două și prezintă viteze ale aerului

mult mai mari decât următoarele două figuri (zonele necolorate din prima figură se datorează scării de viteză care nu surprinde valori mai mari de 0,28 m/s).

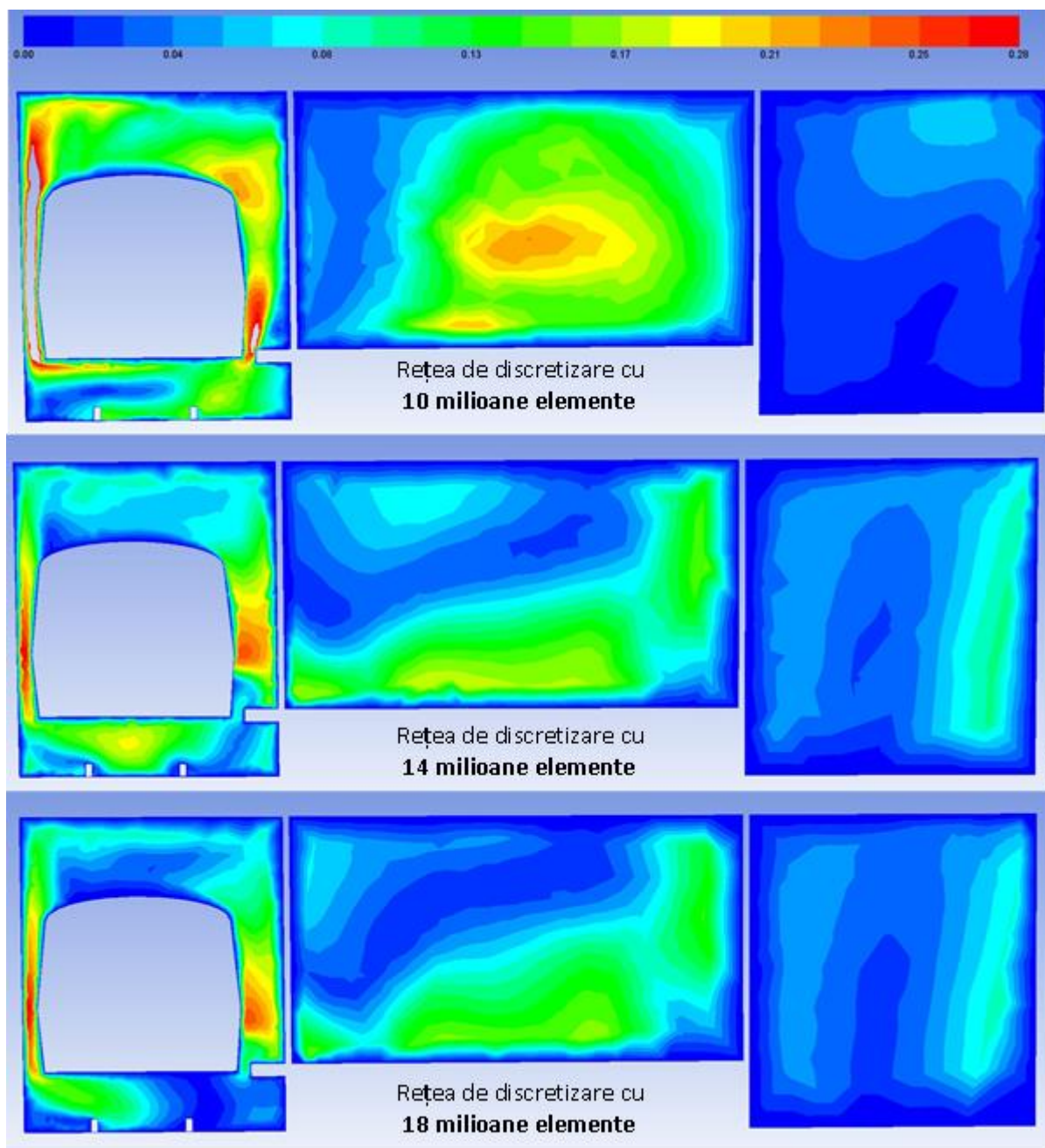


Fig. 27 Câmpuri de viteze aer (m/s) în aceeași secțiune transversală pentru cele 3 variante de rețea de discretizare

În Fig. 28 și Fig. 29 se observă că, în cazul rețelei de discretizare cu 10 milioane de elemente, atât viteza cât și temperatura aerului în punctul de probă prezintă diferențe mari față de celelalte două rețele de discretizare. În plus, diferența dintre viteza medie corespunzătoare rețelei cu 14 milioane de elemente (0,064 m/s) și viteza medie a rețelei cu 18 milioane de elemente (0,053 m/s) este de doar 17%, iar în ceea ce privește diferența de temperatură medie diferența este și mai mică, de aproximativ 1 %. Prin urmare, putem considera că prin creșterea numărului de elemente ale rețelei de discretizare de la 14 la 18 milioane de elemente nu se aduc îmbunătățiri majore în ceea ce privește curgerea aerului, motiv pentru care a fost utilizată pentru realizarea studiului rețeaua de discretizare cu 14 milioane de elemente.

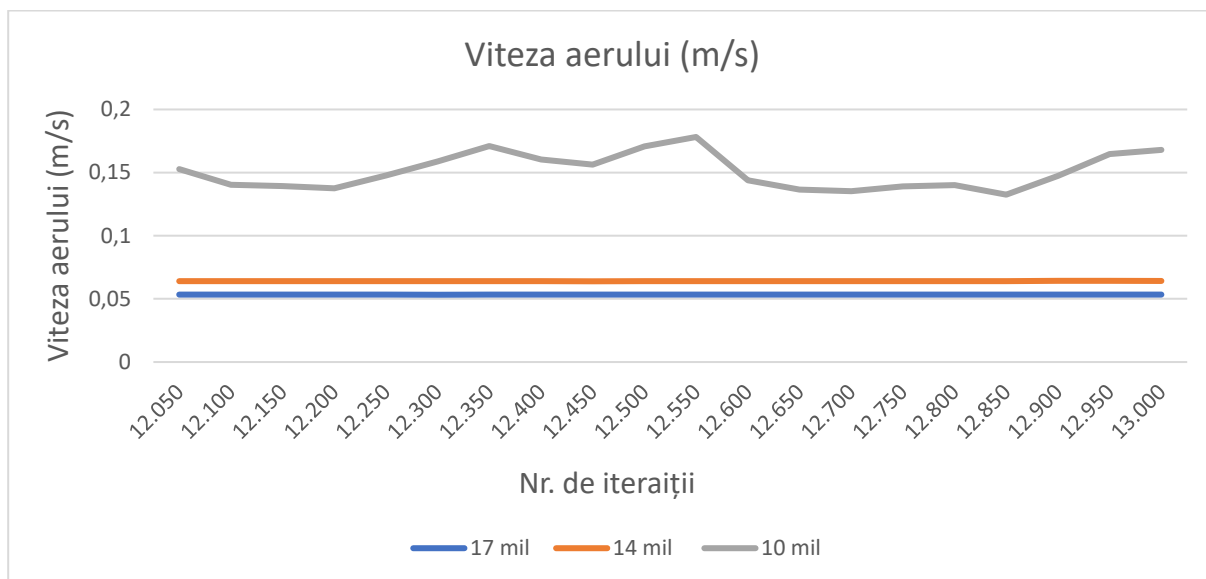


Fig. 28 Valori de viteză a aerului înregistrate în punctul de control în cele 3 rețele de discretizare (m/s)

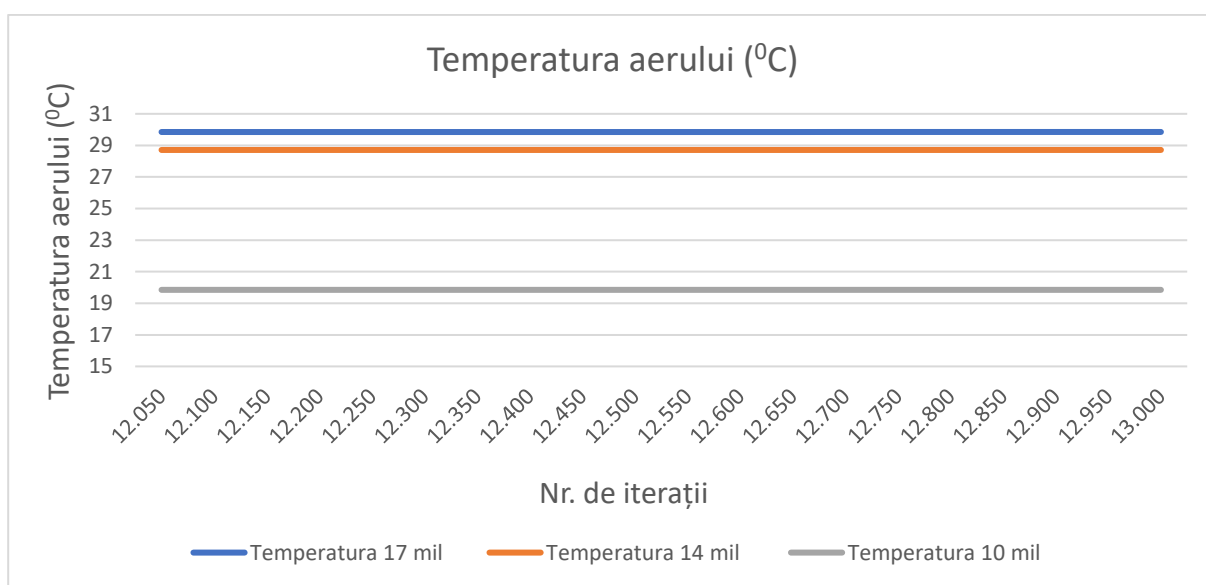


Fig. 29 Valori de temperatură a aerului înregistrate în punctul de control în cele 3 rețele de discretizare (°C)

4.4.3. Modelare curgere turbulentă și curgere în apropierea frontierelor solide

Pe baza considerentelor expuse în capitolul 3.4.3, a fost ales pentru implementare modelul de turbulență RANS cu două ecuații $k-\epsilon$, împreună cu modelul funcției standard de perete (*Standard wall function*).

Valorile medii ale distanței adimensionale y^+ obținute în cadrul acestui studiu sunt prezentate în Tabel 7.

Tabel 7 Valorile lui y^+ obținute în cadrul studiului

	Zona focarului	Pereții trenului de metrou	Pereții stației de metrou	Pereții dispozitivelor de evacuare a aerului din zona de sub peron
Valoarea lui y^+	5,64	36,52	33,23	44,43

În manualul de utilizare Ansys Fluent 15.0 [67] se recomandă ca distanța adimensională y^+ în cazul utilizării funcțiilor de perete să fie cuprinsă în intervalul 0-5 sau 30-300, condiție respectată și în cadrul studiului prezent.

4.4.4. Modelare transfer de căldură radiativ

A fost ales pentru studiu modelul de radiație cu ordonate discrete (DO) deoarece este mai versatil decât celelalte modele, putând fi utilizat pentru întreaga plajă de grosimi optice. Acesta permite rezolvarea unei game variate de probleme, de la transfer radiativ de la perete la perete până la probleme de combustie și rezolvarea radiației pentru suprafețe semi-transparente. Costul de calcul este modest pentru discretizări unghiulare normale și necesarul de memorie este redus, atât timp cât nu este realizată o discretizare unghiulară fină. [69].

4.4.5. Modelare dispersie poluanți

În cadrul studiului a fost definit un amestec de aer, CO și CO₂ în concentrații diferite, în funcție de faza de dezvoltare a incendiului. Pentru rezolvarea ecuațiilor de conservare a masei corespunzătoare pentru CO și CO₂ s-a folosit metoda prezentată în cadrul studiului precedent (cap. 3.4.5).

