



## مطالعه مقایسه‌ای پروفیل‌های عمودی مونوکسید کربن و دما در یک تونل در حال آتش‌سوزی

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> استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۵

### 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. بررسی روش‌های مختلف جهت بیرون راندن دوده یا کم کردن غلظت گازهای سمی و نیز کم کردن دمای حاصل شده از آتش، از مهم‌ترین اهداف پژوهشگران است. در این مطالعه، ابتدا یک تونل با مقطع مستطیلی همراه با آتش استخری در مرکز تونل توسط کد شبیه‌ساز دینامیکی آتش مدل گردیده، نتایج آن با نتایج پیشین مقایسه شده است. سپس نتایج مربوط به توزیع مونوکسید کربن و دما به صورت پروفیل‌های عمودی در مکان‌های مختلف ارائه شده است. این پروفیل‌ها که برای نرخ رهایش‌های متفاوت آتش و نیز تونل با نسبت ظرافت‌ها و شیب‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، بر اساس مقدار بیشینه مکان خود در نزدیکی سقف بی‌بعد شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، غلظت مونوکسید کربن در تمامی مکان‌ها، سریع‌تر از دما کاهش پیدا می‌کند. همچنین به کمک پروفیل‌های عمودی می‌توان به ضخامت دوده نیز پی برد و نشان داد که با افزایش نسبت ظرافت تونل، ضخامت دوده کمتر می‌شود. بررسی پارامترهای مذکور برای شیب‌های گوناگون تونل نیز، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** تهویه اضطراری؛ آتش‌سوزی در تونل؛ توزیع مونوکسید کربن و دما؛ کد شبیه‌ساز دینامیکی آتش

## Comparative Study of Carbone Monoxide and Temperature Vertical Distribution in Tunnel Fires

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

<sup>1</sup> MSc, 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 have been responsible for many fatalities in the recent decades, and this field of study has received an extensive effort by the researchers. Removal of the generated plume and high temperature is a great interest of the investigators. In this work, a numerical test is performed on a rectangular cross-section tunnel with a pool fire at the middle part using FDS5.5. The results obtained are then compared with the earlier ones. Then vertical distributions of carbone monoxide and temperature stratification are presented for various heat release rates of fires and various tunnel aspect ratios and inclinations, which have been reported in dimensionless forms using their maximum values beneath the ceiling. These results indicate that the vertical values for CO decay faster than the temperature values. This profile also helps us to find out about the thickness of the plume, where one can be aware of a smaller thickness for a higher aspect ratio.

**Keywords:** Emergency Ventilation; Tunnel Fire; CO and Temperature Distribution; 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 غیر معمول باعث 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 آتش‌سوزی در تونل‌های دنیا بین ۶۰ تا ۹۰ مورد در هر سال است. از جمله آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲-۱]:

- تونل جاده‌ای در نیهونزاکا در ژاپن (۱۹۷۹): ۷ نفر کشته، تخریب ۱۷۳ وسیله نقلیه، خرابی ۱۱۰۰ متر از طول تونل.
- تونل جاده‌ی 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 سان‌دیاگو در کره‌ی 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، دی‌اکسیدکربن و مونوکسیدکربن حاصل از آن است. لذا طبیعی است که بخش قابل توجهی از تحقیقات در زمینه پیش‌بینی الگوی جریان دود و غلظت آلاینده‌ها باشد.

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<sup>۱</sup> و همکاران [۳]، دریک مطالعه عددی که به کمک کد شبیه ساز دینامیکی آتش انجام شده‌است، یک تونل با ابعاد ۶۰۰ متر طول، ۱۰ متر عرض و ۷ متر 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 می‌گردند. 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 به‌صورت  $C_x/C_0 = 1/1 + bx$  بوده، اختلاف آن با دما به‌صورت  $C_x/C_0 - \Delta T_x/\Delta T_0 \approx \lambda(1 - e^{-kx})$  است که در آن  $\lambda$ ،  $b$  و  $k$  ضرایب ثابت مربوط به مشخصات تونل و  $C_0$ ،  $C_x$ ،  $\Delta T_0$  و  $\Delta T_x$

<sup>۱</sup> Hu

سجودی و همکاران [۷]، با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ توانستند توزیع دما و غلظت مونوکسید کربن را به صورت افقی در طول یک تونل به طول ۶۰۰ متر را مدل-سازی کنند. همچنین ایشان به کمک یک روش تحلیلی نوین میزان توزیع غلظت مونوکسید کربن را به کمک پارامترهای آتش و تونل توانستند توزیع افقی غلظت و دما را پیش‌بینی کنند که همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی و عددی دارد. در این بررسی، تاثیر نرخ رهایش حرارتی، نسبت ظرافت تونل و نیز شیب تونل روی توزیع افقی دما و غلظت مونوکسید کربن بررسی شد. ایشان همچنین [۸] در یک کار عددی مشابه تاثیر حضور یک مانع در مسیر جریان هوا را روی توزیع دما و غلظت مونوکسید کربن 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 مونوکسید کربن کاهش بیشتری خواهد داشت.

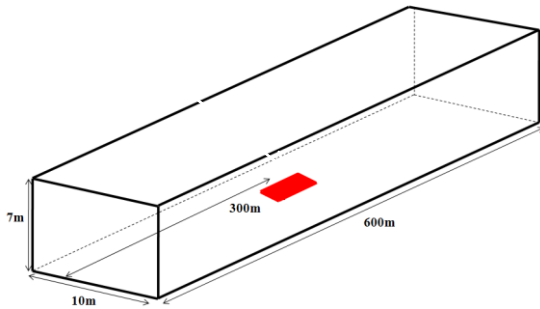
در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه تهویه اضطراری در تونل‌های در حال آتش‌سوزی در مجلات داخلی به چاپ رسیده [۹-۱۰] که گویای شروع همه جانبه این گونه بررسی‌ها در کشور است. بررسی‌های مذکور غالباً روی سرعت بحرانی (حداقل سرعت تهویه اضطراری که از برگشت دود به سمت بالادست آتش جلوگیری نماید) انجام گرفته و پارامترهای هندسی از قبیل، تاثیر 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 [۹]. کاظمی‌پور و همکاران [۱۰]، تاثیر 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 با افزایش میزان نرخ رهایش به مقادیر بیشتر از نرخ رهایش بحرانی، تاثیری روی سرعت بحرانی نخواهد داشت.

