



## بررسی عددی توزیع مونوکسیدکربن و دما در یک تونل در حال آتش‌سوزی با حضور پرده هوا

عطا سجودی<sup>۱\*</sup>، حسین افشین<sup>۲</sup> و بیژن فرهانیه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۲</sup> استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۳</sup> استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶

### چکیده

آتش‌سوزی در تونل‌های جاده‌ای در سال‌های اخیر، سبب وقوع تلفات جانی و مالی بسیاری در دنیا گردیده است که موجب گسترش توجه محققان به موضوع تهویه اضطراری شده است. آنچه عموماً باعث مرگ و میر مسافران در چنین حوادثی می‌شود، استنشاق گاز سمی مونوکسیدکربن بوده، دمای بالای ایجاد شده تنها ۱۵ الی ۲۵ درصد از این تلفات را شامل می‌شود. بررسی روش‌های مختلف جهت بیرون راندن دوده یا کم نمودن غلظت گازهای سمی و نیز کم کردن دمای حاصل شده از آتش، از مهم‌ترین اهداف پژوهشگران است. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا یک تونل با مقطع مستطیلی به طول ۶۰۰ متر، عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۷ متر همراه با آتش استخری در مرکز تونل توسط کد شبیه‌ساز دینامیکی آتش مدل گردیده، نتایج آن با نتایج تحلیلی و تجربی پیشین مقایسه شده است. پس از اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، کارایی پرده هوا در جلوگیری از انتشار دوده و کاهش غلظت مونوکسیدکربن و دما مورد بررسی قرار گرفته است. پرده هوا بصورت تکی و دوتایی با فواصل متعدد از آتش شبیه‌سازی شده است. نتایج عددی بدست آمده نشان می‌دهد که مزیت استفاده از دو پرده هوا در طرفین آتش بیشتر بوده، در نهایت منجر به کاهش میزان غلظت مونوکسیدکربن و دما در حدود استاندارد می‌شود.

**کلمات کلیدی:** تهویه اضطراری؛ آتش‌سوزی در تونل؛ پرده هوا؛ کد شبیه‌ساز دینامیکی آتش.

## Numerical Study of Carbon Monoxide and Temperature Distribution in Tunnel Fires Employing Air Curtain

A. Sojoudi<sup>1\*</sup>, H. Afshin<sup>2</sup>, B. Farhanieh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ms.c, Mech. Eng., Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

Tunnel fires are responsible for many fatalities in recent decades and this field of study has received an extensive effort by researchers. Most of deaths in these events are attributed to inhalation of toxic gases such as CO rather than high temperature of fire which causes 15 to 25 percent of deaths. Removal of the generated plume or its dilution and reduction of high temperature are the great interest of investigators. In the current study, a numerical test has been performed on a rectangular cross section tunnel of 600m length, 10m width and 7m height with a pool fire at the middle part using FDS5.5. Obtained results were compared with previous theoretical and experimental results. After satisfying a good agreement with prior results, single and couple air curtains were used to investigate their efficiency on dilution of the amount of toxic gases and high temperature. Results show that double air curtain is better than a single one and can decay the relevant amounts of CO and temperature below the standard values.

**Keywords:** Emergency Ventilation; Tunnel Fire; Air Curtain; Fire Dynamics Simulator (FDS).

## ۱- مقدمه

هر چند ظهور اولیه سیستم حمل و نقل توده‌ای در دهه‌ی ۱۸۵۰ [۱] از سوی شهروندان و شهرداری‌ها مورد استقبال قرار نگرفت، اما افزایش نرخ رشد جمعیت و افزایش ترافیک در شهرهای مهم، دلایل اصلی نیاز به سیستم حمل و نقل سریع بودند. همچنین سرعت بالاتر قطارها، مسیرهای کوتاه-تر و ظرفیت باربری بیشتر، باعث افزایش اشتیاق شهروندان در استفاده از این سیستم‌ها شد. همراه با فراگیر شدن این خطوط حمل و نقل که اولین آن‌ها در ژانویه ۱۸۸۳ در لندن بود [۱]، کنترل ایستگاه‌های زیرزمینی و تونل‌ها برای ایمنی و راحتی مسافری اهمیت پیدا کرد. سیستم تهویه در مسیر-های زیرزمینی و تونل‌های جاده‌ای، هنگامی به کار می‌رود که یک اتفاق غیرمعمول، سبب ایستادن حرکت قطارها می‌شود و خروج مسافران از وسیله به سمت تونل یا ایستگاه را ضروری می‌سازد. یک تحلیل آماری از سال ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۹ نشان می‌دهد، کل آتش سوزی در تونل‌های دنیا بین، ۶۰ تا ۹۰ مورد در هر سال است. از جمله آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲ و ۱]:

- تونل جاده‌ای در نیهونزاکا در ژاپن (۱۹۷۹): ۷ نفر کشته، تخریب ۱۷۳ وسیله نقلیه، خرابی ۱۱۰۰ متر از طول تونل.
- تونل جاده کالدوت در کالیفرنیا (۱۹۸۲): ۳۳ میلیون یورو خسارت و خرابی ۵۸۰ متر از طول تونل.
- تونل ریلی کانل در فرانسه (۱۹۹۶): ۵۹ میلیون یورو خسارت.
- مترو باکو (۱۹۹۵): ۲۸۹ نفر کشته و ۲۵۶ نفر مجروح.
- مترو شهر سان دیاگو در کره جنوبی (۲۰۰۳): ۱۸۹ نفر کشته.

در یک سیستم محدود مانند مترو که دارای محدودیت در فضا و میزان هوای در گردش است، یکی از مهم‌ترین عوامل تلفات جانی ناشی از آتش‌سوزی، وجود دود و استنشاق گازهای سمی نظیر هیدروژن سیانید، هیدروژن کلرید، دی اکسیدکربن و مونوکسیدکربن حاصل از آن است؛ لذا طبیعی است، بخش قابل توجهی از تحقیقات در زمینه پیش‌بینی الگوی جریان دود و غلظت آلاینده‌ها باشند.

آزمایش در مقیاس واقعی، مطمئن‌ترین روش برای مطالعه پدیده‌های مرتبط با آتش‌سوزی است؛ اما هزینه‌های بسیار هنگفت آن، محققان را به سمت ساخت مدل در

مقیاس کوچکتر و آزمایش روی آن سوق داده است. پژوهشگران بسیاری با کار کردن با مدل‌های کوچک، نتایج قابل قبولی را در زمینه فیزیک آتش‌سوزی و کمیت‌های مربوط به آن هم چون، توزیع دما و دود به‌دست آورده‌اند. با پیشرفت قدرت محاسباتی در سال‌های اخیر، روش‌های عددی نیز پرکاربرد شده‌اند و تحقیقات فراوانی مرتبط با شبیه‌سازی در ادبیات فنی به‌چشم می‌خورد.