Pentru inițializarea concentrațiilor de poluanți în stația de metrou, precum și pentru aerul care este introdus în domeniul de calcul prin tunelurile care fac legătura cu următoarele stații de metrou, au fost utilizate datele obținute în urma măsurărilor efectuate în mai multe stații de metrou din Taiwan [75], referitoare la concentrațiile de CO₂ (692,5 ppm) și CO (2,447 ppm).

4.4.6. Condiții la limită

Condițiile la limită utilizate în studiu descriu modul real de operare a sistemului de ventilare în situația unui tren incendiat oprit în stație. Pornind de la debitele asigurate de CVG Pajura și centrala sistemului de ventilare a zonei de sub peron, au fost determinate viteze aerului în dispozitivele de ventilare ale celor două sisteme și au fost folosite ca și condiție la limită. Pentru a se păstra bilanțul masic al debitelor de aer, deschiderile de la limita domeniului de calcul sunt considerate a fi la presiune atmosferică. Având în vedere că aerul din tuneluri și aerul din exterior au fracții masice de poluanți diferite, au fost setate valorile corespunzătoare ale temperaturii aerului și concentrațiilor de poluanți care pot intra în domeniul de calcul dacă sunt calculate presiuni negative (*backflow*). În acest sens, pentru ieșirile la suprafață au fost impuse proprietățile aerului proaspăt, iar pentru ieșirile tunelurilor de legătură au fost impuse proprietățile aerului de la inițializarea domeniului de calcul.

Condițiile la limită utilizate sunt prezentate în Tabel 8.

Tabel 8 Condițiile la limită utilizate în studiul prezent

Parametru	Valoare	Observații
Temperatură pereți stații (<i>wall_statie</i>)	20 ⁰ C	[76]
Temperatură pereți tren metrou (<i>wall_tren</i>)	17 ⁰ C	
Temperatură aer stații, la inițializare	20 ⁰ C	
Concentrație CO ₂ aer din stații, la inițializare	692,5 ppm	[75]
Concentrație CO aer din stații, la inițializare	2,447 ppm	
Concentrație CO ₂ aer care intra prin ușile de acces de la suprafață (<i>backflow</i>)	403,7 ppm	[73]
Concentrație CO aer care intra prin ușile de acces de la suprafață (<i>backflow</i>)	0,627 ppm	[74]

Temperatură aer prin uşile de acces de la suprafaţă (<i>backflow</i>)	30 ⁰ C	scenariul de vară
Viteză extragere aer prin CVC a statiei	- 4,84 m/s	Corespunzătoare unui debit de 200.000 m ³ /h
Viteză extragere aer prin dispozitivele de ventilare a subperonului	- 1,54 m/s	Corespunzătoare unui debit de 20.000 m ³ /h

4.4.7. Rezolvare numerică

La fel ca în cazul studiului precedent, a fost utilizat un solver de presiune care utilizează pentru discretizarea ecuaţiilor diferenţiale *metoda volumelor finite* şi un algoritm de rezolvare independentă a funcţiilor de conservare a momentului şi a presiunii – SIMPLE, acesta fiind recomandat pentru utilizare în cazul geometriilor complexe, care au reţele de discretizare cu un factor de asimetrie mare (skewness maxim de 0,928 în cazul acestui studiu).

Pasul de timp utilizat pentru calcularea soluţiei a fost fix, cu valoarea de 0,5 secunde, iar numărul maxim de iteraţii pentru rezolvarea fiecărui pas de timp a fost de 15 de iteraţii.

Principalele elemente ce ţin de rezolvarea numerică din cadrul modelului CFD dezvoltat sunt prezentate în Tabel 9.

Tabel 9 Setări rezolvare numerică

Solver	Bazat pe presiune (formularea vitezei: absolută)
Cuplare viteză-presiune	algoritm SIMPLE
Discretizare spaţială (gradient)	• Least squares cell based; • Presiune: de ordinul II; • Viteză, turbulenţă, CO, CO₂, energie: scheme upwind de ordinul II • Factorii de sub-relaxare: ○ presiune: 0,3; ○ densitate: 0,5; ○ body forces: 0,5; ○ viteză: 0,4; ○ energie cinetica turbulentă: 0,4; ○ rata de disipare a energiei cinetice turbulente: 0,4; ○ vâscozitate turbulentă: 0,5; ○ CO/CO₂/ 0,5; ○ energie: 0,5;
Rezolvare sistem de ecuaţii discretizate	Gauss-Siedel cu metodă de tip algebraic multigrid (accelerare convergenţă)
Simulări în regim tranzitoriu	First order implicit (nr. maxim de iteraţii / pas de timp: 20) Pas de timp: 1 secundă

4.5. Procedură simulare

Simularea realizată respectă modul de operare al sistemului de ventilare al staţiei de metrou atât în condiţii normale cât şi în situaţii de urgenţă. Mai mult decât atât, o atenţie specială a fost acordată trecerii dintr-un mod de operare în altul. În acest sens simularea a fost realizată întâi în regim staţionar pentru a descrie modul de funcţionare standard al sistemului de ventilare, apoi, bazat pe rezultatele acestei simulări în regim staţionar (considerate acum valori de iniţializare) a fost lansată simularea în regim tranzitoriu, odată cu introducerea sursei de căldură şi de poluanţi (focarul de incendiu)

Simularea în regim tranzitoriu are o durată de 20 de minute, evoluția în timp a focarului în termen de sursă de căldură și de emisie de poluanți (CO și CO₂) fiind prezentată în capitolul 4.2.

4.5.1. Simulare numerică în regim staționar

Prima simulare a fost efectuată în regim staționar, fără focar de incendiu, cu CVG în regim de evacuare aer cu un debit de 200.000 m³/h. Obiectivul acestei simulări este de a genera un regim de curgere stabil al aerului în domeniul de calcul, aceste date urmând să fie datele de inițializare ale simulării în regim tranzitoriu.

Pentru verificarea stabilității modelului realizat au fost stabilite 3 puncte de control în domeniul de calcul, în care au fost monitorizate valorile pentru 3 parametri: viteză aer, temperatură aer și concentrație de CO din aer. Având în vedere că valorile acestor parametri nu prezintă modificări semnificative în ultimele 1.000 de iterații, curgerea aerului a fost considerată stabilă și s-a trecut mai departe la simularea în regim tranzitoriu.

4.5.2. Simulare numerică în regim tranzitoriu

Odată cu trecerea simulării în regim tranzitoriu a fost introdus focarul de incendiu ca sursă de căldură și poluanți (CO și CO₂), conform scenariului descris la capitolul 4.2.

În cadrul modelului numeric dezvoltat, focarul a fost reprezentat ca o suprafață de formă dreptunghiulară cu lungime de 2 m și lățime de 0,5 m dispus pe partea laterală a ternului, la mijlocul lungimii acestuia. Suprafața respectivă este atât sursă de căldură cât și de poluanți. Modelarea transportului și difuziei de CO și CO₂ în domeniul simulat s-a realizat prin introducerea a două ecuații de conservare a fracției de masă CO și CO₂ în modelul CFD.

Folosind un pas de timp de 0,5 secunde și un număr de 15 iterații/pas de timp au fost rulate peste 47.000 de iterații, într-un timp de calcul CPU de aproximativ 320 ore (în medie 16 ore CPU pentru fiecare minut), pentru a simula curgerea aerului prin stație timp de 20 de minute.

Verificarea stabilității modelului de calcul se realizează prin analizarea bilanțului debitelor masice de aer din domeniul de calcul în diferite momente ale simulării. Acest bilanț reprezintă diferența dintre debitele de aer care intră în domeniul de calcul și debitele de aer care ies din domeniul de calcul.

În Tabel 10 se poate observa că bilanțurile debitelor de aer masice obținute în simulare prezintă valori foarte bune, eroarea (neînchiderea) maximă fiind de ordinul 10⁻⁶.

Tabel 10 Bilanțurile debitelor de aer masice obținute în simulare

	Regim staționar	Minutul 1	Minutul 2	Minutul 3	Minutul 4	Minutul 10	Minutul 15	Minutul 20
Bilanț debite de aer [kg/s]	-8,23·10 ⁻⁷	3,24·10 ⁻⁷	3,3·10 ⁻⁷	3,95·10 ⁻⁶	4,73·10 ⁻⁶	3,48·10 ⁻⁶	4,01·10 ⁻⁶	3,21·10 ⁻⁷
Valoare procentuală	2·10 ⁻⁸ %	2,3·10 ⁻⁷ %	2,37·10 ⁻⁷ %	2,83·10 ⁻⁶ %	3,4·10 ⁻⁶ %	2,5·10 ⁻⁶ %	2,9·10 ⁻⁶ %	2,3·10 ⁻⁷ %

4.6. Rezultate simulare în regim tranzitoriu

Rezultatele simulării în regim tranzitoriu sunt prezentate din minut în minut pentru primele 5 minute de la izbucnirea incendiului, deoarece acestea sunt cele mai importante minute pentru realizarea evacuării de urgență a pasagerilor din stația de metrou. De asemenea, sunt prezentate și rezultatele simulării după 10, 15, respectiv 20 de minute, pentru a se sublinia efectul ventilării de urgență asupra evacuării aerului fierbinte și a poluanților și pentru a avea o imagine de ansamblu asupra situației de urgență din stație pe tot parcursul simulării.

Rezultatele sunt prezentate sub forma unor secțiuni transversale ce surprind curgerea aerului, temperatura și concentrațiile de CO și CO₂ în zona din apropierea focarului și a ușilor PSD.

În Fig. 30 și Fig. 31 sunt prezentate câmpurile de temperatură obținute pe parcursul simulării, într-o secțiune transversală prin zona focarului de incendiu, executate în limita stângă a focarului (direcția de propagare a aerului fierbinte și a concentrațiilor de poluanți). Se poate observa că în zona de pe peretele trenului unde ar trebui să fie reprezentat focarul acesta lipsește din imagine. Acest lucru se întâmplă din cauză că temperatura din focar este mai mare decât temperatura maximă din scara utilizată pentru reprezentarea variației de temperatură. Foarte important de menționat este că se observă efectul pe care îl are sistemul PSD asupra limitării propagării aerului fierbinte în stația de metrou. Dacă ar lipsi acest zid despărțitor, aerul fierbinte ar ajunge în zona peronului și ar împiedica evacuarea pasagerilor din stație. Acesta este motivul pentru care *Standardul de siguranță la foc pentru sisteme fixe de tranzit și sisteme feroviare pentru pasageri din SUA (NFPA 130)* [77] impune ca rezistența la foc și rezistența structurală a sistemelor PSD să fie apropiate de cele ale trenului de metrou.

Temperatura maximă a aerului în zona focarului are valori cuprinse între 900⁰-1100⁰ C, în concordanță cu nivelurile de temperatură determinate experimental în cadrul studiului EUREKA [80] pentru focare de incendiu cu valori similare de HRR cu cele din această lucrare.

În Fig. 32 și Fig. 33 sunt prezentate câmpurile de concentrație de CO obținute pe parcursul simulării în aceeași secțiune transversală prin zona focarului (valori maxime de 6.450 ppm) și se observă că acestea seamănă cu câmpurile de temperatură, monoxidul de carbon ajungând să ocupe tot spațiul cuprins între sistemul PSD (care limitează accesul aerului poluat în stație) și corpul trenului.