همانطور که در کارهای انجام گرفته ملاحظه گردید، عمدتاً به مطالعه تغییر غلظت مونوکسید کربن و دما بصورت

به ترتیب غلظت مونوکسید کربن در موقعیت مبنا، غلظت مونوکسید کربن 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 رهایش منبع آتش را روی پارامترهای هر دو معادله بررسی کردند.

در جدیدترین کار آزمایشگاهی یانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۵]، به کمک یک تونل در ابعاد مقیاس شده توانستند رابطه بین توزیع دما و غلظت مونوکسید کربن را بررسی کنند که نقش مهمی در تامین امنیت افراد در مواقع آتش‌سوزی 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 مونوکسید کربن است. ذرات مونوکسید کربن مرزی برای عبور به بیرون از تونل نداشته در حالی که گرما به راحتی از مرز دیوار عبور نموده، سبب کاهش دما می‌شود. حال یکسان بودن پروفیل عمودی دما و غلظت مونوکسید کربن نشان از این دارد که مکانیزم هردوی انتقال حرارت و انتقال ذرات یکسان است و افزایش سرعت طولی یا دور شدن از آتش، سبب کاهش میزان انتقال حرارت به بیرون می‌شود. در کار مشابه دیگری نیز، ایشان [۶] در یک تونل با ابعاد مقیاس شده به مطالعه و بررسی تغییرات عمودی و افقی غلظت مونوکسید کربن و دما پرداختند. نتایج نشان داده است که مقدار دما به صورت افقی خیلی سریعتر از غلظت مونوکسید کربن کاهش یافته، حتی در اغلب موارد میزان مونوکسید کربن 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 مونوکسید کربن داشته است. با کاهش ارتفاع در یک مکان ثابت، میزان مونوکسید کربن کندتر از دما کاهش یافته و با افزایش سرعت تهویه طولی پروفیل عمودی هردو به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. اندازه‌گیری‌ها در این تونل زمانی انجام می‌گرفت که میزان دما و غلظت مونوکسید کربن به یک حالت دائم رسیده باشند.

<sup>1</sup> Yang



شکل ۱- ابعاد تونل و محل قرارگیری آتش

با استفاده از مفهوم EBU [۱۵]، 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:

$$\dot{w}_{C_xH_y} = \frac{d(\rho Y_{C_xH_y})}{dt} = -\rho \tau_{mix} \min(Y_{C_xH_y}, \frac{Y_{O_2}}{v_1^*}) \quad (4)$$

$$\dot{w}_{CO} = \frac{d(\rho Y_{CO})}{dt} = -\rho \tau_{mix} \min(Y_{CO}, \frac{Y_{O_2}}{v_2}) \quad (5)$$

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

$$\tau_{mix} \approx C_{EBU} \frac{\varepsilon}{k_t} \quad (6)$$

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

$$k_t = \left( \frac{\mu_{ijk}}{C_\mu \rho \Delta} \right)^2 \quad \varepsilon = C_\varepsilon \frac{k_t^{3/2}}{\Delta} \quad (7)$$

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 معادله‌ی 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 به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود [۱۲-۱۴]:

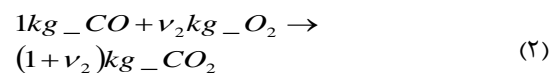
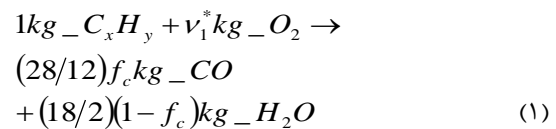
بی‌بعد در قالب پروفیل‌های عمودی و افقی پرداخته شده‌است و تغییرات مربوطه به ازای سرعت تهویه‌های گوناگون سنجیده می‌شود، اما از جمله مهمترین عوامل تاثیر گذار در آتش‌سوزی نرخ رهایش آتش، نسبت ظرافت تونل و نیز شیب آن می‌باشند که مطالعه تاثیر آن‌ها روی تغییرات غلظت مونوکسیدکربن و دما تا حدود زیادی پوشیده مانده است.

## ۲- مستندسازی حل

در سال ۲۰۱۰ آقای هو و همکاران [۴]، در یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی، با تعبیه نمودن آتش در نرخ رهایش‌های گوناگون در مرکز تونلی با مقطع مستطیلی به طول ۶۰۰ متر، عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۷ متر بررسی کردند. 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 شبکه‌بندی گردید. شرایط مرزی بکاربرده شده توسط ایشان [۴] همانند شرایط مرزی ذکر شده در قسمت قبل است.

## ۳- معادلات حاکم

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 [۱۵]:



که ضرایب استوکیومتری به صورت رابطه (۳) است:

$$\begin{aligned} v_1^* &= v_1 - \frac{28}{12} f_c v_2, \\ v_1 &= \frac{32}{12} f_c + \frac{16}{2} (1-f_c), \\ v_2 &= \frac{16}{28} \end{aligned} \quad (3)$$

$$K_{ijk} = \frac{c_p \mu_{ijk}}{\text{Pr}} \quad (\rho D)_{ijk} = \frac{\mu_{ijk}}{Sc} \quad (14)$$

برای جلوگیری از محاسبه نرخ مصرف یا تولید تک تک گونه‌ها و حل معادله پایستگی جرم برای هر یک از آن‌ها، از مدل کسر مخلوط استفاده شده است [۱۲-۱۴]. کسر مخلوط ( $Z$ )، نشان دهنده کسر جرمی تمامی گونه‌هایی است که از سوخت منشأ می‌گیرند (گونه‌های حاوی اتم کربن) و به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

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

$x$ ، 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:

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

آخرین جمله در سمت راست معادله فوق با استفاده از پخش گرادیانی و در نظر گرفتن عدد اشمیت برابر با ۰/۵ محاسبه می‌گردد [۱۲]. از حل معادله فوق، مقادیر کسر مخلوط در دامنه حل به دست می‌آیند.