هو و همکاران [۳]، در مطالعه عددی که به کمک مدل شبیه‌سازی دینامیکی آتش انجام شده‌است، یک تونل با ابعاد ۶۰۰ متر در طول، ۱۰ متر در عرض و ۷ متر در ارتفاع همراه با آتش استخری در مرکز تونل به میزان ۴ مگاوات را شبیه‌سازی کردند. اندازه‌گیری‌های غلظت مونوکسیدکربن و دما برای فواصل ۲۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ متری از منبع آتش، از سقف تا کف تونل گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با نزدیک‌تر شدن به انتهای تونل، اختلاف پروفیل عمودی دو کمیت مزبور بصورت بی‌بعد، افزایش می‌یابد. به عبارتی در نزدیکی آتش، دو پروفیل عمودی به یکدیگر نزدیکتر می‌باشند و با دور شدن از منبع آتش و افزایش میزان انتقال حرارت از دوده به سقف، دو نوع پروفیل از یکدیگر فاصله می‌گیرند (انتقال جرم و ذرات از دیواره سقف امکان‌پذیر نمی‌باشد و غلظت مونوکسیدکربن تنها از طریق ورود هوای تازه از زیر دوده کاهش می‌یابد، ولی دما هم از طریق انتقال حرارت با دیواره سقف و هم از طریق ورود هوای تازه از زیر دوده کاهش می‌یابد). با افزایش سرعت تهویه طولی نیز، این اختلاف کاسته شده، دو نوع پروفیل به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. همچنین نشان داده شد که در یک مکان ثابت از سقف تا کف، غلظت مونوکسیدکربن سریعتر از دما کاهش می‌یابد. این محققان با همین شبیه‌سازی عددی و نیز یک سری مطالعات تجربی، اندازه‌گیری را برای پروفیل‌های طولی دما و غلظت مونوکسیدکربن نیز تکرار کرده‌اند [۴]. در این پژوهش، کاهش غلظت مونوکسیدکربن و نیز اختلاف آن با کاهش دما در سرعت‌های تهویه گوناگون، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج، نشان داده شد که کاهش طولی غلظت مونوکسیدکربن در سقف بصورت  $C_x/C_0 = 1/1 + bx$  بوده، اختلاف آن با دما بصورت  $C_x/C_0 - \Delta T_x/\Delta T_0 \approx \lambda(1 - e^{-kx})$  است که در آن  $\lambda$ ،  $b$  و  $k$  ضرایب ثابت مربوط به مشخصات تونل و  $C_0$

بدون پرده بصورت هارمونیک [۳]، در طول تونل کاهش می‌یابد؛ ولی در زمان حضور پرده هوا، دو منطقه با دمای بالا و منطقه با دمای پایین (منطقه امن) مشهود است. همچنین حضور پرده هوا باعث شده تا ماکزیمم دمای حالت بدون پرده نیز کاسته شود. با افزایش سرعت پرده هوا، ماکزیمم مقدار دما و غلظت مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد. فلیس و همکاران [۶]، در یک کار آزمایشگاهی با استفاده از دو جت هوا که در بین آن‌ها منبع حرارتی ۱.۵ کیلوواتی گذاشته شده، دما و سرعت نقاط مختلف را بررسی کردند. مهم‌ترین عامل در عدم نفوذ گرما در پرده هوا، منحرف نشدن پرده است. به عبارتی با زاویه‌دار شدن پرده هوا نسبت به موقعیت عمودی، میزان انتقال حرارت از پرده افزایش می‌یابد.

در جدیدترین کار آزمایشگاهی یانگ و همکاران [۷] به کمک یک تونل در ابعاد مقیاس شده توانستند، رابطه بین توزیع دما و غلظت مونوکسیدکربن را بررسی نمایند که نقش مهمی در تامین امنیت افراد در مواقع آتش سوزی دارد. در این تحقیق، بیان شده که با افزایش سرعت طولی در کانال میزان اتلاف حرارتی به بیرون کاهش می‌یابد که این میزان حرارت، رابطه اصلی بین توزیع دما و مونوکسیدکربن است. ذرات مونوکسیدکربن، مرزی برای عبور به بیرون از تونل نداشته، در حالی که گرما به راحتی از مرز دیوار عبور نموده، باعث کاهش دما می‌شود. حال یکسان بودن پروفیل عمودی دما و غلظت مونوکسیدکربن، نشان از این دارد که مکانیزم هردوی انتقال حرارت و انتقال ذرات یکسان است و افزایش سرعت طولی یا دور شدن از آتش، باعث کاهش میزان انتقال حرارت به بیرون می‌شود. در کار مشابه دیگری نیز، ایشان [۸] در یک تونل با ابعاد مقیاس شده به مطالعه و بررسی تغییرات عمودی و افقی غلظت مونوکسیدکربن و دما پرداختند. نتایج، نشان داده است که مقدار دما بصورت افقی خیلی سریع‌تر از غلظت مونوکسید کربن کاهش یافته، حتی در اغلب موارد میزان مونوکسیدکربن موجود در هوا در طول تونل مقداری ثابت بوده است. با افزایش سرعت تهویه از نرخ کاهش دما کاسته شده، میزان انتقال حرارت به بیرون کاهش می‌یابد. این افزایش سرعت، تاثیر اندکی روی میزان غلظت مونوکسیدکربن داشته است. با کاهش ارتفاع در یک مکان ثابت، میزان مونوکسیدکربن کندتر از دما کاهش یافته و با افزایش سرعت تهویه طولی، پروفیل عمودی هردو به یکدیگر

$\Delta T_0$  و  $\Delta T_x$ ،  $C_x$ ، به ترتیب، غلظت مونوکسیدکربن در موقعیت مبنا، غلظت مونوکسیدکربن در فاصله  $x$  از آتش، اختلاف دمای دوده و هوای بیرون در فاصله  $x$  از آتش و اختلاف دمای دوده و هوای بیرون در موقعیت مبنا می‌باشند؛ سپس تغییرات سرعت تهویه طولی و نرخ رهايش حرارتی، منبع آتش را روی پارامترهای هر دو معادله بررسی کردند.

امروزه روش‌های مختلفی برای کنترل هوای مطبوع اماکن، سالن‌ها، مسیرهای زیرزمینی و تونل‌های جاده‌ای اتخاذ می‌شود که این روش‌ها، عمدتاً توسط محققان بهینه‌سازی و به لحاظ عملکرد ارزیابی می‌شوند. یکی از این روش‌ها، استفاده از پرده هوا است. پرده هوا، روشی است که با نصب سیستم دمنده مربوطه در بالای سردرب ورودی منازل، اماکن بسته و محیط‌های اداری و تجاری، با ایجاد یک هوای فشرده قابل کنترل (بصورت عمودی از بالا به سمت پایین)، مزیت‌هایی را بوجود می‌آورد:

- جلوگیری از تبادل حرارت و صرفه جویی در مصرف انرژی.
  - حفظ هوای تمیز داخل، جلوگیری از ورود هوای آلوده، دود، گرد و خاک از بیرون به فضاهای داخلی.
  - جلوگیری از ورود حشرات از محل درب ورودی و ...
- در این مطالعه قصد داریم تا به کمک این روش، از انتشار دوده و مونوکسیدکربن در مواقع آتش‌سوزی درون تونل‌ها و مسیرهای زیرزمینی جلوگیری کنیم. استفاده از این روش، می‌تواند منطقه‌ای امن و بدون خطر جهت فرار مسافران درون تونل برای مدت معینی ایجاد کند، اما از طرفی باعث انباشته شدن گازهای سمی در منطقه محبوس شده در طرف دیگر پرده هوا می‌شود.

