

IMPLEMENTAREA SISTEMULUI DE CALCUL FIRE DYNAMICS SIMULATOR

Dumitru DUBNEAC-CHIORU

*Departamentul Alimentații cu căldură, apă, gaze și protecția mediului, Facultatea Urbanism și Arhitectură,
Universitatea Tehnică a Moldovei doctorand, Chișinău, Moldova*

Autorul corespondent: Dumitru Dubneac-Chioru, e-mail dumitru.dubneac-chioru@acagpm.utm.md

Rezumat. *Lucrarea evidențiază modul în care se implementează sistemul de calcul Fire Dynamics Simulator care prezice mișcarea fumului, monoxidul de carbon, temperatura, mișcarea aerului precum și alte substanțe rezultate în timpul izbucnirii unui incendiu într-o clădire. Rezultatele acestor simulări sunt utilizate pentru a garanta siguranța clădirilor înainte de construcție, pentru a evalua riscuri existente și reconstrucția post-incendii pentru investigarea accidentelor.*

Cuvinte cheie: *simulare, studiu, clădire, calcul, fum.*

Introducere

Evoluția sistemului informatic Fire Dynamics Simulator, denumit în continuare prescurtat FDS, a fost posibilă datorită dezvoltării unui parteneriat al organizațiilor publice și private din USA și Europa. FDS este susținut de către:

- **NIST** (National Institute of Standards and Tehnology – USA);
- **BFRL** (Building and Fire Research Laboratory);
- **VTT** Finlanda (Technical Research Centre of Finland);
- **SFPE** (The Society of Fire Protection Engineers);
- **NASA** prin programul - Microgravity Combustion Program.

FDS este un model de calcul al dinamicii fluidelor (CFD – computational fluid dynamics) pentru efluenții unui incendiu (căldură, emisii de fum etc.). Acesta utilizează metoda volumelor finite. Prima versiune a programului a fost lansată în anul 2000. Platforma de dezvoltare a acestui program „open source” este asigurată de organizația GitHub. SmokeView este un program asociat programului FDS și a fost dezvoltat ca un instrument de vizualizare a soluțiilor calculate de FDS, dar și ca principal instrument de diagnostic pentru a analiza rezultatele calculate prin FDS.

La baza modelării matematice a propagării incendiilor stau ecuațiile care guvernează dinamica fluidelor, transferul căldurii și arderea. Deși aceste ecuații nu sunt de dată recentă rezolvarea lor numerică este de actualitate datorită complexității modelelor matematice care descriu propagarea în timp și spațiu a incendiilor.

Această modelare presupune transfer de masă și căldură în regim nestaționar, respectiv modificarea proprietăților fizice și chimice ale materialelor combustibile în timpul arderii. Rezolvarea numerică a acestor ecuații presupune stabilirea unor condiții inițiale pentru presiune, temperatură, tipul materialului combustibil etc. [3].

Dintre modelele matematice actuale amintim modelul zonal și modelul hidrodinamic. Modelul zonal a fost elaborat de către J. Quintiere, în 1984, și consideră compartimentul de ardere împărțit în două zone omogene, un volum inferior, aflat la temperatura mediului ambiant, unde s-a inițializat incendiul și un volum superior, unde se acumulează efluenții incendiului (fum, gaze). Modelul hidrodinamic a fost pus la punct de către R.G. Rehm și dezvoltat de H.R. Baum și K.B. Mc. Grattan, 1999. Acest model se bazează pe ecuațiile Navier – Stokes și modelul turbulenței $k - \epsilon$ elaborat de Patankar și Spalding. Modelarea matematică presupune împărțirea spațiului fizic unde are loc propagarea incendiului într-un număr mare de celule rectangulare. În fiecare celulă mărimile fizice de interes (viteza, temperatură) sunt omogene, dar sunt variabile în timp. Acuratețea rezultatelor depinde de numărul de celule luate în calcul în timpul simulării, însă numărul celulelor este limitat de puterea de calcul a computerului folosit.