#### ۴- معرفی نرم‌افزار

نرم‌افزار 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 می‌نماید و برای جریان‌های ناشی از گرمای شدید و نیز جریان‌های با سرعت پایین با تاکید بر انتقال حرارت و دوده مناسب است [۱۲ و ۱۳]. این نرم‌افزار توسط موسسه NIST 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.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

رابطه (۸)، شکل کلی معادله بقای جرم است که برای جریان‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر قابل استفاده است. معادله‌گذرای ناویر-استوکس برای جریان تراکم‌پذیر و بدون حضور نیروهای خارجی [۱۱-۱۳]:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \rho g_i = \nabla \cdot \bar{\tau}_{ij,SGS} \quad (9)$$

که در آن  $\rho$ ،  $u$ ،  $p$  و  $g$  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  $\varphi'$  (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. همچنین معادله انرژی به صورت رابطه (۱۰) است [۱۳]:

$$\frac{\partial \rho \bar{h}_e}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{h}_e)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{ijk}}{\text{Pr}} \frac{\partial \bar{h}_e}{\partial x_j} \right) = \dot{q} - \nabla \cdot q \quad (10)$$

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

$$\bar{\tau}_{ij,SGS} = 2\mu_{ijk} \bar{S}_{ij} \quad (11)$$

که در آن

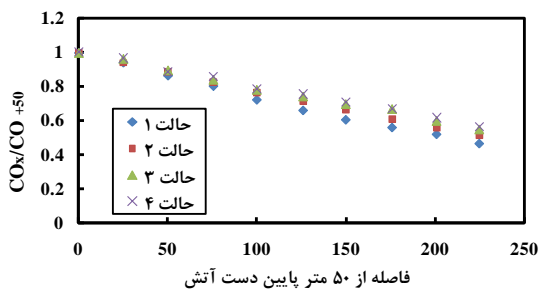
$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

$$\mu_{ijk} = \rho_{ijk} (C_s \Delta)^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (13)$$

که در آن  $C_s$ ، ضریب تجربی اسماکورینسکی 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 زیر رابطه‌مند می‌باشند [۱۴]:

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

شماره حالت	اندازه سلول در مناطق دور از آتش (سانتی‌متر)	اندازه سلول در مناطق نزدیک آتش (سانتی‌متر)
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

معمولا 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:

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

که در صورت درخواست کاربر و در صورت نادرست بودن نامعادله بالا، خطا در محاسبات را اعلام می‌کند. شکل ۳، گام زمانی و نیز مقدار عددی کورانت را در مدت ۶۰۰ ثانیه از زمان شروع آتش‌سوزی 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 رهائش 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.

## ۵- بررسی استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی نتایج

اصولا نتایج حاصل از هر حل عددی می‌بایست نسبت به تعداد سلول انتخابی در مدل مستقل باشند، اما از طرفی با ریز کردن اندازه سلول‌ها حجم محاسباتی افزایش می‌یابد. از آنجایی که مدل شبیه‌ساز گردابه‌ای بزرگ نیز شدیداً به اندازه سلول برای انجام عمل‌گذاری 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 دور دست 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 جرمی دارای سلول‌های درشت‌تری می‌باشند. در مراجع علمی روابط بسیار مفیدی برای انتخاب اندازه سلول پیشنهاد شده‌است. یکی از مهم‌ترین روابط، عدد بی‌بعد سلولی است [۱۴]:

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

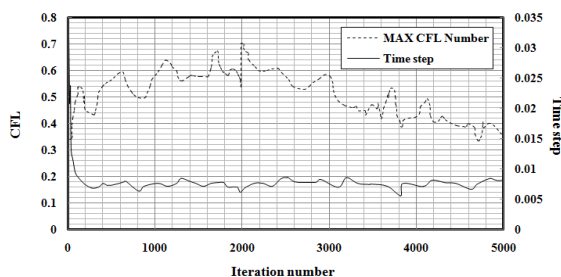
که در آن صورت کسر، مبین نرخ رهائش براساس کیلووات است. عبارت (۱۷) میزان اندازه سلول بی‌بعدی را نشان می‌دهد که می‌بایست در نامعادله (۱۸) صدق کند:

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

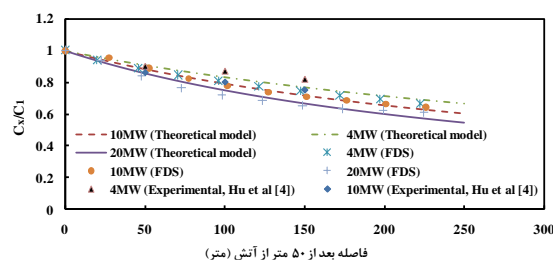
$c_f$  مقدار ثابت ۰/۶ بوده،  $\delta x$  اندازه سلول انتخابی است. همواره توصیه می‌شود که این نامعادله در کد رعایت گردد. در جدول ۱ خلاصه اندازه سلول‌های انتخابی مشاهده می‌شود. شکل ۲، غلظت مونوکسیدکربن برای سناریویی که در آن آتش ۱۰ مگاوات و بدون حضور تهویه طولی نشان داده شده است. غلظت مونوکسیدکربن براساس غلظت مونوکسیدکربن در ۵۰ متر پایین دست آتش بی‌بعد شده‌است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، نتایج مربوط به دو حالت ۳ و ۴ در نزدیکی هم هستند. به دلیل کاهش هزینه محاسباتی، از حالت ۳ استفاده می‌شود که تعداد سلول در آن بالغ بر یک میلیون سلول است. برای اطمینان بیشتر جهت همگرایی نتایج، نمودار کورانت فیریدریش لوئی رسم می‌شود.

