



بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر اطفای آتش در تونل زغال‌سنگ در حال پیشروی

عرفان کاوکار مقدم^۱، اسماعیل محمدیان^۲، حسین افشین^{۳*}، بیژن فرهانیه^۴

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

^۴ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

چکیده

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیکی آتش، اثرات وجود نازل، انشعابات و فن تهویه هوا بر آتش‌سوزی در یک راهروی تونل معدن زغال‌سنگ در حال پیشروی به طول ۴۰ متر بررسی شده است. این مطالعه نشان داده است، وجود نازل علی‌رغم کاهش میدان دید به سبب تبخیر آب، سبب کاهش دمای سرتاسر راهرو و کاهش غلظت کربن دی‌اکسید به اندازه ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام در دورترین نقطه راهرو خواهد شد. وجود انشعاب در یک راهروی تونل معدنی، علاوه بر تأمین مسیر تخلیه از محل آسیب‌دیده، سبب افزایش مدت‌زمان ایمن ماندن نقاط مختلف معدن از نظر دما و غلظت گازهای مضر حاصل از آتش‌سوزی خواهد شد؛ از طرفی اگر انشعاب نزدیک به آتش باشد، به دلیل تأمین اکسیژن مورد نیاز، منجر به گسترش آتش خواهد شد. وجود فن دمشی به منظور تهویه هوا در راهروی تونل علی‌رغم اطفای سریع‌تر آتش و کاهش ۴۶ درصدی میانگین دمای روی منبع آتش، سبب افزایش غلظت کربن مونو اکسید به مقدار ۷/۵ پی‌پی‌ام در دورترین نقطه راهرو خواهد شد؛ همچنین استفاده از نازل‌های متصل به ترموکوپل به سبب نداشتن تأخیر زمانی نسبت به اسپرینکلرها، در مهار آتش مؤثرتر عمل می‌کنند و سبب کاهش ۶۹ درصدی دما بر روی منبع آتش خواهند شد.

کلمات کلیدی: شبیه‌ساز دینامیکی آتش؛ اطفای حریق در معادن؛ اسپرینکلر و نازل؛ فن

Investigation of the effect of several impressive parameters on fire extinguishing in a progressive coal tunnel

Erfan Kavkar Moghaddam¹, Esmail Mohammadian², Hossein Afshin^{3,*}, Bijan Farhanieh⁴

¹ M.Sc Student, Mech. Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

² Ph.D. Student, Mech. Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

³ Prof., Mech. Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

⁴ Prof., Mech. Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Using Fire Dynamic Simulator (FDS) software, this study investigates the effects of sprinklers, branches and blowing fan on fire in a 40-meter-long coal mine tunnel corridor. This study has shown that nozzles, despite reducing the visibility due to water evaporation, will reduce the temperature throughout the corridor and reduce the concentration of carbon dioxide by 15,000 ppm at the farthest point. A branch in a corridor and providing an evacuation route from the damaged area will increase the time for different parts of the mine to remain safe in terms of temperature and the concentration of harmful gases. On the other hand, if the branch is close to the fire, it will cause the fire to spread due to providing the required oxygen. The presence of a blowing fan for ventilation in the tunnel corridor, despite faster fire extinguishing and a 46% reduction in the average temperature on the fire source, will increase the concentration of carbon monoxide by 7.5 ppm at the farthest point. Also, the nozzles connected to the thermocouple, due to the lack of Time Response Index (RTI) compared to sprinklers, are more effective in fire controlling and will reduce the temperature on the fire source by 69%.

Keywords: Fire dynamics simulator (FDS); Mine fire extinguishing; Sprinkler and Nozzle; Fan

۱- مقدمه

آتش‌سوزی از جمله حوادث مهم و عمده در تمامی معادن زغال سنگ اعم از معادن زیرزمینی و معادن روباز است. یکی از مشکلات اساسی برخی از معادن ایران و جهان، عدم وجود سیستم تهویه مناسب به هنگام آتش‌سوزی است. تهویه مناسب علاوه بر جلوگیری از ایجاد آتش‌سوزی و همچنین اطفای سریع‌تر آن، مانع از تجمع گازهای سمی پیش از وقوع حریق در فضاهای مختلف معدن خواهد شد. آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی به مراتب خطرناک‌تر از حریق‌های معادن روباز هست؛ زیرا گرما و محصولات ناشی از احتراق نظیر گازهای سمی محصور شده باعث به خطر افتادن جان کارگران خواهد شد. همچنین آتش‌سوزی در این نوع معادن خطر ایجاد انفجار را هم تشدید خواهد کرد [۱]. این آتش‌سوزی‌ها گاهی به صورت خود به خودی بوده و گاهی نیز ممکن است، در اثر هوادهی به معدن و ورود هوای تازه به رگه‌های زغال سنگ روی دهد. به طور کلی حریق‌های ایجاد شده در معادن زیرزمینی برحسب منشأ به دو دسته تقسیم می‌شوند [۲]:

۱- آتش‌سوزی باز (توسط منابع خارجی) که معمولاً به دلیل استفاده از مواد منفجره، اتصال کابل‌ها، اصطکاک و انفجار گاز متان رخ می‌دهد.

۲- آتش‌سوزی داخلی یا خودسوزی که در اثر جذب سطحی اکسیژن توسط زغال و افزایش دما رخ می‌دهد که در صورت وجود اکسیژن کافی و فقدان سیستم تهویه مؤثر باعث خودسوزی و ایجاد آتش‌سوزی در معادن خواهد شد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متفاوتی در ارتباط با اطفای حریق در معادن انجام گرفته است که می‌توان به تزریق گازهای بی‌اثر مانند نیتروژن، برقراری تعادل دینامیکی فشار و استفاده از آب‌پاش اشاره کرد [۳]. پژوهش‌های انجام شده در زمینه آتش‌سوزی معادن معمولاً در دو دسته کلی قرار خواهند گرفت:

۱- پژوهش‌های انجام شده در زمینه ایجاد آتش‌سوزی، گسترش آتش و نحوه پخش دود که در دسته دینامیک آتش قرار خواهند گرفت.

۲- پژوهش‌هایی که در زمینه اطفای حریق یا پیشگیری از آتش‌سوزی خود به خودی در معادن زغال سنگ انجام شده است.

لی و همکاران [۴] توسط نرم‌افزار FDS به بررسی افزایش دمای بیشینه در یک تونل همراه با انشعاب پرداخته و اثر فاصله منبع آتش تا انشعاب را بر افزایش دما بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از این موضوع است که افزایش دمای بیشینه با کاهش زاویه انشعاب، افزایش سرعت فن تهویه و کاهش شار حرارتی آتش، کاهش می‌یابد؛ همچنین در تونل حاوی انشعاب برای سرعت‌های پایین تهویه هوا (۱ و ۲ متر بر ثانیه) افزایش دمای بیشینه بسیار کمتر از تونل بدون انشعاب است؛ ولی در سرعت‌های بالای تهویه هوا (۳ و ۴ متر بر ثانیه) با افزایش فاصله منبع آتش از انشعاب تا مقدار ۴/۵ متر، افزایش دمای بیشینه کم شده و اگر این فاصله از ۴/۵ متر افزایش یابد، تغییر محسوسی در افزایش دمای بیشینه ایجاد نخواهد شد. و همکاران [۵] با نرم‌افزار FDS به بررسی اثر ارتفاع محل قرار گرفتن معدن در توزیع دمای سقف آن به هنگام آتش‌سوزی پرداختند. نتایج حاکی از این است که هنگامی که نرخ رهایش گرما کم است، دمای سقف با ارتفاع معدن زیاد می‌شود. همچنین هنگامی که نرخ رهایش گرما افزایش می‌یابد، دمای سقف معدن با افزایش ارتفاع آن کاهش می‌یابد که عمدتاً به دلیل کاهش اکسیژن در نقاط مرتفع (مانند فلات‌ها) است. همچنین آتش‌سوزی در ارتفاع‌های معمولی (کمتر از ۳۰۰۰ متر) با تغییرات ارتفاع کمتر دچار تغییر شده و تغییرات دمای سقف همواره با نرخ رهایش گرما ارتباط مستقیم داشته و با افزایش این نرخ، زیاد و با کاهش آن کم می‌شود. در مراحل ابتدایی افزایش نرخ رهایش گرما، دمای سقف هنوز با نرخ رهایش گرما ارتباط مستقیم دارد. هنگامی که نرخ رهایش گرما به ۱۰۰ مگاوات افزایش می‌یابد، توزیع دمای سقف دیگر افزایش نیافته و ثابت باقی می‌ماند. سرانجام، یک رابطه برای پیش‌بینی تغییرات طولی دمای سقف در ارتفاع‌های مختلف ارائه نمودند. کاو و همکاران [۶] به کمک نرم‌افزار FDS به شبیه‌سازی آتش درون یک تونل با هدف بررسی اثر درب ضد حریق، فشار آب پاششی سامانه مه‌آب (واترمیست^۱) و سرعت جریان هوا در پرده هوا^۲ بر جلوگیری از انتشار دود و آتش پرداختند. نتایج نشان داد که هنگام ایجاد حریق در لوله، درب ضد حریق، واترمیست و پرده هوا همگی اثر خوبی در سرمایه‌ی و جلوگیری از پخش شدن دود و آتش دارند و هنگامی که فشار آب پاششی واترمیست ۱۰ مگا پاسکال و سرعت جریان هوا ۱۰