Fig. 34 și Fig. 35 prezintă câmpurile de concentrație de CO₂ obținute pe parcursul simulării în aceeași secțiune transversală prin zona focarului. Dioxidul de carbon însă, având densitatea mai mare decât a aerului, ajunge în primele 2 minute sub tren și este antrenat de mișcarea ascendentă a aerului spre dispozitivele de ventilare de deasupra trenului, mai apoi urmând același model de distribuție ca monoxidul de carbon, ca urmare a creșterii semnificative a concentrației (77.000 ppm) și a mișcării ascendente a aerului fierbinte din zona restrânsă dintre sistemul PSD și corpul trenului.

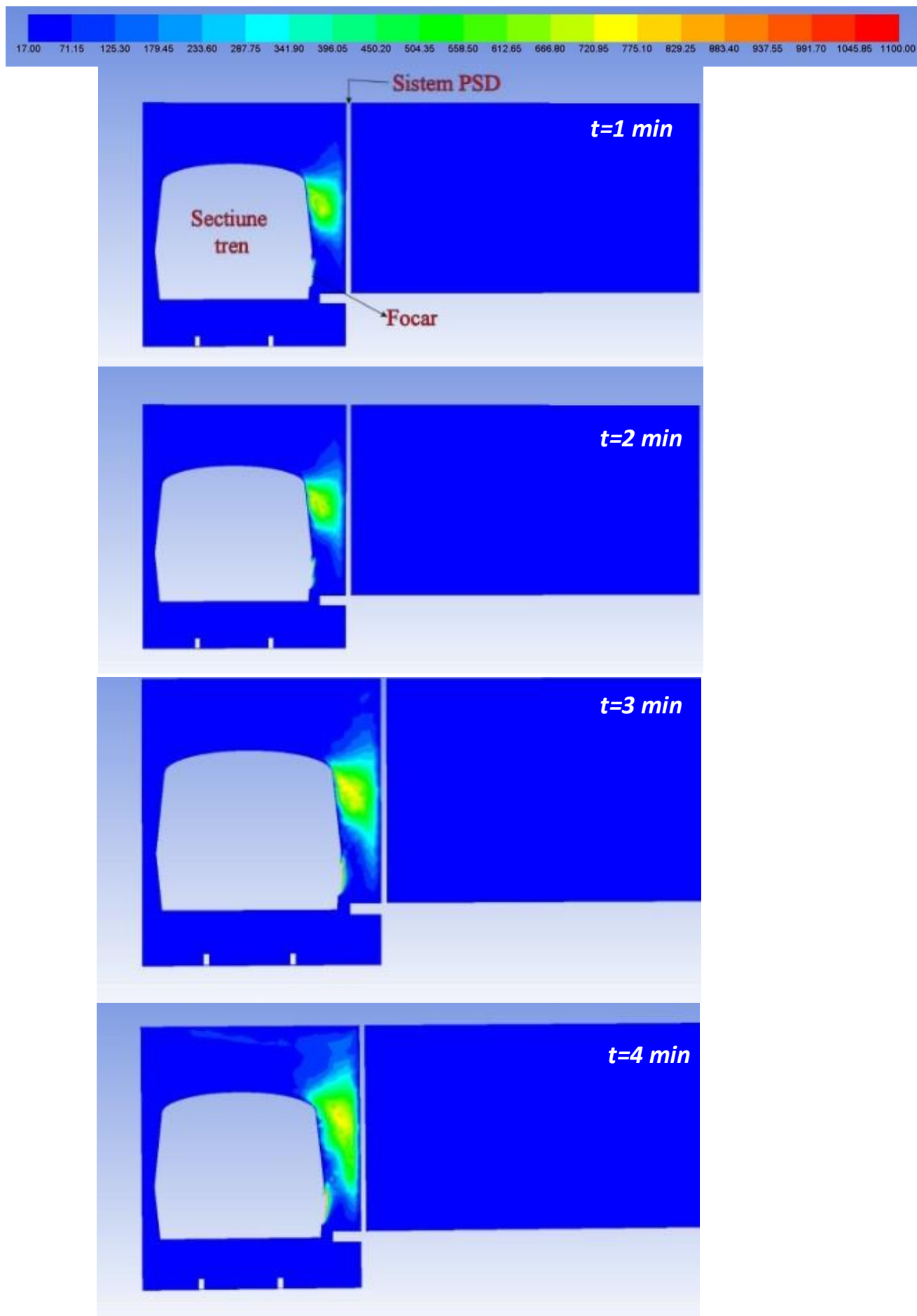


Fig. 30 Secțiune transversală prin zona focarului - câmpuri de temperatură - minutele 1-4 ($^{\circ}\text{C}$)

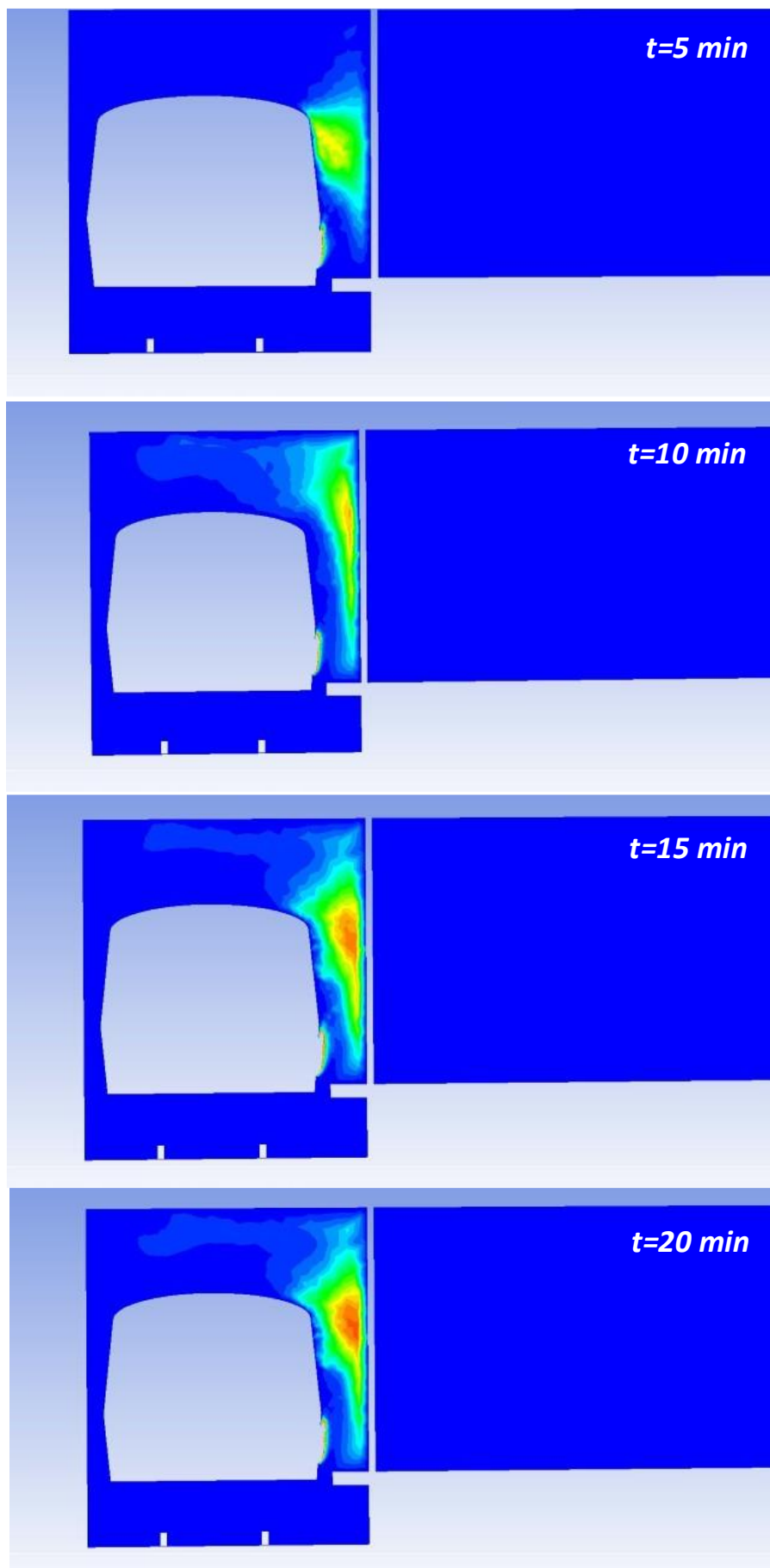


Fig. 31 Secțiune transversală prin zona focarului - câmpuri de temperatură - minutele 5-20 ($^{\circ}\text{C}$)

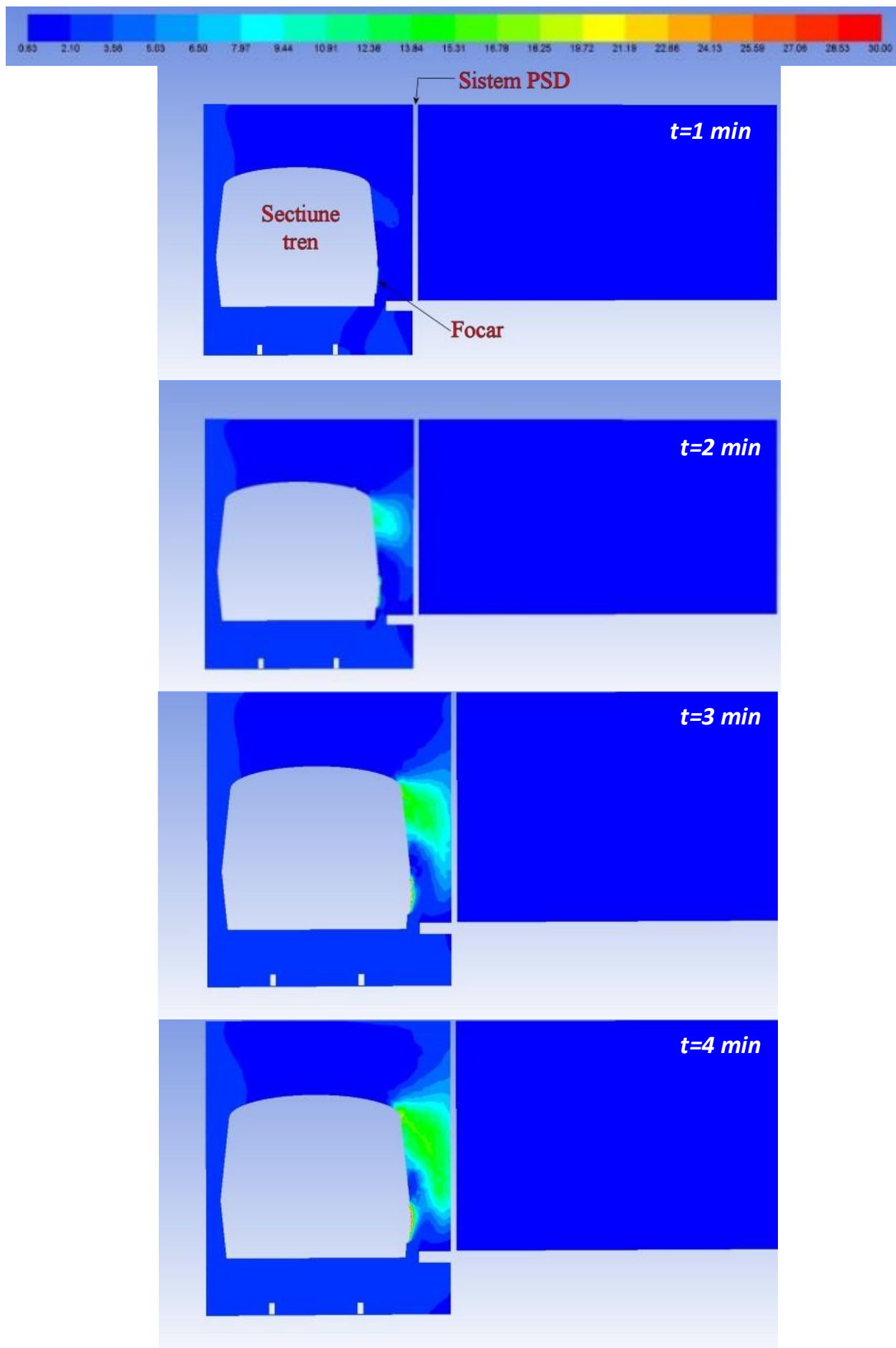


Fig. 32 Secțiune transversală prin zona focarului - câmpuri de concentrație de CO - minutele 1-4 (ppm)