نزدیک به سقف این نمودارها افزایش عمده‌ای خواهد داشت. با افزایش ضخامت دوده، ارتفاع بیشتری از تونل در معرض دما و غلظت بالای مونوکسیدکربن قرار خواهد گرفت. در شکل ۵ و شکل ۶ که مربوط به نرخ رهائش ۴ و ۱۰ مگاواتی می‌باشند، ضخامت دوده تقریباً تا انتهای تونل ثابت باقی می‌ماند، ولی در نرخ رهائش ۲۰ مگاواتی (شکل ۷)، ضخامت دوده بدلیل نیروی بویانسی قوی‌تر و در نتیجه حجم هوای ورودی بیشتر به دوده، افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که غلظت مونوکسیدکربن (در هر شرایط طولی از منبع آتش و میزان نرخ رهائش آن)، سریعتر از دما کاهش پیدا می‌کند. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط فیزیکی حاکم بر تونل (ابعاد تونل، سرعت تهویه و نیز میزان نرخ رهائش منبع آتش)، مکانیزم کاهش عمودی غلظت مونوکسیدکربن که تنها از طریق نفوذ هوا از زیر پلوم دوده است، موثرتر از مکانیزم کاهش عمودی دما عمل کرده است. لازم به ذکر است که دمای دوده هم از طریق انتقال حرارت با دمای کمتر به پلوم دوده و هم از طریق انتقال حرارت با سقف تونل کاهش می‌یابد. با مقایسه اشکال ۵-a، ۵-b و ۵-c ملاحظه می‌شود که در نزدیکی منبع آتش پروفیل دما و غلظت مونوکسیدکربن خیلی نزدیک به هم بوده که با افزایش فاصله، پروفیل‌ها نیز از هم فاصله می‌گیرند. این افزایش فاصله پروفیل‌ها برای منبع با نرخ رهائش کمتر، واضح تر است. دلیل این امر را می‌توان تحت تاثیر قرارگرفتن موثرتر پلوم دوده توسط سرعت افقی هوا عنوان کرد؛ زیرا که در نرخ‌های رهائش بیشتر، این سرعت (۲/۵ متر بر ثانیه) تحت تاثیر نیروی بویانسی قوی‌تری قرار گرفته، بیشتر به سمت منبع آتش سوق پیدا می‌کند تا نفوذ به درون پلوم دوده. با افزایش میزان نرخ رهائش (مثلاً ۷-a تا ۷-c که برای نرخ رهائش ۲۰ مگاوات است)، هر دو پروفیل رطبی به فاصله نداشته، کاملاً به هم چسبیده از سقف تا کف کاهش پیدا می‌کنند که این مسئله نشان از یکسان بودن مکانیزم کاهش هر دو کمیت دارد.

در اشکال ۸ تا ۱۰، پروفیل عمودی توزیع مونوکسیدکربن و دما به صورت بی‌بعد برای نسبت ظرافت‌های گوناگون نشان داده شده است. با مقایسه اشکال ۸-a، ۹-a و ۱۰-a ملاحظه می‌شود که ضخامت دوده در نسبت ظرافت‌های بیشتر (ناحیه اول یا همان طولی از منحنی که نزدیک به سقف می‌باشد)،



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



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

## ۶- نتایج

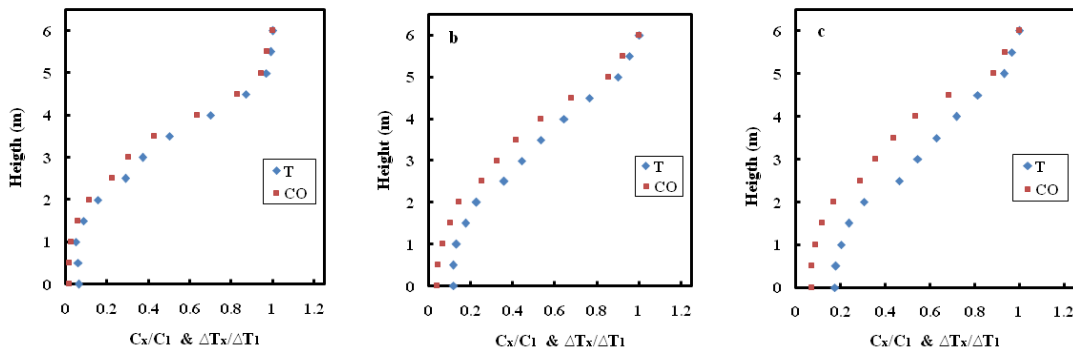
در این بخش، ابتدا نتایج مربوط به پروفیل‌های عمودی دما و غلظت مونوکسیدکربن برای مقادیر مختلف نرخ رهائش ارائه می‌شود. این نتایج که به صورت بی‌بعد شده براساس مقدار بیشینه در نزدیکی سقف می‌باشند، برای فاصله‌های طولی ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ متر گزارش می‌شود. لازم به ذکر است که پروفیل‌های عمودی از ۱ متر زیر سقف تا نزدیکی کف تونل اندازه‌گیری شده است و در تمامی سناریوها سرعت طولی ۲/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است؛ سپس نتایج مربوط به تغییرات نسبت ظرافت تونل (نسبت ظرافت بصورت عرض به ارتفاع تونل تعریف می‌شود) و تغییرات شیب تونل ارائه می‌شود.

اشکال ۵ تا ۷، پروفیل‌های عمودی دما و غلظت مونوکسیدکربن را در نرخ رهائش‌های مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هرکدام از این نمودارها از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول (نزدیک به سقف)، دارای شیب کند و قسمت دوم (نزدیک به کف)، دارای شیب تندی می‌باشند. مقدار طولی قسمت اول، نشان از ضخامت دوده دارد که با افزایش میزان نرخ رهائش این ضخامت افزایش می‌یابد. به عبارتی با مقایسه اشکال ۵-a، ۶-a و ۷-a ملاحظه می‌شود که هرچقدر نرخ رهائش آتش افزایش می‌یابد، قسمت

نزدیکی کف تونل وجود دارد که این مسئله نگران کننده است.