² Air Curtain

¹ Water mist

بین سرعت دوییدن فرد و میدان دید وی تخمین زدند. حیدری نژاد و همکاران [۱۱] به کمک نرم‌افزار FDS به شبیه‌سازی آتش داخل تونل همراه با سیستم تهویه و اطفای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نرخ جریان آب، سبب افزایش ظرفیت خنک کاری سیستم اطفای و تضعیف شار تشعشعی رسیده به پایین‌دست آتش می‌شود. با کاهش قطر ذرات آب پاششی، اختلاف دما با محیط کاهش یافته و در ناحیه پایین‌دست آتش، شار تشعشعی کاهش می‌یابد؛ همچنین جریان هوا منجر به انتقال قطرات به پایین‌دست آتش شده و افزایش نرخ جریان هوا باعث کاهش تضعیف تشعشعی در بالادست آتش خواهد شد. این محققان بیان کردند که موقعیت آب‌پاش‌های فعال‌شده نسبت به منبع آتش بر توانایی خنک‌سازی و تضعیف شار حرارتی تشعشعی سیستم اثرگذار بوده و سیستم اطفای با کاهش دمای دود، سیستم تهویه را قادر ساخته تا با سرعتی کمتر از سرعت تهویه بحرانی از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند. جیان‌گو و همکاران [۱۲] به کمک نرم‌افزار پایدروسیم به مدل‌سازی وقوع آتش توسط پیرولیز پلی‌وینیل کلراید (پی‌وی‌سی) درون یک معدن پرداختند و به این نتایج دست یافتند که با افزایش قدرت منبع آتش، غلظت کربن مونو اکسید و زمان ثابت شدن غلظت این ماده افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت هوای ورودی، دما در مجاورت منبع آتش زیاد شده و محدوده میدان دید و غلظت گاز کربن مونو اکسید کاهش یافته و دود حاصل از آتش رقیق می‌شود؛ همچنین با بیشتر شدن سرعت هوای ورودی از سرعت هوای بحرانی پدیده بازگشت دود رخ نخواهد داد. لی [۱۳] توسط نرم‌افزار FDS به بررسی اطفای آتش رخ داده نزدیک درب باز توسط واترمیست پرداخت. وی برای سه پارامتر تعداد شبکه‌های هندسه، مقدار پاشش قطرات آب و واترمیست در ثانیه^۷ و ضریب اطفای آتش^۸ حساسیت‌سنجی نمود و به این نتیجه رسید که وقتی جت جریان خروجی از واترمیست به آتش توسعه‌یافته برسد، نرخ رهاش گرما به طور ناگهانی زیاد شده و سپس به سرعت کاهش خواهد یافت؛ همچنین تغییر شکل اضلاع درب تأثیر بسیار زیادی بر نرخ رهاش گرما خواهد

متر بر ثانیه باشد، مؤثرترین حالت در جلوگیری از پخش دود و آتش در لوله خواهد بود. همچنین هنگام استفاده از درب ضد حریق، اثر پرده هوا در ایجاد سرمایش از واترمیست بهتر است و هنگامی که از این سیستم‌ها به تنهایی استفاده شود، واترمیست بهترین اثر را در خنک کاری خواهد داشت. استوارت و همکاران [۷] به مقایسه نتایج شبیه‌سازی شرایط لازم برای ایجاد بازگشت آتش در معادن زیرزمینی توسط نرم‌افزار فلوئنت^۱ و ونت فایر^۲ پرداختند و به نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی به یکدیگر و نیز بالاتر بودن دقت در روش دینامیک سیالات محاسباتی^۳ (CFD) دست یافتند؛ همچنین وابسته بودن پدیده بازگشت دود به شدت آتش و سرعت هوای ورودی از نتایج دیگر این محققان بود. ادجیسکی و همکاران [۸] به بررسی متغیرهایی نظیر غلظت کربن دی‌اکسید، اکسیژن، نرخ آزاد شدن گرما و زمان لازم برای گسترش کامل آتش به کمک نرم‌افزار پایدروسیم پرداختند؛ همچنین توسط نرم‌افزار ماین فایر پرو پلاس^۴، نقاط مختلف معدن ساسا واقع در کشور مقدونیه را شماره‌گذاری کرده و با شناسایی نقاط بحرانی، راه خروج مناسب را به کارگران به هنگام وقوع آتش‌سوزی نمایش دادند. ژانگ و لی [۹] با استفاده از نرم‌افزار کامسول^۵ تلاش کردند تا اثرات تزریق گازهای بی‌اثر را در اطفای حریق در تونل‌های زیرزمینی بررسی کنند. این محققان نتیجه گرفتند که با کاهش سرعت باد ورودی، سرعت باد بیشینه در مرکز تونل کاهش می‌یابد که عاملی برای دیرتر خاموش شدن آتش است. همچنین غلظت گاز متان به کندی افزایش می‌یابد و غلظت گاز متان بیشینه از وسط تونل به لبه منتقل خواهد شد و گاز بی‌اثر به کندی با گازهای موجود در اطراف آتش ترکیب خواهد شد. همچنین با کاهش سرعت باد ورودی، غلظت نیتروژن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و گاز نیتروژن تزریق‌شده، در نزدیکی منبع آتش و با بالا رفتن دمای محیط به خوبی با هوا ترکیب خواهد شد. حقیقت و لاکسپر [۱۰] به بررسی متغیرهای دما، عمق لایه دود، گرمای ناشی از تشعشع و محدوده سمی بودن فضا توسط گازهای حاصل از احتراق ناشی از انفجار گاز متان به کمک نرم‌افزار FDS پرداخته و بیشینه زمان زنده ماندن افراد را با بهره‌گیری از روابط ریاضی موجود

⁵ Comsol

⁶ Polyvinyl Chloride (PVC)

⁷ Droplets Per Second (DPS)

⁸ Extinguishing Coefficient

¹ Fluent

² Vent Fire

³ Computational Fluid Dynamic (CFD)

⁴ Minefire Pro+

که \bar{p} و \bar{u}_i به ترتیب چگالی و سرعت سیال موجود در ناحیه مورد بررسی هستند و در صورتی که ماده‌ای در حجم کنترل مورد نظر تولید شود سمت راست معادله دیگر برابر با صفر نخواهد بود و نرخ تولید ماده جایگزین آن خواهد شد [۱۵].

۲-۲- معادله بقای اندازه حرکت

$$\frac{\partial(\bar{u}_j \bar{u}_i \bar{\rho})}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{\rho}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i + f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t^{SGS}) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

که در رابطه بالا u و p و ρ به ترتیب سرعت، فشار و چگالی سیال، g شتاب گرانش، μ لزجت دینامیکی سیال، μ_t^{SGS} لزجت دینامیکی اغتشاشی زیرشبکه و f_i نیروی خارجی مثلاً نیروی ناشی از اصطکاک قطرات مایع موجود در فاز گازی یا حضور میدان مغناطیسی است [۱۵].

۲-۳- معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial \bar{h} \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{h} \bar{\rho})}{\partial x_j} = \frac{D \bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\bar{\rho} \left(D + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \right) + q_r + q_{comb} \quad (3)$$

که در رابطه بالا D ضریب پخش حرارت، v_t لزجت سینماتیکی اغتشاشی، Pr_t پراتل اغتشاشی، h آنتالپی سیال، q_r شار حرارت تابشی و q_{comb} نیز مقدار انرژی حاصل از احتراق است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$q_{comb} = -R \Delta h_c \quad (4)$$

که در این رابطه Δh_c گرمای حاصل از احتراق و R نرخ مصرف سوخت خواهد بود.

۲-۴- معادله بقای گونه‌ها

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{Y}_f}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{Y}_f)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\bar{\rho} \left(D + \frac{v_t}{Sc_f} \right) \frac{\partial \bar{Y}_f}{\partial x_j} \right) + R \quad (5)$$

D ضریب پخش جرم، Y_f کسر جرمی سوخت و Sc_f عدد اشمیت اغتشاشی است که به صورت تجربی مقدار ثابت (معمولاً عدد یک) برای آن در نظر گرفته می‌شود. R نرخ مصرف سوخت است و از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

داشت. وی همچنین نتیجه‌گیری کرد که نرخ رهایش گرما با افزایش میزان پاشش قطرات آب کاهش می‌یابد.

همان‌طور که بیان شد، مطالعات انجام‌گرفته در ارتباط با آتش‌سوزی در معادن عمدتاً به بررسی نحوه گسترش آتش و دود در معادن و عوامل مؤثر بر آن، روش‌های مؤثر در جلوگیری از پدیده خودسوزی زغال سنگ و همچنین بررسی روش اطفای حریق و بررسی تأثیرات متغیرهای مربوط به آن می‌پردازد و در مورد میزان کارایی نازل متصل به ترموکوپل در اطفای حریق و نیز نحوه عملکرد فن دمشی در اطفای آتش و پراکندگی محصولات حاصل از حریق، اطلاعات زیادی در دسترس نیست؛ همچنین عامل مهمی در نحوه گسترش دود و آتش وجود انشعابات در راهروهای معادن است که در پژوهش‌های پیشین کمتر به آن توجه شده است.