هو و همکارانش [۵]، با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی در ابعاد مقیاسی به همراه یک مدل عددی توانستند، حضور پرده هوا را جهت ایجاد یک منطقه امن بررسی نمایند. این پرده هوا در یک طرف آتش قرار می‌گیرد که باعث کاهش غلظت مونوکسیدکربن و نیز دمای ناشی از آتش در منطقه امن می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، بعد از پرده هوا غلظت و دما به یک‌باره کاهش یافته، بعد از آن غلظت مونوکسیدکربن و دما به ترتیب، بصورت هارمونیک و نمایی کاسته می‌شوند. ایشان ابتدا در این تونل برای ۳ سرعت مختلف پرده هوا و نیز در حالت خاموشی فن پرده هوا (بطور کلی ۴ حالت مختلف)، آزمایش را برای آتش ۲ کیلو وات انجام دادند. دما در حالت

با افزایش میزان نرخ رهایش به مقادیر بیشتر از نرخ رهایش بحرانی، تأثیری روی سرعت بحرانی نخواهد داشت. در این مطالعه، از پرده هوا برای ایجاد مسیر ایمن جهت فرار مسافران استفاده می‌نماییم. استفاده از یک پرده هوا برای مدل‌های مختلف در مطالعات پیشین محققان بررسی شده، اما جهت کارآمد بودن آن برای تونل مورد مطالعه حاضر نیز، نتایج عددی تحلیل می‌شود. استفاده از دو پرده هوا که ایده اصلی مطالعه کنونی است، جهت مقایسه با یک پرده هوا ارائه می‌شود. استفاده از دو پرده، باعث محبوس شدن هرچه بیشتر دوده و دمای بالا شده، زمان و مسیر امن بیشتری برای فرار مسافران فراهم می‌کند. بدین ترتیب، دو حالت کلی تعریف می‌شود. در حالت اول، از یک پرده هوا در دو فاصله متفاوت و سه سرعت تهویه ۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه استفاده شده، در حالت دوم از دو پرده هوا در طرفین منبع آتش استفاده می‌نماییم. بدین ترتیب در دو حالت مسئله را برای ۶۰۰ ثانیه شبیه سازی کرده، توزیع پروفیل طولی دما و مونوکسیدکربن در زیر سقف را گزارش می‌نماییم.

## ۲- معرفی نرم‌افزار، معادلات حاکم و شرایط مرزی

نرم افزار *FDS*، یک کد دینامیک سیالات محاسباتی بوده که برای شبیه‌سازی جریان ناشی از آتش‌سوزی در تونل بکار می‌رود. این نرم‌افزار، معادله معروف ناویر-استوکس را که بر اساس مدل شبیه‌ساز گردابه‌ای بزرگ (*LES*) تعبیه شده، بصورت عددی حل می‌کند و برای جریان‌های ناشی از گرمای شدید و نیز جریان‌های با سرعت پایین با تأکید بر انتقال حرارت و دوده مناسب است [۱۷-۱۴]. این نرم‌افزار متن‌باز توسط شرکت *NIST* در کشور ایالات متحده آمریکا تهیه شده که پس از حل سناریوی درخواستی، برای مشاهده نتایج می‌بایست از نرم‌افزار *Smokeview* نیز استفاده کرد. تولید هندسه، شبکه‌بندی، اعمال شرایط مرزی و نیز حل جریان بر عهده *FDS* بوده، پردازش نهایی داده‌ها به کمک *Smokeview* انجام می‌گیرد.

در باب مسئله احتراق فرض می‌شود که ماده سوختی به آب و دی‌اکسیدکربن و مونوکسیدکربن تبدیل شده که از میان واکنش‌های فراوان دیگر، تنها اکسیدشدن *CO* را مدنظر قرار می‌دهیم [۱۳]:

نزدیکتر می‌شوند. اندازه‌گیری‌ها در این تونل، زمانی انجام می‌گرفت که میزان دما و غلظت مونوکسیدکربن به یک حالت دائم رسیده باشند.

سجودی و همکاران [۹]، با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه ای بزرگ توانستند، توزیع دما و غلظت مونوکسید کربن را بصورت افقی در طول یک تونل به طول ۶۰۰ متر را مدل‌سازی نمایند. همچنین ایشان به کمک یک روش تحلیلی نوین میزان توزیع غلظت مونوکسیدکربن را به کمک پارامترهای آتش و تونل توانستند، توزیع افقی غلظت و دما را پیش‌بینی نمایند که همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی و عددی دارد. در این بررسی، تأثیر نرخ رهایش حرارتی، نسبت ظرافت تونل و نیز شیب تونل روی توزیع افقی دما و غلظت مونوکسید کربن بررسی شد. ایشان همچنین [۱۰] در یک کار عددی مشابهی، تأثیر حضور یک مانع در مسیر جریان هوا روی توزیع دما و غلظت مونوکسید کربن را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش ابعاد مانعی که آتش روی آن قرار گرفته است، وضعیت دمایی بحرانی‌تر می‌شود؛ ولی بدلیل افزایش نفوذ هوا به پلوم دود در پشت مانع، غلظت مونوکسیدکربن کاهش بیشتری خواهد داشت.

در سال‌های اخیر، مطالعاتی در زمینه تهویه اضطراری در تونل‌های در حال آتش‌سوزی در مجلات داخلی به چاپ رسیده [۱۱-۱۲] که گویای شروع همه جانبه این گونه بررسی‌ها در کشور است. بررسی‌های مذکور غالباً روی سرعت بحرانی (حداقل سرعت تهویه اضطراری که از برگشت دود به سمت بالادست آتش جلوگیری نماید) انجام گرفته و پارامترهای هندسی از قبیل، تأثیر شیب تونل و میزان انسداد تونل روی میزان سرعت بحرانی مطالعه شده است و نشان داده شده است که با افزایش میزان انسداد تونل و نیز زاویه مثبت شیب تونل، سرعت بحرانی کاهش پیدا می‌کند [۱۱]. کاظمی‌پور و همکاران [۱۲]، تأثیر پارامترهای بیشتری از جمله میزان نرخ رهایش آتش، محل عرضی منبع آتش و رطوبت نسبی هوای تهویه را روی میزان سرعت بحرانی بررسی کردند. مطالعات عددی ایشان نشان داد که با نزدیک شدن منبع آتش به دیواره‌های تونل، سرعت بحرانی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان نرخ رهایش منبع آتش تا یک مقدار بحرانی، میزان سرعت بحرانی افزایش می‌یابد که

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (۸)$$

رابطه ۸، شکل کلی معادله بقای جرم است که برای جریان-های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر قابل استفاده است. معادله گذرای ناویر-استوکس برای جریان تراکم‌پذیر و بدون حضور نیروهای خارجی بصورت رابطه (۹) نوشته می‌شود [۱۷-۱۴]:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \rho g_i = \nabla \cdot \bar{\tau}_{ij.SGS} \quad (۹)$$

که در آن  $\rho$ ،  $u$ ،  $p$ ،  $g$  و به ترتیب، فشار، سرعت، چگالی و شتاب گرانشی زمین می‌باشند. علامت بار نشان از عبور هردوی این معادلات از فیلتر  $LES$  است. لازم به ذکر است که مدل  $LES$ ، در حالت کلی کمیت  $\varphi$  را به دو قسمت مقدار متوسط (مقدار شبکه اصلی)  $\bar{\varphi}$  و نیز مقدار نوسانی  $\hat{\varphi}$  (مقدار شبکه فرعی) تجزیه می‌کند که پس از اعمال این فیلتر به معادلات پیوستگی و مومنتوم به فرم معادلات ۸، ۹ و ۱۰ تبدیل می‌شوند. معادله انرژی بصورت رابطه (۱۰) است [۱۷]:

$$\frac{\partial \rho \bar{h}_e}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{h}_e)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{ijk}}{\text{Pr}} \frac{\partial \bar{h}_e}{\partial x_j} \right) \quad (۱۰)$$

$$= \dot{q} - \nabla \cdot q$$

$\dot{q}$  میزان نرخ رهایش در واحد حجم بوده،  $-\nabla \cdot q$  شار حرارتی تشعشی است. مقادیر مربوط به شبکه‌های فرعی توسط مدل اسماگورینسکی محاسبه می‌شود. تانسورهای تنش رینولدزی  $SGS$ ،  $\bar{\tau}_{ij.SGS}$ ، با توجه به رابطه ۱۱ به کرنش‌های بزرگ مقیاس (با به عبارتی گردابه‌های بزرگتر) مرتبط می‌شود:

$$\bar{\tau}_{ij.SGS} = 2\mu_{ijk} \bar{S}_{ij} \quad (۱۱)$$

که در آن

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (۱۲)$$

$$\mu_{ijk} = \rho_{ijk} (C_s \Delta)^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (۱۳)$$