1. Modelul de calcul Fire Dynamics Simulator

Componentele majore ale FDS sunt:

Modelul hidrodinamic: FDS rezolvă numeric ecuațiile Navier-Stokes pentru viteză mică, flux indus termic cu subliniere pe transportul de căldură și fum de la incendii. Algoritmul principal este o schemă explicită tip predictor-corector. Turbulența este tratată cu modelul Smagorinski. Este posibil să se facă o simulare numerică directă dacă grila de discretizare este suficient de fină;

Modelul de combustie: Pentru majoritatea aplicațiilor, FDS folosește un amestec fracționar de model de combustibil. Amestecul fracționar este o cantitate scalară conservată ce este definită ca fracția gazului într-un punct dat și fluxul de câmp original. Modelul presupune că materialul combustibil este controlat și că reacția dintre combustibil și oxigen este suficient de rapidă. Frația de masă pentru toți reactanții și produșii majori poate fi derivată din fracția de amestecare;

Transportul de radiație: Transferul radiativ de căldură este inclus în model prin soluția ecuației de transport prin radiație. Ecuația de radiație este rezolvată folosind o tehnică similară metodei de volum finit pentru transportul convectiv. Rezolvatorul de volum finit are nevoie de aproape 15% din timpul procesului total de calcul. Picăturile de apă pot absorbi radiația termică. Acest lucru este important atunci când se folosesc sprinklere;

Geometria: FDS aproximează ecuațiile cu derivate parțiale pe mai multe rețele rectangulare. Utilizatorul prescrie obstrucțiile rectangulare care sunt forțate să se conformeze cu rețeaua de calcul;

Condiție la limită: Toate suprafețele solide au condiții termice la limită, plus informații despre comportamentul la ardere al materialului. De obicei proprietățile materialului sunt stocate într-o bază de date și invocate pe nume. Transferul de căldură și de masă de la un corp solid se face de obicei cu corelații empirice, deși este posibil să se calculeze direct transferul de căldură și masă prin simulare numerică directă;

Sprinklere și detectoare: activarea sprinklerelor și detectoarelor de căldură și fum sunt modelate folosind corelații relativ simple bazate pe inerția termică în cazul sprinklerelor și detectoarelor de căldură și pe diferența de timp și transportul fumului în cazul detectoarelor de fum. Jetul sprinklerelor este modelat folosind particulele tip Lagrangian ce reprezintă o mostră a picăturilor de apă ieșite din sprinkler.

„Smokeview” este un program complementar modelului FDS care produce imagini în mișcare ale rezultatelor. În ultimii ani Glen Forney, care se ocupă cu studiul aprofundat al FDS, a adăugat acestui program de vizualizare a fumului capacitatea de a vizualiza focul și fumul într-un mod foarte realist. Într-un fel „Smokeview” (vizualizarea fumului) este datorită caracteristicilor sale tridimensionale, parte integrantă a modelului fizic, deoarece permite evaluarea vizibilității într-un compartiment incendiat în moduri pe care softurile obișnuite de vizualizare științifică nu-l pot realiza.

Pe tot parcursul studierii a modelului FDS s-a avut ca scop rezolvarea practică a problemelor puse de incendiu în ingineria de protecție contra incendiilor și, în același timp, furnizarea unui instrument de studiu al dinamicii fundamentale a incendiului și a arderii.

Modelul FDS poate fi folosit pentru modelarea următoarelor fenomene:

- Transportul la viteză joasă a căldurii și produșilor de ardere proveniți din incendiu;
- Transferul prin radiație și convecție între gaz și suprafețele solide;
- Piroliza;
- Extinderea flăcărilor și intensificarea focului;
- Activarea sprinklerelor și detectoarelor de fum și căldură;
- Jeturile de sprinklere și suprimarea focului cu ajutorul apei.