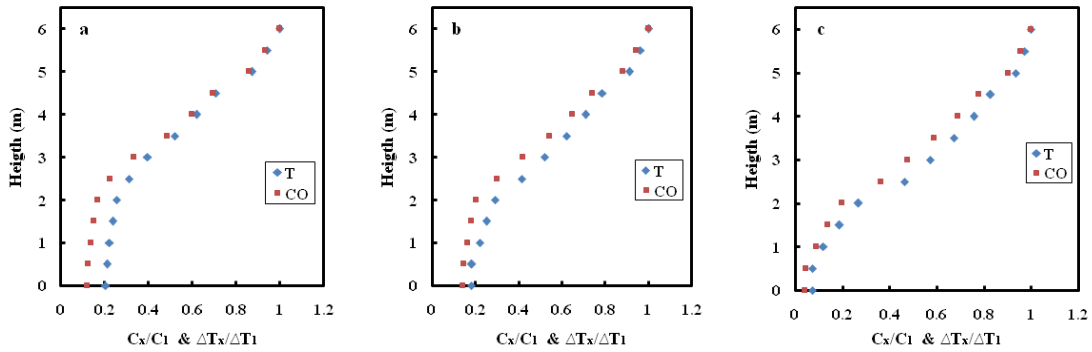
در اشکال ۱۱ تا ۱۶، توزیع عمودی مونوکسیدکربن و دما در فواصل مختلف ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ متر نشان داده شده است. قابل ذکر است که منظور از زاویای مثبت و منفی، به ترتیب چرخش تونل در خلاف عقربه‌های ساعت و هم‌جهت با چرخش عقربه‌های ساعت است. در زوایای گوناگون نیز ملاحظه می‌شود که مونوکسیدکربن سریعتر از دما کاهش پیدا می‌نماید. در اشکال ۱۱ الی ۱۳ که مربوط به زوایای منفی است، ملاحظه می‌شود که هرچه شیب تونل از حالت افقی فاصله بیشتری می‌گیرد، میزان غلظت مونوکسیدکربن و دما به کندی کاهش پیدا می‌کنند. از زاویه صفر تا  $10^\circ$  - میزان مونوکسیدکربن به کندی کاهش می‌یابد، ولی از  $10^\circ$  - تا  $20^\circ$  - مجدداً با سرعت بیشتری رو به کاهش است. تغییرات دما نیز روند مشابهی را طی می‌کند. در اشکال ۱۴ الی ۱۶ که مربوط به شیب مثبت تونل است، ملاحظه می‌شود که در نزدیکی منبع آتش، وضعیت کاهش دما و مونوکسیدکربن خیلی بهتر از حالت افقی می‌باشند و سریعتر از آن کاهش می‌یابند؛ ولی در ادامه دمای دوده وضعیت بدتری به خود گرفته و به کندی کاهش می‌یابد. همچنین تا زاویه  $10^\circ$  غلظت مونوکسیدکربن سریع‌تر از حالت افقی کاهش می‌یابد، اما با افزایش زاویه وضعیت آن نیز نگران کننده خواهد بود.

کمتر است که دلیل این امر، افزایش سطح تماس پلوم عبوری از سقف تونل با هوای تهویه بوده، نکته مثبتی در طراحی سیستم‌های تهویه اضطراری است. در این قسمت نیز همانند مربوط به نرخ رهایش، ملاحظه می‌شود که غلظت مونوکسیدکربن سریعتر از دما کاهش یافته، نیز با افزایش فاصله از آتش، فاصله دو پروفیل در نقاط طولی متفاوت از هم افزایش می‌یابد. افزایش فاصله پروفیل‌ها در نسبت‌های ظرافت بالاتر، بیشتر بوده، نشان می‌دهد که نفوذ هوای تهویه بیشتر به پلوم دود هم‌زمان با افزایش سطح تماس پلوم دوده با هوای تهویه، سبب کاهش هرچه بیشتر غلظت عمودی مونوکسیدکربن نسبت به دما می‌شود. با مقایسه اشکال مذکور، ملاحظه می‌شود که در صورت افزایش نسبت ظرافت، بدلیل گسترده‌تر شدن عرض تونل در مقایسه با ارتفاع آن، حجم هوای ورودی بیشتری به پلوم دوده می‌توان در نظر داشت. همچنین سطح مقطع بیشتری از طریق سقف تونل برای انتقال حرارت دوده با محیط بیرون وجود دارد. به عبارتی، مکانیزم اصلی کاهش غلظت، ورود هوای تازه و مکانیزم اصلی کاهش دما، انتقال حرارت بیشتر با سقف است؛ بنابراین دو پروفیل با افزایش نسبت ظرافت از هم فاصله گرفته و با مکانیزم‌های مختلفی کاسته می‌شوند. توزیع دمای عمودی در نسبت ظرافت‌های بیشتر، کندتر کاهش می‌یابد و در مقایسه با نسبت ظرافت‌های کمتر، دمای بالاتری در

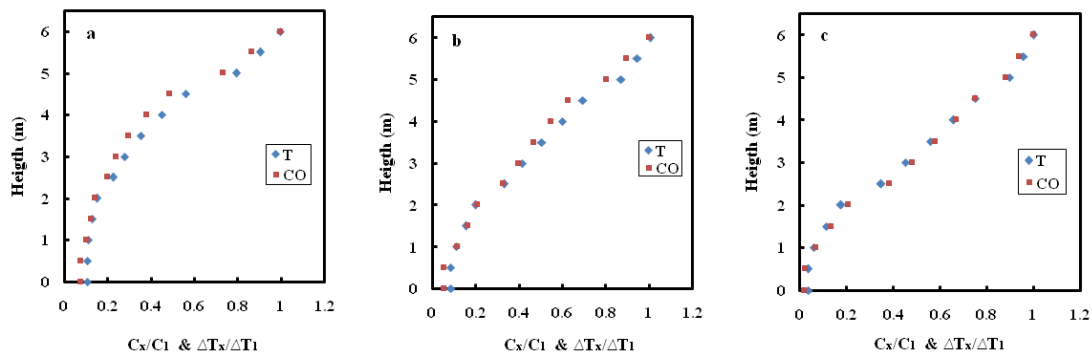


شکل ۵- پروفیل عمودی مونوکسیدکربن و دما بصورت بی‌بعد شده در فاصله (a) ۵۰ متر (b) ۱۵۰ متر (c) ۲۵۰ متر از آتش و نرخ رهایش ۴ مگاوات