$C_s$  ضریب تجربی اسماگورینسکی بوده،  $\Delta$  که همان فیلتر  $LES$  محسوب می‌شود، برابر  $(\delta x \delta y \delta z)^{1/3}$  است.  $K_{ijk}$  ضریب انتقال حرارت هدایتی،  $D_{ijk}$  ضریب نفوذ دوده در هوا بوده که با لزجت بصورت رابطه (۱۴) می‌باشند [۱۶]:

$$K_{ijk} = \frac{c_p \mu_{ijk}}{\text{Pr}} \quad (\rho D)_{ijk} = \frac{\mu_{ijk}}{Sc} \quad (۱۴)$$

$$1kg - C_x H_y + v_1^* kg - O_2 \rightarrow (28/12) f_c kg - CO + (18/2)(1-f_c) kg - H_2O \quad (۱)$$

$$1kg - CO + v_2 kg - O_2 \rightarrow (1+v_2) kg - CO_2 \quad (۲)$$

که ضرایب استوکیومتری بصورت رابطه (۳) می‌باشند:

$$v_1^* = v_1 - \frac{28}{12} f_c v_2, \quad v_1 = \frac{32}{12} f_c + \frac{16}{2} (1-f_c), \quad v_2 = \frac{16}{28} \quad (۳)$$

با استفاده از مفهوم  $EBU$  [۱۳]، میزان سرعت واکنش احتراق محاسبه شده که در محاسبه غلظت مونوکسیدکربن تولیدی بسیار موثر است. نرخ مصرف سوخت و تولید مونوکسیدکربن در این روش، بصورت رابطه (۴-۵) محاسبه می‌شود:

$$\dot{\omega}_{C_x H_y} = \frac{d(\rho Y_{C_x H_y})}{dt} = -\rho \tau_{mix} \min(Y_{C_x H_y}, \frac{Y_{O_2}}{v_1^*}) \quad (۴)$$

$$\dot{\omega}_{CO} = \frac{d(\rho Y_{CO})}{dt} = -\rho \tau_{mix} \min(Y_{CO}, \frac{Y_{O_2}}{v_2}) \quad (۵)$$

مقیاس زمانی بکار برده شده در روابط (۴-۵) از طریق رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$\tau_{mix} \approx C_{EBU} \frac{\varepsilon}{k_t} \quad (۶)$$

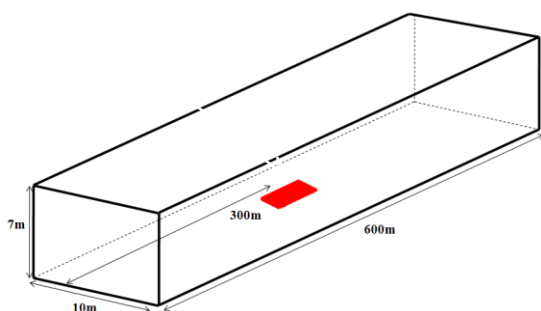
که در آن  $C_{EBU}$  دارای مقدار ۰/۴ است. انرژی جنبشی آشفتگی و نیز نرخ اتلاف آن بصورت رابطه (۷) هستند:

$$k_t = \left( \frac{\mu_{ijk}}{C_\mu \rho \Delta} \right)^2 \quad \varepsilon = C_\varepsilon \frac{k_t^{3/2}}{\Delta} \quad (۷)$$

روش به کار رفته در این پروژه، حجم محدود است که در قالب نرم افزار  $FDS$  از آن استفاده شده است. در این روش با تبدیل معادله بقای جرم، بقای مومنتوم و بقای انرژی که سه معادله اساسی حاکم بر جریان سیال در مکانیک سیالات اند، به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی بصورت رابطه (۸) نوشته می‌شود [۱۶-۱۴]:

### ۳- مستندسازی حل

در سال ۲۰۱۰ آقای هو و همکاران [۴]، در مطالعه عددی و آزمایشگاهی، با قرار دادن آتش در قدرت نرخ رهایش‌های گوناگون در مرکز تونلی با مقطع مستطیلی به طول ۶۰۰ متر، عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۷ متر بررسی نمودند. ایشان با بکار بردن ۳ نرخ رهایش حرارتی متفاوت توانستند، توزیع افقی مونوکسیدکربن و نیز اختلاف آن با دما را در طول تونل و در زیر سقف ردیابی کنند. این مطالعه بارها مورد استفاده محققان واقع شده، به همین دلیل در بررسی حاضر نیز، این مدل تعریف شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱، نمایه-ای ۳ بعدی از تونل و نیز محل قرارگیری آتش را نشان می‌دهد. این هندسه در کد مربوطه رسم و شبکه بندی گردید. شرایط مرزی بکاربرده شده توسط ایشان [۴]، همانند شرایط مرزی ذکر شده در قسمت قبل است.



شکل ۱- ابعاد تونل و محل قرارگیری آتش

### ۴- بررسی استقلال حل از شبکه

اصولاً نتایج حاصل از هر حل عددی، می‌بایست نسبت به تعداد سلول انتخابی در مدل مستقل باشد؛ اما از طرفی با ریز نمودن اندازه سلول‌ها، حجم محاسباتی افزایش می‌یابد. از آنجائی‌که مدل شبیه ساز گردابه‌ای بزرگ نیز شدیداً به اندازه سلول برای انجام عمل گذردهی از فیلتر وابسته است، بنابراین ناحیه حل به دو قسمت تقسیم می‌شود. ناحیه‌ی نزدیک آتش شامل، ۱۰ متر پایین دست و ۱۰ متر بالادست آن است و ناحیه دوردست آتش نیز، مابقی مناطق را دربر می‌گیرد. در ناحیه نزدیک آتش، اندازه سلول‌ها به دلیل داشتن گرادیان‌های شدید حرارتی و جرمی بسیار ریزتر بوده، سایر مناطق نیز بدلیل عدم حضور گرادیان‌های شدید حرارتی و

برای جلوگیری از محاسبه نرخ مصرف یا تولید تک‌تک گونه‌ها و حل معادله پایستگی جرم برای هر یک از آن‌ها، از مدل کسر مخلوط استفاده شده است [۱۴-۱۷]. کسر مخلوط ( $Z$ )، نشان‌دهنده کسر جرمی تمامی گونه‌هایی است که از سوخت منشأ می‌گیرند (گونه‌های حاوی اتم کربن) و به صورت رابطه ۱۵ تعریف می‌شود:

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{XW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{XW_{CO}} Y_{CO} \quad (15)$$