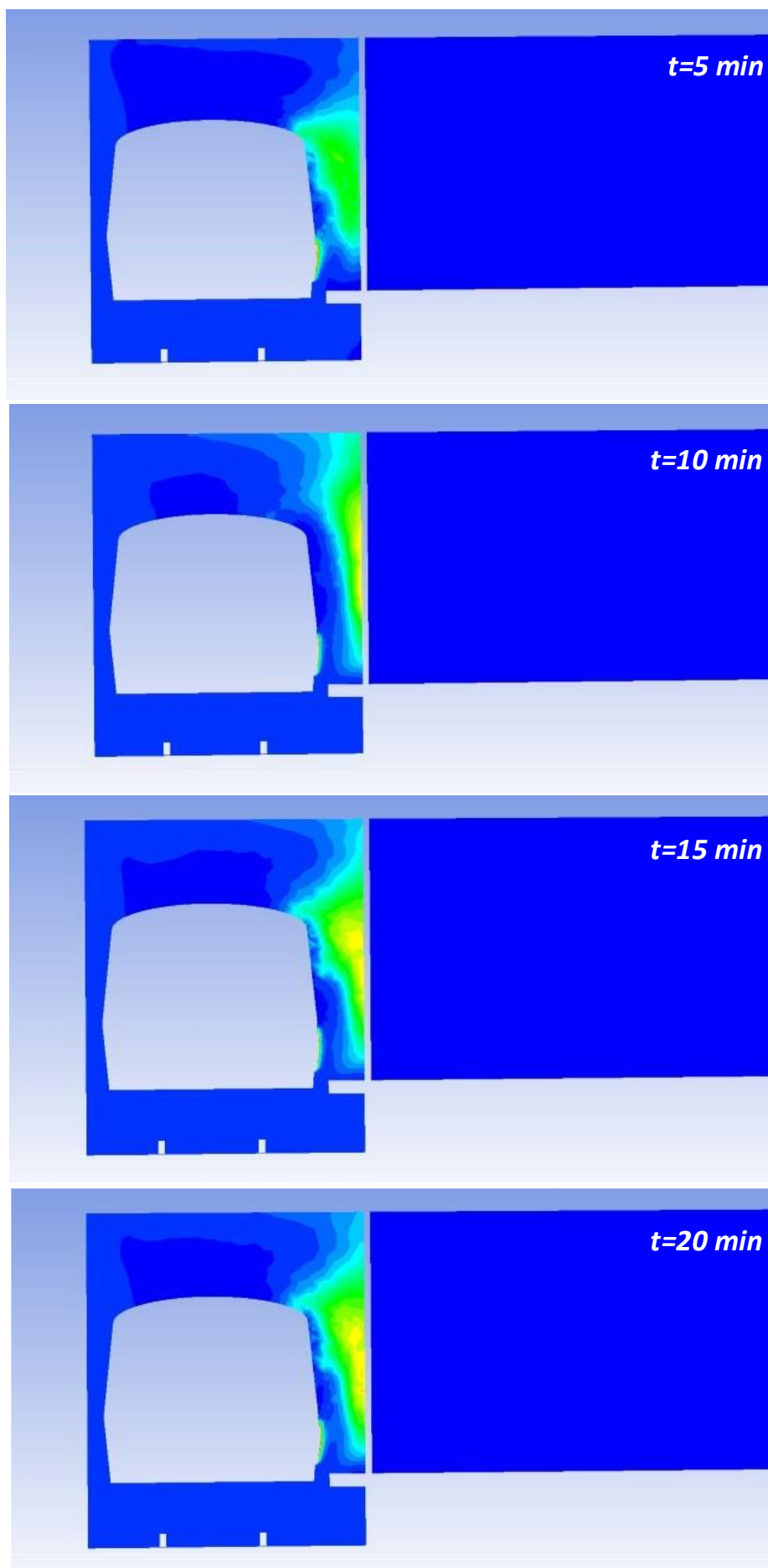


Fig. 33 Secțiune transversală prin zona focarului - câmpuri de concentrație de CO - minutele 5-20 (ppm)

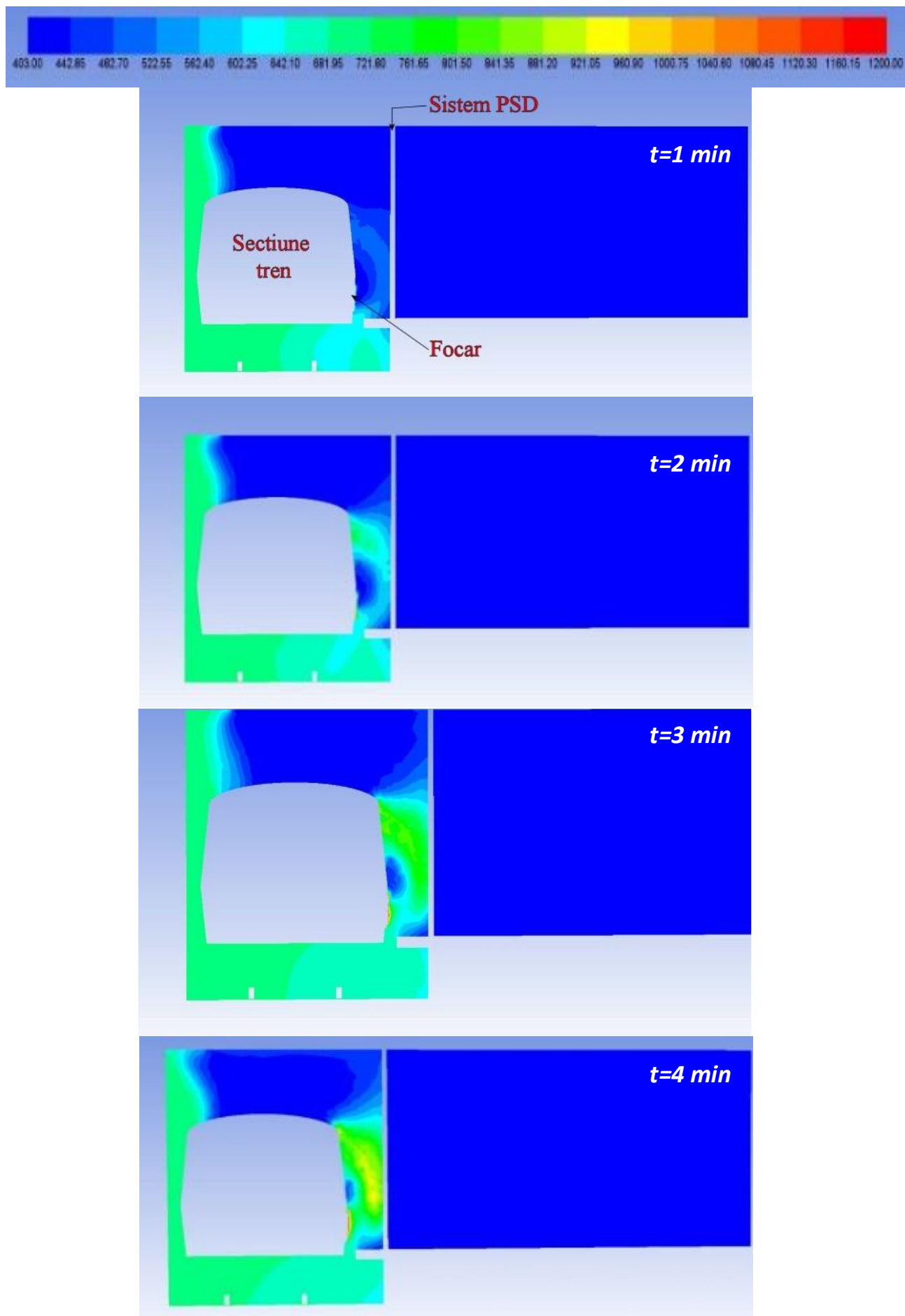


Fig. 34 Secțiune transversală prin zona focarului - câmpuri de concentrație de CO₂ - minutele 1-4 (ppm)

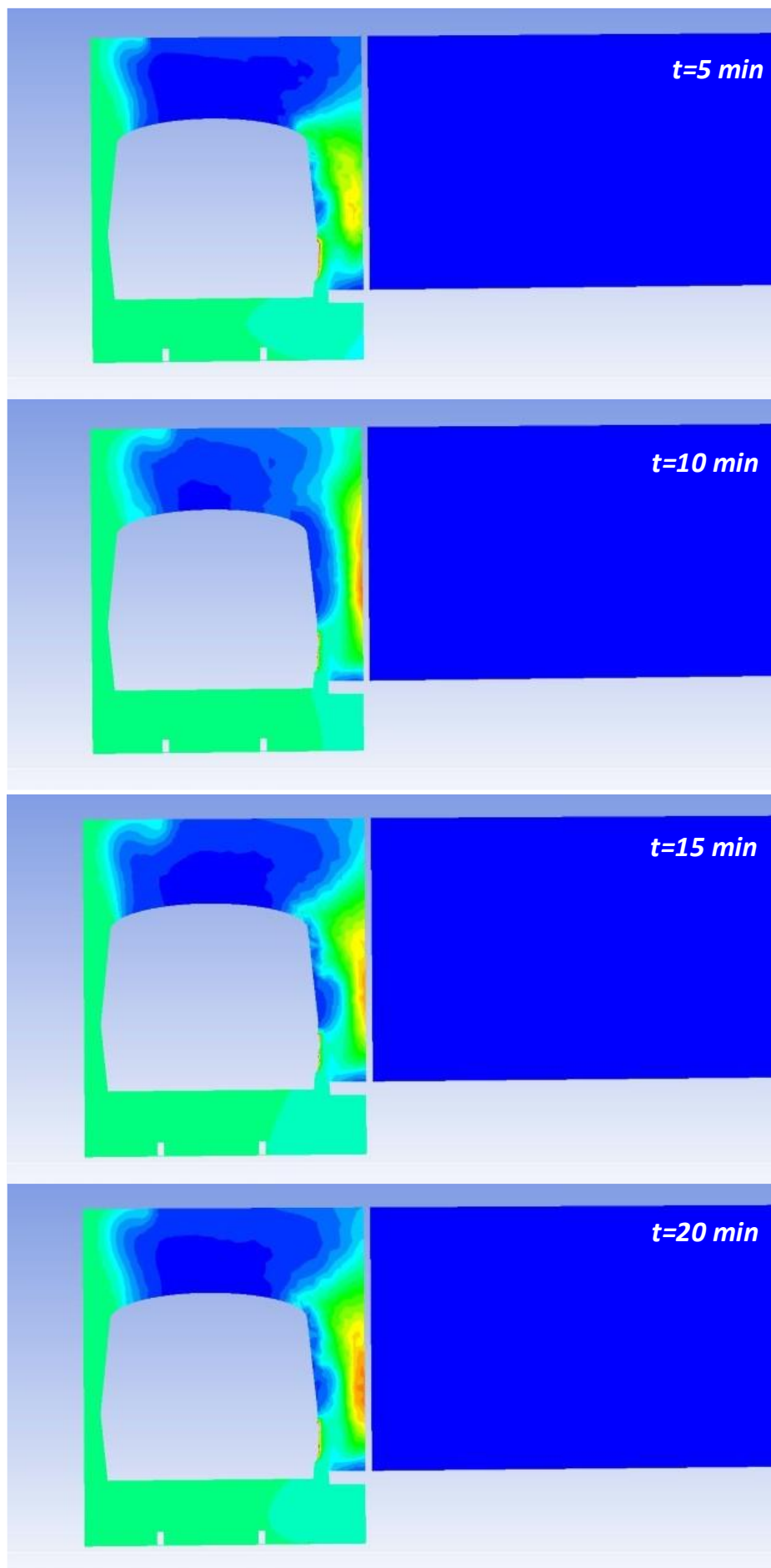


Fig. 35 Secțiune transversală prin zona focarului - câmpuri de concentrație de CO_2 - minutele 5-20 (ppm)

În Fig. 36 – Fig. 41 sunt prezentate câmpurile de temperatură, concentrație de CO, respectiv concentrație de CO₂ prin ușa PSD din stânga focarului, cea prin care sunt cele mai mari șanse ca aerul fierbinte sau poluanții să intre în stație.