FDS a fost special conceput pentru simularea incendiilor, dar poate fi folosit pentru alte simulări de fluxuri fluide de viteză joasă care nu includ în mod necesar focul sau efecte termice. Aproximativ jumătate din aplicațiile modelului au fost făcute pentru proiectarea sistemelor de control al fumului și studii pentru activarea sprinklerelor sau detectoarelor. Cealaltă jumătate constă în aplicații pentru restaurarea incendiilor în scopuri investigative.

Toți parametrii de intrare necesari FDS pentru a descrie un anumit scenariu sunt direcționați către un singur fișier text creat de utilizator. Fișierul conține informații despre grila numerică,

parametrii mediului înconjurător, geometria clădirii, proprietățile materialelor, cinetica arderii și cantitățile de ieșire dorite. Grila numerică constă în una sau mai multe șiruri rectilinii cu calcule uniforme (de obicei). Toate caracteristicile geometrice ale scenariului trebuie să fie conforme cu grila numerică. Obiectele mai mici decât o celulă a grilei vor fi fie approximate ca fiind o singură celulă, fie omise. Geometria clădirii este introdusă ca o serie de blocuri rectangulare. Condițiile limită se aplică suprafețelor solide considerate ca părți de formă rectangulară. Materialele sunt definite de conductivitatea termică, căldura specifică, densitate, grosime și comportament la ardere. Există metode diferite de a introduce aceste informații funcție de nivelul de detaliere dorit [1, 2].

FDS procesează pe calculator: temperatura, densitatea, presiunea, viteza, compoziția chimică în fiecare celulă din grila numerică la fiecare treaptă discretă de timp. De obicei există sute de mii până la milioane de celule în grilă și mii până la sute de mii de pași în timp. În plus FDS calculează pentru suprafețele solide temperatura, fluxul de căldură, procentul de pierdere de masă și diferiți alți parametri. Utilizatorul trebuie să selecteze cu grijă ce date să salveze, așa cum ar face realmente în proiectarea unui experiment. Deși doar o mică fracțiune din informația computerizată poate fi salvată, randamentul constă în fișierele de date destul de extinse. Pentru faza gazoasă se urmărește randamentul următorilor parametri:

- temperatura gazului;
- viteza gazului;
- concentrația speciilor gazoase (vapori de apă, CO₂, CO, N₂);
- concentrația fumului și estimarea vizibilității;
- presiunea;
- rata eliberării de căldură pe unitatea de masă;
- fracția amestecului (raportul aer/combustibil);
- densitatea gazului;
- masa picăturilor de apă pe unitatea de volum.

Pe suprafețe solide modelul FDS poate prevedea cantități adiționale asociate cu balanța energetică dintre gaz și faza solidă incluzând:

- temperatura la suprafață și în interior;
- fluxul de căldură radiantă și convectivă;
- rata de ardere;
- masa picăturilor de ardere pe unitatea de suprafață;

Parametrii globali înregistrați de program include:

- rata eliberării totale de căldură (HRR)
- timpul de activare a sprinklerelor și detectoarelor
- fluxurile de masă și energie prin deschideri sau solide.

Istoricul în timp al diferiților parametri la un moment dat în spațiu sau parametrii globali ca rata de căldură eliberată de incendiu sunt salvate în fișiere text simple delimitate prin virgulă, care pot fi calculate folosind un program de distribuție. Totuși majoritatea datelor câmpului său de suprafață sunt realizate cu programul „Smokeview”, un instrument special conceput pentru a analiza date generale de FDS. FDS și Smokeview sunt utilizate împreună pentru a modela și vizualiza fenomene ce au loc într-un incendiu. Smokeview realizează această vizualizare prin prezentarea animată a urmelor lăsate de fluxul de particule, zone cu contur animat ale variabilelor gazului, care sunt procesate pe calculator și date de suprafață animate. Smokeview prezintă și planuri de vectori și contururi ale datelor statistice oriunde în interiorul unui scenariu la un moment dinainte stabilit.