$\alpha$  تعداد اتم کربن در فرمول سوخت است. کسر مخلوط، یک کمیت پایسته است. با استفاده از این تعریف و جمع کردن معادلات پایستگی جرم تمام گونه‌های حاضر در دامنه حل که از سوخت منشأ می‌گیرند، معادله حاکم برای کمیت پایسته کسر مخلوط، به صورت رابطه ۱۶ (پس از اعمال فیلتر) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho Z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i Z)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho Z (\bar{u}_i - u'_i)] \quad (16)$$

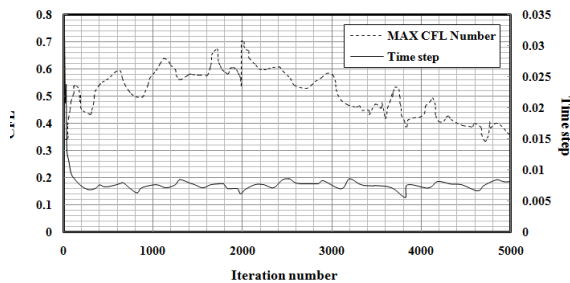
آخرین جمله در سمت راست معادله فوق با استفاده از پخش گرادیانی و در نظر گرفتن عدد اشمیت برابر با ۰/۵ محاسبه می‌شود [۱۶]. از حل معادله ۱۶، مقادیر کسر مخلوط در دامنه حل به دست می‌آیند.

در بحث شرایط مرزی می‌بایست، شرط مرزی مربوط به دیوارهای تونل، ورودی و خروجی تونل و نیز محل آتش کاملاً مشخص شود. پرده هوا با تعریف شرط مرزی ورودی جریان سیال با سرعت و زاویه مشخص معین می‌شود. دیوارهای تونل از جنس بتن در نظر گرفته شده‌اند که براساس تعریف پیش فرض کد، آن را شرط مرزی از نوع همرفتی در نظر گرفته، هوای طرف دیگر دیوار ۲۵ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود (ضخامت دیوار ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است). ورودی و خروجی بدون سرعت اولیه بوده، بصورت باز فرض می‌شوند. جنس ماده سوختی پروپان بوده و روی کف تونل و در مرکز آن در یک مساحت محدود طوری تعریف می‌شود که انرژی حاصل از سوختن آن معادل ۱۰ مگاوات شود.

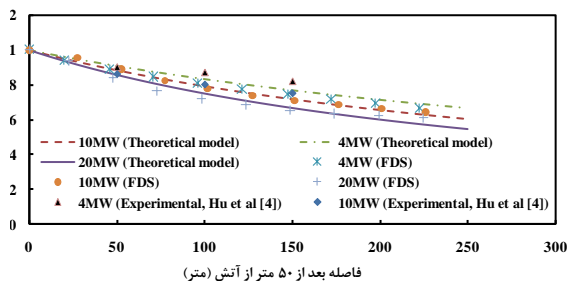
حالت ۳ استفاده می‌شود. برای اطمینان بیشتر جهت همگرایی نتایج، نمودار کورانت فیریدریش لویی رسم می‌شود. معمولاً در محاسبات عددی، میزان این عدد کنترل می‌شود تا از مقدار ۱ متجاوز نگردد. این کد در هر گام زمانی نامعادله (۱۹) را بررسی می‌کند:

$$\delta t. \max \left( \frac{|u_{ijk}|}{\delta x}, \frac{|v_{ijk}|}{\delta y}, \frac{|w_{ijk}|}{\delta z} \right) < 1 \quad (19)$$

که در صورت درخواست کاربر و در صورت نادرست بودن نامعادله ۱۹، خطا در محاسبات را اعلام می‌نماید. شکل ۳، گام زمانی و نیز مقدار عددی کورانت را در مدت ۶۰۰ ثانیه از زمان شروع آتش سوزی نشان می‌دهد. برای اطمینان از نتایج بدست آمده، سناریوی یکسانی با کار هو و همکارانش [۴]، تعریف و در کد مدل‌سازی گردید. شکل ۴، نشان‌دهنده غلظت مونوکسیدکربن بی بعد شده بر اساس غلظت مونوکسیدکربن ۵۰ متر پایین دست آتش (نرخ رهایش ۴ تا ۲۰ مگاوات و بدون حضور تهویه طولی) است (مقادیر مربوطه در نزدیکی سقف اندازه‌گیری شده است). در این نمودار، نتایج آزمایشگاهی [۴] برای آتش ۴ و ۱۰ مگاوات و نیز نتایج تحلیلی [۴] برای آتش ۴، ۱۰ و ۲۰ مگاواتی با نتایج عددی حاضر مقایسه گردید.



شکل ۳ - نمودار کورانت و گام زمانی برای حل ۶۰۰ ثانیه‌ای



شکل ۴ - مقایسه نتایج عددی کار حاضر با نتایج تجربی و تحلیلی هو همکاران [۴]

جرمی، دارای سلول‌های درشت‌تری می‌باشند. در مراجع علمی روابط بسیار مفیدی برای انتخاب اندازه سلول برای هر دو منطقه پیشنهاد شده است. یکی از مهم‌ترین روابط، عدد بی‌بعد سلولی است [۱۷]:

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_a c_p T_a \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (17)$$

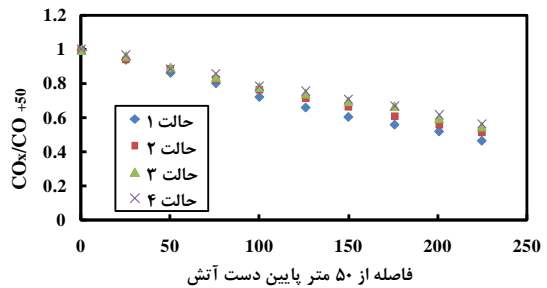
که در آن، صورت کسر مبین نرخ رهایش بر اساس کیلووات است. عبارت بالا میزان اندازه سلول بی‌بعدی را نشان می‌دهد که می‌بایست در نامعادله ۱۸ صدق کند:

$$4 < \left( c_f \frac{D^*}{\delta x} \right) < 16 \quad (18)$$

$c_f$  مقدار ثابت ۰/۶ بوده،  $\delta x$  اندازه سلول انتخابی است. همواره توصیه می‌شود که این نامعادله در کد رعایت شود. در جدول (۱) خلاصه اندازه سلول‌های انتخابی مشاهده می‌شود:

جدول ۱- تعداد سلول‌های انتخابی برای انجام محاسبات مربوط به استقلال حل از شبکه

شماره حالت	اندازه سلول در مناطق دور از آتش (میلی‌متر)	اندازه سلول در مناطق نزدیک آتش (میلی‌متر)
۱	۸۰	۴۰
۲	۶۰	۳۰
۳	۴۰	۲۰
۴	۲۰	۱۰

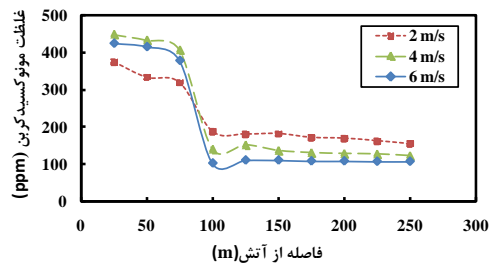


شکل ۲ - بررسی استقلال حل از تعداد شبکه انتخابی برای غلظت مونوکسیدکربن توزیع شده در زیر سقف