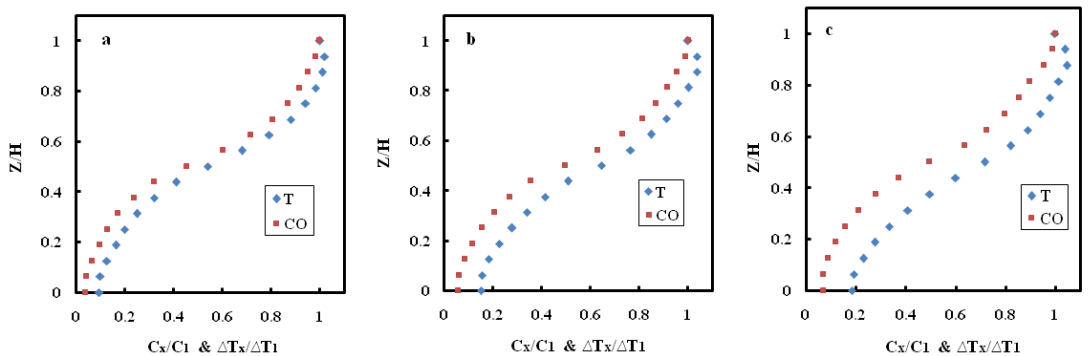




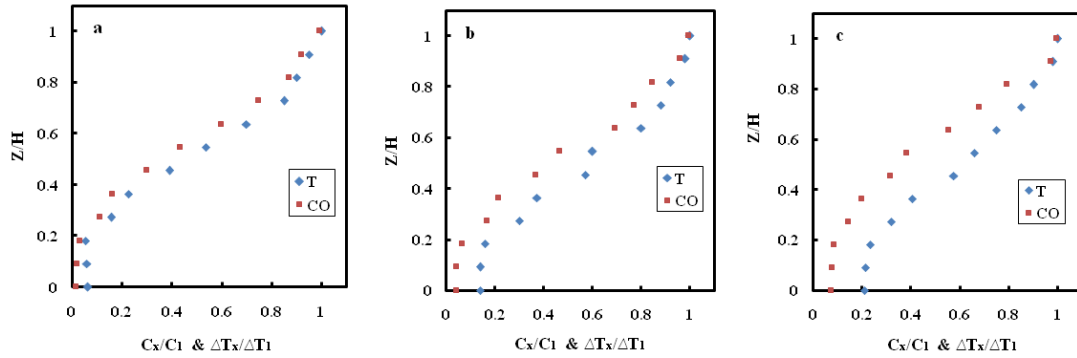
شکل ۶- پروفیل عمودی مونوکسیدکربن و دما بصورت بی بعد شده در فاصله (a) ۵۰ متر (b) ۱۵۰ متر (c) ۲۵۰ متر از آتش و نرخ رهايش ۱۰مگاوات



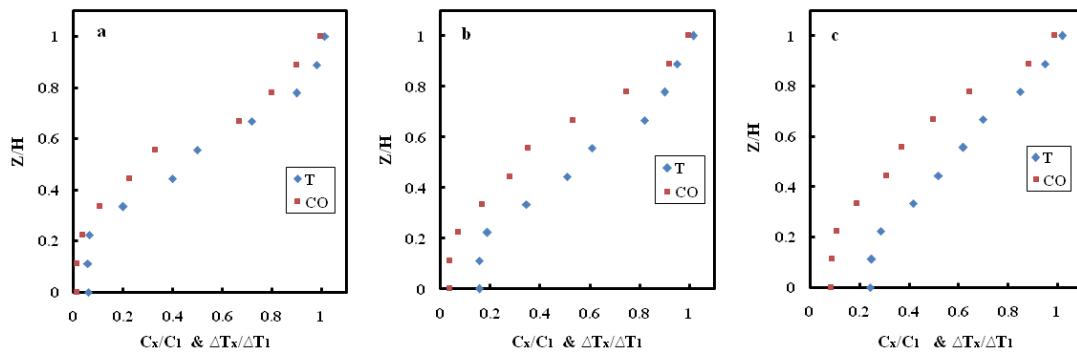
شکل ۷- پروفیل عمودی مونوکسیدکربن و دما بصورت بی بعد شده در فاصله (a) ۵۰ متر (b) ۱۵۰ متر (c) ۲۵۰ متر از آتش و نرخ رهايش ۲۰مگاوات



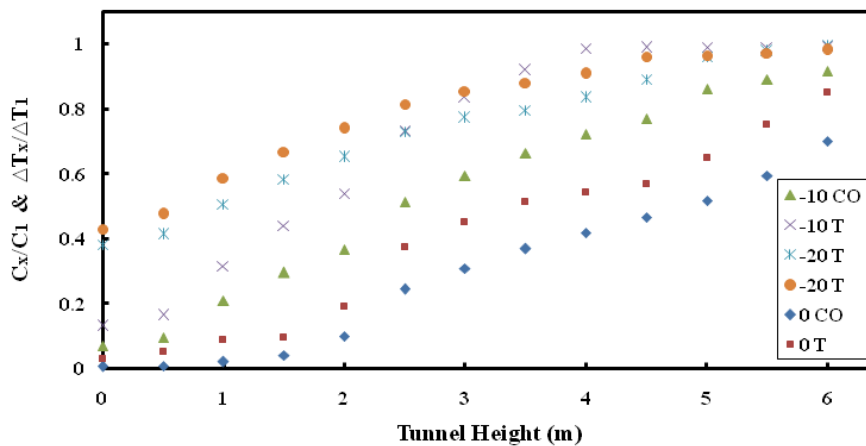
شکل ۸- پروفیل عمودی مونوکسیدکربن و دما بصورت بی بعد شده در فاصله (a) ۵۰ متر (b) ۱۵۰ متر (c) ۲۵۰ متر از آتش و نسبت ظرافت ۱