În model, procesele de ardere sunt modelate în două moduri. Într-un calcul DNS în care difuzia combustibilului și oxigenului poate fi modelată direct, se utilizează de obicei o reacție chimică globală într-o singură etapă, cu viteză finită. În cazurile în care grila de calcul nu este suficient de fină pentru a rezolva difuzia combustibilului și a oxigenului, particulele lagrangiene sau „elementele termice” sunt folosite pentru a introduce energia termică a focului în calcul și, de asemenea, pentru a vizualiza mișcarea fumului și gaze fierbinți. Elementele termice transportă căldura degajată de

incendiu, oferind o descriere auto-consecventă a transportului fumului la toate scalele de durată și timp rezolvabile.

Termenii LES și DNS se referă la metodologii de rezolvare a ecuațiilor dinamicii fluidelor. Cele două modele de combustie relativ simple descrise mai jos nu sunt inerente LES sau DNS. De fapt, termenii „Simulare numerică directă” și „Simulare cu turbulențe mari” sunt mai dificil de definit atunci când sunt utilizați în contextul unui calcul al fluxului de reacție.

Într-un calcul LES, arderea are loc la scări de lungime mult sub limitele de rezoluție ale rețelei numerice subiacente, astfel încât amestecul de gaze combustibile și aer nu poate fi calculat direct. În schimb, focul este reprezentat de particule lagrangiene discrete (sau elemente termice) care provin de la suprafețe solide și eliberează căldură la o rată specificată. Suprafețele se încălzesc datorită transferului de căldură atât convectiv, cât și radiativ de la o sursă externă, cum ar fi un aprindere. Când o suprafață se încălzește până la temperatura de aprindere prescrisă, elementele termice sunt ejectate de pe suprafață și arse la o viteză prescrisă. Elementele termice se introduc la o rată de $n \cdot 00$ particule pe unitate de timp pe unitate de suprafață cu o viteză inițială mică. Această viteză inițială este o funcție a ratei de pierdere de masă pe unitatea de suprafață a patului de combustibil, care poate fi obținută din rata de eliberare a căldurii pe unitatea de suprafață q''_0 , densitatea gazelor combustibile ρ_f și căldura de ardere ΔH .