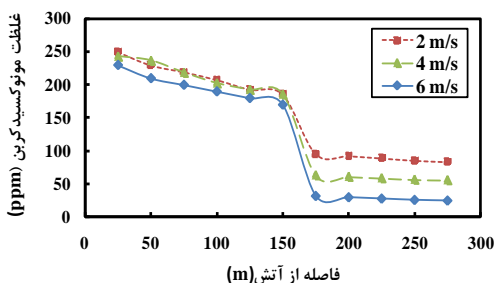
شکل ۲، غلظت مونوکسیدکربن برای همین سناریو (آتش ۱۰ مگاوات و بدون حضور تهویه طولی) نشان داده شده است. غلظت مونوکسیدکربن بر اساس غلظت مونوکسیدکربن در ۵۰ متر پایین دست آتش بی‌بعد شده است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، نتایج مربوط به دو حالت ۳ و ۴ در نزدیکی هم می‌باشند. به دلیل کاهش هزینه محاسباتی، از

## ۵- نتایج

بسیار بالایی بوده، ولی میزان غلظت در منطقه امن مقدار کمتری به خود اختصاص داده است. با افزایش میزان سرعت خروجی هوا از پرده، مقدار غلظت مونوکسیدکربن در منطقه امن کاهش می‌یابد. در سرعت خروجی ۲ و ۴ متر بر ثانیه، غلظت مونوکسیدکربن همچنان در منطقه امن کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که در سرعت خروجی ۶ متر بر ثانیه، غلظت مونوکسیدکربن تا حدودی ثابت باقی می‌ماند (شکل ۷). در فاصله دورتر پرده هوا (شکل ۸)، میزان متوسط غلظت مونوکسیدکربن در حد فاصل منبع آتش و پرده هوا کاهش می‌یابد و دلیل عمده آن، ورود حجم بیشتری از هوای تازه به درون دوده تولیدی است. همچنین نرخ کاهش غلظت مونوکسیدکربن در فاصله مذکور برای فاصله دورتر پرده هوا، بیشتر است. در منطقه امن، تقریباً غلظت مونوکسیدکربن برای سرعت‌های مختلف خروجی پرده هوا، ثابت می‌ماند. همچنین با مقایسه دو شکل ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که بیشینه غلظت مونوکسیدکربن که در نزدیکی محل آتش است، برای پرده هوا با فاصله دورتر، کمتر است، دلیل این امر، بیشتر بودن حجم هوای نفوذی به درون پلوم دوده در حد فاصله منبع آتش و پرده هوا است.

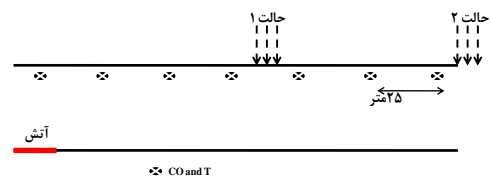


شکل ۷- توزیع غلظت مونوکسیدکربن برای تک پرده (پرده نزدیک به آتش)

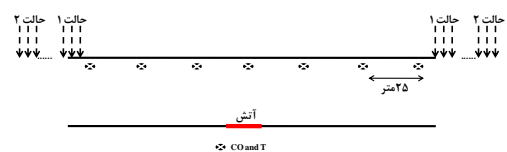


شکل ۸- توزیع غلظت مونوکسیدکربن برای تک پرده (پرده دور از آتش)

یکی از کاربردی‌ترین و پرمصرف‌ترین روش‌های تهویه هوای اماکن سرپسته، استفاده از پرده هوا است. بدین ترتیب که با ملاحظه کردن یک جریان جرمی از هوا با دبی مشخص بصورت عمودی از سقف به سمت کف، مانع از ورود هوای گرم یا سرد، دوده، حشرات و ... به یک مکان می‌شوند. در این مطالعه نیز، از پرده هوا برای ایجاد محیط امن جهت فرار مسافران در مواقع آتش‌سوزی در مسیراها و تونل‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. بدین ترتیب، دو حالت کلی تعریف می‌شود: در حالت اول، از یک پرده هوا در دو فاصله متفاوت و سه سرعت تهویه ۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه استفاده می‌کنیم. در حالت دوم، از دو پرده هوا در دو طرف منبع آتش استفاده می‌شود. طرحواره دو حالت و نیز محل اندازه‌گیری کمیت‌های مورد نظر در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. بدین ترتیب در دو حالت مسئله را برای ۶۰۰ ثانیه شبیه‌سازی نموده، توزیع پروفیل طولی دما و غلظت مونوکسیدکربن را رسم می‌نماییم. پرده هوا در کل عرض تونل و با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر گنجانده شده است.



شکل ۵- طرحواره حالت اول برای استفاده از یک پرده هوا

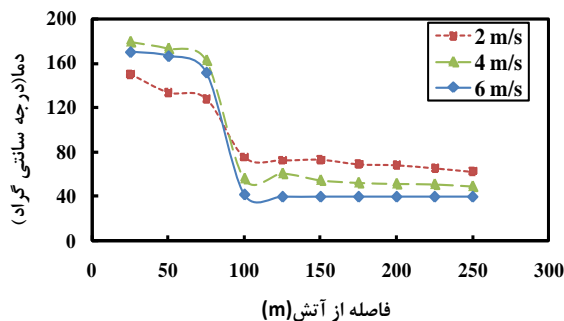


شکل ۶- طرحواره حالت اول برای استفاده از دو پرده هوا

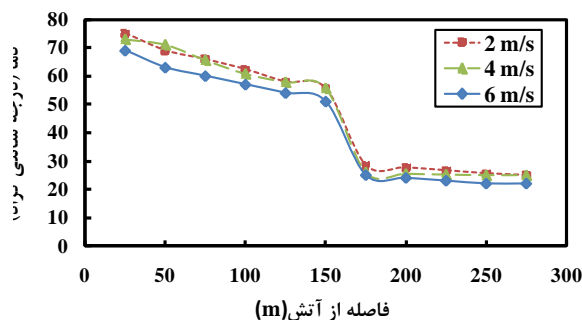
توزیع افقی غلظت مونوکسیدکربن برای قبل و بعد از پرده هوا در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، پرده هوا برای دو حالت نزدیک و دور از منبع آتش و نیز برای ۳ سرعت خروجی متفاوت در نظر گرفته شده است. ملاحظه می‌شود که غلظت مونوکسیدکربن در مکانی که پرده هوا حضور دارد، به یکباره افت می‌نماید. با حضور پرده هوا، غلظت مونوکسیدکربن در حد فاصل منبع آتش و پرده، میزان



است؛ ولی در این حالت، کل مسیر حرکت دوده مسدود گردیده است. ملاحظه می‌شود که غلظت مونوکسیدکربن بیشینه، در حد فاصل بین دو پرده هوا، کمتر از زمانی است که یک پرده هوا در نزدیکی آتش مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی برای مقایسه ۲ حالت در زمانی که پرده هوا دورتر قرار می‌گیرد (مقایسه ۱ پرده هوا و ۲ پرده هوا در فاصله دورتر نسبت به منبع آتش)، تفاوت چندانی به وجود نمی‌آید. همچنین در استفاده از دو پرده هوا نیز ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت خروجی پرده هوا، میزان متوسط غلظت مونوکسیدکربن در منطقه امن افزایش می‌یابد. حسن عمده استفاده از دو پرده هوا، ایجاد مسیر فرار بیشتر برای مسافران و نیز کاهش احتمال قرارگیری مسافران در منطقه خطر است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، توزیع دما در تونل برای حالتی نشان داده شده است که از دو پرده هوا استفاده می‌کنیم. با مقایسه دو حالت، ۱ و ۲ پرده هوا، ملاحظه می‌شود، تغییرات دما وابستگی چندانی به تعداد پرده هوا ندارد؛ بنابراین استفاده از ۲ پرده هوا برای کاهش دما و نیز ایجاد مسیر امن، مناسب به نظر می‌رسد.