در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار FDS سعی می‌شود پس از شبیه‌سازی گسترش آتش، در یک هندسه ثابت معدن، اثر وجود نازل متصل به ترموکوپل در اطفای آتش بررسی شود. همچنین اطلاعاتی در مورد ضریب اطفای آتش در نرم‌افزار FDS، تفاوت میزان کارایی نازل متصل به ترموکوپل با اسپرینکلر^۱ و اثر انشعاب در راهروی معدن بر نحوه گسترش آتش مورد بررسی قرار گیرد؛ همچنین اثر توقف یا ادامه فعالیت فن دمشی هنگام بروز آتش در اطفای آن و پراکنده ساختن مواد حاصل شده از آتش‌سوزی نظیر دود، کربن دی اکسید و کربن مونو اکسید از اهداف دیگر این پژوهش خواهد بود.

۲- روش حل عددی

شبیه‌ساز دینامیکی آتش (FDS) یک نرم‌افزار منبع باز است که بر پایه نظریه دینامیک سیالات و احتراق مواد ایجاد شده است و معادلات ناویر-استوکس را برای جریان‌های سرعت‌پایین به صورت عددی حل می‌کند. (عدد ماخ کمتر از ۰/۳ باشد). این نرم‌افزار جهت حل مسائل، از معادلات پایه آشفتگی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ استفاده خواهد کرد [۱۴]. معادلات حاکم بر مسئله پژوهش عبارت است از:

۲-۱- معادله بقای جرم

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

² Large Eddy Simulation (LES)

¹ Sprinkler

لایه‌ای است که حاوی مخلوط مواد است که واکنش‌های شیمیایی در فاز جامد در آن انجام خواهد شد [۱۶].

۲-۷- شبیه‌سازی جریان‌های توربولانسی

نرم‌افزار FDS جهت مدل‌سازی جریان توربولانسی از دو روش استفاده می‌کند: روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و روش شبیه‌سازی عددی مستقیم^۲. محاسبات در روش شبیه‌سازی عددی مستقیم برای مسائل پیچیده بسیار زمان‌بر است، بنابراین در این پژوهش از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. در این روش، از نوعی فیلترگیری پایین‌گذر^۳ جهت جداسازی مقیاس‌های حرکت استفاده می‌شود [۱۷]:

$$\bar{f}(X, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(X - \bar{x}', t) G(X, \bar{x}', \bar{\Delta}) d\bar{x}' \quad (10)$$

که در آن G تابع فاکتورگیری و $\bar{\Delta}$ پهنای فیلتر می‌باشند. اگر معادله بقای اندازه حرکت (۲) به صورت زیر بازنویسی شود [۱۸ و ۱۹]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu S_{ij}) \quad (11)$$

با استفاده از فاکتورگیری و با فرض امکان جابه‌جایی عملگر فیلترگیری و مشتق‌گیری مکانی، معادلات ناویر-استوکس فیلترگیری شده برای سیال تراکم‌ناپذیر به صورت رابطه (۱۲) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu \bar{S}_{ij} + T_{ij}) \quad (12)$$

که در آن T_{ij} ، تانسور تنش‌های زیرشبکه است و به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$T_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j} \quad (13)$$

۲-۸- الگوریتم حل

نرم‌افزار FDS معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی را با استفاده از روش اختلاف محدود با دقت مرتبه دوم در طول زمان حل می‌کند. متغیرها در طول زمان با استفاده از روش صریح رنگ-کوتای مرتبه دوم به صورت تخمین و اصلاح،

$$R = \frac{\rho}{\Delta t C_c} \min \left(\frac{\bar{Y}_f}{Y_f}, \frac{\bar{Y}_o}{s} \right) \quad (6)$$

در این رابطه، Δt گام زمانی حل، Y_o کسر جرمی اکسیدکننده، s ضریب استوکیومتری و C_c ثابت مدل است [۱۵].

۲-۵- معادله انتقال حرارت تابشی

$$S \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_\lambda(x, s) + B(x, \lambda) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \phi(s, s^*) I_\lambda(x, s^*) ds^* \quad (7)$$

که در آن $I_\lambda(x, s)$ شدت تابش در طول موج λ می‌باشد. S بردار جهت شدت تابش، $\kappa(x, \lambda)$ و $\sigma_s(x, \lambda)$ به ترتیب ضرایب موضعی جذب و پخش بوده و $B(x, \lambda)$ چشمه نشر انرژی تشعشعی می‌باشد. ϕ تابع فاز است که نشان‌دهنده نسبت انکسار در یک جهت به انکسار ایزوتروپ است. جمله انتگرالی موجود در سمت راست معادله بالا نماینده انرژی تشعشعی انعکاس یافته در جهات دیگر است. نرم‌افزار FDS معادله انتقال حرارت تشعشعی را به صورت پیش‌فرض با استفاده از ۱۰۰ زاویه گسسته شده حل می‌کند [۱۶].

۲-۶- معادله پیرولیز

$$\frac{\partial Y_{s,i}}{\partial t} = -\sum_{j=1}^{N_{s,i}} r_{ij} + \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_{s,i}^*} \nu_{s,i}^* r_{i^*j}^* \quad (8)$$

جمله دوم در سمت راست تساوی نرخ تولید ماده i ام توسط واکنش شیمیایی انجام‌شده در سایر مواد جامد را نشان می‌دهد که این ماده با ضریب $\nu_{s,i}^*$ یکی از محصولات آن واکنش‌ها است. عبارت r_{ij} نرخ واکنش i را در دمای T_s مشخص می‌کند و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r_{ij} = A_{ij} Y_{s,i}^{n_{s,ij}} \exp \left(-\frac{E_{ij}}{RT_s} \right) \quad (9)$$

$$Y_{s,i} = \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s,0}} \right)$$

که A_{ij} و E_{ij} به ترتیب ضریب ثابت معادله و انرژی فعال‌سازی واکنش است و برای مواد مختلف، متفاوت است؛ همچنین $n_{s,ij}$ مرتبه واکنش^۱ است و معمولاً برابر با یک است. $\rho_{s,0}$ چگالی اولیه

³ Low Pass Filter

¹ Reaction Order

² Direct Numerical Simulation (DNS)

$$\delta t \cdot \max \left(\frac{|u|}{\delta t}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) < 1 \quad (17)$$

۱۰- با توجه به ارضاء شرط کورانت، نرم افزار وارد مرحله اصلاح می شود. در این مرحله ابتدا مقادیر H^n و u^* به نواحی مرزی شبکه های مختلف انتقال می یابد.

۱۱- سرعت \bar{u}^* محاسبه می شود.

۱۲- مرحله اصلاح (توسط روش رانگ-کوتا) بر متغیرهای به دست آمده در مرحله ۲ اعمال می شود. به عنوان مثال برای چگالی ρ^{n+1} در مرحله اصلاح می توان نوشت:

$$\frac{\rho^{n+1} - \frac{1}{2}(\rho^n + \rho^*)}{\delta t/2} + \nabla \cdot (\rho^* \bar{u}^*) = 0 \quad (18)$$

۱۳- مقادیر Y_α^{n+1} و ρ^{n+1} به محل اتصال شبکه های مختلف انتقال داده شده و شرایط مرزی بر آن ها اعمال می شود.

۱۴- با توجه به متغیرهای به دست آمده دیورژانس سرعت در مرحله اصلاح ($\nabla \cdot u^{n+1}$) محاسبه می شود.

۱۵- اغتشاشات فشار با توجه به معادله پواسون محاسبه می شود:

$$\nabla^2 H^* = - \left[\frac{\nabla \cdot u^{n+1} - \frac{1}{2}(\nabla \cdot \bar{u}^* + \nabla \cdot \bar{u}^n)}{\delta t/2} \right] - \nabla \cdot \bar{F}^* \quad (19)$$

۱۶- با توجه به بخش اصلاح و گام دوم رانگ-کوتا، سرعت در گام زمانی جدید محاسبه خواهد شد:

$$\frac{u^{n+1} - \frac{1}{2}(\bar{u}^* + \bar{u}^n)}{\delta t/2} + \bar{F}^* + \nabla H^* = 0 \quad (20)$$

۱۷- پس از محاسبه سرعت در گام زمانی جدید، مقادیر H^* و u^{n+1} به نواحی مرزی شبکه های مختلف انتقال می یابند. با حل دیگر معادلات، سایر متغیرها در گام زمانی جدید محاسبه شده و معادلات حاکم حل می شوند.

۳- روش حل مسئله

در این پژوهش، هندسه یکی از تونل های زغالی در حال پیشروی جهت شبیه سازی در نظر گرفته شده است.

تعیین می گردند. الگوریتم حل معادلات به صورت مراحل زیر است [۲۰]:

۱- متغیرهای \bar{p}_m^n ، u^n ، Y_α^n ، ρ^n و H^n در گام زمانی n ام تخمین و حدس زده می شوند.

۲- میدان سرعت به هم پیوسته متوسط \bar{u}^n محاسبه می شود. اگر شبکه های مختلف در میدان حل موجود باشد، در نواحی اتصال این شبکه ها، مقدار سرعت با میان یابی بین دو شبکه متصل به هم مشخص شده و به جای مقادیر سرعت قرار داده می شود.