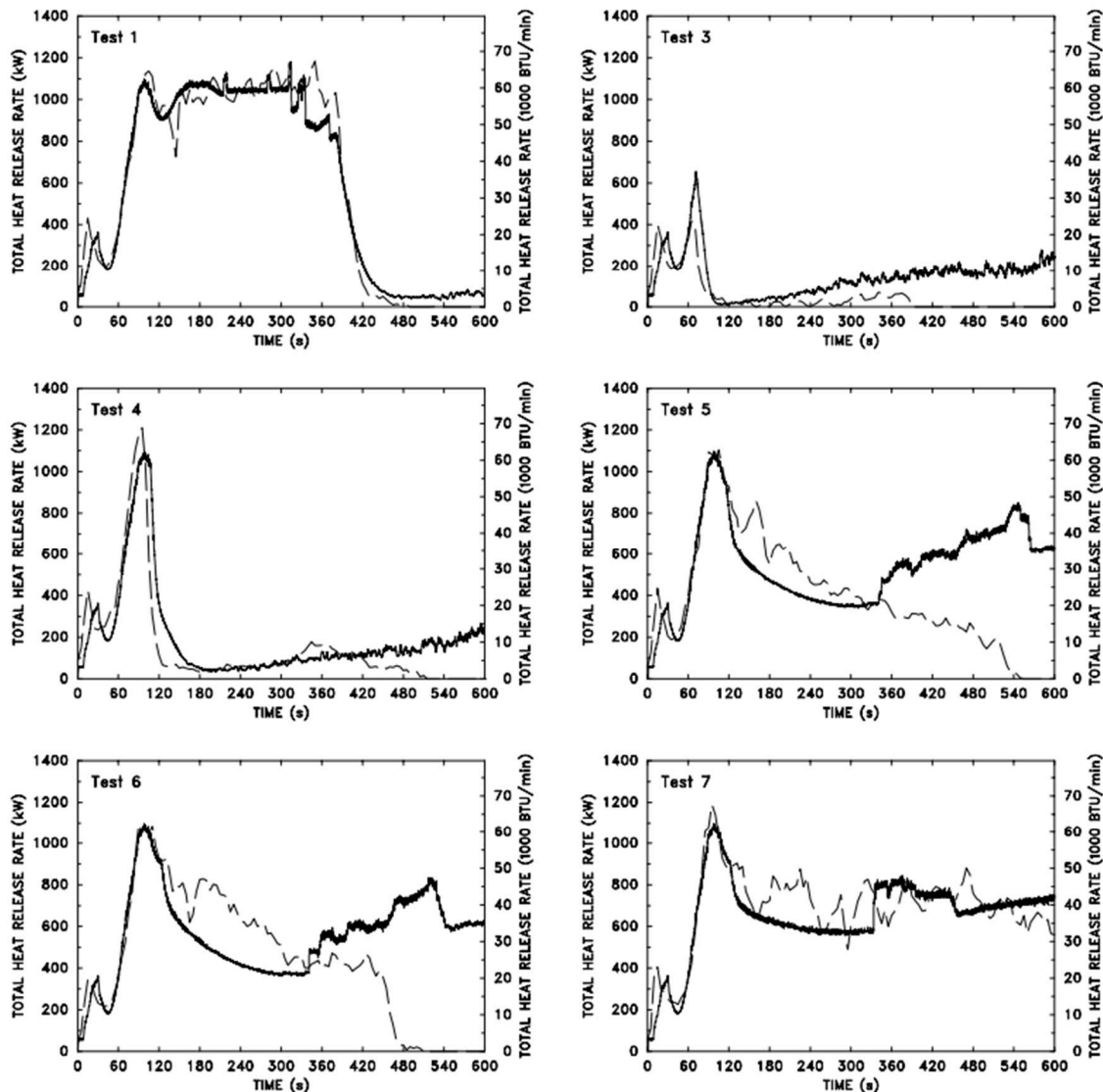


Figura 1. Rate de eliberare a căldurii simulate (linii continue) și experimentale (linii întrerupte) pentru teste

Rețeaua tridimensională, ca și orice alt element al modelului, se poate crea, fie direct, prin intermediul interfeței grafice a programului, fie prin introducerea unui cod în limbaj FDS. Toate calculele FDS sunt efectuate în ochiuri de plasă de calcul. Fiecare obiect în simulare (de exemplu: obstacole și guri de aerisire) trebuie să fie conform ochiurilor de plasă. Atunci când locația unui obiect nu este potrivită exact la o rețea, obiectul este automat re poziționat în timpul simulării. Orice obiect care se extinde dincolo de limita domeniului fizic se întrerupe la limita acesteia.