După cum se poate observa, cadrul PSD care se află la partea superioară a ușii și se înalță până la tavan are un rol la fel de important ca partea dintre două uși consecutive, întrucât constituie o barieră fizică ce blochează accesul fumului generat de incendiu spre spațiul peronului. Întrucât sunt la distanță de aproximativ 2 m de focar, câmpurile de temperatură și de concentrații de CO/CO₂ din această secțiune pun în evidență efectul de flotabilitate (“*buoyancy effect*”) al fumului generat de incendiu.

Cu toate că niciun dispozitiv de ventilare a zonei de sub peron nu este prins în această secțiune, se poate observa efectul pe care acestea îl au asupra aerului fierbinte și a poluanților din apropierea focarului. Prin acțiunea lor, dispozitivele de ventilare a zonei de sub peron contribuie la limitarea accesului fumului în zona peronului.



Fig. 36 Secțiune transversală prin ușa PSD din apropierea focarului - câmpuri de temperatură - minutele 1-4 ($^{\circ}\text{C}$)

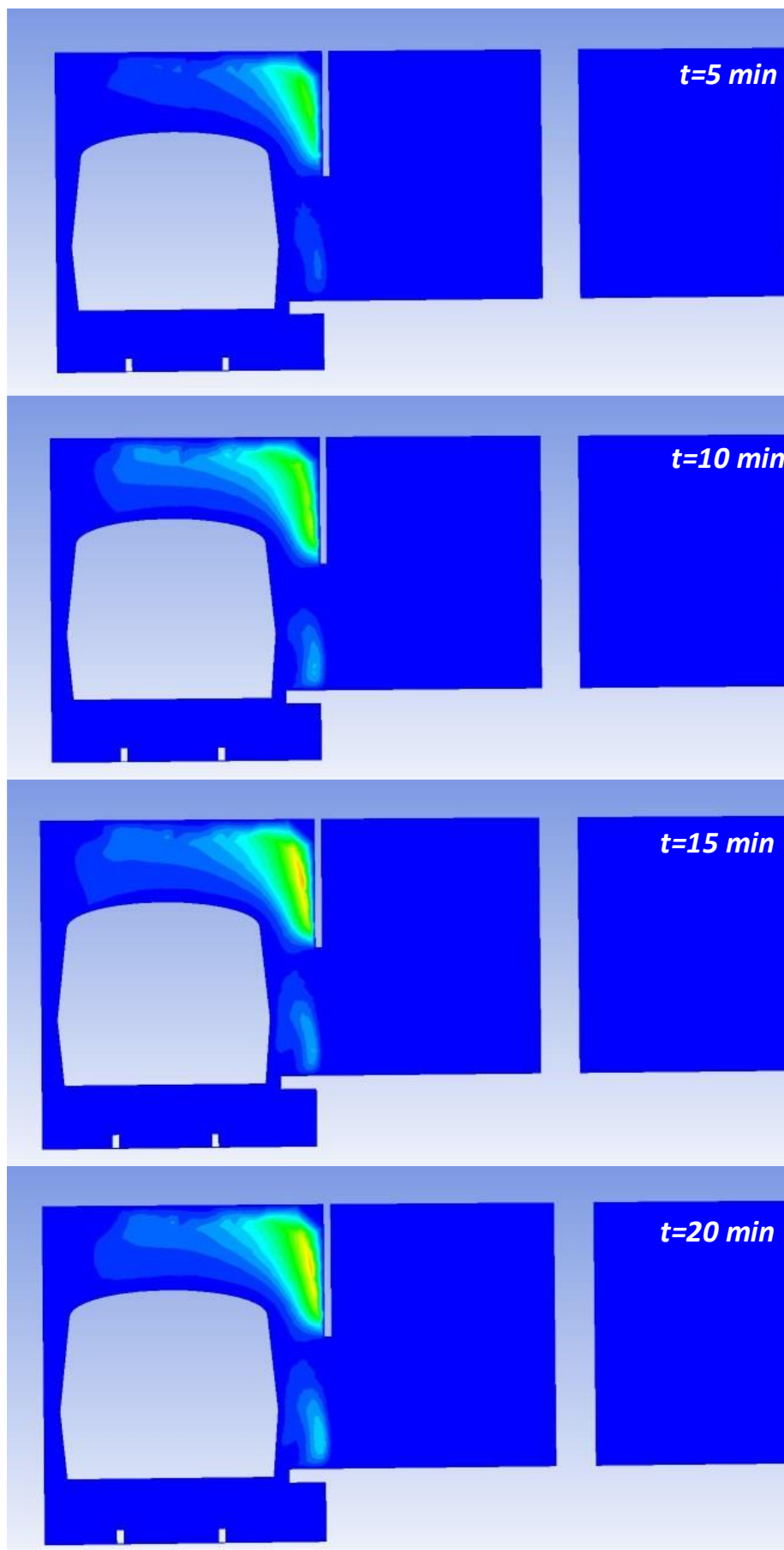


Fig. 37 Secțiune transversală prin ușa PSD din apropierea focarului - câmpuri de temperatură - minutele 5-20 ($^{\circ}\text{C}$)

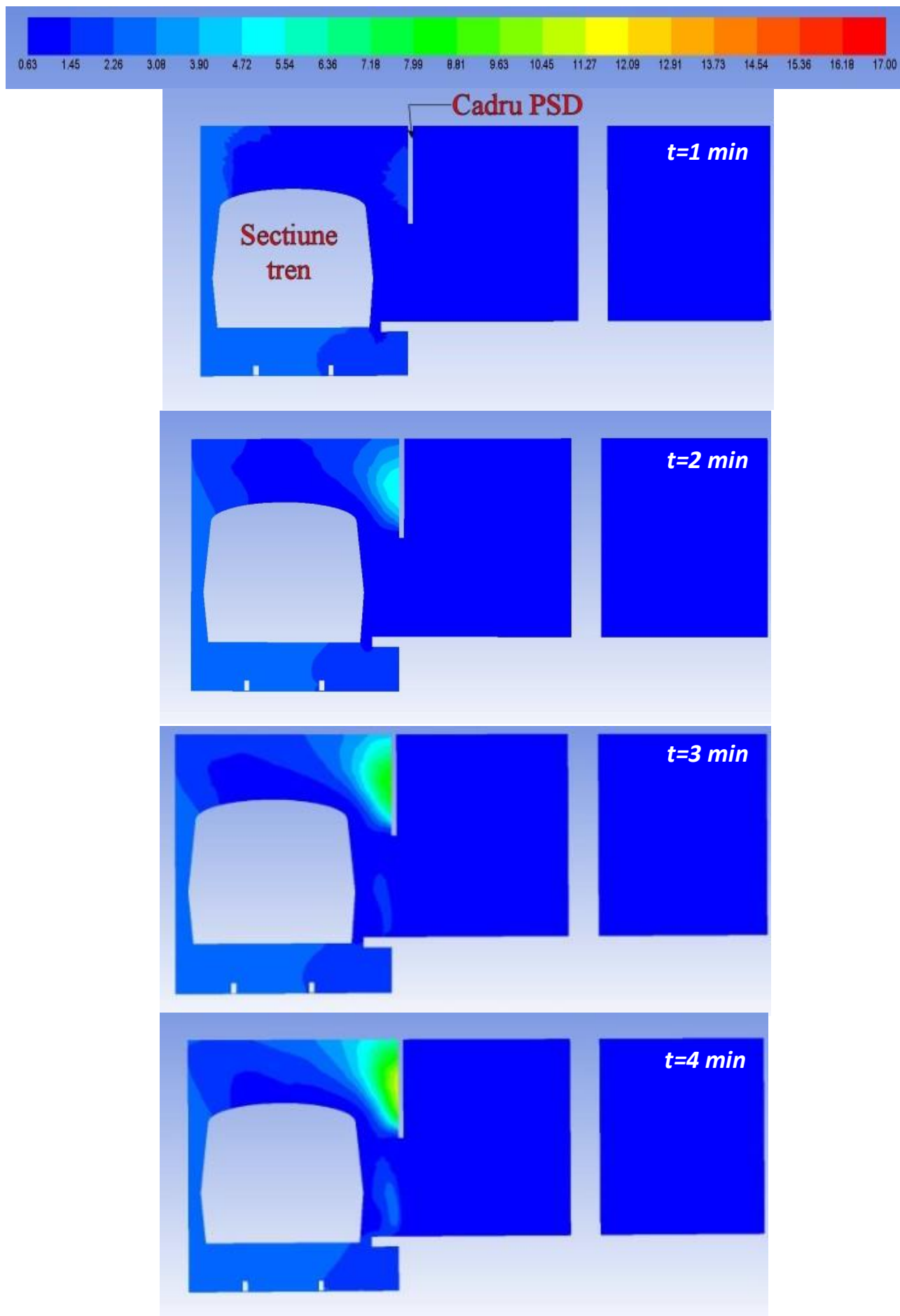


Fig. 38 Secțiune transversală prin ușa PSD din apropierea focarului - câmpuri de concentrație de CO - minutele 1-4 (ppm)