۳- متغیرهای \bar{p}_m^* ، Y_α^* و ρ^* در مرحله پیش بینی با توجه به معادله انتقال حاکم بر آن ها محاسبه خواهد شد. به عنوان مثال چگالی به صورت زیر از معادله بقای جرم کلی به دست می آید:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho^n \bar{u}^n) = 0 \quad (14)$$

۴- مقادیر Y_α^* و ρ^* به محل اتصال شبکه های مختلف انتقال و شرایط مرزی بر آن ها اعمال می شود.

۵- متغیرها در گام زمانی n ام با مقادیر به دست آمده در مرحله پیش بینی جایگزین می شود.

۶- دیورژانس سرعت ($\nabla \cdot u^*$) با توجه به داده های به دست آمده از مرحله پیش بینی محاسبه می شود. باید توجه شود که در این مرحله فقط دیورژانس سرعت محاسبه می شود و خود میدان سرعت محاسبه نخواهد شد.

۷- معادله پواسون^۱ با هدف به دست آوردن اغتشاشات فشار محاسبه خواهد شد:

$$\nabla^2 H^n = - \left[\frac{\nabla \cdot u^* - \nabla \cdot \bar{u}^n}{\delta t} \right] - \nabla \cdot \bar{F}^n \quad (15)$$

۸- سرعت u^* در مرحله پیش بینی محاسبه می شود:

$$\frac{u^* - \bar{u}^n}{\delta t} + \bar{F}^n + \nabla H^n = 0 \quad (16)$$

۹- شرط کورانت-فدریش-لویی^۲ جهت ارزیابی مناسب بودن گام زمانی انتخاب شده بررسی می شود. اگر این شرط (نامعادله (۱۷)) برقرار باشد، نرم افزار به مرحله اصلاح می رود، در غیر این صورت، روند دوباره از بند ۲ با گام زمانی جدید (که برابر ۰/۸ مقدار ماکزیمم δt مجاز است) تکرار می شود.

² Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)

¹ Poisson equation

۳-۱- هندسه معدن و مشخصات شبکه

جهت ساده‌سازی هندسه مسئله راهروی تونل معدنی در حال پیشروی به صورت مکعب مستطیل در نظر گرفته شده است؛ به گونه‌ای که طول راهروی تونل ۴۰ متر، عرض راهرو ۴/۵ متر و ارتفاع آن ۳/۲ متر است؛ همچنین دمای اولیه محیط ۲۰ درجه سلسیوس و فشار محیط برابر با ۱ اتمسفر است. دیواره‌های تونل دمای اولیه‌ای برابر با دمای محیط دارند و ضریب انتشار^۱ دیواره‌ها برابر با ۰/۹ است که توانایی انتقال حرارت تابشی و جابجایی با محیط را دارند.

۳-۲- منبع آتش

منبع آتش در نظر گرفته شده قدرتی به اندازه ۲۰ مگاوات داشته و از طریق پیرولیز پی‌وی‌سی تولید خواهد شد. نرخ حرارت آزاد شده از منبع آتش در فرآیند احتراق به صورت غیر دائمی و وابسته به دما خواهد بود و دارای مشخصات زیر خواهد بود:

$$Q_f = \alpha t^2 \quad (21)$$

که Q_f نرخ آزاد شدن گرما از منبع آتش، α ضریب رشد آتش و t زمان سوختن آتش است؛ همچنین ضریب گسترش آن برابر با $\alpha = 0.4689 \text{ kW/s}^2$ خواهد بود. این ضریب گسترش مربوط به آتشی از نوع آتش سریع^۲ است [۲۱]. این منبع آتش مربعی شکل با ابعاد ۱ متر در ۱ متر می‌باشد که ۰/۵ متر از کف معدن فاصله دارد و مرکز آن در فاصله ۷/۵ متری از ورودی راهروی تونل است. شرط مرزی دمایی این سطح نیز به صورت دما ثابت و مقدار آن ۳۰۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است که نرخ آزاد شدن حرارت آتش به صورت تابع درجه دو نسبت به زمان با ضریب گسترش α افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود یعنی ۲۰ مگاوات خواهد رسید. ماده‌ای که با پی‌وی‌سی مشتعل شده وارد واکنش می‌شود، متان در نظر گرفته شده و نرخ تولید گاز کربن مونو اکسید برابر با 0.1203 kg/kg و نرخ تولید دود نیز 0.185 g/g در نظر گرفته خواهد شد [۲۱].

همچنین در نرم‌افزار FDS متغیری به عنوان ضریب اطفای آتش وجود دارد که متغیری کاملاً تجربی است و در طی فرآیند حل عددی به صورت تجربی داده خواهد شد. این ضریب، حاکی از مقدار قابلیت آتش برای اطفای شدن است و مقدار آن از صفر تا هر عدد دلخواه مثبت می‌تواند باشد. هرچه

این ضریب مقدار بزرگتری داشته باشد، آتش شبیه‌سازی شده راحت‌تر اطفای خواهد شد. در این شبیه‌سازی‌ها از ضریب اطفای ۰/۱ تا ۰/۰۵ جهت دستیابی به میزان کارایی نازل متصل به ترموکوپل و اسپرینکلر در اطفای آتش استفاده شده است.

۳-۳- سیستم تهویه دمشی

با توجه به اینکه طول راهروی هندسه پژوهش ۴۰ متر خواهد بود، از فن دمشی با دبی ۶ متر مکعب بر ثانیه استفاده شده است. قطر فن دمشی نیز ۷۵۰ میلی‌متر خواهد بود و در قسمت فوقانی ورودی راهرو قرار خواهد داشت؛ همچنین دمای اولیه فن نیز برابر با دمای محیط یعنی ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. حال جهت پی بردن به اثر عملکرد فن دمشی در اطفای آتش و پراکنده ساختن فرآورده‌های مضر ناشی از حریق، دو حالت برای آن در نظر گرفته می‌شود که عبارت است از:

- ۱- متوقف شدن فن دمشی به محض گسترش آتش و رسیدن دمای نزدیک‌ترین ترموکوپل در مجاورت با منبع آتش به ۷۴ درجه سلسیوس (محدوده فعالیت آشکارساز حرارتی معمولی) و فعالیت مجدد فن هنگام رسیدن دما به ۲۵ درجه سلسیوس.
- ۲- عدم تغییر در وضعیت فعالیت فن دمشی با گسترش آتش و افزایش دمای نقاط مختلف معدن.

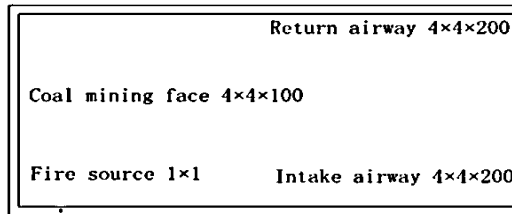
۳-۴- نازل و اسپرینکلر

در این پژوهش از دو نوع نازل و اسپرینکلر تجاری و صنعتی به ترتیب با دبی ۵۶/۱ و ۸۰/۱۳ لیتر بر دقیقه در شبیه‌سازی‌های مجزا جهت پی بردن به تفاوت میزان کارایی آن‌ها استفاده شده است. این آب‌پاش‌ها به سقف معدن متصل می‌شوند. فاصله بین آب‌پاش‌ها ۳ متر در نظر گرفته شده است و اولین آب‌پاش در فاصله ۳ متری از ورودی راهرو قرار خواهد داشت. لازم به ذکر است که دمای اولیه آب‌پاش‌ها برابر با دمای محیط و به مقدار ۲۰ درجه سلسیوس است. در طول آتش‌سوزی اگر دمای هر نقطه از محیط معدن به ۷۴ درجه سلسیوس برسد، آب‌پاش مربوط به آن محل فعال خواهد شد و فرآیند پاشش آب تا زمانی ادامه پیدا خواهد کرد که دمای احساس شده توسط

² Fast Fire

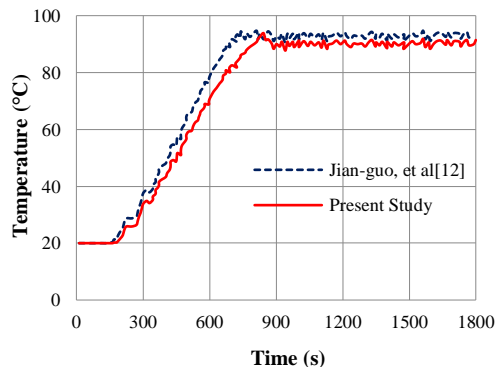
¹ Emissivity Coefficient

قسمت‌ها ۴ متر است. منبع آتش در قسمت ورودی و در وسط آن قرار داده شده است و ۲۰ متر با سطح کاری فاصله دارد و ابعاد آن ۱ متر در ۱ متر است:



شکل ۲- هندسه مدل فیزیکی تعریف شده پژوهش مورد نظر بر اساس مدل جیان گو و همکاران [۱۲]