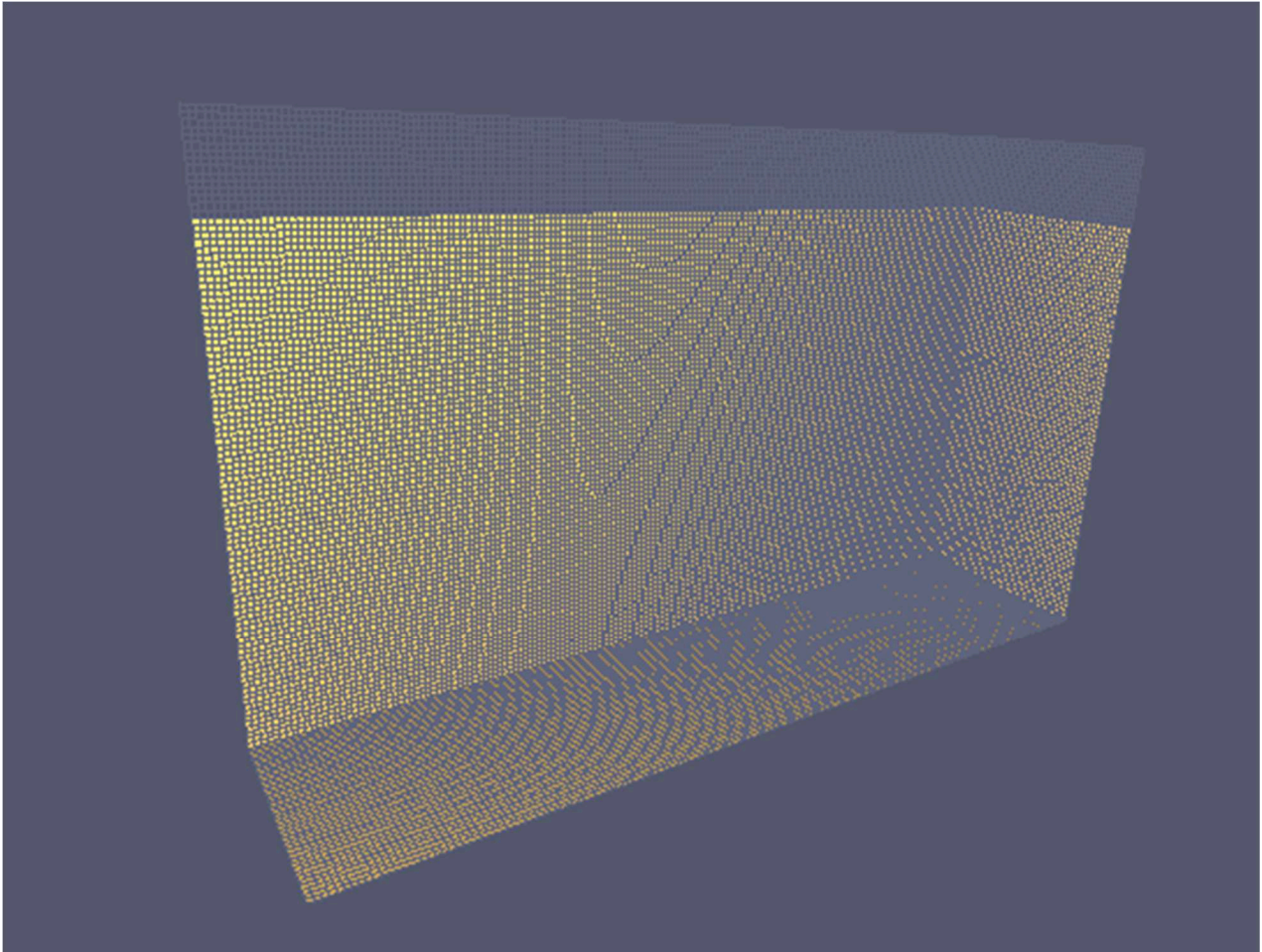
Rata de eliberare a căldurii unui singur element termic este dată de următoarea relație:

$$u_n = \frac{\dot{q}_f''}{\rho_f \Delta H} \quad (1)$$

unde: t_b este timpul de ardere al elementului termic; t_0 - este momentul în care elementul este ejectat din arderesuprafață.

O fracțiune din energia alocată fiecărui element termic este emisă ca radiație și, potențial, reabsorbită de fumul și gazele fierbinți din jur. Termenul vitezei volumetrice de eliberare a căldurii din ecuația energiei este astfel dat de relația:

$$\dot{q}_p = \frac{\dot{q}_f''}{\dot{m}''} \frac{1}{t_b} \quad (t - t_0 < t_b) \quad \dot{q}''' = \frac{\sum_i \dot{q}_{p,i} (1 - \chi_r)}{\delta x \delta y \delta z} + \kappa(\mathbf{x}) \sum_{i=1}^{N_p} \frac{\chi_r \dot{q}_{p,i}}{4\pi |\mathbf{x}_{p,i} - \mathbf{x}|^2} e^{-\int \kappa(l) dl} \quad (2)$$



Figură 2. Rețeaua tridimensională

Description:

Order / Priority:

Specify Color:

Synchronize Meshes - Slower, but less prone to numerical instability.