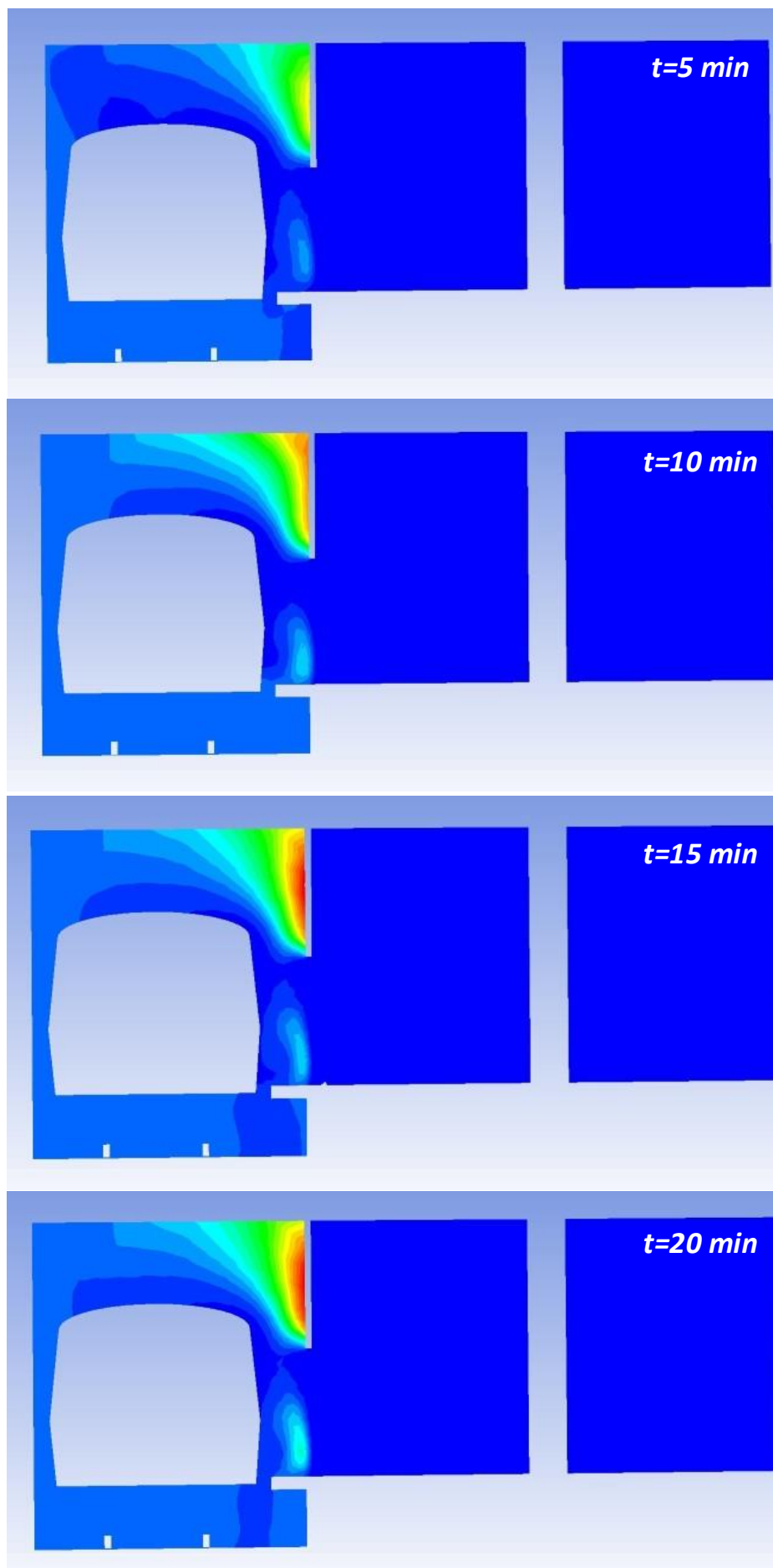


Fig. 39 Secțiune transversală prin ușa PSD din apropierea focarului - câmpuri de concentrație de CO - minutele 5-20 (ppm)

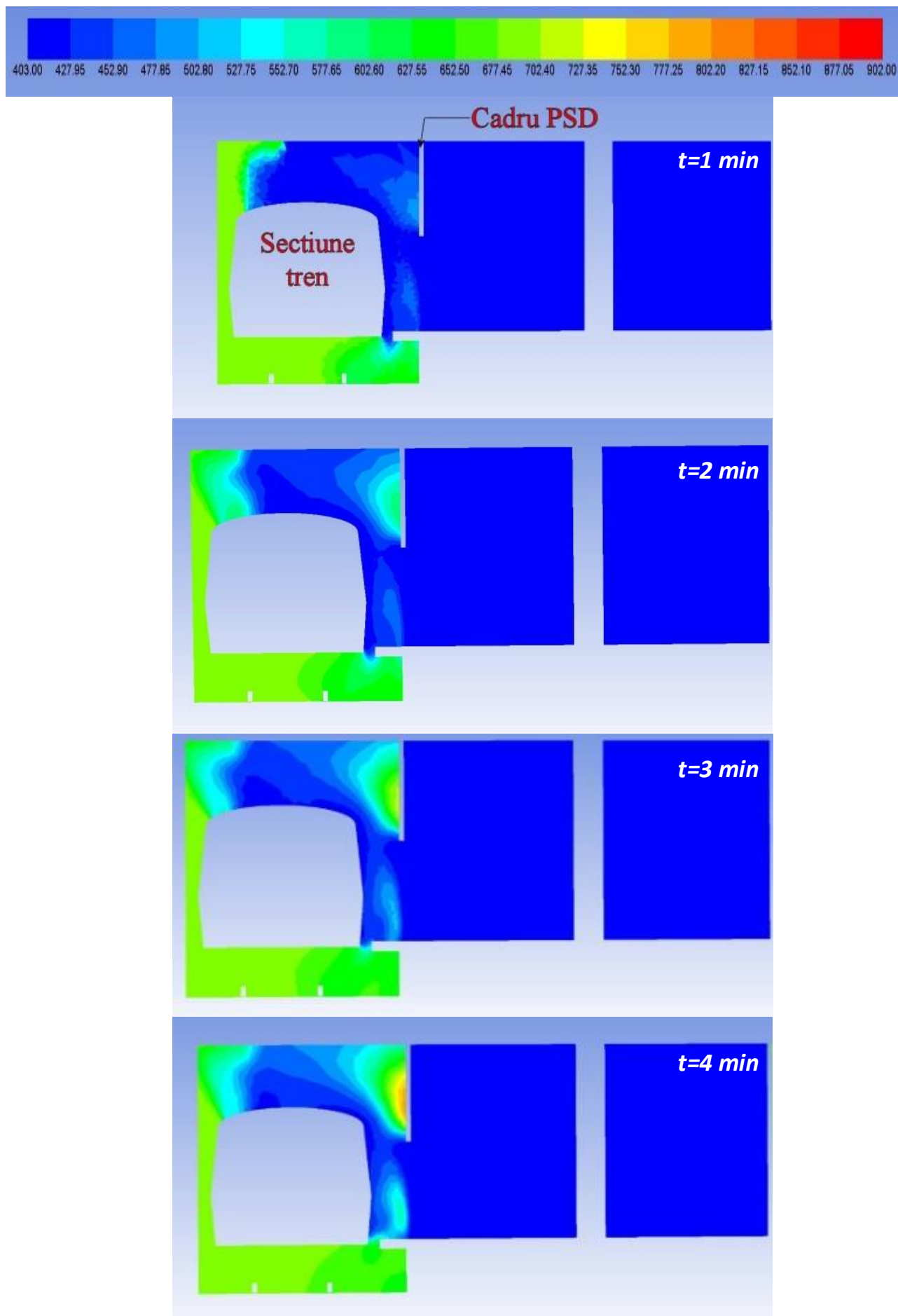


Fig. 40 Secțiune transversală prin ușa PSD din apropierea focarului - câmpuri de concentrație de CO₂ - minutele 1-4 (ppm)

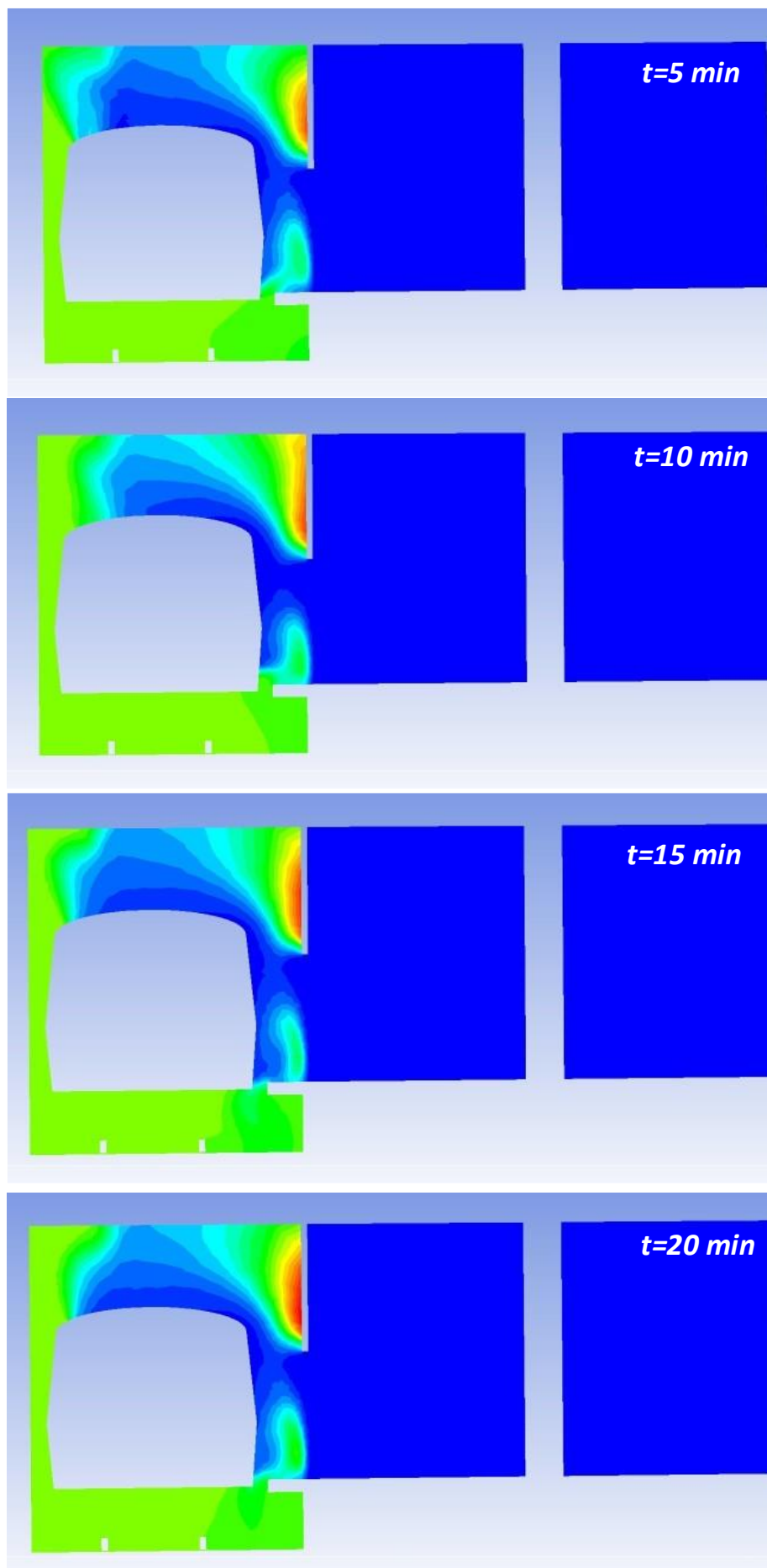


Fig. 41 Secțiune transversală prin ușa PSD din apropierea focarului - câmpuri de concentrație de CO₂ - minutele 5-20 (ppm)

4.7. Sinteză și concluzii

În acest capitol a fost verificat modul de funcționare a sistemului de ventilare propus pentru o stație de metrou cu două niveluri subterane echipată cu uși de tip PSD pentru scenariul unui tren incendiat oprit la peron. În acest sens a fost prezentat modul de construcție a geometriei la scara 1:1, realizarea rețelei de discretizare, condițiile la limită impuse, fenomenele fizice modelate, procedura de simulare și rezultatele obținute atât în regim staționar cât și în regim tranzitoriu.