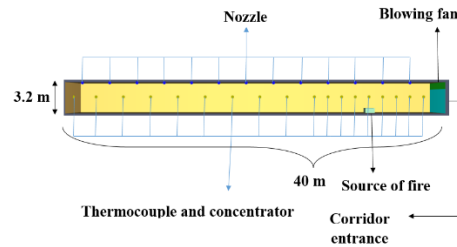
آقای جیان گو شبکه‌بندی هندسه بالا را با توجه به بزرگ بودن هندسه، مدت‌زمان شبیه‌سازی طولانی (۱۸۰۰ ثانیه) و همچنین تعداد شبیه‌سازی‌ها جهت حصول نتایج مختلف به صورت یکدست و با ابعاد $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ متر در نظر گرفته است تا شبیه‌سازی‌ها از نظر زمانی و امکانات سخت‌افزاری بهینه باشد؛ بنابراین تعداد کل مش‌ها ۶۲۹۷۶ است. نرخ آزادسازی گرما از منبع آتش دقیقاً مشابه مطلب بیان شده در روش حل مسئله این پژوهش و در قسمت منبع آتش است. نتایج حاصله از توزیع دما و غلظت کربن مونواکسید در وسط راهروی خروجی در مدت ۳۰ دقیقه پس از ایجاد حریق برای آتشی به قدرت ۲۰ مگاوات و سرعت هوای ورودی ۲ متر بر ثانیه به صورت شکل ۳ است:



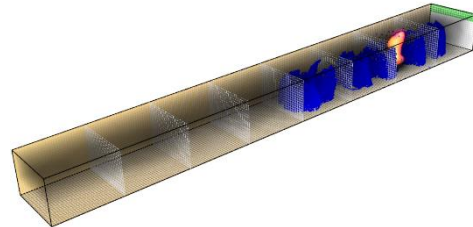
الف) غلظت کربن مونواکسید

ترموکوپل‌های مجاور آب‌پاش به پایین‌تر از ۲۵ درجه سلسیوس برسد.

اندازه‌گیری متغیرهای مهم و اساسی مسئله نظیر توزیع دما، غلظت گاز کربن مونواکسید و کربن دی‌اکسید در ارتفاع ۱/۷ متری از کف معدن محاسبه خواهد شد:



الف) مقطع طولی راهروی تونل



ب) مدل سه بعدی شبکه محاسباتی

شکل ۱- شماتیک راهروی تونل معدنی در حال پیشروی (الف) مقطع طولی راهروی تونل (ب) مدل سه بعدی شبکه محاسباتی

۴- اعتبارسنجی

برای اطمینان یافتن از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، فرآیند اعتبارسنجی با پژوهش جیان گو و همکارانش در نظر گرفته شده است [۱۲]. دمای اولیه راهروی معدن ۲۰ درجه سلسیوس و فشار اولیه آن برابر با یک اتمسفر است. سرعت باد ورودی از ۱ تا ۲/۴ متر بر ثانیه و قدرت منبع آتش از ۱ تا ۲۰ مگاوات تغییر خواهد کرد؛ همچنین دود حاصل شده از دیوارها نمی‌تواند نفوذ کند.

شکل ۲ نشان‌دهنده مدل فیزیکی این پژوهش است، طول راهروی ورودی^۱ و خروجی^۲ ۲۰۰ متر و طول سطح کاری^۳ زغال سنگ ۱۰۰ متر است؛ همچنین عرض و ارتفاع تمامی

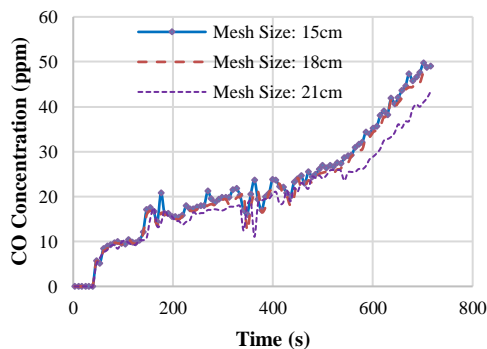
³ Coal mining face

¹ Intake airway

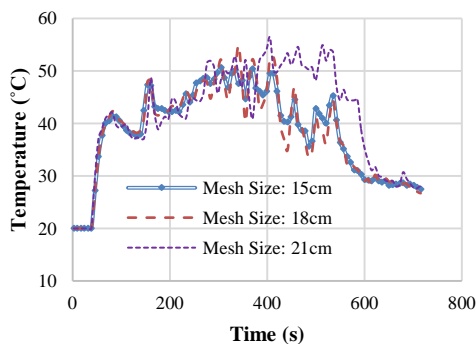
² Return airway

$$D^* = \left(\frac{20000}{1.205 \times 1.005 \times 293.15 \times \sqrt{9.81}} \right)^{\frac{2}{5}} = 3.176m$$

بنابراین در نزدیکی منبع آتش، ابعاد هر سلول در هندسه مورد نظر نباید از مقدار $0.3 \times 0.3 \times 0.3$ بزرگتر در نظر گرفته شود. در تخمین اولیه مقدار اضلاع هر سلول را نصف این مقدار و برابر با $0.15 \times 0.15 \times 0.15$ در نظر گرفته می‌شود. گفتنی است که سلول‌ها از نوع مکعبی بوده و سازمان‌یافته می‌باشند. سپس در قدم بعدی هر ضلع این سلول‌ها را با گام 0.3 دو مرحله زیاد نموده و ابعاد سلول به ترتیب $0.18 \times 0.18 \times 0.18$ و $0.21 \times 0.21 \times 0.21$ در نظر گرفته می‌شود. در نمودارهای شکل ۴ دما و غلظت کربن مونو اکسید در دورترین نقطه معدن در ارتفاع $1/7$ متری از کف معدن به جهت انجام فرایند استقلال حل از شبکه نمایش داده شده است:

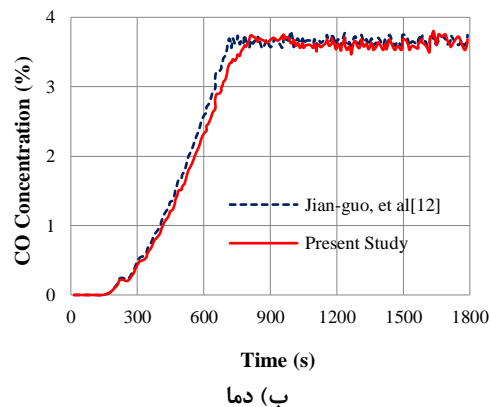


الف) غلظت کربن مونو اکسید



ب) دما

شکل ۴- بررسی استقلال حل از شبکه بر روی (الف) غلظت کربن مونو اکسید و (ب) دما، در دورترین نقطه معدن



شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی (الف) غلظت کربن مونو اکسید و (ب) نتایج دما با نتایج جیان گو و همکاران [۱۲]

با توجه به اختلاف کم موجود در نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی با نتایج استخراج شده از مقاله (کمتر از ۱۰ درصد)، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند اعتبارسنجی با موفقیت انجام شده است و می‌توان به نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی‌ها در ادامه پژوهش اطمینان داشت.

۵- استقلال حل از شبکه

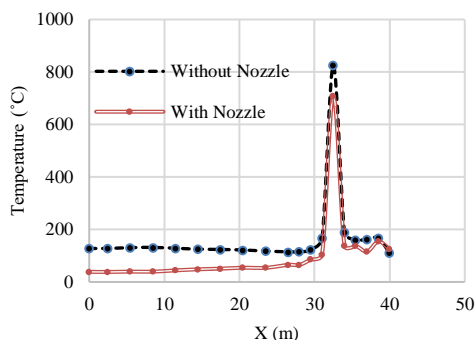
استفاده از شبکه‌بندی مناسب برای حصول نتایج مطلوب و قابل اعتماد امری بسیار مهم است. مک گراتن و همکارانش به نتیجه‌ای مهم در خصوص ابعاد شبکه دست یافتند و بیان نمودند که برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان، ابعاد شبکه در نزدیکی منبع آتش نباید بزرگتر از $0.1 D^*$ باشد. D^* مقیاسی از طول مشخصه برای منبع آتش است و از رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۲۲]:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (22)$$

که Q نرخ گرمای آزاد شده از آتش، ρ چگالی هوا، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا، T_0 دمای محیط و g شتاب گرانش است. با توجه به جدول ترمودینامیکی، خواص هوا در دمای 20 درجه سلسیوس به صورت زیر است:

$$\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3, C_p = 1.005 \text{ kJ/kg K}$$

با توجه به نرخ رهائش گرمای فرض شده به مقدار 20 مگاوات طول مشخصه برابر خواهد شد با:



شکل ۵- تأثیر وجود نازل بر میانگین دمای کل تونل

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، وجود نازل تأثیر بسیار زیادی بر کاهش میانگین دمای سرتاسر این راهروی معدنی در حال پیشروی مخصوصاً در نقاط دور از منبع آتش خواهد داشت؛ به گونه‌ای که در صورت وجود نازل، مناطق دور از آتش از لحاظ دمایی حتی تا ۱۲ دقیقه بعد از شروع آتش‌سوزی ایمن خواهند ماند؛ اما اگر نازل وجود نداشته باشد، میانگین دمای سرتاسر هندسه مورد بررسی بعد از گذشت ۱۲ دقیقه بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس خواهد بود؛ بنابراین هیچ نقطه‌ای برای وجود معدنچیان ایمن نخواهد ماند.