Mesh Alignment Test: **Passed**

Mesh Boundary (m):

Min X: Min Y: Min Z:

Max X: Max Y: Max Z:

Division Method:

X Cells: Cell Size Ratio: 1,00

Y Cells: Cell Size Ratio: 1,01

Z Cells: Cell Size Ratio: 1,01

Cell Size (m): 0,20 x 0,20 x 0,20

Number of cells for mesh: 648.000

Figura 3. Definirea rețelei de calcul

Pentru a obține precizia de simulare optimă, este important să se folosească celule, care sunt de aproximativ aceeași mărime, în toate cele trei direcții. S-a folosit o rețea tridimensională de formă paralelipipedică, formată din celule cu următoarele caracteristici. Limitele rețelei tridimensionale, în metri, sunt precizate în tabelul 1.

Tabelul 1

Limitele rețelei

MIN.	0	MIN.	0	MIN.	0
MAX.	32	MAX.	8	MAX.	20

Metoda de diviziune aleasă este cea uniformă.

Numărul de celule pe coordonată:

- pe X=162
- pe Y=40
- pe Z=100

Dimensiunile celulelor 0,20 x 0,20 x 0,20 m

Numărul de celule total al rețelei 648.000.

Concluzii:

Ecuatiile și algoritmul numeric descrise în acest document formează nucleul unui model de incendiu în evoluție. Pe măsură ce cercetările asupra fenomenelor specifice legate de incendiu continuă, părțile relevante ale modelului pot fi îmbunătățite. Deoarece modelul a fost conceput inițial pentru a analiza incendiile la scară industrială, poate fi utilizat în mod fiabil atunci când este specificată dimensiunea incendiului, iar clădirea este relativ mare în raport cu incendiul. În aceste cazuri, modelul prezice vitezele de curgere și temperaturile cu o precizie de 10 până la 20% în comparație cu măsurătorile experimentale.

În prezent, cercetarea se concentrează pe îmbunătățirea descrierilor atât fazei gazoase, cât și fazei solide ale arderii în model, astfel încât simulări care implică creșterea și suprimarea incendiilor, în special în încăperi de dimensiuni rezidențiale, poate fi îmbunătățit.

Orice utilizator al modelului numeric trebuie să fie conștient de ipotezele și aproximările utilizate.

Există două probleme pe care orice potențial utilizator trebuie să le ia în considerare înainte de a începe calcule. În primul rând, pentru ambele reale și incendii simulate, creșterea incendiului este foarte sensibilă la proprietățile termice ale mediului înconjurător materiale. În al doilea rând, chiar dacă toate proprietățile materialelor sunt cunoscute, este posibil ca fenomenele fizice de interes să nu fie fi simulat din cauza limitărilor din algoritmi modelului sau grila numerică. Cu excepția acelor puține materiale care au fost studiate până în prezent, utilizatorul trebuie să furnizeze proprietățile termice ale materialelor și apoi validați performanța modelului cu experimente pentru a vă asigura că modelul are fizica necesară inclus. Numai atunci se poate aștepta ca modelul să prezică rezultatul scenariilor de incendiu care sunt similare cu cele care au fost efectiv testate.

Referințe

1. Glenn P. Forney, *Smokeview (Version 5) – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I- User's Guide*, NIST, USA, 2007.
2. Glenn P. Forney, *Smokeview (Version 5) – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume II- Technical Reference Guide*, NIST, USA, 2010.
3. Randall McDermott, Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 2-Verification*, NIST, USA, 2010.