شکل ۹- توزیع دما برای تک پرده (پرده نزدیک به آتش)



شکل ۱۰- توزیع دما برای تک پرده (پرده دور از آتش)

در شکل‌های ۹ و ۱۰ توزیع افقی دما در زیر سقف نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود در محل حضور پرده هوا، دما به یکباره کاهش می‌یابد. با افزایش میزان سرعت خروجی هوا از پرده، دما در منطقه امن کاهش یافته، اما با دورتر نمودن فاصله پرده هوا از منبع آتش، دمای در منطقه امن به دمای محیط بیرون رسیده، افزایش سرعت خروجی پرده هوا تاثیر چندانی در کاهش دما در منطقه امن ندارد. همچنین نرخ کاهش دما در حد فاصل منبع آتش و پرده هوا برای فاصله دورتر پرده، بیشتر است. با مقایسه کلی دو حالت قرارگیری پرده هوا می‌توان اظهار داشت که فاصله دورتر پرده هوا، توانایی کاهش دما به محدوده دمای مجاز (کمتر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد) را داراست و میزان غلظت مونوکسیدکربن را تا زیر حد مجاز (۷۰ ppm) تقلیل می‌دهد؛ اما باید دقت داشت که فاصله بیشتر پرده هوا به منزله کاهش طول مسیر فرار مسافران محسوب می‌شود و این مسئله چندان خوش-آیند نمی‌باشد. به همین دلیل، استفاده از دو پرده هوا در ادامه کار بررسی می‌شود. تعیین مکان دقیق آتش امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا مکان‌های متعددی در طول تونل جهت ایجاد پرده هوا می‌توان تعبیه کرد تا در صورت بروز حادثه بتوان از آن‌ها بصورت کنترل شده استفاده کرد (بررسی و تعیین مکان‌های بهینه برای شرایط اضطراری می‌تواند به عنوان موضوع جدیدی مورد بررسی قرار بگیرد). در تونل‌های پیشرفته دنیا، سیستم‌های تهویه اضطراری همواره توسط سیستم‌های کنترلی پیشرفته تحت کنترل قرار می‌گیرند و در مواقع بروز حادثه، میزان اختلاف فشار جت‌فن‌ها را تنظیم می‌نمایند (با تغییر دور و گام پره‌های فن). به همین ترتیب، می‌توان پرده هوا را به چنین سیستمی تجهیز کرد و در مواقع حادثه بر حسب شرایط دما و غلظت آلاینده‌ها، پرده هوایی به کمک سیستم کنترلی تشکیل داد.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، توزیع غلظت مونوکسیدکربن در تونل برای حالتی که از دو پرده هوا استفاده می‌کنیم، نشان داده شده است. مشابه حالت قبل، در نزدیکی پرده هوا غلظت مونوکسیدکربن به یکباره کاهش می‌یابد. نتایج مربوط به حالت‌هایی که پرده‌های هوا دور و یا نزدیک به منبع آتش است، مشابه نتایج استفاده از ۱ پرده هوا است. باید توجه داشت که در حالت قبل (یک پرده هوا) مسیر حرکت دوده مسدود نبوده، از سمت دیگر به طرف انتهای تونل در حرکت

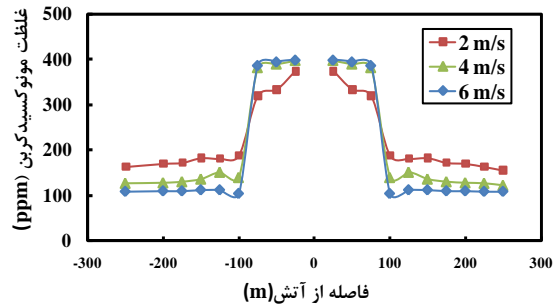
لازم به ذکر است که تاثیر افزایش سرعت خروجی پرده هوا در مطالعه کنونی بررسی گردید و تاثیر ضخامت آن در بررسی‌های آینده لحاظ می‌شود، هرچند می‌توان تخمین نمود که افزایش ضخامت پرده هوا ممکن است، رفتار مشابه با آنچه در افزایش سرعت خروجی هوا از پرده ملاحظه گردید، داشته باشد؛ بنابراین اگر نتوان ضخامت پرده هوا را برحسب شرایط طراحی اولیه در مواقع اضطراری افزایش داد، می‌توان دبی خروجی هوا را افزایش داد.

### ۶- نتیجه‌گیری

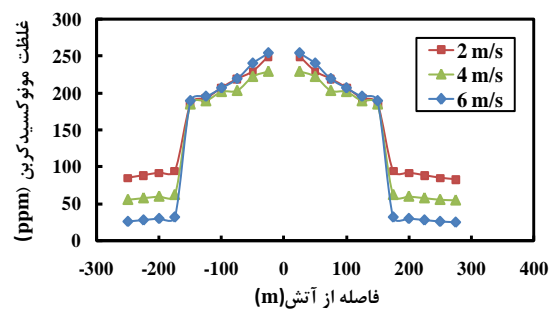
در این مطالعه عددی، به بررسی توزیع مونوکسیدکربن و دما در حضور پرده هوا برای یک تونل بزرگ در حال آتش‌سوزی پرداخته شد. این مطالعه که به کمک کد شبیه‌ساز دینامیکی آتش انجام گرفته، پس از اعتبارسنجی شبیه‌سازی در حالت بدون پرده هوا با نتایج تحلیلی قبلی، پروفیل طولی غلظت مونوکسیدکربن و دما در نزدیکی سقف با حضور یک و دو پرده هوا ارائه گردید. پرده‌های هوا برای دو حالت نزدیک به و دور از منبع آتش در نظر گرفته شدند. با حضور پرده هوا، غلظت مونوکسیدکربن و دما در پشت پرده، میزان بسیار بالایی بوده، ولی میزان غلظت در منطقه امن مقدار کمتری به خود اختصاص داده است. با افزایش میزان سرعت خروجی هوا از پرده، مقدار غلظت مونوکسیدکربن و دما در منطقه امن کاهش می‌یابد. در فاصله دورتر پرده هوا، میزان متوسط غلظت مونوکسیدکربن در پشت پرده هوا کاهش می‌یابد. در مقایسه استفاده از یک و دو پرده هوا می‌توان گفت که با استفاده از دو پرده هوا علاوه بر ایجاد دو مسیر امن برای فرار مسافران، غلظت بیشینه مونوکسیدکربن نیز در این حالت کمتر گزارش می‌شود. در حالت کلی، پرده هوا قابلیت کاهش غلظت مونوکسیدکربن و دما به زیر مقادیر مجاز را دارد و طراح سیستم تهویه اضطراری می‌بایست مکان‌های مناسب جهت نصب پرده هوا را با توجه به نتایج ارائه شده، تنظیم و بهینه نماید.