همچنین وجود آب‌پاش تأثیر زیادی در کاهش غلظت مواد مضر برای سلامتی انسان نظیر کربن دی اکسید خواهد داشت. شکل ۶ کانتورهای غلظت کربن دی اکسید را در سرتاسر راهرو، هنگام استفاده و عدم استفاده از آب‌پاش در ثانیه ۷۲۰ نمایش می‌دهد.

در صورت استفاده از آب‌پاش بعد از ۱۲ دقیقه، غلظت کربن دی اکسید در نقاط دور از منبع آتش کمتر از حدود ۴ درصد یعنی ۴۰۰۰۰ پی‌پی‌ام است؛ در حالی که اگر از آب‌پاش استفاده نشود غلظت این گاز در برخی از نقاط معدن حتی به ۵/۵ درصد یعنی ۵۵۰۰۰ پی‌پی‌ام خواهد رسید. لازم به ذکر است که هر دو مقدار برای سلامتی انسان خطرناک بوده و سبب گیجی و کاهش سطح هوشیاری انسان خواهد شد، اما غلظت حدود ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام بیشتر، طبیعتاً خطرات به مراتب جدی‌تر برای معدنچیان خواهد داشت.

همچنین به علت وجود آتش و گرمای زیاد ناشی از آن، قطرات ریز پاششی آب تبخیر شده و مه ایجاد شده سبب کاهش میدان دید در نقاط دوردست آتش خواهد شد؛ بنابراین در

همان طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل شده در دو متغیر بالا برای ابعاد شبکه ۰/۱۸ و ۰/۱۵ بسیار نزدیک به هم است (به دلیل نوسانی بودن نمودارها میانگین خطاها در هر نمودار بین این سه مقدار ابعاد شبکه انجام شده و در همه این موارد، میانگین خطا کمتر از ۱۰ درصد است)؛ بنابراین ابعاد شبکه ۰/۱۸×۰/۱۸×۰/۱۸ در نظر گرفته خواهد شد. لازم به ذکر است که با توجه به اهمیت مشخصه‌هایی نظیر دما (که فعال شدن نازل و اسپرینکلر به آن مربوط است) و غلظت مواد حاصل از سوختن نظیر کربن دی اکسید و کربن مونو اکسید در نقاط مختلف تونل (جهت مقایسه حالت فعال بودن فن دمشی با حالت غیر فعال بودن آن) مخصوصاً در نقاط انتهایی و دوردست آتش، دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در این نقاط اهمیت بسیار بالایی خواهد داشت؛ بنابراین می‌توان درجه اهمیت مکان‌های دوردست آتش را (به دلیل دقت در محاسبه پارامترهای دما و غلظت مواد حاصل از سوختن) همانند مکان‌های نزدیک به آتش (به جهت دقت در حل معادلات مربوط به احتراق و دقیق‌تر بودن پی‌رولیز پی‌وی‌سی) دانست. به همین دلیل در سرتاسر هندسه ابعاد شبکه‌ها یکسان و برابر با ابعاد شبکه نزدیک آتش در نظر گرفته شده و با بزرگ‌تر در نظر نگرفتن شبکه‌ها در نقاط انتهایی شبکه، شبیه‌سازی با دقت بیشتری انجام شود.

۶- نتایج

۶-۱- اثر وجود نازل (آب‌پاش)

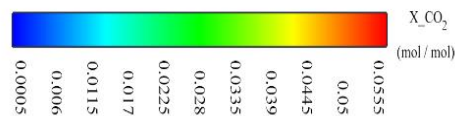
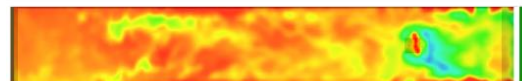
استفاده از آب‌پاش تأثیر بسیار زیادی در اطفای آتش و جلوگیری از گسترش آن خواهد داشت و هرچه آب‌پاش زودتر فعال شود، کارایی آن بیشتر خواهد بود و می‌تواند از رسیدن آتش به مرحله توسعه‌یافته جلوگیری کند و یا دست‌یابی به این مرحله را به تعویق اندازد. در نرم‌افزار FDS کارایی آب‌پاش جهت اطفای آتش کاملاً وابسته به متغیری تجربی به نام ضریب اطفای است. در این قسمت به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی استفاده از آب‌پاش تجاری جهت اطفای آتش با ضریب اطفای ۰/۱ و نیز عدم استفاده از آب‌پاش پرداخته خواهد شد. شکل ۵ مبین تأثیر وجود آب‌پاش بر میانگین دما در سرتاسر تونل در حال پیشروی بعد از ۱۲ دقیقه شبیه‌سازی آتش‌سوزی است:

صورت استفاده از آب‌پاش میدان دید در نقاط دوردست آتش کمی کمتر از حالتی خواهد بود که از آب‌پاش استفاده نشود.

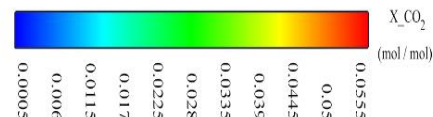
صورت استفاده از آب‌پاش میدان دید در نقاط دوردست آتش کمی کمتر از حالتی خواهد بود که از آب‌پاش استفاده نشود.

صورت استفاده از آب‌پاش میدان دید در نقاط دوردست آتش کمی کمتر از حالتی خواهد بود که از آب‌پاش استفاده نشود.

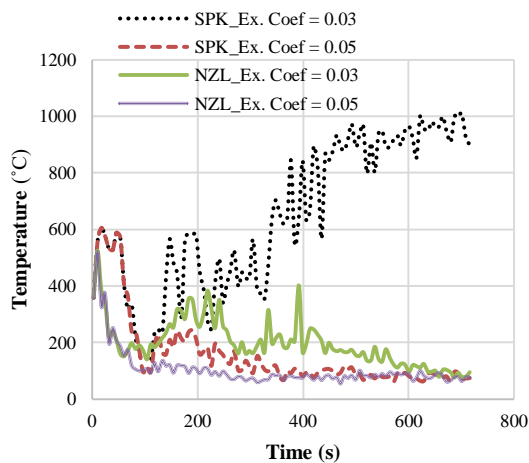
صورت استفاده از آب‌پاش میدان دید در نقاط دوردست آتش کمی کمتر از حالتی خواهد بود که از آب‌پاش استفاده نشود.



الف) عدم استفاده از نازل



ب) استفاده از نازل



شکل ۷- مقایسه اثر نازل متصل به ترموکوپل و اسپرینکلر در ضرب اطفاهای مختلف بر روی دمای روی منبع آتش

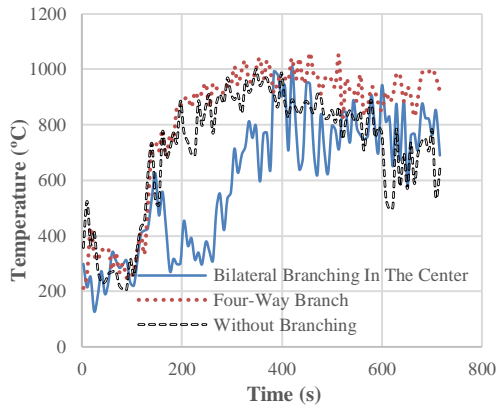
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در ضرب اطفای ۰/۰۳ اسپرینکلر قادر به مهار آتش نخواهد بود، در صورتی که نازل متصل به ترموکوپل به خوبی آتش را مهار خواهد کرد. لازم به ذکر است که هر دو وسیله در ضرب اطفای ۰/۰۵ موفق عمل نموده و توانایی اطفای آتش را خواهند داشت.

۳-۶- اثر انشعاب‌های موجود در راهروی معدن در پژوهش مورد نظر، دو نوع انشعاب برای این راهروی معدنی در نظر گرفته شده است که به ترتیب عبارتند از:

شکل ۶- نمودار غلظت کربن دی‌اکسید در ارتفاع ۱/۷ متری در زمان ۷۲۰ ثانیه در شرایط (الف) عدم استفاده از نازل (ب) استفاده از نازل

۲-۶- تفاوت نازل متصل به ترموکوپل و اسپرینکلر اسپرینکلرها معمولاً دارای شاخص زمان پاسخ^۱ (RTI) می‌باشند که مقدار آن معمولاً بین ۳۵ تا ۲۵۰ و واحد آن $m^{1/2}s^{1/2}$ است. مقدار کم این شاخص نشان‌دهنده پاسخ سریع اسپرینکلر نسبت به دما است؛ به گونه‌ای که برای اسپرینکلرهای پاسخ سریع، مقدار RTI کمتر از ۵۰ و برای اسپرینکلرهای پاسخ استاندارد بیشتر از $80 m^{1/2}s^{1/2}$ است. یکی از نوآوری‌های این پژوهش، متصل کردن نازل‌های پاشش آب به ترموکوپل است که از اسپرینکلرها پاسخ زمانی بسیار سریع‌تری به حرارت دارند و زودتر نسبت به آن‌ها فعال شده و بازدهی بسیار بهتری دارند. در شکل ۷ تغییرات دمای روی منبع آتش در فاصله ۱/۷ متری از سطح زمین در ضرب اطفاهای ۰/۰۳ و ۰/۰۵ برای نازل متصل به ترموکوپل و اسپرینکلر استاندارد با RTI برابر با