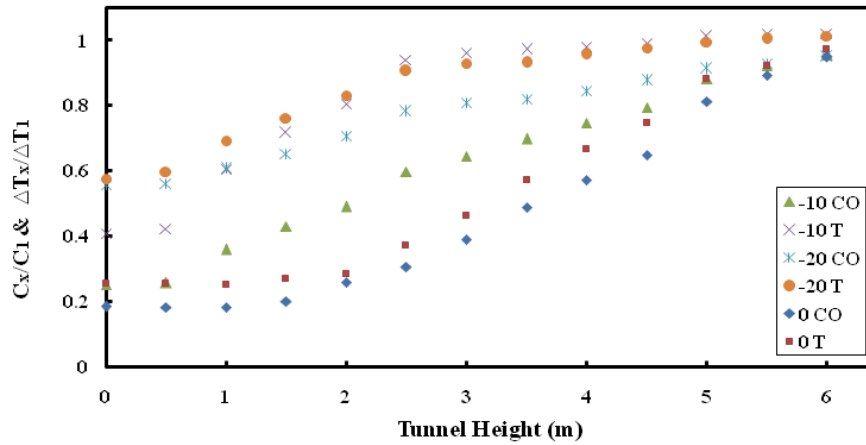
شکل ۹- پروفیل عمودی مونوکسیدکربن و دما بصورت بی بعد شده در فاصله (a) ۵۰ متر (b) ۱۵۰ متر (c) ۲۵۰ متر از آتش و نسبت ظرافت ۲



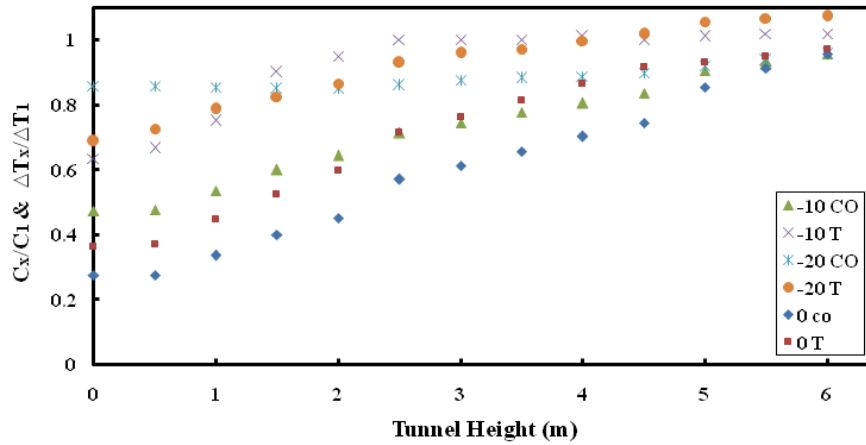
شکل ۱۰- پروفیل عمودی مونوکسیدکربن و دما بصورت بی بعد شده در فاصله (a) ۵۰ متر (b) ۱۵۰ متر (c) ۲۵۰ متر از آتش و نسبت ظرافت ۳



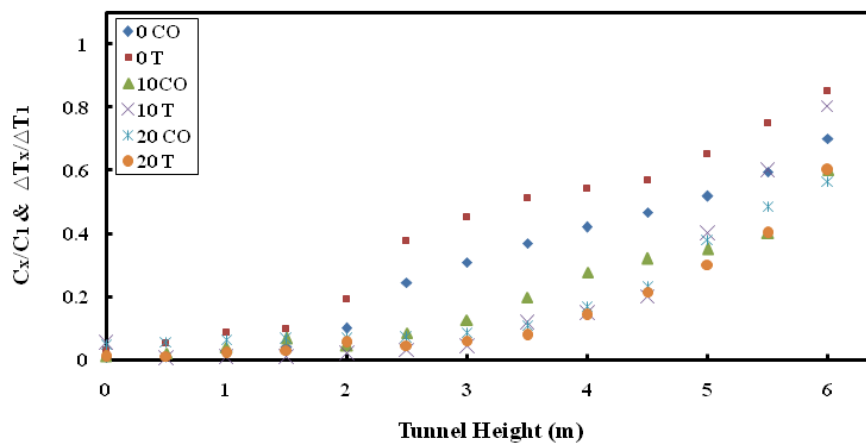
شکل ۱۱- توزیع عمودی دما و مونوکسیدکربن در ۵۰ متر برای شیب منفی



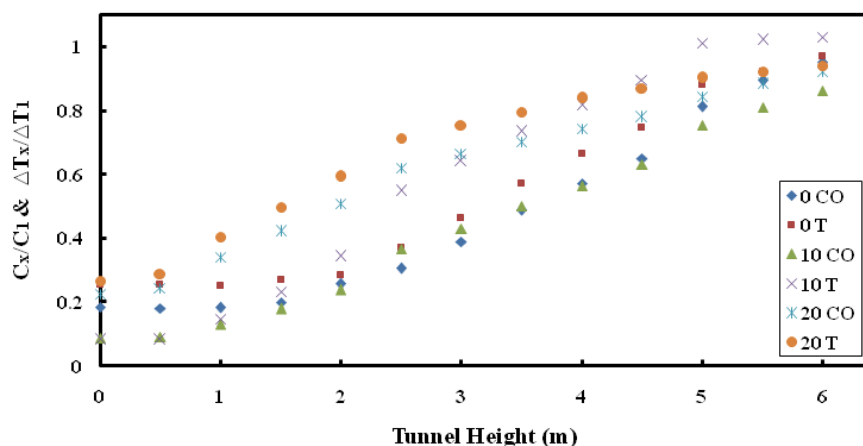
شکل ۱۲- توزیع عمودی دما و مونوکسیدکربن در ۱۵۰ متر برای شیب منفی