### ۷- علایم و نشانه‌ها

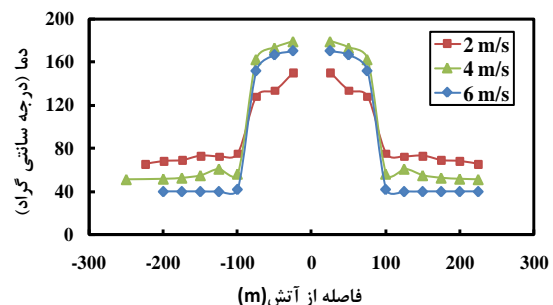
- $C_f$  ثابت اندازه سلولی، -
- $C_s$  ثابت اسماگورینسکی، -



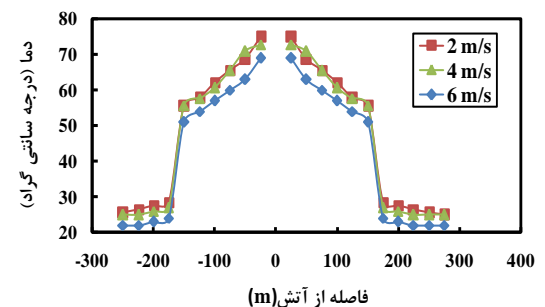
شکل ۱۱- توزیع غلظت مونوکسیدکربن برای دو پرده (پرده‌ها نزدیک به آتش)



شکل ۱۲- توزیع غلظت مونوکسیدکربن برای دو پرده (پرده‌ها دور از آتش)



شکل ۱۳- توزیع دما برای دو پرده (پرده‌ها نزدیک به آتش)



شکل ۱۴- توزیع دما برای دو پرده (پرده‌ها دور از آتش)

ضریب استوکیومتری، -	$v_2$	ضریب ثابت اتلاف انرژی، -	$C_\varepsilon$
Kg/m <sup>3</sup> .S، نرخ زمانی انجام واکنش،	$\dot{\omega}$	ضریب ثابت انرژی آشفته‌گی، -	$C_\mu$
		ضریب ثابت مفهوم EBU، -	$C_{EBU}$
		اندازه بی‌بعد سلولی، -	$D^*$
		ضریب نفوذپذیری، m <sup>2</sup> /s	$D_{ijk}$
		شتاب گرانشی زمین، m/s <sup>2</sup>	$g_i$
		ضریب هدایت حرارتی، W/mK	$K_{ijk}$
		انرژی جنبشی آشفته‌گی، J	$k_t$
		آنتالپی سیال، KJ/Kg	$\bar{h}_e$
		عدد پرانتل، -	Pr
		فشار، Pa	$\bar{P}$
		نرخ رهایش، KW	$\dot{q}$
		میزان حرارت تشعشعی، KW	$\nabla q_r$
		نرخ رهایش آتش، KW	$Q$
		تانسور کرنش، S <sup>-1</sup>	$S_{ij}$
		عدد اشمیت، -	$S_c$
		زمان، s	$t$
		دمای هوای محیط، K	$T_a$
		سرعت سیال، m/s	$\bar{u}_j$
		مولفه محور کارتزین، m	$x_j$
		اندازه ابعاد سلول، m	$\delta x, \delta y, \delta z$
		گام زمانی، s	$\delta t$
		جرم مولکولی مونوکسیدکربن، gr/mol	$W_{CO}$
		جرم مولکولی دی‌اکسیدکربن، gr/mol	$W_{CO_2}$
		جرم مولکولی سوخت، gr/mol	$W_F$
		کسر جرمی اکسیژن، Kg/Kg	$Y_{O_2}$
		کسر جرمی دی‌اکسیدکربن، Kg/Kg	$Y_{CO_2}$
		کسر جرمی هیدروکربن، Kg/Kg	$Y_{CH}$
		کسر جرمی مونوکسیدکربن، Kg/Kg	$Y_{CO}$
		کسر مخلوط، Kg/Kg	$Z$
		چگالی، Kg/m <sup>3</sup>	$\rho$
		تانسورهای تنش رینولدزی، Pa	$\nabla \tau_{ij,SGS}$
		طول مقیاس زمانی اختلاط، S	$\tau_{mix}$
		ویسکوزیته سیال، Pa.s	$\mu_{ijk}$
		پهنای فیلتر، m	$\Delta$
		نرخ اتلاف انرژی آشفته‌گی، J	$\varepsilon$
		ضریب استوکیومتری، -	$v_1$

## ۸- مراجع

- [1] Technical Report – Part 1, Design Fire Scenarios, Rapporteur Alfred Haack, STUVA, Thematic Network FIT ‘Fire in Tunnels’.
- [2] Vuilleumier F, Weatherill A, and Crausaz B (2002) Safety aspects of railway and road tunnel: example of the Lötschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel. Tunn Undergr Sp Tech 17(2): 153-158.
- [3] Hu LH, Yang D, Jiang YQ, Huo R, Liu S (2006) A comparative study on vertical profiles of smoke temperature and carbon monoxide concentration in a tunnel fire. J Appl Fire Sci 16(4): 329-344.
- [4] Hu LH, Tang F, Yang D, Liu S, Huo R (2010) Longitudinal distributions of CO concentration and difference with temperature field in a tunnel fire smoke flow. Int J Heat Mass Tran 53(13): 2844-2855.
- [5] Hu LH, Zhou JW, Huo R, Peng W, Wang HB (2008) Confinement of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation by air curtain in channels. J Hazard Mater 156(1): 327-334.
- [6] Felis F, Pavageau M, Elicer-Cortés JC, Dassonville T (2010) Simultaneous measurements of temperature and velocity fluctuations in a double stream-twin jet air curtain for heat confinement in case of tunnel fire. Int Commun Heat Mass 37(9): 1191-1196.
- [7] Yang D, Huo R, Zhang XL, Zhu S, Zhao XY (2012) Comparative study on carbon monoxide stratification and thermal stratification in a horizontal channel fire. Build Environ 49: 1-8.
- [8] Yang D, Huo R, Zhang XL, Zhao XY (2011) Comparison of the distribution of carbon monoxide concentration and temperature rise in channel fires: reduced-scale experiments. Appl Therm Eng 31(4): 528-36
- [9] Sojoudi A, Afshin H, Farhanieh B (2014) An analysis of carbone monoxide distribution in large tunnel fires. J Mech Sci Technol 28(5): 1917-1925.
- [10] Sojoudi A, Afshin H, Farhanieh B (2013) Numerical evaluation of stationary vehicular blockage ratio on carbon monoxide stratification in large tunnel fires. J Appl Fire Sci 23(4): 435-452.
- [۱۱] رئوفی م، مظاهری ک (۱۳۹۳) بررسی تأثیر شیب و انسداد تونل روی سرعت بحرانی در آتشسوزی بزرگ در تونل بین شهری. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۱۱(۱۴): ۴.

- Standards and Technology, Gaithersburg, MD (<http://firemodels.github.io/fds-smv/>).
- [15] McGrattan KB (2006) Fire Dynamics Simulator (Version 4.07) – Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [16] Kevin M, Bryan K, Simo H (2007) Fire dynamics simulator (Version 5) user's guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication.
- [17] McGrattan K (2013) Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018.
- [۱۲] پورکاظمی ع، پورقاسمی م، افشین ح، فرهانیه ب (۱۳۹۳) مطالعه پارامتریک بر روی سرعت بحرانی در زمان آتش‌سوزی درون تونل‌های دارای سیستم تهویه طولی. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۵(۱۴):۱۰.
- [13] Peters AAF, Weber R (1995) Mathematical modelling of a 2.25MW swirling natural gas flame. Part 1: Eddy break-up concept for turbulent combustion; probability density function approach for nitric oxide formation. Combust Sci Tech 110–111: 67-101
- [14] McGrattan KB, Forney GP (2006) Fire Dynamics Simulator (Version 4.07) – User's Guide. NIST Special Publication 1019, National Institute of