^۱ Response Time Index (RTI)



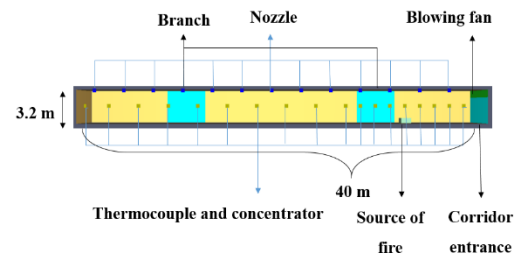
شکل ۹- نمودار اثر انشعاب بر دمای روی منبع آتش

از نمودارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت که در این راهروی تونل در حال پیشروی، انشعاب دو طرفه در مرکز از رسیدن دمای آتش به مقدار بیشینه خود ممانعت به عمل آورده و هم از نظر وجود مسیر فرار از مکان آتش گرفته و هم به عنوان کاهش‌دهنده دمای منبع آتش و کمک به اطفای آن در صورت رسیدن به موقع گروه اطفای حریق مناسب خواهد بود. انشعاب چهار طرفه به جهت نزدیک بودن انشعاب‌ها به منبع آتش و تأمین نمودن اکسیژن مورد نیاز آن، سبب افزایش نرخ سوختن آتش و بیشتر بودن دما نسبت به حالت انشعاب دو طرفه و بدون انشعاب خواهد بود.

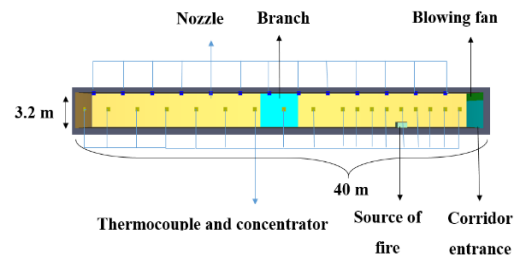
همچنین انشعابات تأثیر زیادی بر روی توزیع دما، کربن دی اکسید و کربن مونو اکسید در سرتاسر راهروی تونل در حال پیشروی دارند و در نتیجه به کمک این موارد می‌توان سبب افزایش ایمن ماندن نقاط مختلف معدن و نیز افزایش مدت‌زمان ورود به سیستم اطفای ثانویه شد. در نمودارهای شکل ۱۰ اثر انشعابات بر دما، غلظت کربن دی اکسید و نیز کربن مونو اکسید در دورترین نقطه معدن از آتش (انتهای راهرو) در ارتفاع ۱/۷ متری از کف معدن قابل مشاهده خواهد بود:

۱- انشعاب دو طرفه در مرکز: از این نوع انشعاب‌ها برای راهروهای میانی استفاده می‌شود تا از هر دو طرف با راهروهای همسایه خود ارتباط داشته باشند.

۲- انشعاب چهار طرفه: از این نوع انشعاب‌ها نیز در راهروهای میانی استفاده خواهد شد و برای راهروهایی که طول بسیار بلندی دارند، مناسب است. در این پژوهش، انشعاب‌ها نسبت به مرکز هندسه متقارن هستند.



الف) انشعاب چهار طرفه



ب) انشعاب دو طرفه

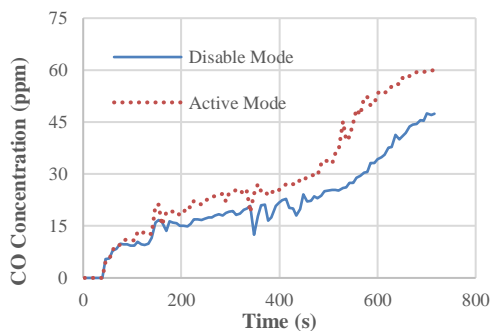
شکل ۸- شماتیک انشعابات راهروی تونل در حال پیشروی (الف) انشعابات چهار طرفه (ب) انشعابات دو طرفه

نتایج حاصله از شبیه‌سازی هر یک از موارد بالا برای آتش طراحی شده با ضریب اطفای برابر با ۰/۰۱ در نمودارهای شکل ۹ آورده شده است:

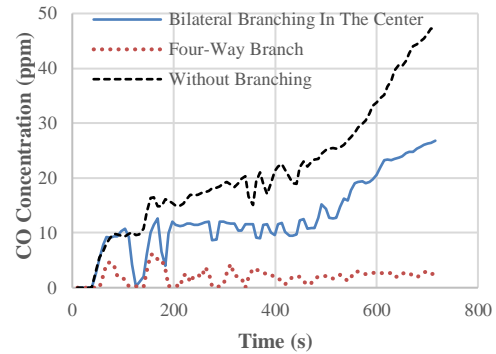
پی‌پی‌ام در غلظت کربن مونو اکسید و ۱/۲۸ و ۰/۶۹ درصد در غلظت کربن دی اکسید در دورترین نقطه معدن خواهند شد؛ بنابراین هرچه انشعابات یک راهروی معدنی بیشتر باشد، مدت‌زمان بیشتری نقاط دور از منبع آتش ایمن خواهند ماند، ولی اگر این انشعابات نزدیک به آتش باشد، سبب توسعه آتش به راهروهای مجاور شده و مهار آتش را به سبب تأمین اکسیژن آن دشوارتر می‌کند؛ بنابراین انشعاب نزدیک منبع آتش هم جنبه مثبت از جهت بیشتر ایمن ماندن نقاط معدن و هم جنبه منفی از جهت اطفای آتش خواهد داشت.

۴-۶- اثر وجود فن دمشی

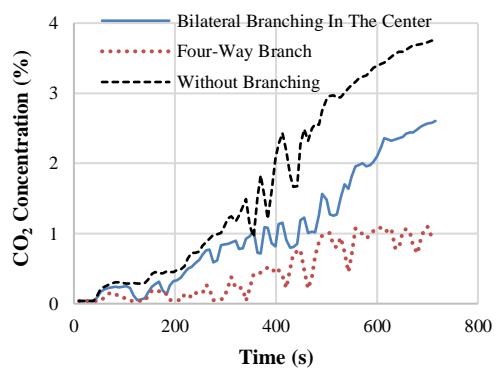
هرچه دبی فن بیشتر باشد، احتمال وقوع پدیده بازگشت دود کمتر خواهد شد؛ اما باید به این نکته توجه داشت که گاهی اوقات نیروی اینرسی حاصل از فن دمشی سبب پخش بیشتر آتش و محصولات آن نظیر دود و گازهای مضر به نقاط دوردست آتش خواهد شد. از طرفی امکان خاموشی آتش در صورت بالا بودن سرعت تهویه یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از فن در حین آتش‌سوزی است. در نمودارهای شکل ۱۱ از خاموشی آتش و نیز پخش بیشتر کربن مونو اکسید به دورترین نقطه معدن کاملاً مشهود است. در یک حالت با رسیدن دما به ۷۴ درجه سلسیوس فن دمشی متوقف خواهد شد و در حالت دیگر به فعالیت خود ادامه می‌دهد. میانگین دما بر روی منبع آتش در ارتفاع ۱/۷ متری در مدت ۱۲ دقیقه شبیه‌سازی، هنگام غیر فعال بودن فن دمشی و ادامه فعالیت آن به ترتیب ۷۰۹ و ۳۸۳ درجه سلسیوس است؛ بنابراین فعالیت فن سبب کاهش ۴۵/۹۸ درصدی دما و اطفای سریع‌تر آتش می‌شود. لازم به ذکر است که دبی فن دمشی برابر با ۶ متر مکعب بر ثانیه و ضریب اطفای آتش ۰/۰۱ است.



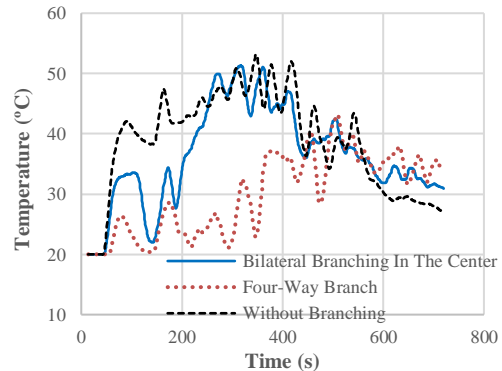
الف) غلظت کربن مونو اکسید در دورترین نقطه معدن



الف) غلظت کربن مونو اکسید



ب) غلظت کربن دی اکسید



پ) دما

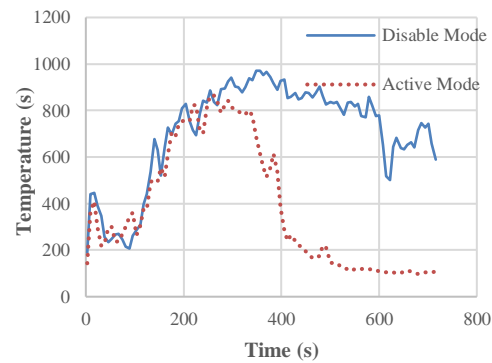
شکل ۱۰- نمودارهای بررسی اثر انشعاب بر (الف) غلظت کربن مونو اکسید (ب) غلظت کربن دی اکسید و (پ) دما در دورترین نقطه راهروی تونل