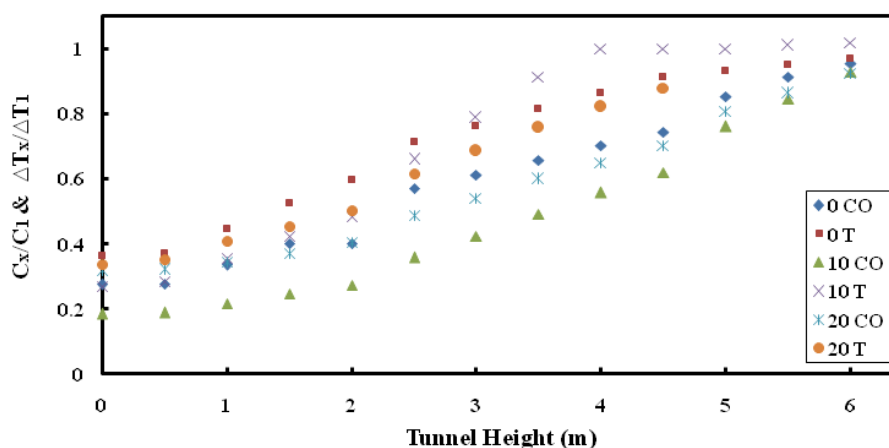
شکل ۱۳- توزیع عمودی دما و مونوکسیدکربن در ۲۵۰ متر برای شیب منفی



شکل ۱۴- توزیع عمودی دما و مونوکسیدکربن در ۵۰ متر برای شیب مثبت



شکل ۱۵- توزیع عمودی دما و مونوکسیدکربن در ۱۵متر برای شیب مثبت



شکل ۱۶- توزیع عمودی دما و مونوکسیدکربن در ۲۵متر برای شیب مثبت

## ۷- نتیجه‌گیری

در یک مطالعه عددی به بررسی چگونگی توزیع عمودی مونوکسیدکربن و دما در طول یک تونل در حال آتش‌سوزی پرداخته شد. این تحقیق که به کمک کد FDS انجام گرفته، پس از اعتبارسنجی توسط نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی پیشین در یک آتش‌سوزی درون یک تونل با مقطع مستطیلی انجام گرفته، به بررسی چگونگی توزیع دما و مونوکسیدکربن در نرخ رهایش‌های گوناگون آتش، نسبت ظرافت‌های مختلف تونل و شیب‌های مختلف تونل بررسی گردید. نتایج، حاکی از آن است که غلظت مونوکسیدکربن همواره سریعتر از دما کاهش پیدا می‌کند و با افزایش میزان نرخ رهایش حرارتی، ضخامت دوده افزایش می‌یابد. با افزودن میزان نسبت ظرافت، پهنای تونل افزایش یافته، میزان ضخامت دوده کاهش و میزان انتقال

حرارت آن با سقف افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مربوط به تغییرات زوایا نیز ارائه و بررسی گردید.

## نمادها

ثابت اندازه سلولی	$C_f$
اندازه بی‌بعد سلولی	$D^*$
شتاب گرانشی زمین، $m/s^2$	$g_i$
آنتالپی سیال، KJ/Kg	$\bar{h}_e$
عدد پراختل	Pr
فشار، Pa	$\bar{P}$
نرخ رهایش، KW	$\dot{q}$
میزان حرارت تشعشعی، KW	$\nabla q_r$

- [6] 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
- [7] Atta S, Afshin H, Farhanieh B (2014) An analysis of carbene monoxide distribution in large tunnel fires. *J Mech Sci Technol* 28.5: 1917-1925.
- [8] Atta S, Afshin H, Farhanieh B (2013) Numerical evaluation of stationary vehicular blockage ratio on carbon monoxide stratification in large tunnel fires. *Journal of Applied Fire Science* 23.4: 435-452.
- [۹] رفوفی. معصومه، مظاهری. کیومرث، " بررسی تأثیر شیب و انسداد تونل روی سرعت بحرانی در آتشسوزی بزرگ در تونل بین شهری"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۱۱، صص ۴.
- [۱۰] پورکاظمی. علی، پورقاسمی. مهیار، افشین. حسین، فرهانیه. بیژن، " مطالعه پارامتریک بر روی سرعت بحرانی در زمان آتشسوزی درون تونلهای دارای سیستم تهویه طولی"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۵، صص ۱۰.
- [11] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, Floyd J, Weinschenk C (2013) Fire dynamics simulator, technical reference guide, volume 1: mathematical model. NIST Special Publication 1018.
- [12] Kevin, M, Bryan, K, Simo H (2007) Fire dynamics simulator (version 5) user's guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication.
- [13] Friday PA, Mowrer FW (2001) Comparison of FDS model predictions with FM/SNL fire test data. NISTGCR01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD,.
- [14] McGrattan KB, Hamins A (2002) Numerical simulation of the howard street tunnel fire. Baltimore, Maryland, National Institute of Standards and Technology.
- [15] 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.

نرخ رهایش آتش، KW	$Q$
زمان، s	$t$
دمای هوای محیط، K	$T_a$
سرعت سیال، m/s	$\bar{u}_j$
مولفه محور کارتین، m	$x_j$
جرم مولکولی	$W$
تعداد اتم کربن در فرمول سوخت	$X$
کسر جرمی گونه	$Y$
اندازه ابعاد سلول، m	$\delta x, \delta y, \delta z$
گام زمانی، s	$\delta t$
کسر مخلوط	$Z$
چگالی، $\text{Kg/m}^3$	$\rho$
تانسورهای تنش رینولدزی، Pa	$\nabla \tau_{ij,SGS}$
لزجت سیال، Pa.s	$\mu_{ijk}$

#### ۷- مراجع

- [1] Technical Report – Part 1 (2001) Design fire scenarios, rapporteur alfred haack STUVA. Thematic Network FIT 'Fire in Tunnels.
- [2] Vuilleumier F, Weatherill A, Crausaz B (2002) Safety aspects of railway and road tunnel: example of the Lötschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel. *Tunnelling Underground Space Technol* 17(2): 153-158.
- [3] Hu L. H, Yang D, Jiang Y. Q, Huo R, Liu S (2006) A Comparative study on vertical profiles of smoke temperature and carbon monoxide concentration in a tunnel fire. *Journal of Applied Fire Science* 16(4): 329-344.
- [4] Hu L. H, 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] Yang D, Huo R, Zhang Xi, Zhu S, Zhao XY (2012) Comparative study on carbon monoxide stratification and thermal stratification in a horizontal channel fire. *Build Environ* 49: 1-8.