Simularea în regim staționar a fost realizată pentru a stabili curgerea aerului prin domeniul de calcul înainte de a introduce focarul de incendiu ca sursă de căldură și poluanți (CO și CO_2). Câmpurile de viteză obținute într-o secțiune longitudinală prin centrul dispozitivelor de ventilare circulare amplasate deasupra șinelor de tren din stația de metrou, precum și într-un plan orizontal prin dispozitivele de ventilare ale zonei de sub peron confirmă faptul că regimul de curgere este stabil și rezultatele pot fi folosite ca valori de inițializare pentru simularea în regim tranzitoriu.

Potrivit scenariului de incendiu, odată cu trecerea simulării în regim tranzitoriu a fost introdus focarul de incendiu ca sursă de căldură și poluanți (CO și CO_2), amplasat la mijlocul lungimii trenului, în partea laterală a acestuia. Rezultatele simulării în regim tranzitoriu sunt prezentate din minut în minut pentru primele 5 minute de la izbucnirea incendiului, respectiv după 10, 15 și 20 de minute, pentru a verifica dacă aerul fierbinte sau poluanții generați de focar ajung în zona peronului. Rezultatele sunt prezentate sub forma unor câmpuri de viteză, temperatură și concentrații de CO și CO_2 ale aerului în secțiuni longitudinale (prin dispozitivele de ventilare circulare dispuse deasupra șinelor de tren) și transversale (prin focar și printr-o ușă PSD).

Secțiunile transversale prin zona focarului relevă faptul că temperatura maximă a aerului în zona dintre focar și sistemul PSD este de 900^0 - 1100^0C , în concordanță cu rezultatele obținute experimental în studiului EUREKA [80]. De asemenea, câmpurile de temperatură și de poluanți prezentate pun în evidență efectul pe care îl are sistemul PSD în limitarea propagării aerului fierbinte și poluat în zona peronului, unde în primele 10 minute se desfășoară evacuarea de urgență a persoanelor.

În secțiunea transversală și planul orizontal prin ușa PSD se observă că aerul fierbinte și concentrațiile mari de poluanți se propagă deasupra ușii și sunt reținute în tunel de sistemul PSD care ocupă spațiul dintre ușă și plafon. De asemenea, vectorii de viteză pun în evidență circulația aerului dinspre stație spre tunel, ca urmare a extragerii aerului din tunel prin dispozitivele de ventilare circulare amplasate deasupra trenului. În plus, la partea inferioară a secțiunilor se observă efectul funcționării sistemului de ventilare a zonei de sub peron, care amplifică circulația aerului dinspre stație spre tunel. Prin urmare, în scenariul propus în acest studiu, sistemul de uși PSD are un rol deosebit de important și contribuie semnificativ la limitarea propagării fumului din tunel în stația de metrou.

5. Contribuții personale

Această teză de doctorat vizează un domeniu complex și puternic inter-disciplinar, abordând subiecte ce țin de ingineria securității la incendiu (caracteristicile unui focar de incendiu, efluenții incendiului, evacuarea de urgență a călătorilor etc.), ingineria instalațiilor de ventilare (ventilarea în situații normale și de urgență, dispunerea centralelor de ventilare de interstație, amplasarea dispozitivelor de ventilare în stația de metrou etc.), precum și modelare și simulare CFD.

În acest sens, un prim element de originalitate al tezei constă în colectarea, centralizarea și prelucrarea informațiilor referitoare la prescripțiile tehnice, normativele și standardele naționale și internaționale privind exploatarea în siguranță a rețelelor de metrou. Pentru realizarea acestui studiu bibliografic au fost solicitate informații de la companiile private și de stat care gestionează rețelele de metrou ale celor mai mari orașe din Europa (Metro Madrid, Hamburg Hochbahn AG, Norwegian Railway Authority, RATP Group – Paris, ATAC S.p.A. – Roma, UITP - International Association of Public Transport) și din afara Europei (MTR Corporation Hong Kong, National Research Council Canada, National Fire Protection Association - USA, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism - Japonia). Informațiile obținute s-au concretizat într-un studiu comparativ privind reglementările tehnice pe care trebuie să le respecte administratorii rețelelor de metrou pentru a asigura evacuarea în siguranță a călătorilor din stații și tuneluri de metrou în caz de incendiu, concluziile fiind prezentate în Anexa nr. 1.

Contribuția personală din primele două capitole ale tezei constă în faptul că au fost identificate, clasificate și sintetizate cele mai recente informații și studii numerice referitoare la incendiile în tuneluri și stații de metrou. Astfel, a fost prezentat stadiul actual al cunoașterii în domeniul tezei de doctorat și a fost întocmit un articol de review privind studiile numerice referitoare la modul de funcționare a sistemelor de ventilare specifice rețelelor de metrou în situații de urgență, care a fost prezentat în cadrul celei de-a doua conferințe a Școlii Doctorale UTCB (2019).

Ținând cont că domeniul modelării și simulării CFD este unul extrem de complex, cu foarte multe subdomenii de studiu și aplicații ingineresti, contribuția personală în cel de-al treilea capitol rezidă în colectarea și sintetizarea informațiilor teoretice esențiale referitoare la realizarea unei simulări numerice privind curgerea aerului printr-un domeniu de calcul.

Probabil cel mai important element de originalitate din cadrul tezei constă în realizarea geometriei 3D a rețelei de metrou formată din două stații de metrou și tunelurile de legătură dintre ele, precum și dezvoltarea modelului numeric CFD pentru această configurație. Noutatea și specificitatea acestui demers constă în faptul că tunelurile sunt curbate, iar unul dintre ele este și înclinat cu o pantă de 3,1%. Această configurație de tunel este cea mai puțin studiată, fiind deopotrivă rar întâlnită și greu de reprodus experimental, existând un număr redus de articole care prezintă simulări numerice privind incendii în astfel de tuneluri. Modelele numerice realizate în cadrul acestei teze de doctorat pot constitui baza pentru alte simulări care să vizeze scenarii de urgență diferite, soluții de ventilare noi, influența unor modificări constructive asupra parametrilor de confort sau de siguranță din stație etc.

Deși ușile de siguranță PSD sunt construite în majoritatea stațiilor noi de metrou, nu există multe studii care să vizeze impactul lor asupra siguranței călătorilor în cazul unui incendiu într-o stație de metrou. Mai mult decât atât, studiul prezentat în capitolul 5 este primul studiu referitor la impactul ușilor PSD într-o stație de metrou din București, reprezentând astfel o contribuție originală majoră în

cadrul tezei la nivel național. Studiul poate fi extins și la alte stații de metrou din București sau chiar la rețele noi de metrou, cum este cazul rețelei de metrou ce va fi construită în Cluj-Napoca.

Un alt aspect original al studiilor numerice prezentate constă în modul în care a fost simulat focarul de incendiu. Astfel, concentrațiile masice de monoxid și dioxid de carbon produse de arderea unui focar de PMMA caracterizat de o rată de eliberare a căldurii de 30 MW, respectiv 10 MW, au fost extrase din Fire Dynamics Simulator și folosite ca date de intrare în Ansys Fluent 15.0 pentru descrierea focarului de incendiu.

Rezultatele cercetării desfășurate în timpul programului de studii doctorale, atât cele referitoare la concluziile studiului bibliografic cât și cele referitoare la rezultatele simulărilor numerice, au fost diseminate după cum urmează:

- 1. Review of numerical studies on ventilation systems for subway networks in emergency situations**
 - Autori: Vladimir Kubinyecz și Cătălin Teodosiu.
 - Prezentat la 2nd Conference of the UTCB Doctoral School (2019).
 - Publicat în *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 664, Issue 1, pp. 012093 (2021), DOI: 10.1088/1755-1315/664/1/012093.
- 2. Verification of ventilation system efficiency in a curved subway tunnel in case of fire using numerical modeling**
 - Autori: Vladimir Kubinyecz și Cătălin Teodosiu.
 - Prezentat la "10th International Conference on Energy and Environment" (2021).
 - Publicat în *IEEE Xplore* în 29 November 2021, DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614790.
- 3. Numerical study on smoke evacuation from a curved subway tunnel**
 - Autori: Vladimir Kubinyecz și Cătălin Teodosiu.
 - Prezentat la 4th Conference of the UTCB Doctoral School (2021).
- 4. Numerical evaluation of emergency ventilation system design in a curved and sloped subway tunnel in case of fire**
 - Autori: Cătălin Teodosiu, Vladimir Kubinyecz și Raluca Teodosiu.
 - În curs de examinare în *Environmental Engineering and Management Journal* (din 28.02.2022)..

6. Concluzii și perspective

Obiectivul general al tezei de doctorat este de a dezvolta modele numerice prin care să se poată verifica funcționarea sistemelor de ventilare în situații de urgență reprezentate de un tren incendiat oprit în tunel între două stații, precum și un tren incendiat oprit la peron într-o stație de metrou.

În urma realizării studiului bibliografic s-a concluzionat că majoritatea cercetărilor legate de incendii în tuneluri de metrou vizează configurațiile cu tuneluri drepte, configurațiile cu tuneluri înclinate și curbate fiind cel mai puțin investigate, deși gradul de înclinare al tunelurilor influențează distribuția fumului și a gazelor fierbinți prin faptul că apar fenomene termice specifice (“buoyancy effect” și „stack/chimney effect”), iar asimetria pereților unui tunel curbat influențează mișcarea fumului și scade eficiența ventilării longitudinale. Referitor la studiul incendiilor în stații de metrou, bibliografia studiată relevă că ușile PSD contribuie la creșterea gradului de confort al călătorilor din stațiile de metrou și contribuie la evacuarea mai rapidă a fumului generat de incendii, crescând de asemenea intervalul de timp disponibil pentru evacuarea în situații de urgență a călătorilor

Referitor la simulările CFD, pe baza analizelor efectuate și a rezultatelor obținute se poate afirma că modelul numeric CFD dezvoltat este fiabil și poate să fie utilizat cu succes în predicții privind investigarea eficienței sistemelor de ventilare în cazul situațiilor de urgență ce pot apărea în rețelele de metrou.

În acest sens, în studiul numeric privind evacuarea fumului dintr-un tunel înclinat și curbat s-a constatat că sistemul de ventilare propus asigură condițiile optime pentru evacuarea în siguranță a călătorilor, întrucât nu au fost identificate concentrații mari de poluanți sau temperaturi mari pe traseul de evacuare a pasagerilor (temperatura maximă de 35⁰C și concentrații de CO sub 2000 ppm, respectiv CO₂ sub 60.000 ppm).

De asemenea, în studiul numeric privind evacuarea fumului dintr-o stație de metrou cu două niveluri subterane, s-a observat că, deși ușile PSD din apropierea trenului incendiat sunt în permanență deschise, aerul fierbinte (temperaturi cuprinse între 900⁰-1100⁰C, în concordanță cu nivelurile de temperatură determinate experimental în alte studii) și concentrațiile mari de poluanți (valori de 6.450 ppm pentru CO, respectiv 77.000 ppm pentru CO₂ în spațiul dintre focar și panoul sistemului PSD) se propagă deasupra ușii și sunt reținute în tunel de sistemul PSD care ocupă spațiul dintre ușă și plafon. În plus, rezultatele prezentate au evidențiat circulația aerului dinspre stație spre tunel, ca urmare a extragerii aerului din tunel prin dispozitivele de ventilare circulare ale sistemului de ventilare generală al stației.

De asemenea, trebuie precizat că modelele CFD dezvoltate pot fi folosite în continuare pentru simularea altor scenarii de urgență. În ceea ce privește scenariile analizate în această teză, toate datele indică faptul că modul de funcționare propus pentru sistemul de ventilare al rețelei de metrou asigură condițiile necesare pentru evacuare de urgență a călătorilor din tunel (în cazul scenariului ce presupune un tren incendiat oprit în tunel) și din stația de metrou (pentru scenariul cu tren incendiat oprit la peron în stație prevăzută cu sisteme de tip PSD).