از نمودارهای بالا می‌توان دریافت که انشعاب چهار طرفه و انشعاب دو طرفه نسبت به حالت بدون انشعاب به ترتیب سبب کاهش ۸/۵ و ۲/۲ درجه سلسیوس در دما، ۱۹/۴۴ و ۸/۷

مقایسه بین نازل‌های متصل به ترموکوپل و اسپرینکلرها نشان می‌دهد که نازل‌های متصل به ترموکوپل به سبب نداشتن تأخیر زمانی در مهار آتش مؤثرتر عمل می‌کنند و توانایی اطفای آتش با ضریب اطفای ۰/۰۳ را بر خلاف اسپرینکلر دارند، همچنین سبب کاهش ۴۷ درصدی دما در ۶۰ ثانیه اول و کاهش ۶۹ درصدی دما در ۱۲ دقیقه اول در ارتفاع ۱/۷ متری بر روی منبع آتش خواهند شد. وجود انشعابات در این راهروی تونل معدنی به جهت انتقال دود، گازهای مضر و گرما به راهروهای مجاور، میدان دید و مدت‌زمان ایمن ماندن نقاط دور از آتش را افزایش می‌دهد؛ به طوری که انشعاب چهار طرفه و انشعاب دو طرفه نسبت به حالت بدون انشعاب به ترتیب سبب کاهش ۸/۵ و ۲/۲ درجه سلسیوس، ۱۹/۴ و ۸/۷ پی‌پی‌ام غلظت کربن مونو اکسید و ۱/۲۸ و ۰/۶۹ درصدی غلظت کربن دی اکسید در دورترین نقطه معدن خواهد شد؛ اما اگر انشعابها نزدیک منبع آتش باشد، سبب تأمین اکسیژن بیشتر آتش و گسترش آن خواهد شد. در انتها نیز اثر وجود فن دمشی در دو حالت غیر فعال شدن هنگام رسیدن دمای ترموکوپل به ۷۴ درجه سلسیوس و نیز ادامه فعالیت بدون در نظر گرفتن محدودیت دمایی بررسی شد، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ادامه فعالیت فن سبب کاهش ۴۶ درصدی میانگین دما بر روی منبع آتش در ارتفاع ۱/۷ متری در مدت ۱۲ دقیقه و اطفای سریع‌تر آتش می‌شود؛ اما میانگین غلظت کربن مونو اکسید در دورترین نقطه معدن، هنگام غیر فعال بودن فن دمشی و روشن ماندن آن به ترتیب ۲۱/۵ و ۲۹ پی‌پی‌ام است؛ بنابراین فعالیت فن دمشی در هنگام آتش‌سوزی علی‌رغم کاهش دما، سبب افزایش غلظت مواد مضر در سرتاسر این راهروی تونل معدنی در حال پیشروی خواهد شد.

۸- مراجع

- [1] Sinha PR (1986) Mine fires in Indian coalfields. Energy, 11(11-12), 1147-1154.
- [2] Farahani JV (2014) Man-made major hazards like earthquake or explosion; case study, Turkish mine explosion (13 may 2014). IR J of Public Health 43(10): 1444.
- [3] Ray SK, Singh RP (2007) Recent developments and practices to control fire in underground coal mines. Fire Technol 43(4): 285-300.
- [4] Li Y, Zhang X, Sun X, Zhu N (2021) Maximum temperature of ceiling jet flow in longitudinal ventilated tunnel fires with various distances



ب) دما بر روی منبع آتش

شکل ۱۱- اثر وجود فن دمشی در اطفای آتش بر روی (الف) غلظت کربن مونو اکسید در دورترین نقطه معدن و (ب) دما بر روی منبع آتش

اثر دوگانه وجود فن دمشی در نمودارهای شکل ۱۱ کاملاً مشهود است؛ بنابراین در این راهروی تونل در حال پیشروی، در صورت استفاده از فن با سرعت تهویه بالا، علاوه بر اطفای سریع‌تر آتش، سبب افزایش غلظت مواد مضر در دورترین نقطه معدن خواهد شد. در واقع میانگین غلظت کربن مونو اکسید در دورترین نقطه معدن در ارتفاع ۱/۷ متری در مدت ۱۲ دقیقه، هنگام غیر فعال بودن فن دمشی و ادامه فعالیت آن به ترتیب ۲۱/۵ و ۲۹ پی‌پی‌ام است.

۷- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر وجود آب‌پاش، انشعاب در راهرو و فن دمشی به هنگام آتش‌سوزی در یک راهروی تونل معدنی در حال پیشروی به طول ۴۰ متر است؛ همچنین تفاوت کارایی نازل متصل به ترموکوپل و اسپرینکلر در اطفای حریق بررسی شده است. استفاده از آب‌پاش نقش به‌سزایی در کاهش دما به هنگام آتش‌سوزی دارد، به طوری که اگر ضریب اطفای آتش برابر با ۰/۰۱ باشد و از نازل استفاده نشود، میانگین دما در مدت ۱۲ دقیقه شبیه‌سازی در سرتاسر این راهروی در حال پیشروی، بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس و غیر ایمن خواهد بود. در صورت استفاده از نازل، علی‌رغم کاهش میدان دید به دلیل تبخیر آب پاششی و ایجاد بخار، بعد از گذشت ۱۲ دقیقه از ایجاد آتش، غلظت گاز کربن دی اکسید در دورترین نقطه از آتش حدود ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام کمتر خواهد بود؛ همچنین

- [14] Rosema A, Guan H, Veld H (2001) Simulation of spontaneous combustion, to study the causes of coal fires in the Rujigou Basin. *Fuel* 80(1): 7-16.
- [15] Yeoh GH, Yuen KK (2009) *Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice*. Butterworth-Heinemann.
- [16] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, Floyd J, Weinschenk C, Overholt K (2013) *Fire Dynamics Simulator user's guide*. NIST Special Publication 1019(6): 1-339.
- [۱۷] جوشقانی م (۱۳۸۳). بررسی ساختارهای بزرگ حرکتی در پدیده جایجایی آزاد پلوم با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. دانشگاه صنعتی شریف.
- [18] Turns SR (2000) *An introduction to combustion: concepts and applications*. McGraw-Hill.
- [۱۹] حیدری‌نژاد ق، پاسدارشهری ه، صفرزاده م (۱۳۹۹) اهمیت استفاده از مدل احتراقی و زیرشبکه مناسب به منظور مدل‌سازی الگوی جریان در آتش استخری بزرگ‌مقیاس. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر ۵۲(۹): ۲۴۲۵-۲۴۴۲.
- [۲۰] پارسا س، محمدیان ا، افشین ح، فرهانی ب (۱۴۰۰) بررسی تأثیر نسبت ابعاد دریچه و شرایط منبع احتراق بر رفتار پدیده بازافروختگی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۱(۳): ۱۶۵-۱۷۹.
- [21] Deming W, Xingshen W, Qingguo B (1996) Study on the combustion characteristics of mine fires. *China Uni of Mining Technol* 1: 49-56.
- [22] McGrattan KB, Baum HR, Rehm RG (1998) Large eddy simulations of smoke movement. *Fire Safety J* 30(2): 161-178.
- between fire source and cross-passage. *Tunnelling and UnderG Space Technol* 113: 103953.
- [5] Wu E, Huang R, Wu L, Shen X, Li Z (2020) Numerical study on the influence of altitude on roof temperature in mine fires. *IEEE Access* 8: 102855-102866.
- [6] Cao B, Yang L, Wang H, Xu Q, Li B (2021) Numerical study on the different prevention methods for fire and smoke in utility tunnel fire. In *IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Sci.* 675(1): 012045 IOP Publishing.
- [7] Stewart CM, Aminossadati SM, Kizil MS (2015) Underground fire rollback simulation in large scale ventilation models. In *15th North American Mine Vent. Symposium*.
- [8] Adjiski V, Mirakovski D, Despodov Z, Mijalkovski S (2015) Simulation and optimization of evacuation routes in case of fire in underground mines. *J of Sustainable Mining* 14(3): 133-143.
- [9] Zhang LL, Li CY (2017) Effect of inert gas injection on gas explosion in the process of sealing fire zone. In *IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Sci.* 59(1): 012044 IOP Publishing.
- [10] Haghghat A, Luxbacher K (2018) Tenability analysis for improvement of firefighters' performance in a methane fire event at a coal mine working face. *J of Fire Sci* 36(3): 256-274.
- [11] Heidarinejad G, Vasheghani Farahani R (2018) Numerical Simulation of Fire in Tunnel with Ventilation and Suppression Systems. *Modares Mech Eng* 18(8): 209-220.
- [12] Jian-guo W, Rui-meng W, Yan-qiu W, Jun-kai S (2019) Numerical Simulation of Smoke Variation During Fire in Intake Airways on a Coal Mining Face. In *Proc. of the 11th Int. Mine Vent. Cong.* (pp. 652-663). Springer, Singapore.
- [13] Lee J (2019) Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening. *Nuclear Eng and Technol* 51(2): 410-423.