Ținând cont de volumul de muncă depus pentru construcția geometriei, realizarea rețelei de discretizare și identificarea metodelor potrivite de rezolvare numerică pentru cele două modele numerice CFD, timpul alocat studierii scenariilor posibile de ventilare a fost limitat. O posibilă continuare a celor două studii o reprezintă, așa cum s-a menționat anterior, investigarea unor scenarii

de urgență diferite. De exemplu, pornind de la primul model numeric se pot studia consecințele schimbării direcției de ventilare din tunele (de la stația 1 Mai spre stația Pajura) sau a schimbării poziției trenului oprit în tunel. De asemenea, ar putea fi studiat efectul pe care îl are întârzierea de 3 minute necesară schimbării sensului de rotire a ventilatoarelor din CVI asupra propagării fumului pe calea de evacuare a călătorilor. În ceea ce privește al doilea model numeric prezentat, pornind de la același scenariu de urgență, ar putea fi studiat efectul pe care îl are deschiderea ușilor PSD de pe partea opusă sau pornirea CVI din apropierea stației. De asemenea, ar putea fi analizat modul de evacuare a fumului în cazul unui incendiu pe peronul stației de metrou, corelat cu deschiderea/închiderea ușilor PSD, precum și implementarea altor forme de dispozitive de ventilare (nu doar cele circulare utilizate în studiul prezent).

Având în vedere că normele de proiectare a construcțiilor și instalațiilor specifice de metrou privind prevenirea și stingerea incendiilor au fost emise în 2002 și nu fac referire deloc la sisteme de uși PSD, concluziile studiului prezentat în această teză pot sta la baza actualizării documentelor legale respective. Mai mult decât atât, după modelul legislației în domeniu din alte țări (de exemplu Italia și SUA), considerăm oportună prevederea obligativității de realizarea a simulărilor numerice pentru verificarea scenariilor de securitate la incendiu pentru toate construcțiile noi de metrou și optimizarea soluțiilor de siguranță la cele deja în exploatare.

Bibliografie

- [1] The World Bank Group, “Transport for Development,” *World Bank Gr.*, p. 113, 2008.
- [2] Union International de Transport Publique, “WORLD METRO FIGURES,” Brussels, 2018.
- [3] U. I. de T. Publique, “World report on metro automation,” 2018.
- [4] W. Y. Yan, J. H. Wang, and J. C. Jiang, “Subway Fire Cause Analysis Model Based on System Dynamics: A Preliminary Model Framework,” *Procedia Eng.*, vol. 135, pp. 431–438, 2016.
- [5] J. Qin, C. Liu, and Q. Huang, “Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 21, no. June, p. 100677, 2020.
- [6] W. hwa Hong, “The progress and controlling Situation of Daegu Subway Fire Disaster,” *Fire Saf. J.*, vol. 6, pp. 122–142, 2004.
- [7] C. Liang and G. Fu, “Behavior and Psychology of Daegu Subway Fire Accident in Korea,” in *4th International Conference on Management Science and Management Innovation*, 2017, vol. 31, no. Msmi, pp. 252–255.
- [8] R. Pangyi, “Consequence Management in the 1995 Sarin Attacks on the Japanese Subway System,” in *Belfer Center for Science and International Affairs*, 2002, no. February, p. 22.
- [9] T. Okumura *et al.*, “Report on 640 victims of the Tokyo subway sarin attack,” *Ann. Emerg. Med.*, vol. 28, no. 2, pp. 129–135, 1996.
- [10] A. Beard and R. Carvel, *Handbook of Tunnel Fire Safety*, Second edi. London, 2011.
- [11] 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, 2019.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
 - [21] 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.
 - [22] 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.
 - [23] S. Zhao, Y. Z. Li, M. Kumm, H. Ingason, and F. Liu, “Re-direction of smoke flow in inclined tunnel fires,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 86, no. July 2018, pp. 113–127, 2019.
 - [24] W. K. Chow, K. Y. Wong, and W. Y. Chung, “Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 122–128, 2010.
 - [25] Y. Zhou, R. Bu, J. Gong, Z. Xu, H. Chen, and C. Fan, “Numerical investigation on the effectiveness of positive pressure ventilation technology in a multi-layer subway station,” *Indoor Built Environ.*, vol. 28, no. 7, pp. 984–998, 2019.
 - [26] J. Ji, H. Wan, K. Li, J. Han, and J. Sun, “A numerical study on upstream maximum temperature in inclined urban road tunnel fires,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 88, pp. 516–526, 2015.
 - [27] 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.
 - [28] H. Wan, Z. Gao, J. Han, J. Ji, M. Ye, and Y. Zhang, “A numerical study on smoke back-layering length and inlet air velocity of fires in an inclined tunnel under natural ventilation with a vertical shaft,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 138, no. January 2018, pp. 293–303, 2019.
 - [29] X. Zhang, Y. Lin, C. Shi, and J. Zhang, “Numerical simulation on the maximum temperature and smoke back-layering length in a tilted tunnel under natural ventilation,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 107, no. June 2020, p. 103661, 2021.
 - [30] D. Zhou, T. Hu, Z. Wang, T. Chen, and X. Li, “Influence of tunnel slope on movement characteristics of thermal smoke in a moving subway train fire,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 28, no. September, p. 101472, 2021.
 - [31] J. D. Cano-Moreno, J. M. M. S. de Pedro, B. S. Esteban, and M. S. Nicolau, “Influence of the Slope and Delay on Passenger Evacuation from a Fire Along a Railway Tunnel with Natural Ventilation,” *Fire Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 1569–1588, 2021.
 - [32] W. K. Chow, Y. Gao, J. H. Zhao, J. F. Dang, C. L. Chow, and L. Miao, “Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation,” *Fire Saf. J.*, vol. 75, pp. 14–22, 2015.
 - [33] W. K. Chow, Y. Gao, J. F. Zou, Q. K. Liu, C. L. Chow, and L. Miao, “Numerical Studies on Thermally-Induced Air Flow in Sloping Tunnels with Experimental Scale Modelling Justifications,” *Fire Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 867–892, 2018.
 - [34] J. Han, F. Liu, F. Wang, M. Weng, and J. Wang, “Study on the smoke movement and downstream temperature distribution in a sloping tunnel with one closed portal,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 149, no. July 2019, p. 106165, 2020.
 - [35] F. Wang, M. Wang, R. Carvel, and Y. Wang, “Numerical study on fire smoke movement and

- control in curved road tunnels,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 67, no. October 2016, pp. 1–7, 2017.
- [36] A. Kashef and H. Saber, “CFD simulations for verification of ventilation strategies in Tube C of the Ville- Marie tunnel in Montréal City,” *Natl. Res. Counc. Canada*, pp. 1–10, 2008.
 - [37] 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.
 - [38] C. Caliendo, P. Ciambelli, M. L. De Guglielmo, M. G. Meo, and P. Russo, “Numerical simulation of different HGV fire scenarios in curved bi-directional road tunnels and safety evaluation,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 31, pp. 33–50, Sep. 2012.
 - [39] M. H. Zhong, C. L. Shi, L. He, J. H. Shi, C. Liu, and X. L. Tian, “Smoke development in full-scale sloped long and large curved tunnel fires under natural ventilation,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 108, pp. 857–865, 2016.
 - [40] 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.
 - [41] 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.
 - [42] 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.
 - [43] 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.
 - [44] 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.
 - [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] 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.
 - [48] Y. W. Chung, S. J. Kang, T. Matsubayashi, Y. Sawada, and M. Ueda, “The effectiveness of platform screen doors for the prevention of subway suicides in South Korea,” *J. Affect. Disord.*, vol. 194, pp. 80–83, 2016.
 - [49] M. Ueda, Y. Sawada, and T. Matsubayashi, “The effectiveness of installing physical barriers for preventing railway suicides and accidents: Evidence from Japan,” *J. Affect. Disord.*, vol. 178, pp. 1–4, 2015.
 - [50] Y. Soeta and R. Shimokura, “Change of acoustic characteristics caused by platform screen doors in train stations,” *Appl. Acoust.*, vol. 73, no. 5, pp. 535–542, 2012.

- [51] S. C. Hu and J. H. Lee, "Influence of platform screen doors on energy consumption of the environment control system of a mass rapid transit system: Case study of the Taipei MRT system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 5, pp. 639–650, 2004.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] A. Beard and R. Carvel, *Handbook of Tunnel Fire Safety*, Second edi. 2011.
- [61] Z. Dan, Y. Zin, and Z. Jin-li, "Study on fire characteristics of subway train running with fire," *Am. Soc. Civ. Eng.*, pp. 3743–3751, 2014.
- [62] S. M. Olenick and D. J. Carpenter, "An updated international survey of computer models for fire and smoke," *J. Fire Prot. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 87–110, 2003.
- [63] Z. Long, Y. Yang, C. Liu, and M. Zhong, "Study on the optimal operation mode of ventilation system during metro double-island platform fire," *Build. Simul.*, vol. 14, no. 3, pp. 779–792, 2021.
- [64] A. Ingason, H. & Lonnemark, "Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnels," *Safe Reliab. Tunnels*, no. January, pp. 87–96, 2004.
- [65] D. A. Purser, "Toxic hazard calculation models for use with fire effluent data," *Fire Toxic.*, pp. 619–636, 2010.
- [66] S. Jain, S. Shashi, and S. Kumar, "Numerical studies on evaluation of smoke control system of underground metro rail transport system in India having jet injection system: A case study," *Build. Simul.*, vol. 4, no. 3, pp. 205–216, 2011.
- [67] *ANSYS FLUENT User 's Guide*, no. October. Ansys Inc, 2013.
- [68] *Ansys Fluent Theory Guide*, no. November. 2013.

- [69] J. R. Howell, R. Siegel, and M. P. Mengü, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Fifth edit. Boca Raton, Florida, USA: Taylor and Francis Group, 2010.
- [70] S. Ukleja, “Production of smoke and carbon monoxide in underventilated enclosure fires,” Faculty of Art, Design and Built Environment of the University of Ulster, 2012.
- [71] N. Marsh and R. Gann, “Smoke Component Yields from Bench-scale Fire Tests. Comparison with room fire results,” USA, 2013.
- [72] J. Y. Hou, “Distribution Curves for Interior Furnishings on CO₂, CO, HCN, Soot and Heat of Combustion,” University of Canterbury, 2011.
- [73] “Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide | NOAA Climate.gov.” [Online]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>. [Accessed: 09-May-2021].
- [74] “Aerlive » Platformă pentru măsurarea calității aerului din București Aerlive | Platformă pentru măsurarea calității aerului din București.” [Online]. Available: <https://aerlive.ro/>. [Accessed: 09-May-2021].
- [75] Y. Y. Chen, F. C. Sung, M. L. Chen, I. F. Mao, and C. Y. Lu, “Indoor air quality in the metro system in north Taiwan,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, no. 12, pp. 1–10, 2016.
- [76] G. Tudor, D. E. Brinzea, and D. N. Robescu, “Modeling and CFD simulation in ANSYS of air piston deviation in subway stations,” *Proc. 2019 Int. Conf. ENERGY Environ. CIEM 2019*, pp. 11–15, 2019.
- [77] “Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems.” National Fire Protection Association, p. 81, 2020.
- [78] A. Lönnermark, A. Claesson, and J. Lindström, “Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel,” *Fire Technol. SP Rep. 201205*, p. 150, 2012.
- [79] 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.
- [80] A. Haack, “Fire Protection in Traffic Tunnels : General Aspects and results of the EUREKA Project,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 377–381, 1999.